

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
COMPUTAÇÃO APLICADA

UMA ARQUITETURA LPWAN DE CUSTO
ACESSÍVEL PARA CIDADES
INTELIGENTES

Fernando Vinícios Manchini de Souza

Passo Fundo

2019

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA

**UMA ARQUITETURA LPWAN DE
CUSTO ACESSÍVEL PARA
CIDADES INTELIGENTES**

Fernando Vinícios Manchini de Souza

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Computação Aplicada na Universidade de Passo Fundo.

Orientador: Prof. Doutor Roberto dos Santos Rabello

Passo Fundo

2019

CIP – Catalogação na Publicação

S729a Souza, Fernando Vinícius Manchini de
Uma arquitetura LPWAN de custo acessível para cidades
inteligentes / Fernando Vinícius Manchini de Souza. – 2019.
67 f.: il. color. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Roberto dos Santos Rabello.

Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) –
Universidade de Passo Fundo, 2019.

1. Software. 2. Cidades inteligentes. 3. Arquitetura
operacional. I. Rabello, Roberto dos Santos, orientador.
II. Título.

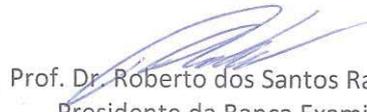
CDU: 004.451

Catalogação: Bibliotecária Marciéli de Oliveira - CRB 10/2113

**ATA DE DEFESA DO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DO ACADÊMICO**

FERNANDO VINÍCIOS MANCHINI DE SOUZA

Aos vinte e sete dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e dezenove, às 14 horas, realizou-se, no Instituto de Ciências Exatas e Geociências, prédio B5, da Universidade de Passo Fundo, a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso “Uma arquitetura LPWAN de custo acessível para cidades inteligentes”, de autoria de Fernando Vinícios Manchini de Souza, acadêmico do Curso de Mestrado em Computação Aplicada do Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada – PPGCA/UPF. Segundo as informações prestadas pelo Conselho de Pós-Graduação e constantes nos arquivos da Secretaria do PPGCA, o aluno preencheu os requisitos necessários para submeter seu trabalho à avaliação. A banca examinadora foi composta pelos doutores Roberto dos Santos Rabello, Marcelo Trindade Rebonatto e João Henrique Kleinschmidt. Concluídos os trabalhos de apresentação e arguição, a banca examinadora considerou o candidato APROVADO. Foi concedido o prazo de até quarenta e cinco (45) dias, conforme Regimento do PPGCA, para o acadêmico apresentar ao Conselho de Pós-Graduação o trabalho em sua redação definitiva, a fim de que sejam feitos os encaminhamentos necessários à emissão do Diploma de Mestre em Computação Aplicada. Para constar, foi lavrada a presente ata, que vai assinada pelos membros da banca examinadora e pela Coordenação do PPGCA.



Prof. Dr. Roberto dos Santos Rabello - UPF
Presidente da Banca Examinadora
(Orientador)



Prof. Dr. Marcelo Trindade Rebonatto - UPF
(Avaliador Interno)

Prof. Dr. João Henrique Kleinschmidt - UFABC
(Avaliadora Externa)



Prof. Dr. Rafael Rieder
Coordenador do PPGCA

UMA ARQUITETURA LPWAN DE CUSTO ACESSÍVEL PARA CIDADES INTELIGENTES

RESUMO

Com a aglomeração de pessoas, crescente urbanização e recursos gradativamente mal utilizados, as Cidades Inteligentes, apoiadas fortemente na Internet das Coisas, surgem como um contraponto para a otimização de recursos e bem-estar social. Porém, o custo da comunicação utilizando redes de celulares é um dos grandes limitadores para as aplicações em larga escala ou em cidades pequenas com poucos recursos. Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho é apresentar uma arquitetura de sistemas de custo acessível para cidades inteligentes empregando a tecnologia *LoRaWan* para comunicação dos dispositivos coletores de dados. Assim, valida-se essa arquitetura através de protótipos empregados no ambiente universitário, para avaliar a viabilidade e a cobertura de *gateways LoRaWan* de baixo custo e, também, para investigar a complexidade de plataformas abertas para o desenvolvimento dos dispositivos. Os resultados da pesquisa mostram que a arquitetura e os materiais apresentados cumprem seus objetivos como uma solução de baixo custo para cidades inteligentes.

Palavras-Chave: cidades inteligentes, arquitetura de sistemas, LoRaWan.

LOW-COST ACCESSIBLE LPWAN ARCHITECTURE FOR SMART CITIES

ABSTRACT

With the agglomeration of people, growing urbanization and resources gradually misused, the Smart Cities, strongly supported in the Internet of Things, appear as a counterpoint to the optimization of resources and social welfare. However, the cost of communication using cellular networks is one of the major limiters for large-scale applications or in small cities with few resources. In this context, the objective of this work is to present an accessible systems architecture for intelligent cities using LoRaWan technology for the communication of data collection devices. Thus, this architecture is validated through prototypes used in the university environment, to evaluate the feasibility and coverage of low cost gateways and also to investigate the complexity of open platforms for device development. The research results show that the architecture and materials presented meet their goals as a low-cost solution for smart cities.

Keywords: smart cities, systems architecture, LoRaWan.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Sistemas de abrangência de uma cidade inteligente e seus relacionamentos [16]	15
Figura 2.	Modelo de Referência de Rede segundo o Lora Alliance [29].	18
Figura 3.	Visão geral do fluxo das atividades	27
Figura 4.	Visão 4+1 descrevendo a arquitetura de sistemas com base no uso de múltiplas visualizações simultâneas	28
Figura 5.	Diagrama de Classes	29
Figura 6.	Diagrama de Atividades coleta de dados	30
Figura 7.	Diagrama de Atividades Consulta	31
Figura 8.	Diagrama de Componentes	31
Figura 9.	Diagrama de Implantação	32
Figura 10.	Módulos Lora utilizados na pesquisa	33
Figura 11.	Antenas utilizados na pesquisa	34
Figura 12.	Gateway <i>multichannel</i> construído	36
Figura 13.	Visão Geral do <i>backend</i> da plataforma The Things Network [39]	37
Figura 14.	Fluxo desenvolvido no Node-Red para salvar dados coletados	40
Figura 15.	Fluxo desenvolvido no Node-Red para consultar dados	40
Figura 16.	Dashboard desenvolvido no Node-Red	41
Figura 17.	Contador de Veículos Visão Geral	42
Figura 18.	Protótipo do Gateway instalado no interior da UPF	43
Figura 19.	<i>Breadboard View</i> do dispositivo Contador de Veículos	43
Figura 20.	Estrutura de dados contador de veículos	44
Figura 21.	Instalação do Contador de Veículos	45
Figura 22.	Desgaste da mangueira do Contador de Veículos	46
Figura 23.	Painel do Contador de veículos	46
Figura 24.	<i>Breadboard view</i> do dispositivo de teste de autonomia de bateria	47
Figura 25.	Tensão da Bateria do dispositivo	48
Figura 26.	Gateway final instalado no local externo	48
Figura 27.	Esquemático do dispositivos com sensores de qualidade do ar	49
Figura 28.	Dispositivo montagem da placa e sensores de qualidade do ar	51
Figura 29.	UPF Smart Campus	52
Figura 30.	Cobertura do LoRa do gateway na UPF	54

Figura 31.	Cobertura do LoRa do gateway na UPF	55
Figura 32.	Perda de Pacotes do dispositivo de qualidade do ar	55
Figura 33.	Perda de Pacotes do dispositivo sensor de temperatura	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Comparativo entre classes de dispositivos <i>LoRaWan</i>	19
Tabela 2.	Custos dos componentes do dispositivo contador de veículos	45
Tabela 3.	Custos dos componentes do dispositivo de autonomia de bateria	47
Tabela 4.	Custos dos componentes do <i>gateway</i>	48
Tabela 5.	Custos dos componentes do dispositivo de qualidade do ar	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	CIDADES INTELIGENTES	14
2.2	INTERNET DAS COISAS	16
2.3	LORAWAN	18
2.4	PLATAFORMAS ABERTAS	21
2.5	TRABALHOS RELACIONADOS	23
2.5.1	Evaluation of LoRa LPWAN Technology for Indoor Remote Health and Well-being Monitoring	23
2.5.2	IoT-based health monitoring via LoRaWAN	23
2.5.3	Smart cities: A case study in waste monitoring and management	24
2.5.4	Smart LED Street Light Systems: A Bruneian Case Study	25
2.5.5	LoRa WAN for Wind Turbine Monitoring: Prototype and Practical Deployment	25
2.5.6	IoT agriculture system based on LoRaWAN	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	A ARQUITETURA	27
3.1.1	Dispositivos	32
3.1.2	Gateway	35
3.1.3	Plataforma	36
3.1.4	Banco de Dados	38
3.1.5	Aplicação	39
4	EXPERIMENTOS E ANÁLISE DE RESULTADOS	42
4.1	PROTÓTIPOS	42
4.2	AVALIAÇÃO DA ARQUITETURA	53
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
5	CONSIDERAÇÕES	60
	REFERÊNCIAS	62

1. INTRODUÇÃO

A tomada de decisão, utilizando um modelo racional, baseia-se em informações de acontecimentos passados para prever fatos futuros, porém, limitado pela mente humana, não é possível ter respostas rápidas analisando todas as variáveis. Diante disso, acaba-se utilizando respostas intuitivas que não são adequadas para questões complexas, pois não necessariamente refletem a lógica dos fatos [1].

Portanto, mesmo que atualmente se conte com modelos de simulação para antecipar resultados, ainda são necessários calibrá-los com parâmetros e informações coletadas para ter bons resultados. Além disso, sabe-se que a coleta de informações feita de forma manual é um processo custoso pelo fato de demandar muito tempo e mão-de-obra, tanto para obter quanto para analisar grandes volumes de dados. O censo brasileiro realizado pelo IBGE exemplifica essa situação, pois a realização dele é feita apenas de 10 em 10 anos, na qual são necessários milhares de agentes, tendo um custo estipulado em 3 bilhões de reais para a realização em 2020 [2].

Já nas Cidades Inteligentes, a coleta de informações automatizadas do ambiente em tempo real combinada com sistemas de inteligência ajudam a visualizar e descobrir padrões promovendo melhores decisões. Tem-se como exemplo desse sistema um semáforo, pois ele altera seu ciclo automaticamente devido às informações do tráfego atual e gera uma otimização de vários recursos, como de combustível e de tempo.

Para mais, sabe-se que a infraestrutura de comunicação é dominada pelas empresas de telecomunicação, tanto no Brasil quanto no mundo, e as necessidades regulatórias restringem o mercado. Logo, isso acaba inibindo, até certo ponto, o investimento e a concorrência, tornando dispendiosas as soluções que necessitam de coleta e transmissão de informações remotas.

De mais a mais, os padrões de conexões adotados, como fibra ótica e 4G, promovem altas taxas de transmissão atendendo as demandas de grandes volumes de dados e de baixa latência em uma cidade inteligente. No entanto, toda essa complexidade requer equipamentos mais complexos e de maior custo, esse fato torna-se o limitador para a aplicação em larga escala devido ao seu investimento financeiro inicial.

Contudo, em vários cenários a comunicação e o acesso facilitado à informação são os pontos-chave para reduzir o desperdício de tempo e de recursos. Exemplos dessa redução são: a notificação antecipada que o trânsito estará bloqueado e a sugestão do desvio; o agendamento de consultas médicas pela internet; a distribuição de serviços essenciais, como agências bancárias pela cidade; a otimização dos meios de transporte através do compartilhamento; a produção e distribuição de alimentos em fazendas urbanas.

O mercado de telecomunicação também é regido por uma complexa regulamentação, o que faz com que poucas empresas operem esses serviços. Assim, desestimulasse a con-

corrência e, no caso do Brasil, influenciado também pela alta tributação, elevasse os preços. Para mais, o investimento em pequenas cidades e em regiões rurais é escasso, deixando esses lugares sem cobertura.

A tecnologia em comunicação de dados sem fio evoluiu muito nos últimos anos permitindo a troca de grandes volumes de informações. Todavia, acarretou na necessidade de dispositivos mais complexos para o processamento desses grandes volumes, logo, esse aumento de complexidade demanda maiores custos financeiros e energéticos. Ou seja, esses empecilhos dificultam a implantação da *Internet of Things*, IoT, em larga escala em zonas rurais ou até mesmo no perímetro urbano de pequenas cidades, pois aumenta o custo financeiro de cada dispositivo. Visto que essa implantação demanda poder de processamento razoável para suportar protocolos de rede, como por exemplo o TCP/IP, e, conseqüentemente, aumenta o custo mensal para manter cada dispositivo conectado.

Ademais, compreende-se que a aplicação dos conceitos de Cidades Inteligentes é muito dependente das empresas de Tecnologias da Informação e Comunicação, TICs, para a coleta, a comunicação e a análise dos dados. Desse modo, plataformas como da IBM[®] tem forte apelo a seus produtos e serviços. Entretanto, um modelo genérico de Cidades Inteligentes é impossível [3], mesmo com padrões tecnológicos e interoperabilidade dos dispositivos e sistemas, pois cada cidade é única, tendo em vista que possui seus problemas e suas peculiaridades. Assim, estratégias nacionais de cidade inteligente falham, já que não capitalizam os recursos locais e ignoram as necessidades e as prioridades regionais [4].

As novas tecnologias de comunicação que surgiram nos últimos anos trazem novos modelos de negócios ao setor de telecomunicação e promovem novas soluções que buscam atender as demandas de Internet das Coisas com baixo custo. Dessa forma, o problema principal da pesquisa é verificar a viabilidade técnica e financeira de aplicar a tecnologia de rede *LoRaWan* para definir uma arquitetura de sistemas na qual, através de apenas um ponto com acesso à internet, seja possível cobrir a área de uma cidade de médio porte para coleta de dados de sensores em tempo real, sem dependência de uma estrutura complexa de comunicações e que permita o acesso dessas informações através de aplicações *web*.

Também serão objetivos abordar a construção dos dispositivos mantendo o baixo custo financeiro e baixa complexidade na codificação, proporcionando assim, que os protótipos criados possam ser replicados em maior quantidade, inclusive por outros desenvolvedores. Mantendo o princípio de baixo custo até o nível da aplicação, utilizando plataformas na nuvem com bom custo benefício para armazenamento dos dados e hospedagem da interface com o usuário.

Com isso, a arquitetura proposta juntamente com os conceitos de dados abertos servem como catalisadores para novas aplicações e pesquisas que necessitem de dados em tempo real do ambiente da cidade. Além disso, incentiva o desenvolvimento e a produção de sensores e de coletores específicos na indústria local para necessidades da própria região, criando assim um ecossistema de empreendedorismo e de inovação.

Ressalta-se que a implementação de toda uma aplicação de IoT demanda conhecimento amplo de várias áreas como: eletrônica, comunicação, protocolos, banco de dados, sistema operacional, *webservices*, programação para dispositivos móveis, para web, etc. No entanto, essa demanda torna quase inviável o desenvolvimento completo de uma aplicação em uma única pesquisa ou não se tem o aprofundamento adequado em certas áreas [5].

No que diz respeito aos experimentos para a validação da arquitetura buscou-se englobar situações reais que necessitavam de coleta de dados para monitoramento em tempo real e comparação de dados históricos. No primeiro experimento foi coletado, através de dispositivo construído, a quantidade de veículos que entravam na Universidade de Passo Fundo pelo pórtico principal e o nível do gás CO no local. O experimento final foi desenvolvido em conjunto com o curso de Engenharia Ambiental, nele coletou-se dados de três gases poluentes em dois pontos de grande movimentação de pessoas e veículos na universidade. Também foi criado um *dashboard web* para exibição dos dados coletados e informações referentes às fontes emissoras e os efeitos dos gases poluentes no ser humano.

A presente dissertação encontra-se organizada como segue: no primeiro capítulo apresentam-se os conteúdos estudados para a fundamentação teórica, assim como alguns trabalhos relacionados com a abordagem da dissertação. Na sequência, o segundo capítulo especifica a proposta e descreve os materiais utilizados. Já no terceiro capítulo são apresentados os experimentos realizados e seus resultados, finalizando com a discussão dos resultados. As considerações finais e as indicações para trabalhos futuros encerram a dissertação.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esse capítulo apresenta a fundamentação teórica e suas seções estão divididas da seguinte forma: na seção 2.1 são apresentados os conceitos de Cidade Inteligente sob diferentes visões. Na seção 2.2 aborda-se os conceitos de Internet das Coisas e apresenta-se os protocolos de comunicação de longas distâncias. Já na seção 2.3 é detalhado o padrão *LoRaWan* e na seção 2.4 exemplifica-se sobre as plataformas abertas. Por fim, a seção 2.5 trata de alguns trabalhos que abordam *LoRaWan* em aplicações de cidades inteligentes.

A maior parte da população vive nas cidades, cerca de 3,42 bilhões de pessoas, o que supera as 3,41 bilhões das áreas rurais, e a estimativa é que em 2050 sejam 5,2 bilhões representando um percentual de 84 % vivendo nas cidades [6]. Essa questão aliada ao fato das cidades crescerem sem um planejamento central, isto é, apenas com as decisões individuais de cada cidadão criando um ambiente anárquico, geram vários problemas para o desenvolvimento e o crescimento das cidades. E, em contrapartida, também acabam criando oportunidades em vários aspectos.

Com o advento da Quarta Revolução Industrial criaram-se novos paradigmas apoiados fortemente na tecnologia e na integração entre o mundo físico, virtual e biológico permitido pela IoT e Inteligência Artificial. Um exemplo de paradigma é a produção distribuída local, feita para atender demandas específicas com produtos customizados, tendo como exemplo a impressão em 3D [7].

Destaca-se que o conceito de *Internet of Things*, IoT, emergiu no fim dos anos 90 por ASHTON, em sua palestra para a P&G sobre RFID [8]. Desde a primeira explanação o conceito evoluiu muito e atualmente pode ser definido como uma infraestrutura global para interligação de objetos físicos e virtuais através dos sistemas de comunicação para captura de informações e atuação no ambiente [9] [10]. Para mais, a popularização de soluções IoT cresce devido a vários fatores, têm-se como exemplos a evolução na miniaturização, a redução de custo de sensores, melhores conexões de rede, a capacidade de identidade única de cada dispositivo, o poder de processamento e de armazenamento das informações na nuvem com baixo custo e o desenvolvimento da computação cognitiva e *machine learning* [11].

Por sua vez, a arquitetura de sistema de software é a forma de estruturar os componentes que interagem com outros elementos, componentes e interfaces menores. Em outras palavras, a arquitetura de um sistema é o conjunto de estruturas necessárias para definir o software, que compreende vários elementos, suas relações e propriedades [12].

Assim, a convergência de todos os tópicos citados anteriormente juntamente com as preocupações ambientais e de bem-estar social, quando balanceadas para atender as necessidades e os desejos da população com uma capacidade funcional sustentável, utilizando a

tecnologia para transformar a infraestrutura e otimizar os recursos, criam um ambiente com o conceito de cidade inteligente[13].

2.1 CIDADES INTELIGENTES

O conceito de cidade inteligente se tornou popular na área política nos últimos anos. O foco principal está ligado à infraestrutura de TICs, mas há muitas pesquisas sobre o bem-estar social, a educação, a sustentabilidade do meio ambiente e a mobilidade como impulsionadores do crescimento urbano [14]. Ainda não há um conceito definitivo de cidades inteligentes, sendo assim, os grupos de pesquisa e as empresas abordam o tema partindo de seu interesse.

A definição dada pela IBM parte da otimização das informações interconectadas para melhor entender, controlar e otimizar o uso de recursos limitados. Uma cidade inteligente equilibra suas necessidades sociais, comerciais e ambientais ao otimizar os recursos disponíveis. Logo, a IBM tem como missão para cidades inteligentes fornecer soluções para facilitar o desenvolvimento e a sustentabilidade de uma cidade em benefício da população, medindo a inteligência da cidade com as melhorias na qualidade de vida e bem-estar econômico que são alcançados pela aplicação das TICs para planejar, projetar e construir a infraestrutura da cidade [15].

A visão da IBM agrupa os sistemas em três eixos (Figura 1): Planejamento e Gerenciamento, Infraestrutura e Humano. O eixo do Planejamento e Gerenciamento agrupa sistemas de segurança pública, governo e órgãos administrativos, planejamento da cidade e operações e construções. Já o eixo de Infraestrutura refere-se a serviços como transporte, abastecimento de água e de energia. Por sua vez, no eixo Humano estão presentes os programas sociais, a assistência médica e a educação [16].

Além disso, baseada na terminologia "Era Cognitiva" a IBM aposta no aprendizado de máquina como importante ponto de evolução, combinando novas ferramentas, como o IBM Watson, para criar novas maneiras dos cidadãos, empresas e governo trabalharem em conjunto para melhorar produtos e serviços[16].

Por seu turno, o *Smart City Council* define sua visão de Cidades Inteligentes baseado em três fatores principais: coleta, comunicação e análise. Inicia-se pela coleta dos dados através de sensores, outros dispositivos e sistemas já existentes como fonte de dados. Em seguida, são transmitidos esses dados usando redes com ou sem fio. Enfim, são analisados esses dados para entender o que está acontecendo agora e o que provavelmente acontecerá depois. Estes dados formam um ciclo virtual, onde as informações geradas ajudam as pessoas a mudarem de comportamento, ou seja, a tomarem melhores decisões, então esses dados são coletados novamente.

Com o surgimento de casos reais de cidades inteligentes pode-se realizar comparações entre as diferentes estratégias de implementação. Angelidou [4] realiza uma comparação

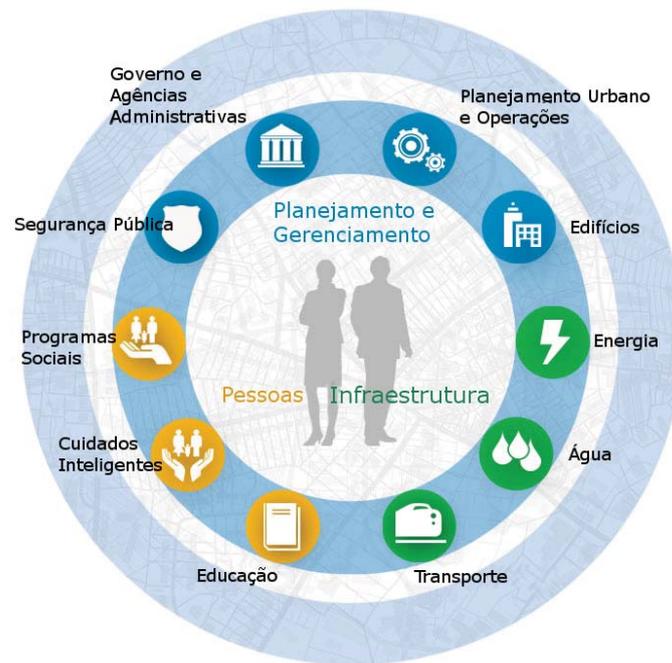


Figura 1. Sistemas de abrangência de uma cidade inteligente e seus relacionamentos [16]

apresentando vantagens e desvantagens da estratégia nacional contra local, novas cidades contra existentes, fortemente orientada à infraestrutura contra pouco orientada à infraestrutura. Um exemplo de modelo de cidades inteligentes orientados para a infraestrutura é a solução da IBM com o suporte a sistemas e processos operacionais em toda a cidade usando informações coletadas para prever e reagir a eventos da cidade. Em 2010, a IBM empregou seu primeiro centro de operações integradas no Rio de Janeiro, com grande investimento em redes de sensores após assinatura de contrato com a cidade, preparando-se para a Copa do Mundo de Futebol de 2014 e para os Jogos Olímpicos de 2016 [4]. Na época houve algumas críticas na implantação, pois a população não foi ouvida e o foco era promover somente a infraestrutura para os eventos [4].

Como contraponto aos conceitos das grandes empresas de tecnologia, há uma visão que aproveita todos os recursos disponíveis, incluído o conhecimento e a criatividade da população, sendo assim, as cidades inteligentes devem colocar a tecnologia a serviço de sua população e não afastá-la desse recurso [17]. A visão da Rede Brasileira de Cidades Inteligentes e Humanas, RBCIH, defende que as TICs têm papel importante no auxílio na resolução dos problemas, mas que as cidades são feitas de pessoas, por pessoas e para pessoas. Portanto, cidades inteligentes e humanas são as que sustentam o crescimento e o desenvolvimento com metas de bem-estar, qualidade de vida e empoderamento do cidadão e comunidades de modo igualitário, promovendo a criatividade local com o suporte da tecnologia. Além do mais, deve-se implantá-las com a gestão de dados abertos, acessíveis e transparentes que permita melhorar, incrementar e automatizar funções da cidade de modo eficiente, integrado e sustentável, e que sejam relevantes para os cidadãos [18] [3].

Baseado nesse conceito de *Smart City*, surge o conceito de *Smart Campus*. Ambos possuem as mesmas premissas, contudo, o último é aplicado dentro do contexto universitário. Esse busca oferecer serviços de alta qualidade para a comunidade em tempo hábil, reduzindo esforços e os custos operacionais com tecnologias para controlar e monitorar instalações do campus. Leva-se, assim, ao aumento da eficiência e da capacidade de resposta do campus em ter uma melhor tomada de decisão, utilizando o espaço e a experiência dos alunos, professores e funcionários [19]. E mesmo que não se aplique todas as premissas ou aspectos de infraestrutura de uma única vez, a implementação gradativa de projetos dessa natureza transformam o ambiente em um *Smart Campus* [20].

Tanto em um *Smart Campus* quanto em uma *Smart City* os dispositivos conectados que capturam e interagem com o ambiente são fundamentais para o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis e, desse modo, evitam-se desperdícios. Por fim, salienta-se que assim como os dados históricos permitem analisar o passado, as técnicas de inteligência computacional permitem antecipar situações futuras. Na próxima seção aprofunda-se nos conceitos de Internet das Coisas e protocolos de comunicação de longas distâncias.

2.2 INTERNET DAS COISAS

O principal aspecto da abordagem da IoT é o alto impacto que ela possui em vários tópicos do cotidiano e no comportamento das pessoas. Do ponto de vista de um usuário particular, os efeitos mais óbvios da introdução da IoT são visíveis nos campos do trabalho e no ambiente doméstico. Nesse contexto, a domótica, a vida assistida, *e-health* e a aprendizagem aprimorada são apenas alguns exemplos de possíveis cenários de aplicação nos quais o novo paradigma terá um papel de liderança no futuro próximo. Da mesma forma, do ponto de vista dos usuários de negócios, as consequências mais aparentes serão igualmente visíveis em campos como automação e manufatura industrial, logística, gerenciamento de negócios, processos, transporte inteligente de pessoas e mercadorias [21].

Para Whitmore [22], o conceito principal de Internet das Coisas são objetos equipados com identificação, sensoriamento, acesso à rede e capacidade de processamento permitindo a comunicação com outros dispositivos através da Internet. Essa definição principal não é nova, por anos a tecnologia de RFID e rede de sensores estão sendo utilizadas pela indústria e manufatura para rastreamento de estoque.

Já segundo Zhang e Vasilakos, a IoT fornece uma integração de vários sensores e objetos que podem se comunicar diretamente uns com os outros sem intervenção humana. Sendo dispositivos físicos que monitoram e coletam vários tipos de dados de máquinas ou do ambiente, inclusive da vida humana [23].

Um dos aspectos cruciais que deve ser considerado em projeto de IoT são as redes de telecomunicações usadas para transmitir as informações dos sensores. A tecnologia escolhida deve ser adequada, principalmente no consumo de energia e, estando ciente de que o tráfego

de dados não é alto, a demanda de taxa de transmissão também não é alta, na ordem de kbps. Essas redes são conhecidas como *LPWAN*, *Wide Area Networks Low Power* e, atualmente, são implementadas através de soluções como *LoRaWan*, *SigFox*, *NB-IoT* e *LTE-M* [24].

Ademais, as redes celulares evoluíram muito nos últimos 15 anos, desde a rede 2G na tecnologia GPRS com taxas de dados de 9,6 kbps, depois EDGE com 547 kbps, passando pela HSPA+ com 168 Mbps e, por fim, chegando na 4G com a tecnologia LTE podendo chegar a 300 Mbps. Essa evolução permitiu o consumo de conteúdo móvel com alta taxa de transmissão, alavancando os dispositivos móveis como *smarthphone*. No entanto, essa solução voltada para o contexto de IoT acaba sendo superdimensionada na questão de taxa de transmissão e na complexidade [25], assim como no custo de manter um dispositivo conectado, esse ponto que até chega a inibir quando considerado milhões de dispositivos. A complexidade desses protocolos de alta taxa de transmissão gera maior necessidade de processamento e energéticas [11]. Para resolver essas necessidades está sendo introduzida a tecnologia *LTE-M*, que é uma variação voltada para IoT, com taxa de transmissão de até 1 Mbps, utilizando a mesma estrutura das rede celular, simplificando assim a implantação, mas acaba mantendo o custo elevado para cada dispositivo [24].

O *NB-IoT* está sendo padronizado pela 3GPP e tem o intuito de resolver o problema do consumo de energia e conexões de longo alcance com taxas de transmissão de 170 kbps para *downlink* e 250 kbps de *uplink*, além de simplificar a implantação, pois é um protocolo que utiliza a infraestrutura das operadoras de telefonia para prover o serviço aos usuários [11].

Já o padrão *SIGFOX* surge como uma alternativa à tecnologia celular, para dispositivos de baixo custo, com capacidade de processamento reduzido e transmissão em longas distâncias. Ele possui um custo por mensagem enviada, mas é muito baixo em comparação à rede celular. Mesmo operando em faixas de frequência ISM, a rede *SIGFOX* é fechada, sendo necessário uma concessionária distribuir o sinal na região. No Brasil, a rede já está em processo de implantação pela concessionária WND [26]. O padrão provê mensagens de 12 bytes por vez, sendo possível o envio de 120 mensagens por dias, que permite utilização em vários dispositivos que necessitam de pouca banda, assim, dispositivos que utilizam simples baterias AA podem ter autonomia por até 10 anos, segundo o fabricante [27].

Por sua vez, o *LoRaWan* se destaca sobre os padrões anteriores por não ser vinculado com a infraestrutura atual de rede celular e não depender de um operador exclusivo da tecnologia. Dessa forma, ele permite projetos customizados e aderente as necessidades locais, proporcionando também menor custo de manutenção. Em contrapartida, apresenta complexidade maior para implantação, pois é necessário instalar toda a infraestrutura de comunicação. O padrão *LoRaWan* terá maior detalhamento na próxima sessão.

2.3 LORAWAN

Por definição *LoRa* é a tecnologia de rádio frequência enquanto *LoRaWan* é o protocolo de rede, sendo uma *Low Power Wide Area Network, LPWAN* que consiste em uma arquitetura de rede voltada ao baixo consumo de energia, baixa taxa de dados e longo alcance, pontos chave para IoT, provendo comunicação segura bidirecional, mobilidade e serviço de localização. Para mais, utiliza a topologia estrela, com um *gateway* como ponte entre os *end-devices* e o *Network Server*, esse que por sua vez realiza o roteamento dos pacotes de cada dispositivo para o servidor de aplicação [28]. Outro ponto do *LoRaWan* é que ele é aberto, isto é, permite que qualquer empresa produza dispositivos, entretanto, eles devem ser homologados pela *LoRa Alliance* [28], já que o transmissor *LoRa* possui patentes pela *SemTech*. A especificação ainda prevê *Join Server* que gerencia a autenticação dos dispositivos na rede, o modelo de referência de rede pode ser observado na Figura 2.

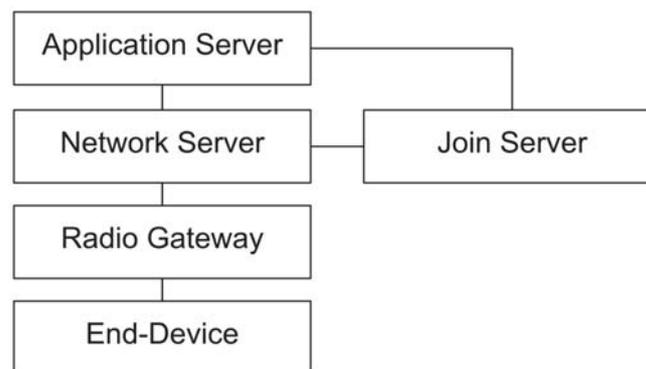


Figura 2. Modelo de Referência de Rede segundo o Lora Alliance [29]

Os *End-Devices* podem ser sensores ou atuadores que são conectados sem fio na rede *LoRaWan* através do *Radio Gateway*. A transmissão utiliza o conceito de *chirp spread spectrum* de modulação que provê resistência e robustez contra interferência e efeito Doppler, sendo esse o grande diferencial da tecnologia *LoRa* [30]. Os demais parâmetros de comunicação são:

- Bandwidth (BW): podendo variar de 125 kHz e 500 kHz no continente americano [30].
- *Spreading Factor* (SF): podendo variar de 7 a 12, definindo o tempo e a taxa de transmissão que a informação será transmitida. Quanto menor o SF menor será o tempo de transmissão e maior será a taxa, assim abrange um alcance menor. Já quanto maior o SF maior será o tempo de transmissão e menor será a taxa de transmissão, contudo ele abrange um alcance maior [30].
- TXPower: indica a potencia do sinal, no padrão americano varia de 10 dBm a 30 dBm [31].

A combinação *bandwidth* e *Spreading Factor* proporcionam taxa de transmissão entre de 0.3 kb/s a 27 kb/s [30], ainda há a parametrização de *Adaptative Data Rate*, ADR, que permite

que o SF e o TXPower do *end-device* seja ajustada para otimizar o consumo de energia. Isso na prática permite que na mesma área de abrangência de um *gateway* tenha diferentes taxas de dados, pois os dispositivos localizados próximos do *gateway* podem utilizar SF menor, assim economiza-se energia.

Os dispositivos *LoRa* são categorizados em classes para utilização adequada em cada projeto, sempre voltado para o menor consumo de energia:

- Classe A: dispositivos bidirecionais, mas com possibilidade de receber mensagens (*down-link*) restritas logo após o envio (*uplink*). Nessa forma de operação reduz o consumo de energia, pois durante o resto do tempo o módulo *LoRa* estará desligado.
- Classe B: dispositivos bidirecionais, mas têm possibilidade de receber mensagem com tarefas sincronizadas de tempo em tempo. Ao enviar uma mensagem pode ser criada uma tarefa para sincronizar o próximo horário em que o dispositivo estará ouvindo.
- Classe C: dispositivo bidirecional, mas com a possibilidade de recebimento de mensagens a quase qualquer momento.

Na Tabela 1 resume-se a diferença das classes de dispositivos *LoRaWan* [24].

Tabela 1. Comparativo entre classes de dispositivos *LoRaWan*

Classe	A	B	C
Mensagens em Multicast	Não	Sim	Sim
Latência	Alto	Baixo	Não
Dispositivo inicia a comunicação	Sim	Sim	Sim
Servidor inicia a comunicação	Não	Sim, com intervalos	Sim, Constante
Consumo de Energia	Baixo	Moderado	Alto

A utilização de faixas de frequência de rádio é limitada pelos governos locais dos países para definir regras, organização e evitar problemas de interferências entre os equipamentos de uso crítico. Portanto, há um acordo internacional que define algumas frequências sem necessidade de regulamentação para incentivar o desenvolvimento industrial, científico e médico, esse acordo é denominado *ISM band, industrial, scientific and medical*. No Brasil o órgão regulador de telecomunicação é a Agência Nacional de Telecomunicação, ANATEL, dentre suas responsabilidades está as definições das faixas de frequência que necessitam de cadastramento para operação, logo, segundo a resolução 506 da Anatel, no capítulo II, define as faixas de frequência restritas, que não necessitam de cadastramento junto ao órgão: 902-907,5 MHz, 915-928 MHz, 2.400-2.483,5 MHz, 5.725-5.875 MHz e 24,00-24,25 GHz [32].

A instrução da *LoRa Alliance* para o continente americano é utilizar a faixa de frequência 902 a 928 MHz, como pode ser observado as faixas entre 907,5 a 915 MHz não podem ser utilizadas, assim, ao utilizar dispositivos do padrão americano deve-se tomar o cuidado de inutilizar esses canais via software na aplicação. Sabe-se, contudo, que essa limitação já ocorre

em outros países que padronizaram a distribuição das faixas de frequência de tal modo que não sejam inutilizados canais, como é o caso do padrão australiano. Entretanto, ainda não há um padrão brasileiro definido [31].

Os pacotes ao chegarem no *Gateway* são encaminhados sem nenhum processamento ou interpretação ao *Network Server*, esse que é o centro da topologia estrela, tendo como funções:

- Verificação de endereço do *End-Device*
- Autenticação dos frames
- Gerenciar o *Adaptative Data Rate*, ADR
- Responder a todas requisições dos *End-Device*
- Encaminhar ao *Application Servers* todas as mensagens de *uplink*
- Agendar e encaminhar ao *End-Device* todas as mensagens de *downlink* dos *Application Servers*.
- Encaminhar para o *Join Server* as requisições de autenticação dos *End-Devices*.

Um dos pontos críticos da infraestrutura para IoT é a segurança, dessa forma o protocolo *LoRaWan* possui um mecanismo criptografia baseado no padrão AES, e possui dois métodos de autenticação na rede. No método ABP, *Activation by Personalization*, o *End-Device* recebe os identificadores no processo de fabricação ou codificação, sendo únicos na rede local, assim não é possível transportar este *End-Device* para outra rede *LoRaWan*, sendo necessário alterar esses identificadores no código do dispositivo. Os parâmetros definidos nesse método são:

- *Device Address*(DevAddr): Identificador único do dispositivo com 32 bits. Presente em cada *data frame*.
- *Network Session Key* (NwksKey): Identificador único na camada rede com 128-bit AES de encriptação, garantindo a integridade de mensagens entre o *end node* e o *Network Server*.
- *Application Session Key* (AppSKey): Identificador único na camada de aplicação com 128-bit AES de encriptação, usado para criptografia das mensagens na aplicação.

No caso do método Over-the-Air (OTAA), o *End-Device* possui um identificador único global DevEUI, através deste envia-se uma requisição de *join*, sendo essa não criptografada, caso aceito na rede o *DevAddr* é gerado e enviado para o dispositivo que irá utilizar estes para troca das próximas mensagens criptografadas [28]. O *Join Server* gerencia a autenticação apenas neste método.

No *Application Server* são tratadas as mensagens, *payloads*, dos dispositivos para o usuário final sendo descryptografada utilizando o *AppSKey*, é apenas nessa camada que as informações geradas pelos dispositivos são de fato acessadas.

2.4 PLATAFORMAS ABERTAS

Atualmente as plataformas abertas de *hardware* e *software* contribuem muito para os avanços em muitas áreas, principalmente pela troca de informações e de experiência que essas plataformas podem proporcionar. Pode ser citado a impressão em 3D, robótica, automação residencial, mas há muitos outros campos em que o uso de placas como *Arduino* e *Raspberry Pi* alavancaram projetos domésticos simples para grandes empreendimentos de tecnologia.

Com a grande difusão da plataforma *Arduino* para prototipação é comum sua utilização no início de projetos, principalmente pelo seu baixo custo e tempo de estudo. Iniciado em 2005 para ajudar estudantes no aprendizado de eletrônica e programação, foi o primeiro projeto de código aberto de *hardware* [33]. Se popularizou rapidamente e vendeu 50.000 placas em três anos, mas esse número deve ser bem maior, por ser um projeto aberto e que pode ser replicado por outros. Atualmente, a principal placa do projeto *Arduino* é a Uno, com custo aproximado de três dólares. Ela tem como especificação:

- Microcontrolador Atmel AVR ATmega328P de 16 bits com clock de 16 Mhz, 32 kbytes
- 2 KB de memória SRAM
- 32 KB de memória de programa, *flash*
- 1 KB de memória EEPROM
- 14 Portas Digitais, destas 6 com saída PWM
- 6 Entradas Analógicas
- Alimentação recomendada de 7 a 12 V
- Conexão USB tipo B

Porém, após o período de certa hegemonia do *Arduino* para prototipação e soluções baratas para IoT, foram desenvolvidas em 2014 as placas *ESP8266* e *ESP32*. A primeira chegou a custar apenas dois dólares, mas os grandes diferenciais não ficam apenas o custo, ficam também no tamanho reduzido, consumo de energia, *wi-fi* e *bluetooth* em um único chip. Já a segunda possui processador 32 bits de 240 Mhz dual core, com 520 KB SRAM, 16 MByte *flash*, 32 portas de entrada e saída, sendo necessário uma voltagem de apenas 2,2 a 3,6 Volts para operação [34].

Para mais, baseada na premissa de educação, a Fundação *Raspberry Pi* trabalha para colocar o poder da computação e da produção digital nas mãos de pessoas de todo o mundo, fornecendo computadores de baixo custo e alto desempenho do tamanho de um cartão de crédito. Esse pequeno dispositivo permite que pessoas de todas as idades explorem a computação e aprendam a programar, além de ser muito utilizado em muitos projetos de IoT pelo seu baixíssimo custo e possibilidades de customização [35].

Atualmente as placas *Raspberry Pi* estão na terceira geração, disponíveis em três modelos de placas, A, B, e zero, e algumas variações revisadas [36]. O principal modelo, *Raspberry Pi 3 Model B+*, possui a seguinte especificação [37]:

- Processador ARM Cortex-A53 64-bit Quad-Core de 1.4GHz
- 1GB LPDDR2 SDRAM
- Wifi 2.4GHz e 5GHz b/g/n/ac
- Bluetooth 4.2, BLE
- Porta Lan
- 40 Pinos de GPIO
- Saída de Vídeo padrão HDMI
- 4 Portas USB 2.0
- Slot para cartão Micro SD
- Alimentação 5V / 2.5A

Cada plataforma apresentada anteriormente possui um contexto em que é mais indicado utilizá-la. Por exemplo, em dispositivos mais simples as placas *Arduino* são mais aderentes, pois não possuem um grande poder de processamento, logo necessitam de menos energia e dispensam menos recursos financeiros. Por outro lado, a plataforma *Raspberry Pi* permite executar um sistema operacional *Linux* com interface gráfica, além de possuir 40 pinos de entrada e saída para acesso a sensores e atuadores, se mostrando bem flexível. Entretanto, o custo e as necessidades energéticas se tornam bem evidentes em comparação com o *Arduino*. Dessa forma, as placas ESP acabam sendo uma solução intermediária em recursos de *hardware* e financeira.

O projeto *LoRa Server* abrange um conjunto de aplicativos de código aberto que preenche a lacuna entre os *gateways* que recebem mensagens *LoRaWan* dos dispositivos até a aplicação final. Fornecendo mecanismos para gerenciar os *gateways* na rede *LoRa*, os aplicativos suportados e os dispositivos associados aos aplicativos [38]. Projetado de forma que possa ser flexível e modular, por exemplo, o componente *LoRa App Server* implementa o componente servidor de aplicativos e oferece uma interface de usuário da Web para que os usuários

acessem e modifiquem seus *gateways*, aplicativos e dispositivos. O sistema também pode ser acessado por meio de interfaces de integração por *APIs gRPC* e *JSON REST* [38].

A *The Things Network* é uma comunidade colaborativa com mais de 60 mil membros e uma plataforma com 6 mil *gateways LoRaWan* públicos espalhados pelo mundo, além de facilitar a integração dos dados recebidos com bancos de dados, HTTP e Cayenne[39].

2.5 TRABALHOS RELACIONADOS

Essa sessão analisa trabalhos e pesquisas que abordam *LoRaWan* em aplicações de cidades inteligentes. Alguns trabalhos ainda estão em fase inicial, contudo, mostram como soluções simples podem colaborar para a melhoria dos serviços públicos.

2.5.1 Evaluation of LoRa LPWAN Technology for Indoor Remote Health and Wellbeing Monitoring

O trabalho de Juha Petäjälä et al [40] relata os experimentos utilizando dispositivos comerciais da tecnologia *LoRaWan* no campus da Universidade de Oulu na Finlândia, aplicando diferentes SF, *Bandwidth* e *TXPower*. No caso desse estudo, foi utilizada uma potência de transmissão de 14 dBm e SF = 12, sendo possível cobrir toda a área do campus, 570 x 320 metros, com uma média de 96,7 % de sucesso de transmissão.

São relatados testes tanto no exterior quanto no interior de construções entre 55 e 370 metros de distância, utilizando *spreading factors* de 7 a 10 avaliando o percentual de pacotes com erro e o RSSI (*Received Signal Strength*) em uma tabela e gráfico em forma de mapa de calor. Ao final é realizado um breve relato do consumo de energia com essa variação de *spreading factors*, concluindo que o consumo é maior devido ao tempo que o transmissor permanece ativo em SF maiores.

Sendo um dos primeiros trabalhos práticos da utilização da tecnologia *LoRa* em ambientes internos, conclui-se que é possível a transmissão *indoor* em 300 metros mesmo tendo perdas e atrasos. Além disso, é viável e possui potencial a utilização da tecnologia para monitoramento do bem-estar e controle de sinais não críticos, como atividades físicas, localização, monitoramento de animais de estimação e gerenciamento pessoal, etc.

2.5.2 IoT-based health monitoring via LoRaWAN

Os autores Mdhaffar, Afef, et al da University of Sousse, Tunísia [41], apresentam um novo coletor de baixo custo para dados médicos utilizando *LoRaWan* para transmissão dos dados de pressão sanguínea, glicose e temperatura. O denominado *IOT4HC* é baseado em dispositivos de maior custo que utilizam outras tecnologias de transmissão. Entretanto, nesse

protótipo simplifica o dispositivo permitindo que pessoas com problemas de saúde específicos e que estão localizadas em áreas rurais ou sem acesso à internet não precisem se deslocar para coleta de dados preventivos.

O projeto abrange desde o sensor até o acesso web pelos usuários e médicos, porém, a pesquisa abordada no artigo é limitada ao dispositivo e se divide em dois subgrupos. O primeiro levantou a cobertura da área do *gateway LoRaWan*, que na área urbana teve resultados de até 1,89 Km em uma direção e 0,73 km em uma região de alta densidade urbana; contudo, na área rural alcançou 33 km² utilizando um antena de 3 dBi de ganho.

Já o segundo grupo focou no consumo energético do dispositivo utilizando *LoRaWan* comparando com a tecnologia GPRS, o qual mesmo em *idle mode* o dispositivo equipado com GPRS consome aproximadamente 20mA, enquanto com *LoRa* consome aproximadamente 4.7 mA, e, utilizando uma estimativa de consumo, com uma *power bank* de 2200 mA, teria uma autonomia de até 10.875 dias.

Com um alcance na área rural de 33 km² e como em experimentos mostrou 10 vezes menor consumo energético que a transmissão por GPRS, o equipamento se mostra interessante para áreas remotas. No entanto, o não envio contínuo de dados não permite a utilização da solução para pacientes críticos, assim uma solução alternativa deverá ser implementada para esses casos.

2.5.3 Smart cities: A case study in waste monitoring and management

O trabalho de Castro Lundin, Ozkil e Schuldt-Jensen [42] relata a construção de um sistema de monitoramento de lixeiras na Technical University of Denmark, abordando o gerenciamento e a otimização do controle de resíduos como um dos principais itens para cidades inteligentes. Porém, as soluções comerciais tornam inviável a aplicação em larga escala devido ao preço muito elevado.

Na pesquisa é descrito a construção de todo o sistema de forma resumida, os dispositivos utilizam sensores ultra-sônicos para determinar o nível que a lixeira se encontra, os equipamentos para a montagem do *gateway* e as tecnologias e os protocolos para a implementação do *backend e frontend*.

Ainda são analisados os dados coletados durante a fase de teste, nos quais são verificados que algumas lixeiras eram preenchidas antes do recolhimento previsto, devido a sua localização próxima a uma lancheria, enquanto outras permaneciam com o nível baixo. Esse comportamento já era previsto pelos coletores de lixo devido à experiência e o conhecimento do local, assim não foram aplicados predição nos resultados obtidos. Entretanto, o autor argumenta que no caso da indisponibilidade dos atuais coletores, os substitutos não teriam esse conhecimento e o ambiente ficaria à mercê do acúmulo de lixo bem como qualquer outro evento

inesperado também causaria problemas. Logo, a implantação de um sistema de monitoramento inteligente permite que se utilize uma abordagem pró-ativa e não reativa.

Conclui-se que o sistema inteligente, mesmo sendo simples e barato, mostra sua importância para melhorar os serviços oferecidos aos cidadãos, e que mesmo não substituindo o conhecimento dos coletores, melhora a reação em algumas situações atípicas. A questão do custo por lixeira também foi respeitada durante o estudo, não ultrapassando 100 dólares, sendo esse um dos principais fatores para a implantação desse sistema em larga escala.

2.5.4 Smart LED Street Light Systems: A Bruneian Case Study

No artigo de Suhaili [43] que relata o projeto de monitoramento da iluminação LED em Bruneian, aborda-se a situação atual onde há pouca adesão a lâmpadas LED, cerca de 2%. Como a simples troca das lâmpadas HPS, *high-pressure sodium*, por LED proporcionam a redução do consumo em 40% e como a implantação desse sistema inteligente poderá otimizar ainda mais, apenas reduzindo a potência ou desligando as luzes de acordo com dados em tempo real de sensores.

O projeto propõe a utilização de LDR, *Light dependent resistor*, que mensura a intensidade da iluminação natural em conjunto com o sensor PIR, *Passive infrared*, que permite detectar a presença de pessoas ou veículos, aumentando a intensidade do brilho ou reduzindo, até mesmo desligando quando não há movimentação, proporcionando 67-71% de economia de energia. Para tanto, *LoRaWan* é definido na arquitetura como o meio de comunicação devido a sua simplicidade, consumo de energia e topologia em estrela, já que outros padrões que utilizam topologia *mesh* consomem mais recursos, pois necessitam de dispositivos para realizarem o intermédio na comunicação.

O artigo demonstra os benefícios de um sistema inteligente aplicado na iluminação pública, pois ao agregar maior inteligência, reduz-se a intervenção humana, economiza-se energia e maximiza-se o conforto e segurança das áreas atendidas pelo sistema.

2.5.5 LoRa WAN for Wind Turbine Monitoring: Prototype and Practical Deployment

Os autores Mikhaylov, Moiz, et al da Universidade de Oulu [44], na Finlândia, apresentam um protótipo para monitoramento de turbina eólicas utilizando a tecnologia *LoRaWan*. Abordando como as redes de energia elétrica tornaram-se o principal sistema da civilização atual. As novas iniciativas políticas com o objetivo de reduzir a poluição, aumentando a parcela de energia gerada por fontes renováveis ganharam impulso e criam novos desafios. Foi desenvolvido dispositivo de coleta próprio em conjunto com *gateway* comercial MultiTech, foi documentado a utilização de *network server* privado, destacou-se ainda a implementação da aplicação em formato de painel para acompanhamento das informações. A coleta foi realizada

durante nove meses, registrando cerca de meio milhão de dados. Ao fim, afirma que a tecnologia *LoRaWan* prove soluções simples e eficiente em custos, permitindo o monitoramento não crítico no contexto de redes elétricas, mas com ressalvas por o artigo não aborda o aspecto da escalabilidade.

2.5.6 IoT agriculture system based on LoRaWAN

O trabalho de Davcev, Mitreski e et al da *Faculty of Computer Science and Engineering Skopje*, na Macedonia [45] relata um sistema agrícola de IoT eficiente no uso de energia e altamente escalável, sendo aplicado no contexto de uma fazenda de uva. Este sistema é baseado na rede *LoRaWAN* para transmissão de dados de longo alcance e baixo consumo de energia dos dispositivos para os serviços na nuvem. A aplicação utiliza a plataforma *The Things Network* que implementa os serviços de *back-end* da *LoRaWAN*.

Os trabalhos relacionados demonstram como a tecnologia *LoRaWan* pode ser utilizada diferentes situações, com vantagens e desvantagens em comparação a outras tecnologias. Influenciaram o desenvolvimento deste trabalho, pois já validavam algumas especificações na prática da tecnologia *LoRaWan*, demonstrando que seria possível chegar ao objetivo principal do trabalho. No entanto, cada trabalho relacionado busca apresentar apenas uma aplicação, em contraste, o trabalho desenvolvido que parte da definição genérica da arquitetura de sistemas, validando em problemas distintos, criando assim um ambiente inteligente com sensores heterogêneos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esse capítulo descreve o fluxo das atividades para definições da arquitetura de sistema, as tecnologias e os hardwares utilizados na construção dos protótipos para avaliação. A definição da arquitetura tem a abrangência dos dispositivos de coleta, protocolos de comunicação, armazenamento dos dados e aplicação de consulta *web*. Dentro do escopo da arquitetura não terá uma aplicação fim, entretanto, a implementação dos protótipos para validação tem foco em um problema real do monitoramento de gases poluentes, demanda do curso de Engenharia Ambiental da UPF. O desenvolvimento do projeto é dividido em três fases: pesquisa, desenvolvimento da arquitetura e implementação do protótipo, que serão subdivididos em etapas. Uma visão geral do fluxo de atividades está definido na Figura 3:

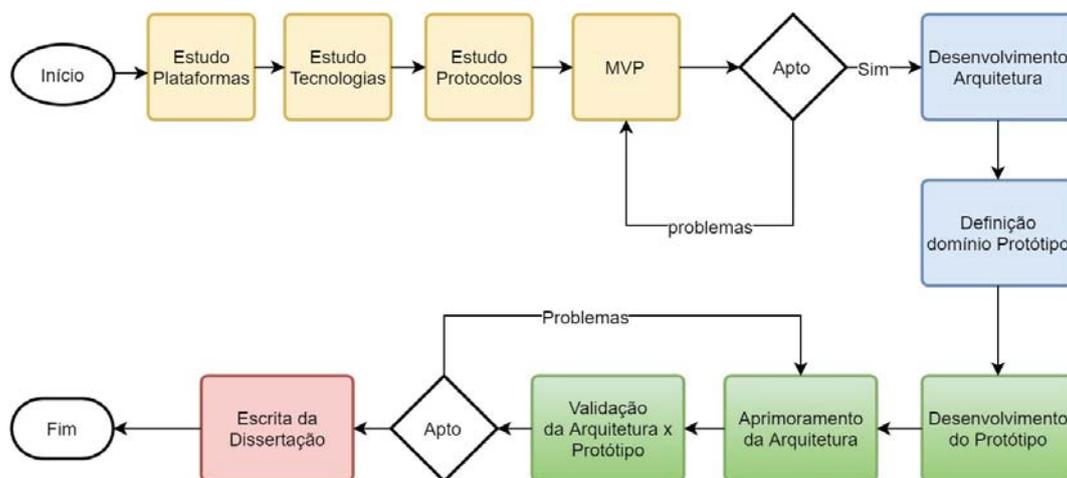


Figura 3. Visão geral do fluxo das atividades

A fase inicial de pesquisa contempla o estudo aprofundado das plataformas, tecnologias e protocolos, validando a aplicabilidade e viabilidade MVP, *Minimum Viable Product*. Seguindo conceitos do *design thinking*, partiu-se de uma ideia simples, realizando testes, validações e aperfeiçoamentos para avançar para a próxima etapa, retrocedendo quando necessário.

3.1 A ARQUITETURA

A arquitetura foi definida seguindo os requisitos básicos listados abaixo:

- Transmissão de informações a longa distâncias
- Teste de viabilidade da tecnologia *LoRaWan*
- Testar o desempenho da tecnologia *LoRaWan*
- Testar a arquitetura da tecnologia *LoRaWan*

- Baixo custo financeiro para construção dos dispositivos
- Baixa complexidade na implementação dos dispositivos
- Baixo custo financeiro para manutenção da aplicação
- Padrão de acesso aos dados
- Acesso facilitado dos dados

A arquitetura de sistema pode ser apresentada de diferentes formas, segundo Kruchten [46], o modelo de visão 4 + 1 é bastante genérico. Portanto, outras notações, ferramentas e métodos de design podem ser usados, especialmente para as decomposições lógicas e de processo. A Figura 4 é uma visão geral do modelo 4+1, na qual são apresentadas a visão lógica, de processos, de implementação e de implantação.

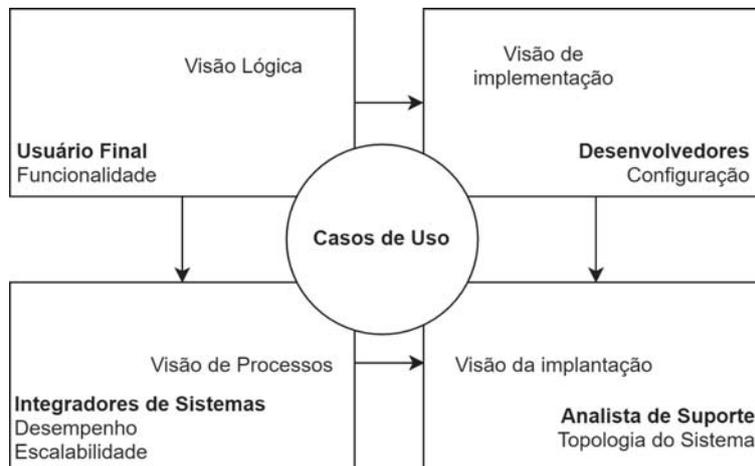


Figura 4. Visão 4+1 descrevendo a arquitetura de sistemas com base no uso de múltiplas visualizações simultâneas

A visão lógica da arquitetura define as abstrações das partes de um sistema. Além de ser usado para modelar do que o sistema é composto e como as partes interagem umas com as outras. Os tipos de diagramas *UML* que geralmente retratam essa visão são: classes, objetos, máquina de estado e diagramas de interação [47]. Para representar essa visão utilizou-se o diagrama de classes, Figura 5, que demonstra a interação dos objetos desde o dispositivo até a aplicação.

A classe *PacketLoraWan* representa os dados gerados nos dispositivos, contendo os identificadores no padrão *LoRaWan* (*devAddr*, *nwkskey*, *appskey* e *devEUI*) e um vetor de *bytes*, *data*, que são as informações coletadas pelo sensores no padrão *CayenneLPP*.

A *Application* é a classe que representa a aplicação na plataforma *The Things Network*, contendo o *id* como identificador único, *description* descreve a aplicação, *payloadFormat* formato do pacote enviado pelo dispositivo, podendo ser *custom* ou no padrão *Cayenne LPP*. O atributo

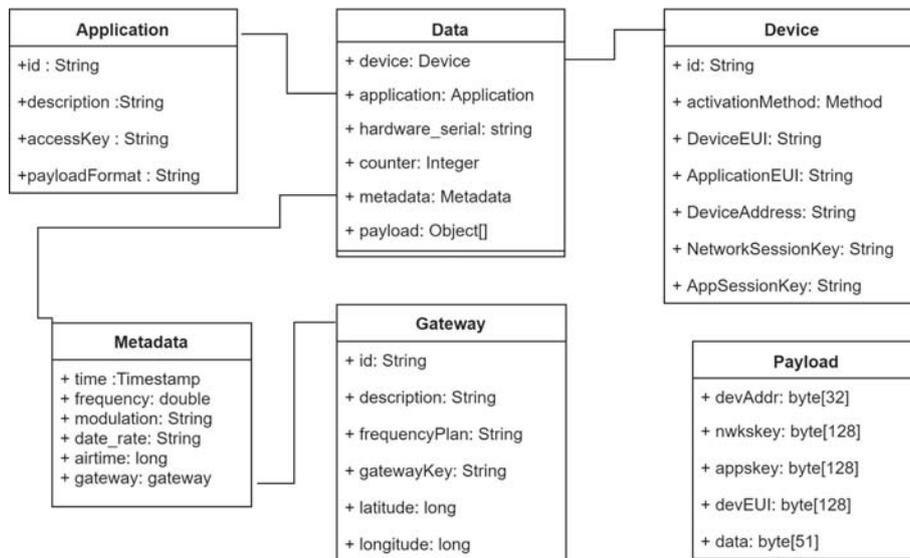


Figura 5. Diagrama de Classes

accessKey é a chave de acesso gerado pela plataforma para acesso aos dados da aplicação através dos métodos de integração.

Já a classe *Device* representa o dispositivo cadastrado na plataforma *The Things Network*, possui os atributos *id* como identificador único, *activationMethod* podendo ser *ABP* ou *OTAA*, e os demais atributos para autenticação do dispositivo: *DeviceEUI*, *ApplicationEUI*, *DeviceAddress*, *NetWirkSessionKey*, *AppSessionKey*.

O *Gateway* é definido pelos atributos *id* como identificador único, *description* que descreve o gateway, *frequencyPlan* que no caso é 915 Mhz, *gatewayKey* define a chave de segurança que deve ser configurado no equipamento físico, e, por fim, latitude e longitude que armazenam a posição geográfica do *gateway*.

As informações, ao trafegarem pela rede *LoRaWan* até a aplicação, são convertidas na estrutura representada pelas classes *Data* que possuem o relacionamento com o *device* e *application*. O atributo *counter* é o número de pacotes enviados pelo dispositivo, *payload* representado por um vetor de objetos, esses que já são dados convertidos do vetor de *bytes* da classe *Payload*. Por fim, a classe *MetaData* possui dados referentes à transmissão como *time* com a data e hora do *gateway* no momento que recebeu o pacote, *frequency* com a frequência que foi transmitido o pacote, *date_rate* define o o *Spreading Factor* e *bandwidth* utilizados na transmissão e, finalmente, o *airtime* que é o tempo total do envio do pacote.

A Visão do Processo descreve as atividades dentro do sistema e é particularmente útil para visualizar o que deve acontecer no software, normalmente é representado por diagramas de atividades [47]. O diagrama de atividade da coleta dos dados pelos dispositivos pode ser observado na Figura 6. A atividade começa com a inicialização do dispositivo, logo após é realizada a autenticação na rede *LoRaWan* enviando um pacote do tipo *join* com os parâmetros necessários.

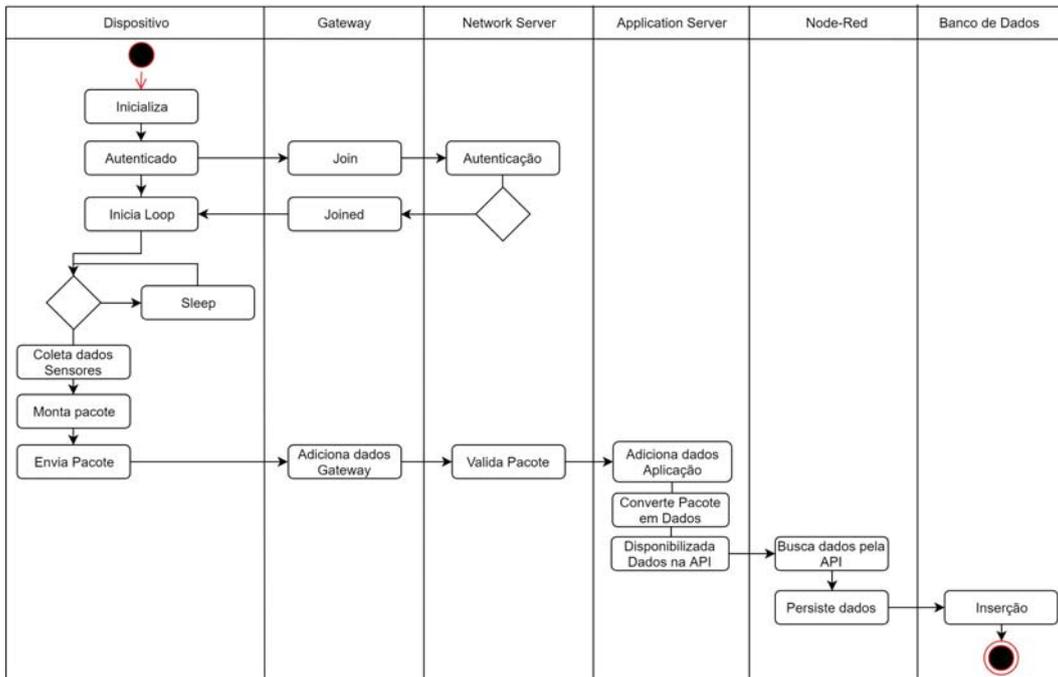


Figura 6. Diagrama de Atividades coleta de dados

Esse pacote é encaminhado pelo *gateway* para o *Network Server* que valida se esta aplicação e dispositivos são válidos, caso verdadeiro, retorna o pacote *joined* com a confirmação da autenticação. Em seguida, o dispositivo entra no *loop* principal no qual se verifica se está no ciclo para envio de um novo pacote, caso negativo, entra em *sleep* até atingir esse tempo determinado. Ao ser atingido é realizada a leitura dos dados dos sensores, criado um pacote no padrão determinado e enviado esse pacote pela rede *LoRaWan*. Ao ser recebido pelo *gateway* este adiciona alguns dados referentes à performance da rede, como *Data Rate*, *SNR* e *RSSI*.

Ao ser recebido pelo *Network server*, são validadas as informações de autenticação do pacote e ele é encaminhado para o *application server*, onde são adicionados os dados da aplicação e convertidos os dados brutos dos sensores para objetos *JSON*. Por fim, o pacote é capturado por API pelo *Node-Red* que persiste no banco de dados.

Já no diagrama de atividades de consulta dos dados, Figura 7, inicia-se com a requisição por API Rest do usuário recebida pelo *Node-Red* que realiza o tratamento dessa requisição, montando a consulta no padrão do banco de dados e, em seguida, envia a requisição de consulta ao banco de dados. Ao receber o retorno, o *Node-Red* ajusta o documento *JSON* para retorno via HTTP da solicitação REST. Para a consulta não é necessária nenhuma interação com o *Network Server* ou *gateway* da estrutura *LoRaWan*, os dados são consultados diretamente no banco de dados.

A visão do desenvolvimento descreve como as partes do sistema são organizadas em módulos e componentes, sendo muito útil para gerenciar as camadas dentro da arquitetura. Essa visão normalmente contém diagramas de pacote e componente. A Figura 8 apresenta o diagrama de componentes da arquitetura.

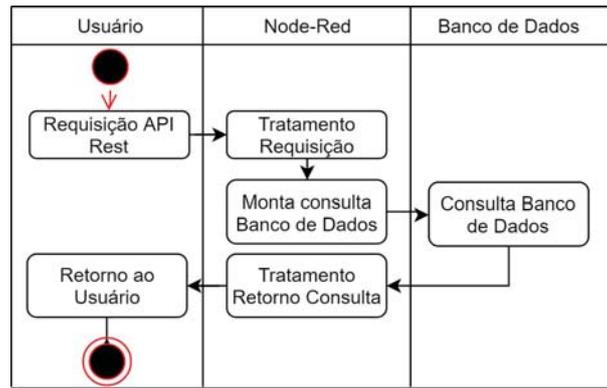


Figura 7. Diagrama de Atividades Consulta

A dependência dos componentes começa pelo *framework Arduino*, que provê a base para interligação do software e hardware do dispositivo. As bibliotecas dos sensores como *ADS1015* e *DHT* são acessadas pelo *Arduino*. A biblioteca *LMIC* gerencia a operação do hardware do rádio Lora e o envio dos pacotes no padrão *LoRaWan*.

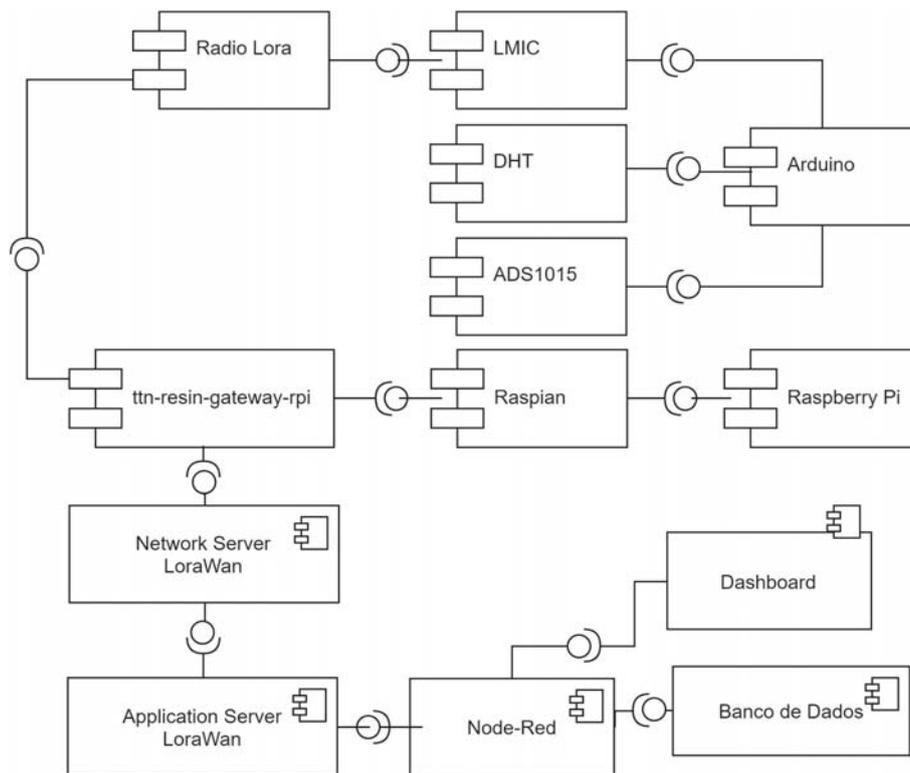


Figura 8. Diagrama de Componentes

O componente *ttn-resin-gateway-rpi* é responsável pela operação do hardware do gateway e também pelo encaminhamento dos pacotes *LoRaWan* para o *Network Server*. O *ttn-resin-gateway-rpi* utiliza o sistema operacional *raspbian*, que é executado sobre uma placa *Raspberry pi*. Já o componente *Network Server* é acessado pelo *Application Server* dentro da plataforma *The Things Network*. O *Node-Red* acessa o *Application Server* através de API de inte-

gração capturando as informações, salvando no banco de dados e disponibilizando os dados no *dashboard* aos usuários.

Uma visão física da arquitetura descreve como o design do sistema, conforme descrito nas três visões anteriores, é transformado em entidades do mundo real [47]. Os diagramas nesta exibição mostram como as partes abstratas são mapeadas na implementação final. Os diagramas de implantação podem ser observados na Figura 9, na qual estão definidos os hardwares necessários para a execução da arquitetura.

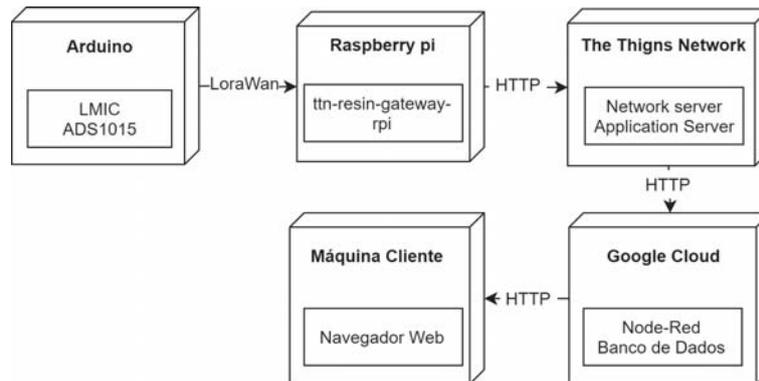


Figura 9. Diagrama de Implantação

Para execução da arquitetura são necessários alguns *hardwares*, iniciando pelos dispositivos que podem ser *Arduínos* ou *ESP32*, pois têm compatibilidade com o *framework* de programação *Arduino* e com a biblioteca *LMIC*. Para o *gateway* é necessário uma placa *Raspberry pi*. O *Network Server* e *Application Server* executam sobre a plataforma *The Things Networks*, assim o hardware necessário é abstraído para a plataforma. Na execução do *Node-Red* e banco de dados é utilizado uma máquina virtual na plataforma do *Google Cloud*. Para consulta do *Dashboard* pelo cliente é necessário um computador ou *smartphone* com capacidade de executar um navegador *web*.

3.1.1 Dispositivos

Os dispositivos foram desenvolvidos com a premissa de uma codificação enxuta, com baixo consumo de energia e com custo financeiro reduzido, assim foi utilizado a *framework Arduino* para alcançar esses objetivos. A simplicidade na codificação permite que outros desenvolvedores implementem novos dispositivos utilizando a mesma estrutura do código principal, alterando apenas a coleta das informações dos sensores.

No entanto, o ambiente de desenvolvimento do *Arduino IDE* muitas vezes acaba sendo limitado em alguns aspectos, por exemplo como ferramenta para *debug* e organização de bibliotecas por projeto, assim foi utilizada uma alternativa, o *platformio* [48]. Ele é um ecossistema para desenvolvimento de IoT e permite desenvolver em vários *frameworks* e plataformas de diferentes *hardwares* em um único ambiente. Além disso, o *platformio-ide* pode ser executado em

conjunto com o *Atom*, que é um editor de texto com suporte a várias linguagens de programação, de código aberto, multiplataforma, com uma gama de *plug-ins*, sendo atualmente mantido pelo *GitHub* [49].

O grande desafio para o desenvolvimento dos dispositivos é adquirir noções básicas de eletrônica para a montagem e a documentação, além de explorar um novo ambiente de programação. Para isso foi utilizado a ferramenta de CAD *Fritzing*, ela é de código aberto, multiplataforma e possui vários componentes de hardware já prontos. Para mais, conta ainda com auxílio da comunidade em fórum de discussão, criando um ecossistema criativo que permite aos usuários documentar seus protótipos e componentes compartilhando no ambiente. É importante ressaltar que o *Fritzing* é utilizado desde os fundamentos para ensinar eletrônica em uma sala de aula até a fabricação de placas de circuito impresso profissionais. [50].

Os módulos Lora são responsáveis pelo envio dos pacotes através de radiofrequência e necessitam ser certificados pela *Lora Alliance* [28] para garantir a compatibilidade com a rede *LoRaWan*. Foram utilizados no trabalho três tipos de equipamentos: *RFM95*, *TTGO Lora* e *Shield Lora Dragino* que podem ser observados na Figura 10.

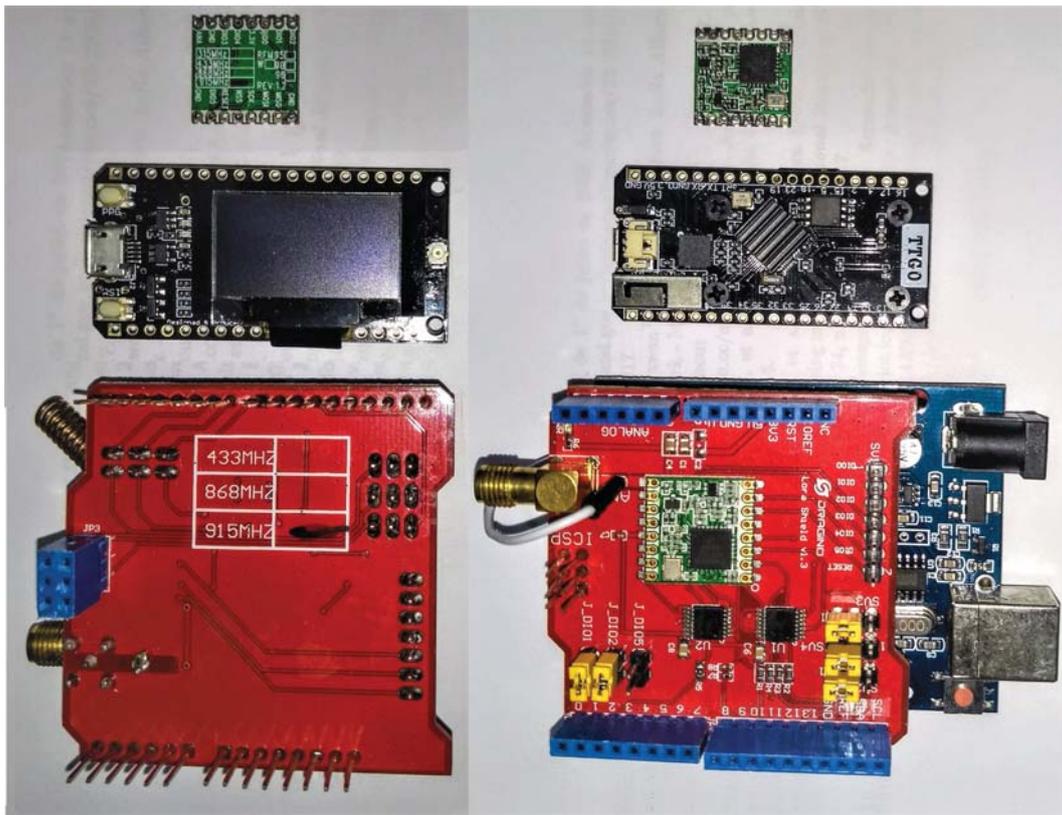


Figura 10. Módulos Lora utilizados na pesquisa

O *Shield Lora Dragino* tem o formato próprio para ser encaixado sobre um *arduino UNO*, facilitando a criação de protótipos, pois já possui o conector SMA para antenas. Alguns pinos do *Shield* estão redirecionados para o módulo *RFM95*, que está no centro da placa, assim estão inutilizados para outros usos, como, por exemplo, os pinos digitais 2,6,7,8,9 [51].

Já o módulo *HopeRF RFM95* possui tamanho reduzido, 16x16mm, oferece comunicação de espectro disperso de longo alcance e alta imunidade a interferências, minimizando o consumo de energia. Pode alcançar a sensibilidade de mais de -148dBm, combinado com o amplificador de potência integrado de +20 dBm, tornando-o ideal para qualquer aplicação que exija alcance ou robustez e baixo custo [52]. O *Shield Lora Dragino* também utiliza o *HopeRF RFM95*, assim possui as mesmas características de sensibilidade e potência. Entretanto, a vantagem de utilizar apenas o *RFM95* dá-se na otimização de espaço já que não possui o tamanho mínimo, 62 mm x 43 mm, para o encaixe sobre a placa *Arduino Uno*. Contudo, a desvantagem é a necessidade de fazer todas as ligações físicas entre o módulo, o microcontrolador e a antena.

Por sua vez, a placa *Lilygo TTGO Lora* possui um microcontrolador ESP32, *dual-core*, com *clock* de 240MHz, SRAM de 520 KB integrado, módulo Wi-Fi e Bluetooth. Também possui um módulo Lora baseado no *Semtech SX1278*, com -148dBm de sensibilidade e +20 dBm de potência e já possui um conector de antena *IPEX*. A versão adquirida no projeto possui ainda *display oled* de 0.96 polegada que permite exibir algumas informações no dispositivo.

Logo, as antenas utilizadas nos dispositivos devem ser adequadas para a propagação da radiofrequência em 915 MHz. Na Figura 11 são apresentados três modelos de antenas que foram utilizadas no decorrer do projeto para os dispositivos:

- Antena Helicoidal 915MHz - SW915-TH12
- Antena de 46mm
- Antena de 90mm, com ganho de 2.5 dBi 900 a 925 MHz



Figura 11. Antenas utilizados na pesquisa

Todos os modelos de antena se mostraram satisfatórios na transmissão de curtas distâncias, até 400 metros. Porém, a partir dessa distância a antena de 90mm se mostra mais confiável.

A biblioteca *LMiC* foi desenvolvida inicialmente pela IBM para módulos *LoRa Semtech SX1272/SX1276* e *HopeRF RFM92/95*, mas atualmente foi modificada pela comunidade em re-

positórios *fork* do original, sendo possível, de forma relativamente simples, integração com o *Arduino*. Também fornece uma implementação *LoRaWAN* Classe A e Classe B bastante completa, suportando os planos de frequência de *EU-868* e *US-915*, mesmo não sendo a implementação completa, os recursos são satisfatórios [53].

- Envio de pacotes para o *uplink*, levando em conta o *duty cycle*.
- Criptografia e verificação de integridade de mensagens.
- Recebimento de pacotes de *downlink* na janela do RX2.
- Frequências personalizadas e configurações de *datarate*.
- Autenticação OTAA.

Todos esses recursos combinados são necessários para a construção de dispositivos para a comunicação da rede *LoRaWan*. Entretanto, ainda pode ser necessário alguns componentes e bibliotecas adicionais para a implementação dos sensores em cada projeto.

3.1.2 Gateway

O *gateway* tem como principal função encaminhar os pacotes *Lora* para o *network server*, para isso é composto essencialmente por um concentrador *Lora* e hardware capaz de enviar os pacotes via *WiFi*, *Ethernet* ou rede celular. No decorrer do trabalho foram implementados dois *gateway*, o primeiro é um *Single-channel*, que opera apenas um canal e o outro é *multi-channel*.

O *gateway Single-channel* possui como microcontrolador uma placa *ESP32* conectada a uma placa *Dragino Lora Hat*, executando o *firmware ESP-1ch-Gateway-v5.0* [54] com algumas modificações e configurações para a placa utilizada. Esse *firmware* começou a ser desenvolvido como uma prova de conceito para comprovar que um único chip *RFM95* de baixo custo poderia ser usado como uma alternativa barata para os *gateway LoRa*, muito mais caros que estavam utilizando o *Semtech SX1301* [54]. Atualmente, tem suporte a um único canal *Lora*, operando sobre os microcontroladores *ESP8266* e *ESP32*, implementando um *gateway* padrão *LoRa*, mas não é um *gateway* completo, pois a quantidade mínima de frequências para um *gateway* completo é três.

O segundo *gateway* é um *multichannel*, ou seja, opera em vários canais simultâneos, sendo montado com uma placa *Raspberry Pi 3*, uma antena de fibra de vidro de 6dbm e o concentrador *LoRa RAK831*. É compacto, modular e possui a seguinte especificação:

- Base no *Semtech SX1301*.
- Sensibilidade abaixo de -142,5 dBm.
- Suporta as bandas de frequência 433 / 868 / 915 MHz.

- Interface USB e SPI.
- Potência de saída até 23 dBm
- Alcance até 15 km, com linha de visada.
- Suporta 10 canais (8 canais *down* e 1 canal *up*) e 1 canal FSK.
- Faixa de temperatura de -40 a 85 °C.
- Tamanho compacto 80,0 x 50,0 x 5,0 mm.



Figura 12. Gateway *multichannel* construído

O *firmware* para esse *gateway* é baseado no projeto *ttn-resin-gateway-rpi*, que é o encaminhador de pacotes *Lora* para o *network server*. Esse projeto já encaminha por padrão os pacotes ao *The Things NetWork*. Outro recurso desse *firmware* é sua execução sobre a lógica de contêineres *Docker*. Na documentação no *The Things NetWork* é recomendado utilizar o *Resin.io*, que é uma plataforma que utiliza o conceito de contêineres para gerenciamento de dispositivos remotamente. O foco principal do *Resin.io* é *hardwares* para IoT, tendo como principal placa a *Raspberry pi* [55].

3.1.3 Plataforma

*The Things Network*¹ é uma plataforma e uma comunidade para compartilhamento de *gateways* e informações sobre a tecnologia *LoRaWan*. Os sistemas *backend* da *The Things Network* são responsáveis pelo roteamento de dados de IoT entre os dispositivos e a aplicação.

¹<https://www.thethingsnetwork.org>

Uma rede típica de IoT requer *gateway* como uma ponte entre protocolos de rádio específicos e a Internet. Nos casos em que os próprios dispositivos suportam a pilha de TCP/IP, esses *gateways* só precisam encaminhar pacotes para a Internet. Os protocolos não IP, como o *LoRaWAN*, exigem alguma forma de roteamento e processamento antes que as mensagens possam ser entregues na aplicação[39]. A Figura 13 representa a estrutura de *backend* da *The Things Network*.

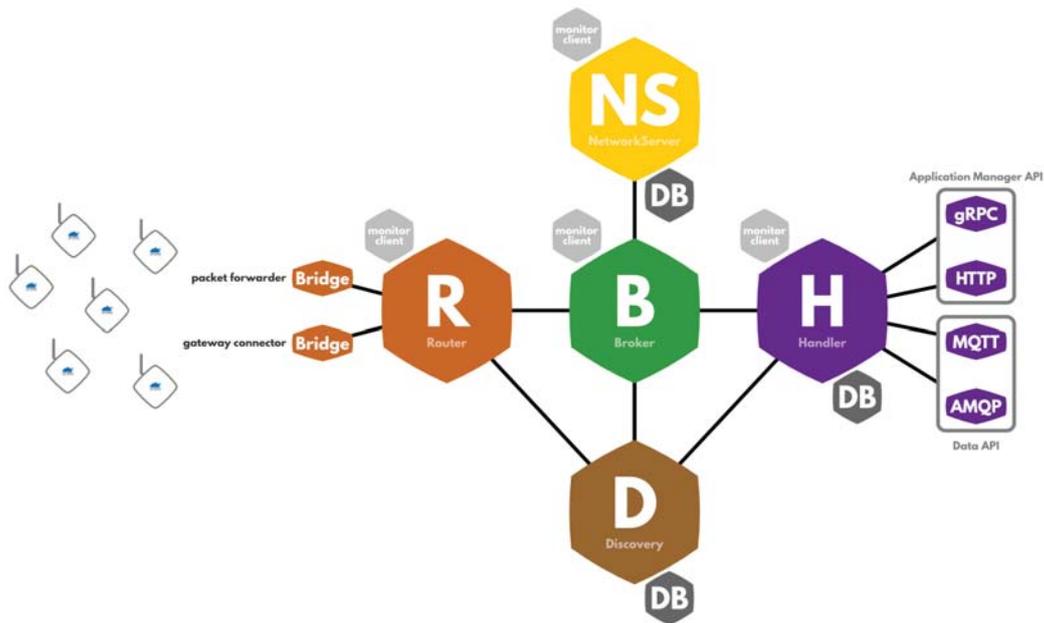


Figura 13. Visão Geral do *backend* da plataforma The Things Network [39]

Os dispositivos transmitem mensagens *LoRaWAN* que são recebidas por vários *gateways*, esses encaminham as mensagens para o *The Things Network*, recebida pelo *router* que é responsável pelo gerenciamento do status do *gateway* e pelo agendamento de transmissões. Cada *router* está conectado a um ou mais *brokers*, esses são a parte central da *The Things Network*, pois têm como função mapear o dispositivo para a aplicação, encaminhar mensagens de *uplink* para a aplicação correta e encaminhar mensagens de *downlink* para o *router* correto, que as encaminha para um *gateway*.

O *Network Server* é responsável pela funcionalidade específica do *LoRaWAN*. Um *Handler* é responsável por manipular os dados de um ou mais aplicativos. Para fazer isso, ele se conecta a um *Broker*, onde registra aplicativos e dispositivos. Ao serem processados pelo *Handler*, os dados são criptografados ou descriptografados [56].

Para mais, o objetivo da *The Things Network* é ser muito flexível em termos de opções de implantação, assim permite conectar-se à rede da comunidade pública hospedada pela *The Things Network Foundation* ou, também, é possível implantar redes privadas, executando todos esses componentes em um ambiente privado [56].

A *The Things Network* define o *LoRaWAN* como um protocolo "intensivo em rede", intensivo no sentido de que, devido a abordagem simples e minimalista para os dispositivos,

os sistemas *Network Servers* são responsáveis pela maior parte da lógica. Portanto, pelo fato do *LoRaWAN* ter sido projetado para a arquitetura centralizada, para funcionar em uma infraestrutura distribuída como a *The Things Network* algumas etapas tiveram que ser adicionadas [56].

Em primeiro lugar, existem funções relacionadas ao *gateway*, como o agendamento e o gerenciamento da utilização. O agendamento é necessário porque um *gateway* só pode fazer uma transmissão por vez. Já as informações de utilização são usadas para distribuir uniformemente a carga em diferentes *gateways* e para estar em conformidade com as limitações dos ciclos de serviço de cada região [56].

Outras funções adicionadas gerenciam o estado dos dispositivos na rede. Como o endereço do dispositivo não é exclusivo, a rede precisa controlar quais endereços são usados pelos dispositivos para mapear uma mensagem para o dispositivo e aplicação correta, assim como a rede deve monitorar as chaves de segurança e os contadores de quadros de cada dispositivo [56]. Também foram adicionadas algumas funcionalidades relacionadas aos aplicativos, como, por exemplo, os *Handler*, que interpretam os dados binários e realizam a ponte para protocolos de camada superior, como AMQP e MQTT [56].

Finalmente, e mais importante, como a *The Things Network* é uma rede distribuída, tem que existir uma funcionalidade que suporte essa distribuição. A funcionalidade de descoberta, *Discovery*, ajuda os componentes a determinar para onde o tráfego deve ser roteado. Atualmente, isso é implementado como um servidor de detecção centralizado, dando ao *The Things Network Foundation* o controle sobre quais componentes têm permissão para acessar serviços específicos [56].

3.1.4 Banco de Dados

Os gerenciadores de bancos de dados relacionais são amplamente usados na maioria das aplicações e têm bom desempenho para manipular uma quantidade limitada de dados. Entretanto, com um grande volume de dados como internet, multimídia e mídias sociais, o uso de bancos de dados relacionais tradicionais é ineficiente [57].

O *MongoDB* é diferente dos bancos de dados relacionais tradicionais, pois os dados não são armazenados usando estruturas de tabela de colunas fixas. O principal objetivo do banco de dados *MongoDB* é servir como alternativa aos bancos de dados tradicionais em aplicações com grande volume e alto número de acessos simultâneos [58].

É um sistema de gerenciamento de banco de dados NoSQL lançado em 2009, trabalha armazenando dados como documentos semelhantes a *JSON* com esquemas dinâmicos (o formato é chamado *BSON*). Seu foco é voltado para quatro questões: flexibilidade, poder, desempenho e facilidade de uso. Também suporta indexação replicados e oferece *drivers* para várias linguagens de programação.[58].

Por fim, o *MongoDB* foi utilizado no projeto para armazenar os dados capturados pelos dispositivos, inicialmente por não necessitar de tratamento ou conversão, podendo os arquivos *JSON* serem, simplesmente, inseridos na base de dados.

3.1.5 Aplicação

O Node-RED é uma ferramenta originalmente desenvolvida pela equipe de Serviços de Tecnologia Emergentes da IBM, mas atualmente é mantida pela Fundação JS. Ela utiliza como conceito principal a Programação Baseada em Fluxo, que foi definida por J. Paul Morrison na década de 1970, e se baseia em que programas de computador são modelados como gráficos direcionados conectando redes de nós de "caixa preta" que trocam dados ao longo de arcos conectados. Esse paradigma simples, embora não necessariamente expresso visualmente, é o cerne de várias linguagens de programação visual [59]. Além disso, por ser um modelo com apelo à representação visual, torna-se mais acessível a uma ampla gama de usuários. Pode, ainda, dividir um problema em etapas discretas, permitindo analisar um fluxo e ter uma noção do que está sendo realizado, sem ter que entender as linhas individuais de código dentro de cada nó [60].

Para mais, o editor de fluxo do Node-RED é executado diretamente no navegador Web, sendo implementado em *JavaScript* usando a estrutura do *Node.js*, aproveitando o modelo de evento interno do *Node* e o suporte nativo para *JavaScript* no editor do cliente e no servidor[59].

Salienta-se que no decorrer do projeto foram criados vários fluxos para as aplicações, a Figura 14 é um exemplo de fluxo em que os dados dos dispositivos são capturados via *plugin* do Node-Red da API do *The Things Network*, representados pelos nós azuis [61]. Em seguida são tratados em um nó para armazenar todas as informações do pacote *LoRaWan*, e não apenas o conteúdo da mensagem e, por fim, persistido no banco de dados *MongoDB*, no caso representado pelo nó *ibm-bluemix sensores*.

Enfim, para a exibição dos dados em *dashboard* foi utilizado o *plugin node-red-dashboard* [62], que permite criar painéis informativos com dados em tempo real. A Figura 15 é um exemplo de fluxo onde são tratados os eventos da página web, criado as consultas para o banco de dados *MongoDB* e formatando os dados para serem exibidos em tabelas e gráficos no *dashboard*, Figura 16.

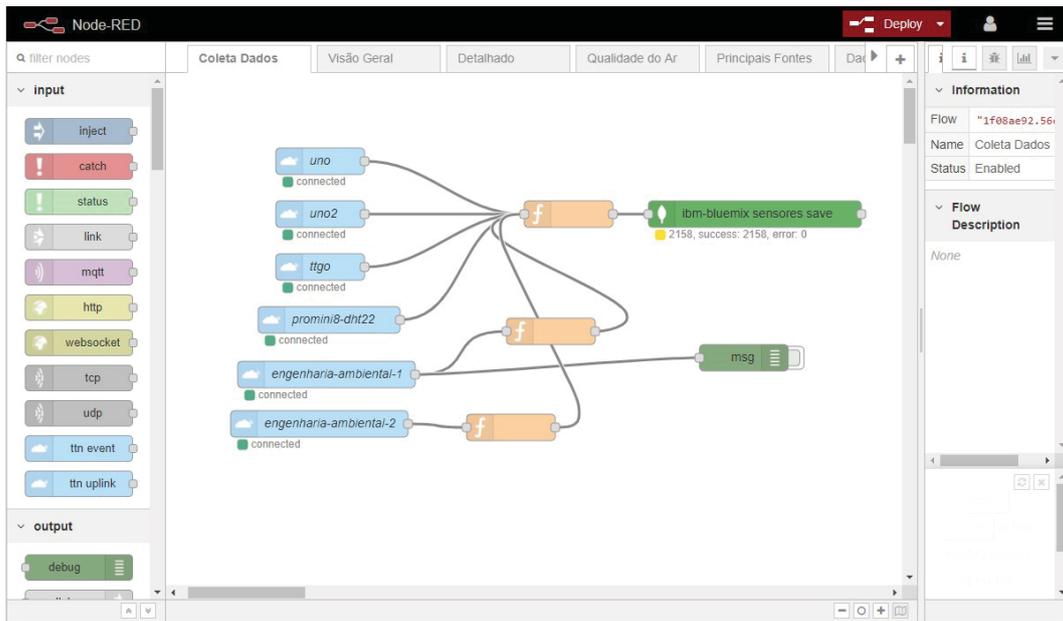


Figura 14. Fluxo desenvolvido no Node-Red para salvar dados coletados

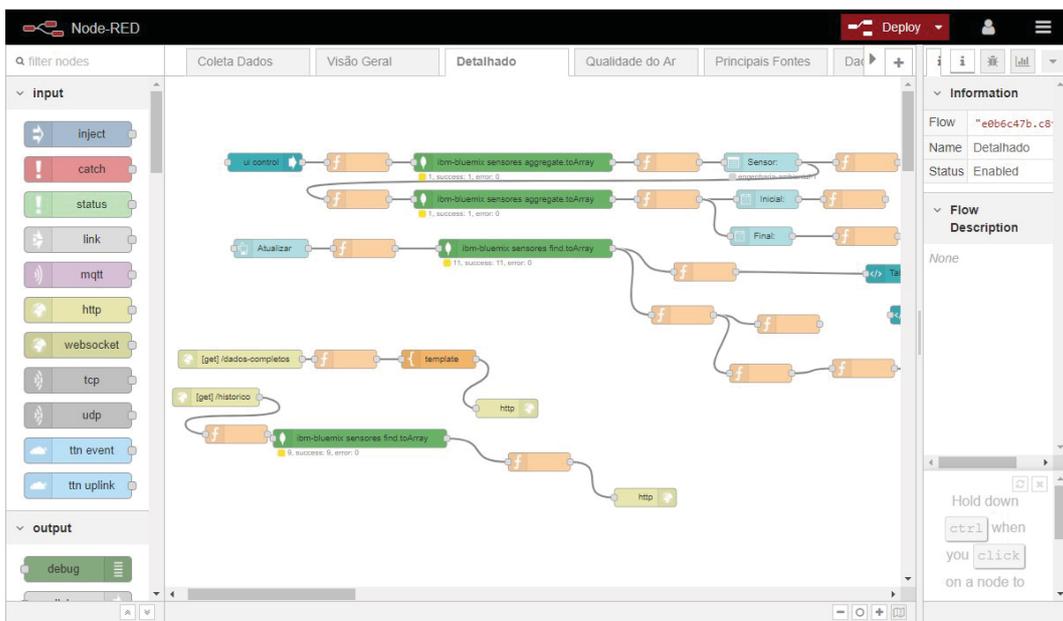


Figura 15. Fluxo desenvolvido no Node-Red para consultar dados

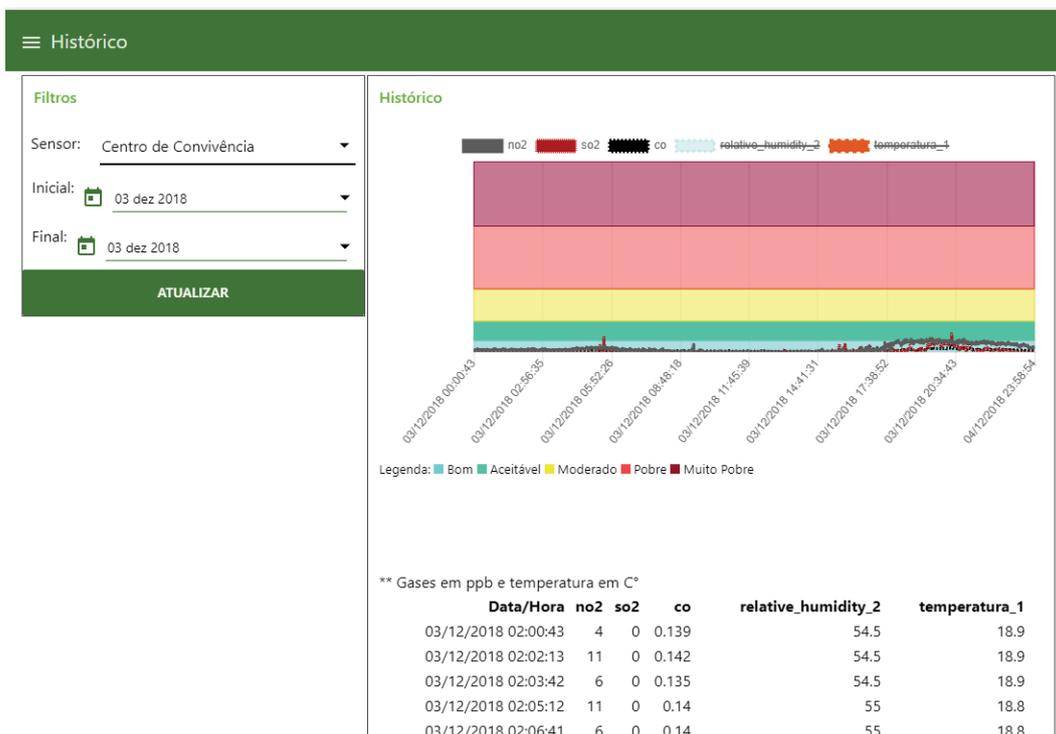


Figura 16. Dashboard desenvolvido no Node-Red

4. EXPERIMENTOS E ANÁLISE DE RESULTADOS

Nesse capítulo será explanado sobre os experimentos realizados, os dados coletados e a análise dos resultados obtidos na avaliação da arquitetura, realizando, também, uma comparação com outras tecnologias que poderiam ter sido adotadas.

4.1 PROTÓTIPOS

O primeiro protótipo testado em campo foi baseado em um contador de veículos para contabilizar quantos deles entravam no campus da UPF pelo pórtico principal. O objetivo foi validar a estabilidade da rede, as perdas de pacote, além, é claro, de capturar informações relevantes sobre a entrada de veículos para o setor de segurança e para a análise em projetos de outros cursos da UPF.

A Figura 17 demonstra um diagrama de fluxo simplificado, com o algoritmo do sensor em destaque na cor amarela, o layout da mensagem enviada pelo sensor, a autenticação e conversão da mensagem na plataforma *The Things Network* em azul e, por fim, em vermelho a aplicação implementada em *Node-Red*.

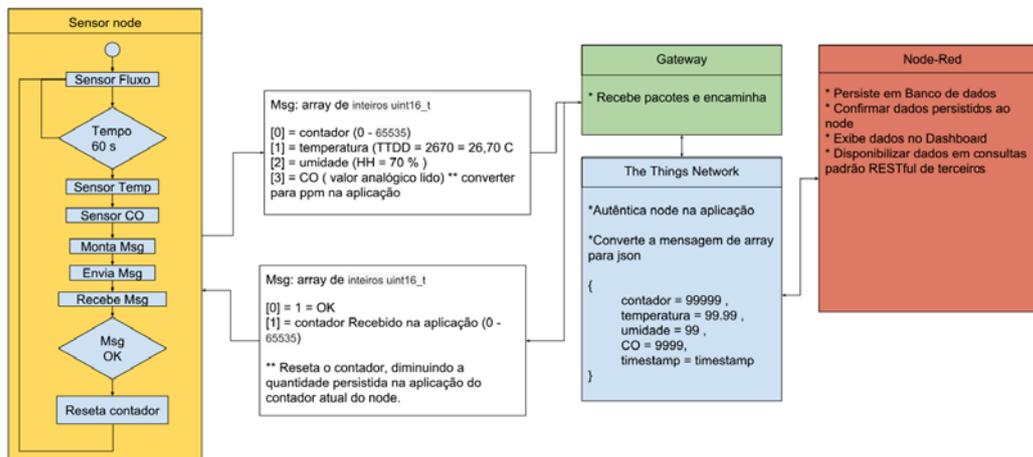


Figura 17. Contador de Veículos Visão Geral

Nesse protótipo foi necessário a instalação do *gateway LoRaWan* na estrutura física da UPF, entretanto, como o projeto estava na fase inicial, foi decidido que seria instalada *indoor*, para facilitar as manutenções. Na figura 18 pode ser observado o equipamento instalado no interior da salas do Instituto de Ciências Exatas e Geociências, ICEG.

Para tanto, antes da montagem e codificação do dispositivo, foi realizada a montagem projeto utilizando o aplicativo *fritzing*. A figura 19 demonstra a *breadboard view* do projeto que consiste em: 1. Arduino Pro Mini, 2. DHT22, 3. MPX5700DP, 4. MQ-7, 5. Módulo Lora RFM95, 6. Antena, 7. Fonte de Energia. 8. Chave On/Off.



Figura 18. Protótipo do Gateway instalado no interior da UPF

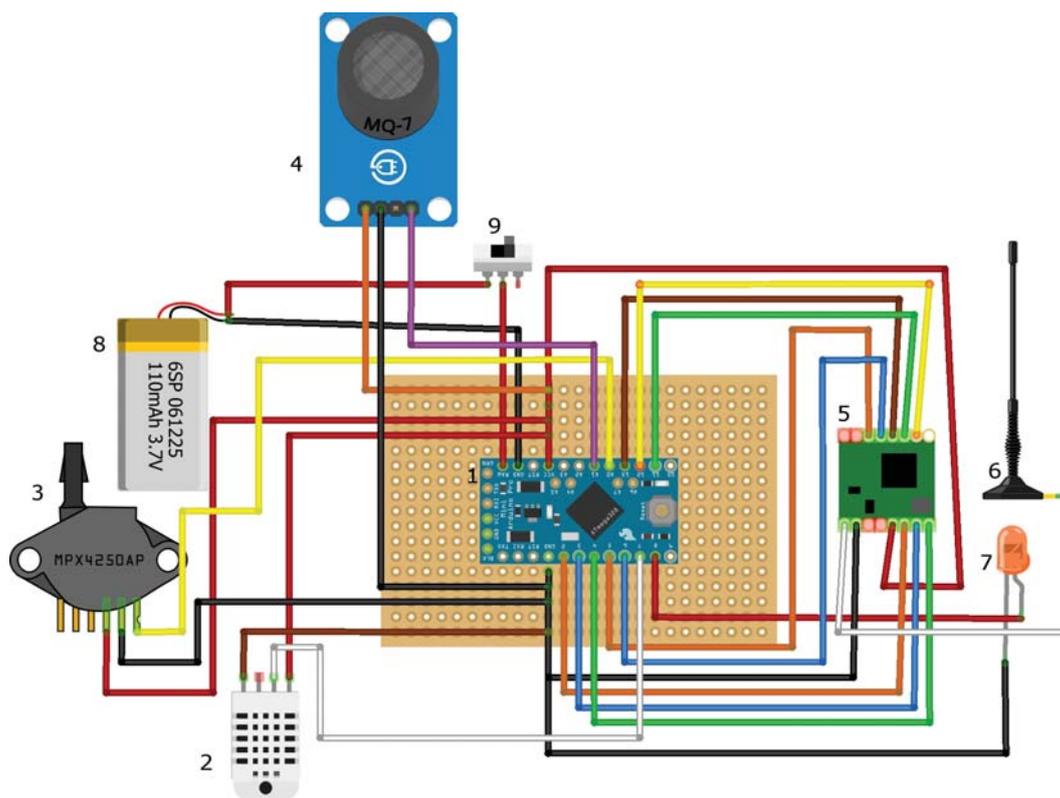


Figura 19. Breadboard View do dispositivo Contador de Veículos

O princípio para a contagem dos veículos consiste na medição constante da pressão interna de uma mangueira de jardim através do sensor MPX5700DP. A leitura ocorre em *loop*

com *delay* de 1ms, onde é realizado a média dos 50 últimos valores lidos, em seguida verifica-se se este valor é maior que a média global, mais o *offset* 3, se sim atribui a variável *car* como verdadeiro, indicando se o eixo dianteiro do veículo passou sobre a mangueira. Repetindo o processo variável *car* estando verdadeira, é acrescido 1 na quantidade de veículos e variável *car* marcada como falso.

A cada minuto é enviado um pacote contendo o número de veículos, a temperatura, a umidade e o valor analógico do sensor MQ-7. Inicialmente foi implementado com a confirmação de entrega do pacote. Entretanto, durante o tempo em que o dispositivo ficava ocioso aguardando o retorno, acabava-se perdendo muitas contagens de veículos, assim foi removido a confirmação de entrega.

No protótipo desenvolvido todos os dados dos dispositivos são persistidos na mesma *collection* no banco de dados, pois permite gravar dados que não estejam na mesma estrutura, porém, pode dificultar as consultas posteriormente. Um *collection* é equivalente a uma tabela em um banco de dados relacional. Na aplicação do contador de veículos a estrutura de dados segue o seguinte padrão simplificado na Figura 20:

```

1 {   "co":232,
2     "humidity":71.6,
3     "temperature":30.3,
4     "timestamp":1523624217823,
5     "traffic":0
6 }
```

Figura 20. Estrutura de dados contador de veículos

Os campos na estrutura *JSON* representam:

- *CO*: valor analógico(0-1023) do sensor de CO
- *Humidity*: percentual de umidade relativa do ar
- *Temperature*: temperatura em graus celsius
- *Timestamp*: data e hora no formato long
- *Traffic*: número de veículos acumulado último minuto

O experimento foi instalado no dia 26 de abril de 2018 e ficou em operação até o dia 14 de maio de 2018. A instalação do equipamento pode ser observada na Figura 21, na qual observa-se o dispositivo fixado no suporte da cancela, conectado à mangueira que se estende de uma extremidade a outra da via.

Já os custos dos componentes podem ser observados na Tabela 2 com os valores em dólares, tendo como componente de maior custo o sensor de pressão MPX5700DP.



Figura 21. Instalação do Contador de Veículos

Tabela 2. Custos dos componentes do dispositivo contador de veículos

Item	Componente	Custo	Quantidade	Custo Total
1	Arduino Pro Mini	U\$ 2	1	U\$ 2
2	DHT 22	U\$ 3	1	U\$ 3
3	MPX5700DP	U\$ 9	1	U\$ 9
4	MQ-7	U\$ 2	1	U\$ 2
5	Módulo Lora RFM95	U\$ 5	1	U\$ 5
6	Antena	U\$ 3	1	U\$ 3
7	Fonte de Energia 5V	U\$ 3	1	U\$ 3
8	Chave On/OFF	U\$ 1	1	U\$ 3
	Caixa Plástica	U\$ 2	1	U\$ 2
Total:				U\$ 32

No projeto inicial seria utilizado uma bateria para alimentação do dispositivo, porém isso foi revisto e adaptado para utilização de um carregador de celular como fonte de energia contínua. Visto que não se possuía uma bateria com autonomia suficiente para manter o equipamento operacional por mais de três dias e realizar a troca regularmente também era inviável.

Antes mesmo de realizar a instalação da mangueira, já era esperado que ela não resistisse por muito tempo, estipulava-se uma durabilidade de, em torno, 10 dias. Entretanto, após sete dias foi necessário substituir a mangueira devido ao desgaste causado pelos veículos que transitavam sobre ela. A Figura 22 demonstra o estado da mangueira após esse período.

Uma alternativa para esse problema, seria a utilização de laço indutivo, que é constituído por um conjunto de fios dispostos em formato retangular instalados dentro do pavimento e um módulo que monitora as variações do sinal elétrico, detectando assim, metais que estão sobre o laço. Pelo fato de ser instalado no interior no asfalto, não sofre o desgaste acelerado, como ocorreu com a mangueira. Contudo, nesta fase a validação era temporária e buscava-se a simplicidade na instalação, visto que para instalar o laço indutivo teria que ser cortado uma trilha em formato de retângulo no asfalto, o método utilizado foi efetivo para alcançar os objetivos.

Para mais, ressalta-se que os dados coletados eram roteados pelo *The Things Network* e armazenados na aplicação desenvolvida utilizando o *framework Node-Red*. Posteriormente

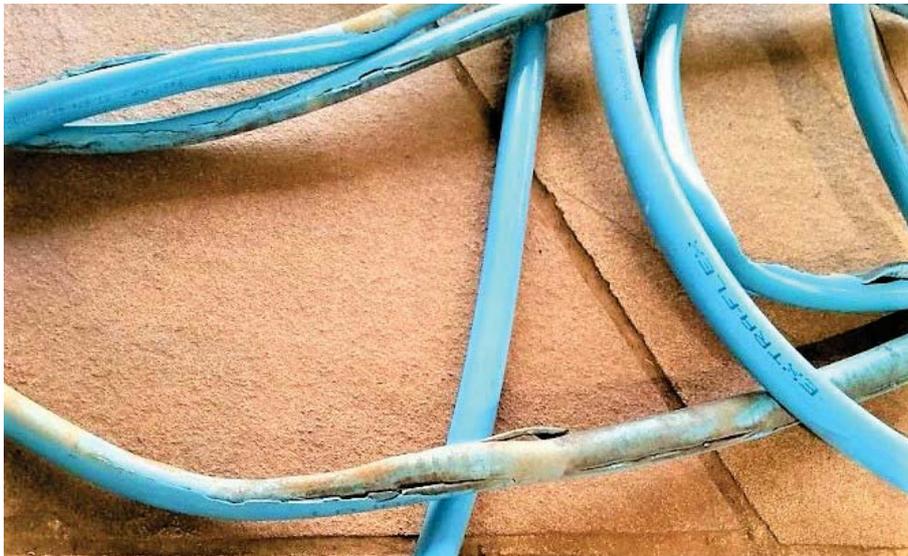


Figura 22. Desgaste da mangueira do Contador de Veículos

eram exibidos em forma de gráfico e tabela com o histórico, permitindo analisar de forma analítica o fluxo de entrada de veículos na UPF. A Figura 23 exemplifica esse painel.

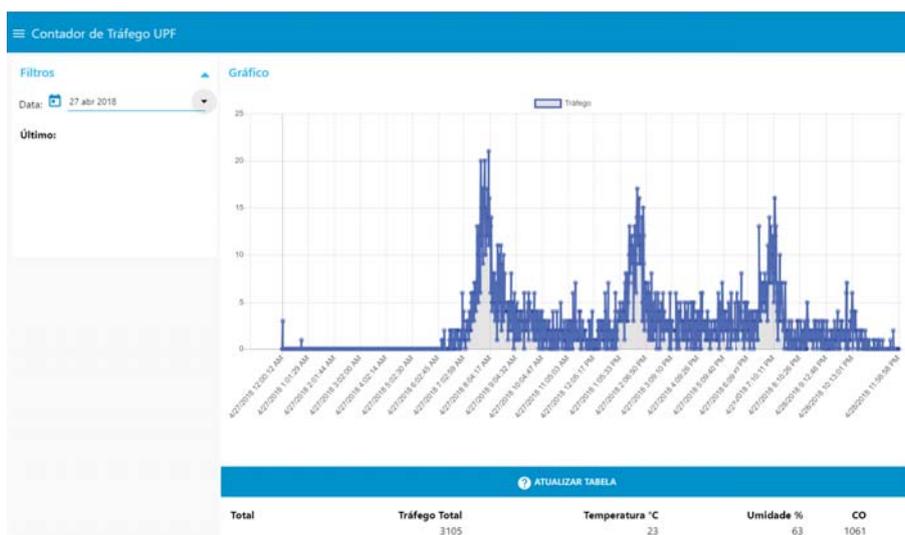


Figura 23. Painel do Contador de veículos

O seguinte experimento desenvolvido focava na autonomia de bateria baseado na coleta de dados simples de temperatura e umidade a cada 1 hora no ambiente externo no campus na UPF. O dispositivo tem a mesma estrutura básica do experimento anterior, porém mais simplificada, contendo os componentes descritos na Tabela 3. Neste dispositivo o componente de maior custo é a bateria.

A Figura 24 representa *breadboard view* do dispositivo do experimento de autonomia de bateria. Os dois resistores formam um divisor de tensão permitindo monitorar de forma simples a tensão da bateria. Foi utilizado a biblioteca *Low-Power* para *Arduino*, criada pela *Rocket Scream*

Tabela 3. Custos dos componentes do dispositivo de autonomia de bateria

Item	Componente	Custo	Quantidade	Custo Total
1	Arduino Pro Mini	U\$ 2	1	U\$ 2
2	DHT 22	U\$ 3	1	U\$ 3
3	Módulo Lora RFM95	U\$ 5	1	U\$ 5
4	Antena	U\$ 3	1	U\$ 3
5	Bateria 3.7 V 850 mha	U\$ 8	1	U\$ 8
6	Chave On/OFF	U\$ 1	1	U\$ 3
7	Resistores	U\$ 1	1	U\$ 3
	Caixa Plástica	U\$ 2	1	U\$ 2
Total:				U\$ 29

[63], que proporciona de forma fácil a otimização de recursos da placa colocando em modo *sleep* que desabilita grande parte dos recursos prolongando muito a autonomia da bateria.

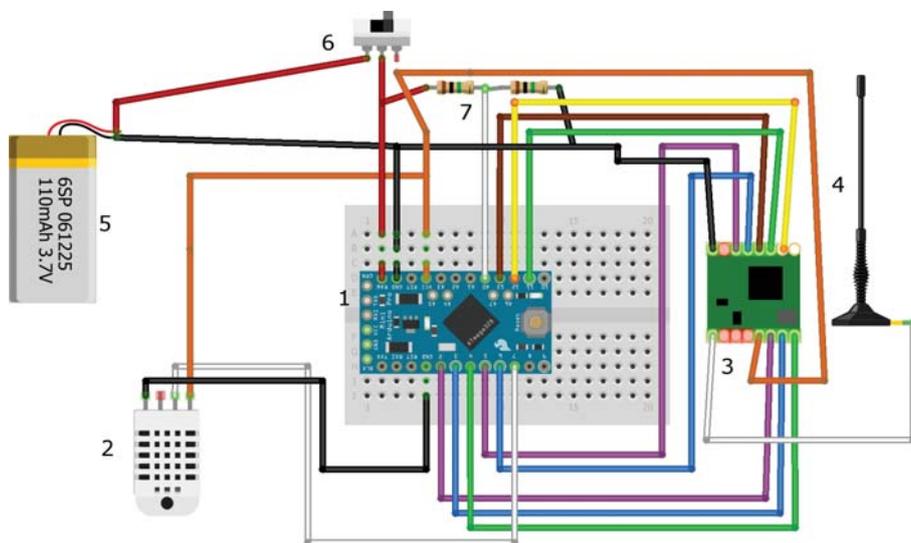


Figura 24. Breadboard view do dispositivo de teste de autonomia de bateria

Através da Figura 25 observa-se que no período de 14 de julho de 2018 a 15 de dezembro de 2018 o decréscimo da tensão de uma bateria de 850 mAh. Sem a utilização da biblioteca a descarga da bateria ocorre em cinco dias.

Nessa fase o *gateway multichannel* definitivo foi instalado no ambiente externo com o auxílio do departamento de manutenção da UPF. Observa-se na Figura 26.

O último experimento consistiu na construção de sensores para medição da qualidade do ar do campus da UPF em parceria com o curso de Engenharia Ambiental. Teve como objetivo analisar como a instalação de uma rede de monitoramento da qualidade do ar em tempo real, em pequena escala, no campus I da UPF, disponibilizando o acesso aos dados para os usuários, pode gerar conhecimento aos visitantes da aplicação e como isso pode contribuir para a construção de um *smart e learning* campus. Inicialmente a pesquisa da Engenharia Ambiental

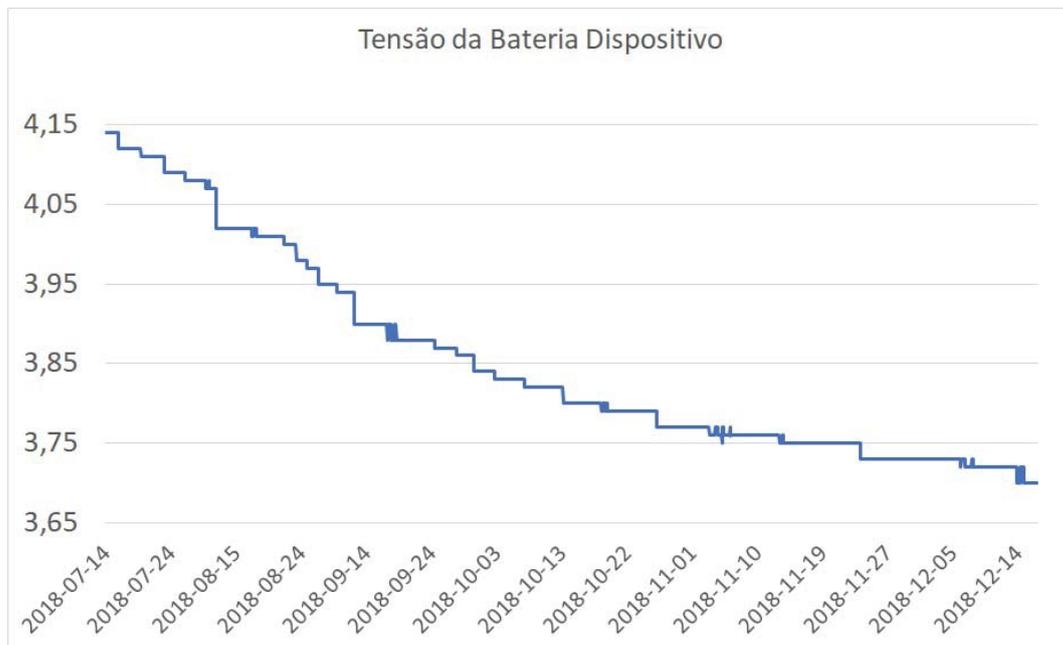


Figura 25. Tensão da Bateria do dispositivo



Figura 26. Gateway final instalado no local externo

Tabela 4. Custos dos componentes do gateway

Item	Componente	Custo
1	Raspberry Pi 3 Modelo B	U\$ 43
2	Cartão SD	U\$ 5
3	LoRa Gateway RAK831	U\$ 120
4	Placa conversão Gateway para RPI	U\$ 10
5	Antena	U\$ 28
6	Caixa Plástica e suporte	U\$ 7
Total:		U\$ 213

utilizaria a coleta de dados manual, através de coletor de dados móvel de alta precisão, contudo, os períodos estariam limitados à disponibilidade do pessoal e do equipamento.

Concomitantemente, a pesquisa tem como um dos objetivos validar a arquitetura proposta em um ambiente real. Assim sendo, nota-se aqui a importância de cooperação com o curso de Engenharia Ambiental. Visto que o trabalho teria benefícios como a utilização de sensores alternativos e de baixo custo, permitiria a coleta de dados de forma intermitente, o que geraria muito mais dados para análise. Além disso, agregaria valor para ambas as pesquisas, pois mesclaria as necessidades e possibilidades que cada projeto já havia desenvolvido até aquele presente momento.

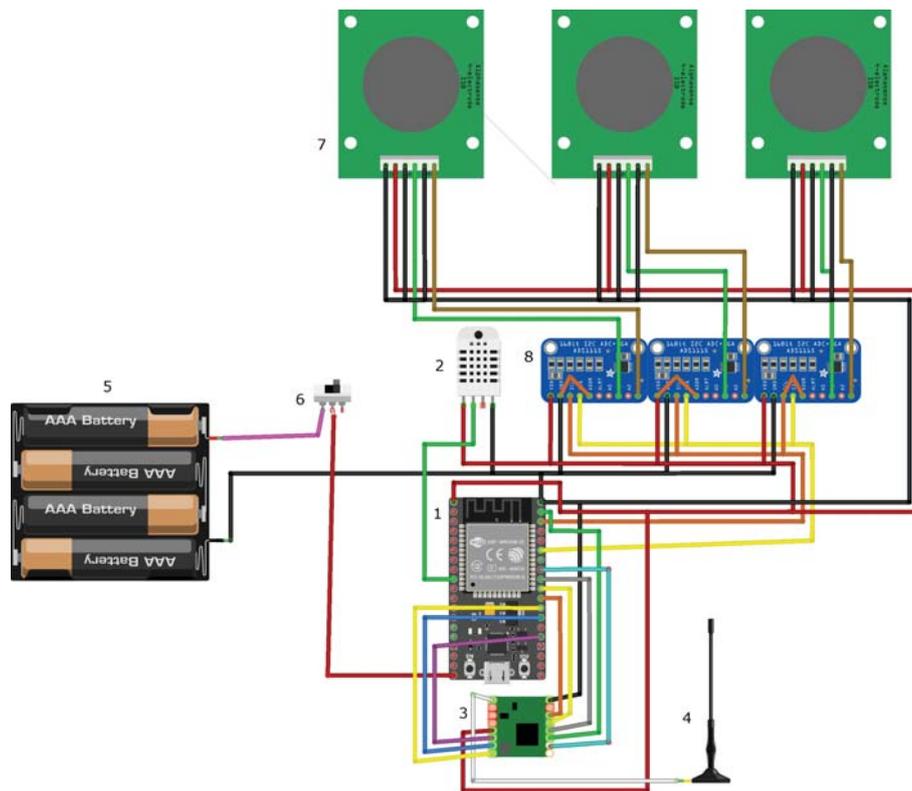


Figura 27. Esquemático do dispositivos com sensores de qualidade do ar

Para mais, ressalta-se que o dispositivo construído nesse experimento foi o mais complexo desenvolvido durante o trabalho e também o de maior custo. Assim, observa-se na Figura 27 o *breadboard view* do dispositivo e na Tabela 5 os custos dos componentes.

Sobre os sensores para coletas dos gases CO , SO_2 e NO_2 , para atender a demanda do projeto de Engenharia Ambiental na precisão dos dados necessários foi indispensável a utilização de equipamentos mais robustos do fabricante *Alphasense*. Visto que é citado em trabalhos [64], [65] e [66] como sendo uma boa solução de sensor para medição da qualidade do ar de baixo custo. Portanto, feita a conversão dos valores da moeda dólar para o real, demonstra-se que não se trata de baixo custo para os padrões brasileiros, além das taxas de importação incidentes.

Os sensores *Alphasense* utilizados são categorizados como eletroquímicos, sendo através de uma tensão elétrica entre dois elétrodos e uma solução eletrólito, calibrada para um gás específico, determina a concentração deste [65]. O sensor *Alphasense* é composto de

Tabela 5. Custos dos componentes do dispositivo de qualidade do ar

Item	Componente	Custo	Quantidade	Custo Total
1	ESP 32	U\$ 5	1	U\$ 5
2	DHT 22	U\$ 3	1	U\$ 3
3	Módulo Lora RFM95	U\$ 5	1	U\$ 5
4	Antena	U\$ 3	1	U\$ 3
5	Fonte de Energia 5V	U\$ 3	1	U\$ 3
6	Chave On/OFF	U\$ 1	1	U\$ 3
7	Placa Individual para Sensor	U\$ 74	3	U\$ 222
8	ADS1115	U\$ 2	3	U\$ 6
9	Sensor Alphasense CO-B4	U\$ 51	1	U\$ 51
10	Sensor Alphasense SO2-B4	U\$ 51	1	U\$ 51
11	Sensor Alphasense NO2-B42F	U\$ 51	1	U\$ 51
	Caixa Plástica e suporte	U\$ 7	1	U\$ 7
	Total:			U\$ 410

duas partes, o sensor em si que possui a solução eletrólito, que tem vida útil de dois anos, já a outra parte é a placa individual do sensor, *Individual Sensor Board*, ISB. Ao fim da vida útil deve ser trocado apenas o sensor, destacando do ISB e não interferindo no placa de circuito elétrico.

Para a leitura dos dados de cada sensor através da placa ISB são utilizados dois pares de portas analógicas, cada par é referente a um eletrodo da placa ISB. Trata-se de *We*, eletrodo de trabalho e *AE*, eletrodo auxiliar. A sensibilidade dos sensores é bem alta, no caso do NO_2 1 milivolt equivale a 0,215 partes por bilhão do gás. Assim, para a construção desse dispositivo foi necessário utilizar o conversor analógico digital ADS1115 com 16 bits para se ter uma leitura com maior precisão dos dados gerados pelos sensores.

Portanto, foram construídos dois equipamentos idênticos nesse experimento e instalados em locais de grande circulação no campus I da UPF. A figura 28 tem uma visão da montagem final do equipamento com a tampa aberta, a caixa também possui aberturas laterais para os sensores ficarem expostos ao ar que será monitorado.

Ademais, nesse experimento também foi necessário o desenvolvimento de *dashboard*, observado parcialmente na Figura 29, para a interação com os usuários. Visto que um dos objetivos para a pesquisa realizada no curso de Engenharia Ambiental era permitir o acesso em tempo real e a geração de conhecimento para os usuários, com informações relacionadas à qualidade do ar, quais os problemas que cada poluente pode causar à saúde, as principais fontes de emissão e algumas práticas para reduzi-la [67].

A aplicação denominada *Smart e Learning Campus UPF* foi divulgada internamente na universidade por cartazes com *QR Codes* espalhados pelo campus, através de e-mails e participações em programas de rádio [68]. Ao acessar o site pelo *smartphone* o usuário é apresentado ao projeto, navega por algumas páginas com informações e responde a alguns questionamentos e, por fim, acessa o painel com os indicadores atuais dos gases. As informações sobre os gases, efeitos e formas de prevenção foram produzidas pela aluna Janaina Mazutti do curso de

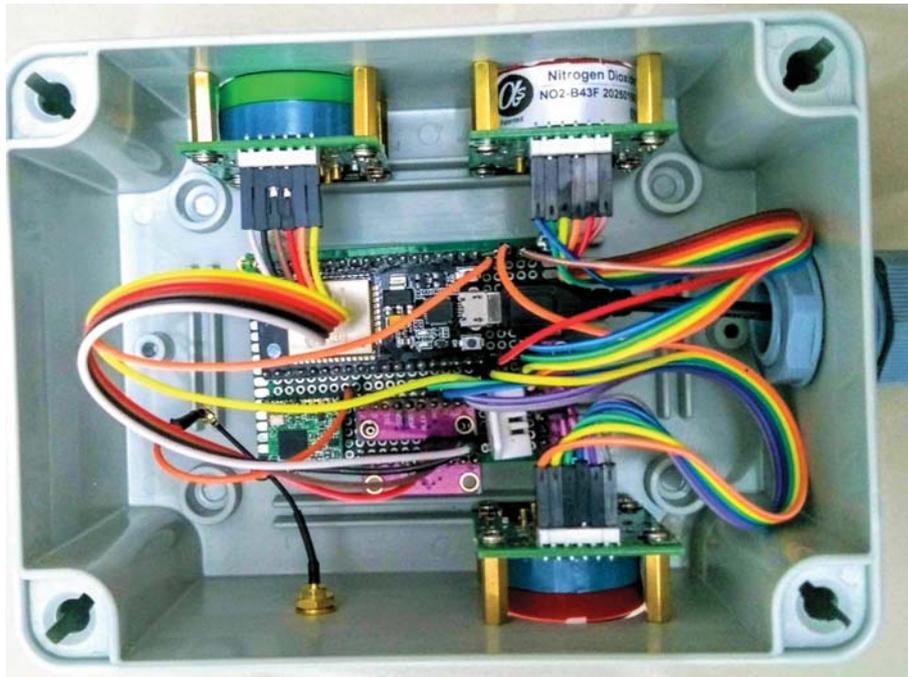


Figura 28. Dispositivo montagem da placa e sensores de qualidade do ar

Engenharia Ambiental da UPF [67]. Ao acessar a aplicação por um *desktop* os usuários têm acesso ao histórico dos dados formatados em tabela ou gráfico indicando a qualidade do ar dentro da escala segundo o *European Air Quality Index*, [69], conforme observado na Figura 16. O *Smart e Learning Campus UPF* foi divulgado de forma ostensiva nos meses de outubro e novembro, atraindo 459 visitas únicas e 939 acessos. Os dados de acesso foram monitorados pela ferramenta do *Google Analytics* que gera várias estatísticas sobre os acessos de forma gratuita [70].

Apresentação

Projeto "Smart e learning Campus"

QUÃO LIMPO É O AR QUE VOCÊ RESPIRA?

Este projeto tem o objetivo de monitorar a qualidade do ar no campus I da UPF e informar sobre as concentrações dos poluentes atmosféricos dióxido de nitrogênio (NO₂), dióxido de enxofre (SO₂) e monóxido de carbono (CO) presentes no ar que você respira na Universidade.

Clique aqui para conferir o Índice da Qualidade do Ar no campus em tempo real e contribuir com a pesquisa

Principais fontes de emissão

Principais fontes de emissão

Clique nas imagens para ter acesso às informações



Fonte: EPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos)

[Continuar](#)

Dióxido de Enxofre (SO₂)

Queima de combustíveis fósseis, originários de petróleo, como gasolina e diesel.

[Fechar](#)



Fonte: EPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos)

[Continuar](#)

Índice de qualidade do ar em tempo real - Mobile

Parada de Ônibus	Centro de Convivência
<p>CO: 0.09 ppm</p> <p>SO₂: 84 ug/m₃</p> <p>NO₂: 0 ug/m₃</p> <p>HISTÓRICO</p> <p>13/12/2018 10:27:22</p> <p>Legenda: Bom Aceitável</p>	<p>CO: 0.125 ppm</p> <p>SO₂: 37 ug/m₃</p> <p>NO₂: 0 ug/m₃</p> <p>LOCALIZAÇÃO PONTOS</p> <p>13/12/2018 10:19:59</p> <p>Legenda: Moderado Pobre Muito Pobre</p>

Figura 29. UPF Smart Campus

4.2 AVALIAÇÃO DA ARQUITETURA

Na avaliação da arquitetura é analisado se os requisitos da arquitetura foram atendidos e se os protótipos e experimentos desenvolvidos tiveram sua implementação atendidos pelos recursos da arquitetura. A seguinte avaliação foi dividida em partes que avaliam os aspectos dos dispositivos, *gateway*, *network server* e aplicação.

Para os dispositivos a baixa complexidade de implementação e construção são objetivos na arquitetura proposta. A codificação para as três placas utilizadas nos dispositivos do projeto não possuem nenhuma diferença, pois ambas utilizam o *framework arduino*, assim as bibliotecas para os sensores e módulo *LoRaWan* também são compatíveis. Entretanto, a diferença entre as placas e os microcontroladores está na estrutura física, tamanho e formas de ligação dos componentes. Deste modo, algumas como a *Lilygo TTGO Lora*, acabam sendo mais adequadas para projetos minimalistas, pois o microcontrolador e módulo *LoRaWan* já estão embarcados na mesma placa.

Ao definir a estrutura do código dos dispositivos essa pode ser replicada para qualquer um dos dispositivos, simplificando muito o desenvolvimento de novos equipamentos. Entretanto, cada sensor possui atributos e comportamentos distintos, assim a codificação e a calibração de cada um deles demanda mais tempo e recursos. Nas tabelas de custos dos dispositivos, expostas nas seções anteriores, mostra-se que os sensores de cada experimento sempre é o componente de maior custo financeiro, principalmente, se é necessário uma maior precisão e confiabilidade. Assim sendo, o baixo custo financeiro para a construção dos dispositivos pode ser alcançado, mas dependerá do propósito da aplicação e da necessidade dos sensores.

Já entre os três tipos de antenas utilizadas não foi realizada uma avaliação da qualidade de transmissão entre antenas do mesmo tamanho ou material. Portanto, não se pode afirmar que quanto maior a antena melhor a transmissão nos protótipos desenvolvidos, mas foi dada preferência à utilização de antenas de 90 mm em todos os protótipos em campo.

Além disso, sabe-se que uma das principais promessas da tecnologia *Lora* é a cobertura, visto que pode chegar a 15 Km com linha de visada. No entanto, como o ambiente do campus da UPF é coberto por árvores, edifícios e desníveis no terreno que acabam reduzindo o alcance, a instalação dos dispositivos também não colabora para a qualidade do sinal, visto que, foram instalados em ambientes sem a visada para o *gateway*.

Ademais, para estimar a cobertura foi utilizada a aplicação *TTN Mapper*, que é um projeto derivado da *The Things Network* e é planejado como um sistema que permite mapear e publicar a cobertura dos *gateways Lora* e, assim, encorajar outros desenvolvedores. Substancialmente, através do aplicativo *Android*, o usuário vincula dispositivos cadastrados na plataforma *The Things Network* a sua sessão no *TTN Mapper*, em seguida acessa o modo de mapeamento e desloca-se pela cidade. Todos os pacotes recebidos na aplicação *LoRaWan* possuem o *received signal strength indicator*, RSSI e localização GPS provida do *smartphone*, assim,

combinando essas informações, é construído um mapa de calor com a cobertura do *gateway* na plataforma [71].

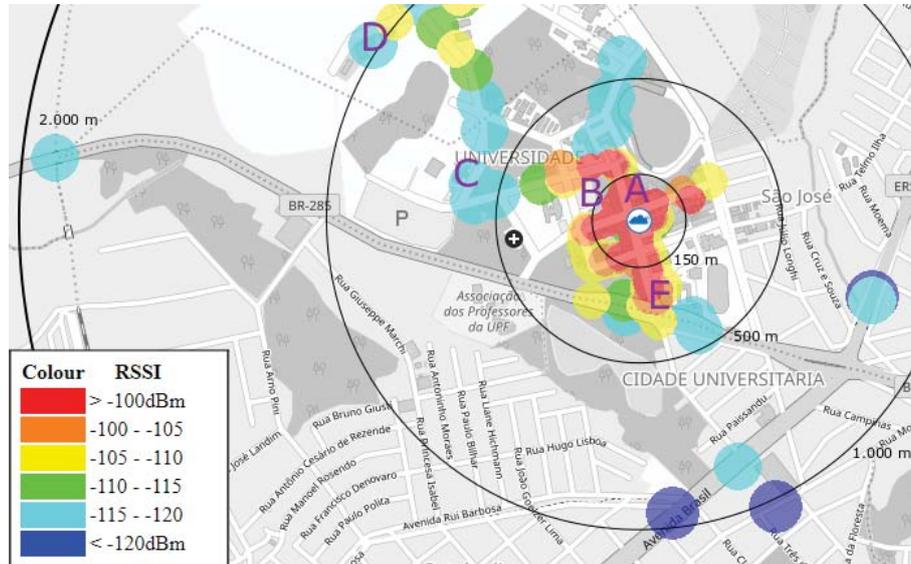


Figura 30. Cobertura do LoRa do gateway na UPF

A cobertura do *gateway* LoRaWan localizado no campus da UPF gerada pela aplicação *TTN Mapper* pode ser observada na Figura 30. Na escala de cores, vermelho representa uma qualidade ótima, laranja boa, amarelo e verde aceitável, azul claro ruim e azul escuro péssima. Já os círculos sinalizam a distância aproximada do *gateway* até aquele ponto. Por sua vez, as letras na cor roxa indicam a localização dos dispositivos fixos:

- A: Dispositivo de Qualidade do Ar localizado na parada de ônibus.
- B: Dispositivo de Qualidade do Ar localizado no entrada do Centro de Convivência do Campus.
- C: Dispositivo de Temperatura localizado na Centro de Eventos do Campus.
- D: Dispositivo de Temperatura localizado no módulo II do UPF Parque.
- E: Dispositivo Contador de Veículos localizado no pórtico de acesso do campus.

A figura 31 demonstra o ponto mais distante, 4,3 Km, que foi possível realizar a comunicação com o *gateway*. No referido acontecimento havia visada para a universidade e o dispositivo se encontrava no 5º andar de um edifício fora do perímetro da universidade. Visto isso, demonstra-se que pequenas melhorias nas condições já proporciona o envio dos pacotes em distâncias bem razoáveis.

Visto isso, destaca-se que os dispositivos localizados mais próximos, até 150 metros, como os de qualidade do ar, apresentam uma taxa de sucesso na transmissão bem elevada. A Figura 32 indica o percentual diário de falha de pacotes do dispositivo localizado na parada de

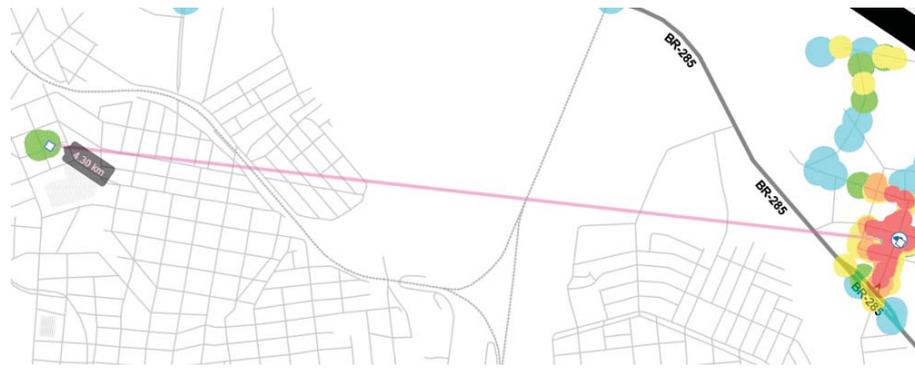


Figura 31. Cobertura do LoRa do gateway na UPF

ônibus no período de 20 de outubro de 2018 a 12 de dezembro de 2018. A taxa de falha é de 1% em média, considerando que é enviado 1 pacote a cada 90 segundos, dito de outra forma, são 960 pacotes por dia, sendo perdidos 10 em média. Registrou-se o pior dos casos no dia 21 de novembro de 2018, no qual se apresentou perda de 2,23%, perdendo 21 pacotes no total.

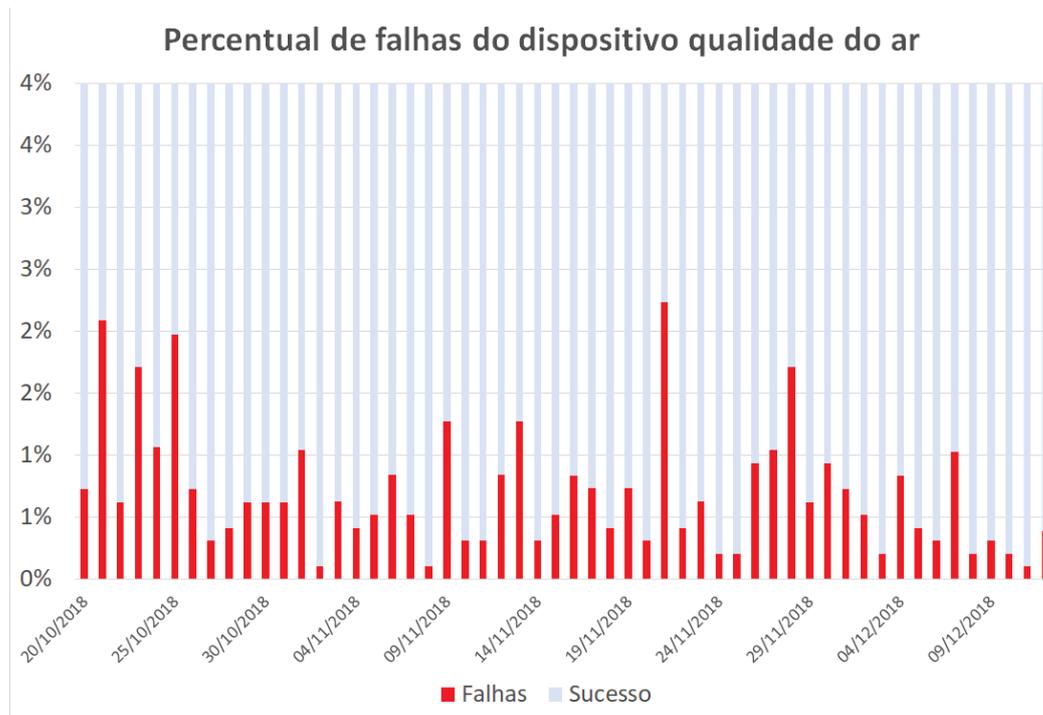


Figura 32. Perda de Pacotes do dispositivo de qualidade do ar

Já no caso do dispositivo de monitoramento de temperatura localizado no módulo II do UPF Parque, a 1.000 metros do *gateway*, que envia 1 pacote por hora, a taxa de perda se mostrou bem mais elevada em alguns dias. A Figura 33 indica o histórico de falhas dos pacotes no período de 21 de setembro de 2018 a 16 de dezembro de 2018. Na média geral o percentual de falha é 8,82% ou 2 pacotes diários considerando o ciclo desses dispositivo. No dia mais crítico, 04 de outubro de 2018, o percentual chegou a 45,8%, o que representa 11 pacotes perdidos naquele dia.

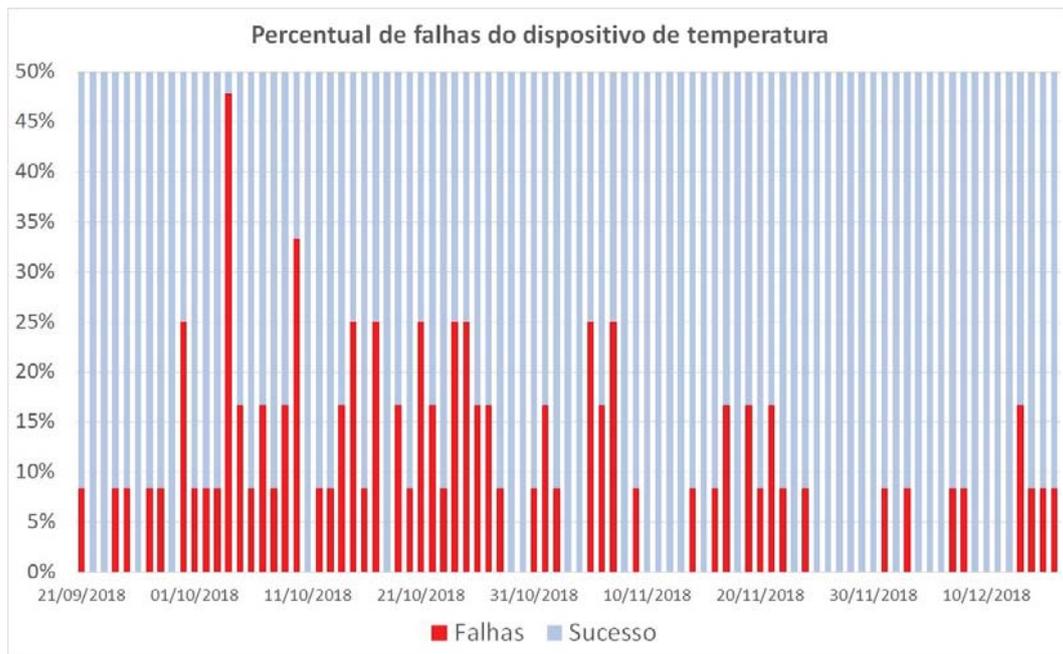


Figura 33. Perda de Pacotes do dispositivo sensor de temperatura

Por sua vez, o *gateway* final instalado no ambiente externo se mostrou estável durante o período dos experimentos, sendo necessária apenas uma intervenção em que foi preciso reiniciá-lo, pois não estava respondendo. Também ocorreu outra situação, mas foi durante a rotina de podas das árvores, em que um galho caiu sobre o *gateway*, assim foi necessário corrigir seu posicionamento.

Portanto, comparado com soluções de *gateways Lora* de mercado para uso externo, que possuem custo a partir de U\$600 [72], a construção de *gateways* com base em placas Raspberry Pi mostra-se satisfatória em custo, pois tem aproximadamente 1/3 do valor de um profissional, dado que o *gateway* construído teve custo de U\$ 213. Não foi possível realizar a comparação de desempenho entre solução profissional e a desenvolvida, entretanto, os requisitos de teste de viabilidade e desempenho da tecnologia *LoRaWan* foram atendidos pela solução adotada, como foi observado na Figura 30 e Figura 31.

A teoria da arquitetura da tecnologia *LoRaWan* com seu *Network* e *Application Server*, pode ser validada na prática através da plataforma *The Things Network*. Assim sendo, a plataforma se mostra aderente à arquitetura proposta nesse trabalho, mesmo tendo a dependência do fornecedor do serviço externo e, por ser mantido pela comunidade, não há garantias de qualidade de serviço de operação. Porém, mantém o custo baixo para manutenção da aplicação, um dos requisitos da arquitetura. Contudo, para uma solução comercial, deve-se utilizar um *Network Server* dedicado ou, no caso de terceirizado, ter garantias contratuais da qualidade e disponibilidade do serviço.

No que diz respeito ao *node-red*, salienta-se que ele se mostra uma boa alternativa como ferramenta de desenvolvimento, pois a curva de aprendizado é bem rápida, principalmente pelo fato da codificação ser baseada em *java script*. A utilização dos *nodes* visuais também

simplifica a organização e a estruturação do código fonte da aplicação, já sendo, de certa forma, uma documentação de alto nível. Já a interface de desenvolvimento se mostrou leve, visto que consumiu poucos recursos, sendo necessária apenas uma instância *f1-micro* (1 vCPUj, 0,6 GB de memória) no *Google Cloud* para a montagem dos fluxos. No entanto, para a aplicação *Smart e Learning Campus UPF*, como houve mais acessos de usuários simultâneos e múltiplas gerações de gráficos, foi necessário alocar mais recursos utilizando uma instância *g1-small* (1 vCPUj, 1,7 GB de memória) na plataforma do *Google Cloud*; mesmo assim o custo dessas instâncias se mantiveram baixos, aproximadamente \$3.88 mensais para a *f1-micro* e \$13.13 para a *g1-small*.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes iniciais e os demais trabalhos relacionados mostram que mesmo com o equipamento *LoRaWan* de baixo custo, proporciona-se uma cobertura *outdoor* muito considerável no meio urbano e muito além do esperado no meio rural [41], entretanto, para o monitoramento *indoor* a efetividade fica limitada [73].

Além disso, os testes de transmissões de longas distâncias realizadas durante a pesquisa mostram que elas são possíveis, mas dependem de fatores positivos para que ocorram. Visto isso, a aplicação deve aceitar uma taxa de perda de pacote, pois o *LoRaWan*, por ter o foco em baixo consumo de energia, não é tão efetivo para manter conexões intermitentes. Portanto, para aplicações em tempo real ou de uso crítico, como por exemplo o monitoramento médico, não é indicado.

Outra questão da limitação do *LoRaWan* é o tamanho das mensagens enviadas. No caso dos experimentos desenvolvidos no trabalho não houve preocupação nesse sentido, pois os dispositivos implementados são simples e em pouco número. Entretanto, aumentando a complexidade dos dispositivos, incrementando com uma gama maior de sensores e atuadores em futuros projetos, poderá tornar-se uma limitação mais evidente.

O *LoRaWan* destaca-se, principalmente, pela não dependência a uma empresa de telecomunicação exclusiva para vender o serviço de cobertura, como ocorre com o *sigfox*. Por outro lado, permite que operadores locais distribuam a cobertura bem como permite implementação de soluções customizadas para o roteamento das informações até a aplicação. O *The Things Network* apresenta-se como uma boa solução de entrada de *Network server*, porém, em sua versão gratuita, mantida pela comunidade, não garante a qualidade do serviço. Mesmo assim, aplicações com recursos financeiros limitados e dados não críticos, como é o caso dessa pesquisa, são muito bem atendidas por essa plataforma.

Para mais, o *gateway* utilizando *raspberry* e o módulo *RAK 831* é uma das soluções de menor custo possível atualmente para um *gateway* completo *multichanel*. Os objetivos esperados foram alcançados, o que demonstra que a tecnologia *LoRaWan* é viável, pois apresenta boa cobertura de sinal para os dispositivos. Os *gateway* de mercado, comercializados por empresas

já renomadas, prometem maior confiabilidade ao escalar ambientes mais complexos. Entretanto, o ecossistema local atual e projetos futuros em andamento através de outras pesquisas serão bem atendidos pela solução de *gateway* apresentada nessa pesquisa.

De mais a mais, os componentes para os dispositivos e *gateway* como o microcontrolador e transmissor *LoraWan* possuem custo bem acessível e, com a popularização da tecnologia, acredita-se que reduzirá ainda mais os valores. No entanto, os sensores e as baterias necessários para a implementação dos dispositivos em aplicações específicas acabam elevando o orçamento do projeto na maioria dos casos.

Contudo, sabe-se que o uso de baterias para autonomia em grandes períodos é um desafio que deve ser balanceado com a quantidade de mensagens enviadas, que deve ser a mínima necessária. Além do mais, a transmissão de pacotes em ciclo de minutos inviabiliza o uso de baterias nos dispositivos, carecendo de uma fonte contínua de energia. O envio de mensagens a cada hora, como foi validado em experimento, proporciona uma autonomia de seis meses com pequenas otimizações de *software*. Acredita-se que a otimização do *hardware* proporcionará que uma carga nas baterias utilizadas nos experimentos poderá chegar a anos de autonomia.

Constatou-se, todavia, que os fatores de maior impedimento para a utilização de novos equipamentos em pesquisas científicas são a burocracia e a tributação na importação do governo brasileiro. A alíquota do imposto de importação é de 60%, com algumas exceções [74], além disso, ainda é taxado pelo Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços, ICMS, que varia de cada Unidade Federativa, mas que no Rio Grande do Sul é 18% [75]. Dessa forma, um produto que possui o custo de 200 dólares americanos, inicialmente é convertido à moeda brasileira, o real, no câmbio atual 4 por 1, assim custaria 800 reais. Para mais, aplicando o imposto de importação, 480 reais são recolhidos pela receita federal quando produto chega na alfândega. E, por fim, é tributado o ICMS estadual, isto é, utilizando como base de cálculo o custo total do produto, nesse caso, $R\$ 1280 = 800 + 480$, aplicando 18%, 230,40 reais são recolhidos pela receita estadual.

Salienta-se que existem outras alternativas para a importação de equipamento para pesquisa como o *Importa Fácil Ciência*, que proporciona aos pesquisadores isenção da tributação dos impostos de importação, mas há outras taxas incidentes nesse serviço [76]. Para realizar a importação dessa forma o pesquisador deve seguir os passos definidos pelo governo e respeitar as limitações do programa, tendo como exemplo, exige-se que o importador seja pesquisador com título de doutor (ou perfil científico e/ou tecnológico equivalente) vinculados a instituições de pesquisa credenciados ao CNPq.

Por fim, ressalta-se que a colaboração entre o curso de Engenharia Ambiental e o mestrado em Computação Aplicada da Universidade de Passo Fundo foi fundamental para viabilizar ambas as pesquisas. Visto que a aplicação *Smart e Learning Campus UPF* agregou para a pesquisa do curso de Engenharia Ambiental, sendo capaz de transformar os dados coletados da concentração dos gases poluentes em informações relevantes para os usuários do campus,

además de gerar conhecimento sobre o t3pico da polui33o atmosf33rica. Por outro lado, contribuiu para essa pesquisa porque acabou validando a arquitetura de custo acess33vel em uma situa33o real. Isso gerou remodula33es em alguns pontos desse trabalho, por exemplo, a preocupa33o com a apresenta33o dos dados aos usu33rios, isto 33, torn33-os compreens33veis para pessoas, e o layout de apresenta33o. Em suma, a troca de conhecimento interdisciplinar contribuiu para a melhoria na qualidade de ambas as pesquisas.

Considerando todos os aspectos citados anteriormente, destacando as dificuldades de log33stica para acesso aos equipamentos e desafios no estudo das diferentes tecnologias, a arquitetura de sistemas proposta e os prot33tipos desenvolvidos para valida33o atestam que 33 poss33vel alcan33ar os objetivos definidos. Assim com apenas 1 *gateway* instalado 33 poss33vel cobrir com sinal *LoRa* toda a 33rea do campus da UPF e parte da cidade de Passo Fundo. Os dispositivos desenvolvidos mantiveram a premissa da simplicidade e baixo custo, proporcionando que sejam replicados em grande quantidade, ou customizados para serem aplicados em situa33es diferentes. A aplica33o mostrou-se acess33vel para o p33blico tendo um bom n33mero de acesso enquanto estava sendo divulgada, al33m disso, os dados coletados foram distribu33dos para pesquisadores de outras 33reas, proporcionando a eles uma vis33o anal33tica, em alguns aspectos, da vida no campus.

5. CONSIDERAÇÕES

Esse trabalho aborda como a tecnologia *LoRaWan* cumpre as expectativas de uma solução de comunicação de baixo custo, pois os módulos *LoRa* estão muito acessíveis no mercado. Também não há necessidade da contratação de planos de dados por dispositivo, pois apenas o *gateway* precisa de acesso à internet, a comunicação entre os equipamentos utiliza frequência definidas como restritas, que não necessitam de regulamentação podendo ser implantadas em quase qualquer lugar. Além disso, a transmissão em longas distâncias utilizando *LoRaWan* não foram aferidas ao limite nesse trabalho, mas a cobertura alcançada utilizando a solução de baixo custo para o *gateway* se mostrou satisfatória, cobrindo o campus da universidade.

Para mais, as plataformas abertas e software livre colaboram na disseminação da tecnologia, pois permitem que os usuários colaborem diretamente com novas soluções ou que customizem aplicações com a realidade local. No decorrer do trabalho foram utilizadas várias dessas plataformas que simplificaram o desenvolvimento de todas as partes do trabalho. Entretanto, para a definição da arquitetura e para a execução dos experimentos foi necessário um amplo conhecimento, desde eletrônica, programação de embarcados, sistemas operacionais, banco de dados até desenvolvimento web. Ressalta-se que para empreendimentos com maior complexidade a mão de obra especializada em cada área citada é indispensável para atender as expectativas e os prazos inerentes a projetos maiores.

Os dispositivos demandaram maior investimento de tempo para seu desenvolvimento, pois além da construção e codificação, foi necessária toda a pesquisa de compatibilidade entre os componentes, preocupação com a logística de entrega, aflição no manuseio dos pequenos componentes, pois não possuía muitos exemplares, assim ocorrendo algum acidente poderia comprometer o desenvolvimento do trabalho. Felizmente, não ocorreu nenhuma casualidade que impediu a elaboração dos dispositivos e do trabalho como um todo.

A pesquisa aliando teoria e prática com uma abordagem de validar as tecnologias em pequenos protótipos no decorrer do trabalho, permitiu mudar de direção quando algum item se mostrava insatisfatório. Dessa forma, algumas tecnologias acabaram sendo descartadas por não contribuir com a arquitetura, ou por necessitar de muitas adequações, aumentando a complexidade, que acabaria contrariando um dos objetivos. No entanto a arquitetura permite que em implementações futuras, seja reavaliado as tecnologias substituindo as propostas no trabalho.

O legado deixado por esse trabalho vai muito além deste documento, visto que toda a estrutura física de *gateway* e dispositivos instalados permanecerá a disposição da comunidade universitária, possibilitando a continuidade dos experimentos e implementação de pesquisas totalmente novas sobre a arquitetura proposta.

Foram aproximadamente 18 meses aliando teoria e prática nesta pesquisa que permitiram aprofundar os conhecimentos acadêmicos, profissionais e pessoais. No ponto de vista acadêmico, além dos resultados e trabalhos derivados da pesquisa, o *networking* criado entre os cursos de diferentes áreas foi um grande feito neste período, pois gerará novos frutos, com novas pesquisas mais cooperativas, que extrapolam as áreas de conhecimento, criando um ambiente acadêmico mais rico. O perfil profissional na área de tecnologia da informação necessita a constante atualização, logo a pesquisa de novas tecnologias e linguagens de programação, agregam um grande valor ao perfil dessa área. Já no lado pessoal, o sentimento inicial de grande desafio, após muita dedicação, se transforma no senso de dever cumprido ao final dessa etapa.

Durante o desenvolvimento do trabalho foram geradas publicações com o intuito de validar a relevância do tema e disseminar o conhecimento gerado. As publicações foram:

- Submissão do artigo intitulado *Desenvolvimento de um protótipo com utilização de LoRaWan como Solução de Comunicação de Baixo Custo à 1st Workshop on Computational Intelligence and Smart Cities*. O artigo submetido foi aceito e publicado nos anais do evento [77].
- Redação de capítulo intitulado *LoRaWan: Low Cost Solution for Smart Cities* para o livro *Smart and Digital Cities* da editora *Springer International*. O livro está em fase final de publicação [78].
- Submissão para registro do software derivado do experimento de monitoramento de qualidade do ar, intitulado *Smart Campus UPF* à Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

Por fim, para trabalhos futuros sugere-se abordar outros problemas de monitoramento interno na universidade com foco na segurança, na iluminação, no tratamento de resíduos e no trânsito. As expectativas são de manutenção do *gateway LoRaWan* público disponível na universidade, o ampliando também à integração com os demais cursos e áreas do conhecimento em novos projetos de coleta de dados. Ainda, sugere-se como uma possibilidade futura, manipular massa de dados maiores com a finalidade de gerar conhecimento e inteligência com técnicas de aprendizado de máquina e recomendações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GONTIJO, A. C.; MAIA, C. S. C. Tomada de decisão, do modelo racional ao comportamental: uma síntese teórica. *Caderno de Pesquisas em Administração*, v. 11, n. 4, p. 13–30, 2004.
- [2] AMORIM, D. *IBGE precisa de R\$ 3 bi para Censo 2020*. 2017. Acessado: 02 out. 2018. Disponível em: <<http://economia.estadao.com.br/noticias/suas-contas,ibge-confirma-concurso-para-censo-2020,70002024324>>. Acesso em: 02 out. 2018.
- [3] HUMANAS, R. B. de Cidades Inteligentes e. *BRASIL 2030 : INDICADORES BRASILEIROS DE CIDADES INTELIGENTES E HUMANAS*. 2017. Acessado: 02 out. 2018. Disponível em: <<http://redebrasileira.org/indicadores>>. Acesso em: 02 out. 2018.
- [4] ANGELIDOU, M. Smart city policies: A spatial approach. *Cities*, Elsevier, v. 41, p. S3–S11, 2014.
- [5] SEWAGUDDE, C. *The design and implementation of a smart-parking system for Helsinki Area*. 62 p. Dissertação (Mestrado) — School of Science - Aalto University, 2016. Disponível em: <<http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201608263078>>.
- [6] NATIONS, U. *Urban and Rural Areas 2009*. 2009. Acessado: 14 ago. 2018. Disponível em: <<http://www.un.org/en/development/desa/population/publications/urbanization/urban-rural.shtml>>. Acesso em: 14 ago. 2018.
- [7] SCHWAB, K. *A Quarta Revolução Industrial*. São Paulo: Edipro, 2016. 160 p. ISBN 9788572839785.
- [8] ASHTON, K. That ‘internet of things’ thing. *RFiD Journal*, v. 22, n. 7, p. 97–114, 2009.
- [9] VERMESAN, O.; FRIESS, P. *Internet of things-from research and innovation to market deployment*. [S.l.]: River Publishers Aalborg, 2014. 364 p. ISBN 9788793102941.
- [10] ITU. *Overview of the Internet of thing - International Telecommunication Union*. 2017. Acessado: 14 nov. 2018. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-I>>. Acesso em: 14 nov. 2018.
- [11] DIAS, R. R. de F. *Internet das Coisas Sem Mistérios: Uma nova inteligência para os negócios*. São Paulo: Netpress Books, 2016. 120 p.
- [12] CLEMENTS, P. et al. *Documenting Software Architectures: Views and Beyond*. [S.l.]: Pearson Education, 2002. 560 p. ISBN 0201703726.
- [13] FARIAS, J. et al. Cidades inteligentes e comunicações. *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, v. 1, p. 28–32, 10 2011.

- [14] CARAGLIU, A.; BO, C. D.; NIJKAMP, P. Smart cities in europe. *Journal of urban technology*, Taylor & Francis, v. 18, n. 2, p. 65–82, 2011.
- [15] KEHOE, M. et al. Smarter cities series: a foundation for understanding ibm smarter cities. *Redguides for Business Leaders*, IBM, 2011.
- [16] IBM. *Smarter Cities New cognitive approaches to long-standing challenges*. 2017. Acessado: 15 out. 2018. Disponível em: <https://www.ibm.com/smarterplanet/us/en/smarter_cities/overview/>. Acesso em: 15 out. 2018.
- [17] PEREIRA, G. V. et al. Building a reference model and an evaluation method for cities of the brazilian network of smart and human cities. In: *Proceedings of the 18th Annual International Conference on Digital Government Research*. New York, NY, USA: ACM, 2017. (dg.o '17), p. 580–581. ISBN 978-1-4503-5317-5. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/3085228.3085257>>.
- [18] HUMANAS, R. B. de Cidades Inteligentes e. *Brasil 2030 : CIDADES INTELIGENTES E HUMANAS*. 2017. Acessado: 02 out. 2017. Disponível em: <<http://redebrasileira.org/brasil-2030>>. Acesso em: 02 out. 2017.
- [19] ABUARQOUB, A. et al. A survey on internet of things enabled smart campus applications. In: *Proceedings of the International Conference on Future Networks and Distributed Systems*. New York, NY, USA: ACM, 2017. (ICFNDS '17), p. 50:1–50:7. ISBN 978-1-4503-4844-7. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/3102304.3109810>>.
- [20] SCHIOPOIU, A. B.; BURDESCU, D. D. The development of the critical thinking as strategy for transforming a traditional university into a smart university. In: USKOV, V. L.; HOWLETT, R. J.; JAIN, L. C. (Ed.). *Smart Education and e-Learning 2017*. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 67–74. ISBN 978-3-319-59451-4.
- [21] ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The internet of things: A survey. *Computer networks*, Elsevier, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010.
- [22] WHITMORE, A.; AGARWAL, A.; XU, L. D. The internet of things—a survey of topics and trends. *Information Systems Frontiers*, Springer, v. 17, n. 2, p. 261–274, 2015.
- [23] YAN, Z.; ZHANG, P.; VASILAKOS, A. V. A survey on trust management for internet of things. *Journal of network and computer applications*, Elsevier, v. 42, p. 120–134, 2014.
- [24] 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.

- [25] Lauridsen, M. et al. Coverage comparison of gprs, nb-iot, lora, and sigfox in a 7800 km² area. In: IEEE. *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. New York, NY, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017. p. 1–5. ISBN 978-1-5090-5932-4.
- [26] WND. *WND - Brasil - WND Group*. 2018. Acessado: 16 nov. 2018. Disponível em: <<https://www.wndgroup.io/brasil/>>. Acesso em: 16 nov. 2018.
- [27] SIGFOX. *Sigfox - The Global Communications Service Provider for the Internet of Things (IoT)*. 2018. Acessado: 16 nov. 2018. Disponível em: <<https://www.sigfox.com>>. Acesso em: 16 nov. 2018.
- [28] ALLIANCE, L. *LoRaWAN™ Specification*. 2018. Acessado: 16 nov. 2018. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawantm-specification-v10>>. Acesso em: 16 nov. 2018.
- [29] SORNIN, N. et al. *LoRaWAN™ Backend Interfaces 1.0 Specification*. 2018. Acessado: 16 nov. 2018. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawantm-back-end-interfaces-v10>>. Acesso em: 16 nov. 2018.
- [30] ADELANTADO, F. et al. Understanding the limits of lorawan. *arXiv preprint arXiv:1607.08011*, 2016.
- [31] ALLIANCE, L. *LoRaWAN™ Regional Parameters*. 2018. Acessado: 16 nov. 2018. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawantm-regional-parameters-v10>>. Acesso em: 16 nov. 2018.
- [32] RESOLUÇÃO n 506, de 1º de julho de 2008. 2008. Acessado: 14 ago. 2018. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/23-2008/104-resolucao-506>>. Acesso em: 14 ago. 2018.
- [33] ARDUINO - About Us. 2018. Acessado: 1 out. 2018. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/AboutUs>>. Acesso em: 01 out. 2018.
- [34] ESPRESSIF ESP32 Overview. 2018. Acessado: 1 out. 2018. Disponível em: <<https://espressif.com/en/products/hardware/esp32/overview>>. Acesso em: 01 out. 2018.
- [35] FOUNDATION, R. P. *About - Raspberry Pi Foundation*. 2018. Acessado: 15 dez. 2018. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org/about/>>. Acesso em: 18 dez. 2018.
- [36] FOUNDATION, R. P. *What is a Raspberry Pi ?* 2018. Acessado: 15 dez. 2018. Disponível em: <[https://www.raspberrypi.org/help/what-18 dez. 2018](https://www.raspberrypi.org/help/what-18-dez-2018)>.
- [37] FOUNDATION, R. P. *Raspberry Pi 3 Model B+*. 2018. Acessado: 15 dez. 2018. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>>. Acesso em: 18 dez. 2018.

- [38] LORASERVER.IO. *Project - LoRa Server, open-source LoRaWAN network-server*. 2018. Acessado: 15 mar. 2019. Disponível em: <<https://www.loraserver.io/overview/>>. Acesso em: 15 mar. 2019.
- [39] THE Things Network. 2018. Acessado: 14 ago. 2018. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/>>. Acesso em: 14 ago. 2018.
- [40] PETÄJÄJÄRVI, J. et al. Evaluation of lora lpwan technology for indoor remote health and wellbeing monitoring. *International Journal of Wireless Information Networks*, Springer, v. 24, n. 2, p. 153–165, 2017.
- [41] Mdhaffar, A. et al. lot-based health monitoring via lorawan. *IEEE EUROCON 2017 -17th International Conference on Smart Technologies*, IEEE, v. 1, n. 1, p. 519–524, July 2017.
- [42] LUNDIN, A. C.; OZKIL, A. G.; SCHULDT-JENSEN, J. Smart cities: A case study in waste monitoring and management. *Hawaii International Conference on System Sciences 2017*, p. 10, 01 2017.
- [43] KUMAR, D. N. S. K. P. A.; AU, T. W.; SUHAILI, W. S. Smart led street light systems: A bruneian case study. In: PHON-AMNUAISUK, S.; ANG, S.-P.; LEE, S.-Y. (Ed.). *Multi-disciplinary Trends in Artificial Intelligence*. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 370–379. ISBN 978-3-319-69456-6.
- [44] Mikhaylov, K. et al. Lora wan for wind turbine monitoring: Prototype and practical deployment. In: *2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6. ISSN 2157-023X.
- [45] Davcev, D. et al. lot agriculture system based on lorawan. In: *2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–4.
- [46] KRUCHTEN, P. B. The 4+ 1 view model of architecture. *IEEE software*, IEEE, v. 12, n. 6, p. 42–50, 1995.
- [47] MILES, R.; HAMILTON, K. *Learning UML 2.0*. 1. ed. Sebastopol , CA, USA: "O'Reilly Media, Inc.", 2006. 286 p.
- [48] KRAVETS, I. *platformio*. 2018. Acessado: 14 ago. 2018. Disponível em: <<http://platformio.org/>>. Acesso em: 14 ago. 2018.
- [49] GITHUB.COM. *A hackable text editor for the 21st Century*. 2018. Acessado: 14 dez. 2018. Disponível em: <<https://atom.io/>>. Acesso em: 14 dez. 2018.
- [50] FRITZING.ORG. *Fritzing - Eletronics made easy*. 2018. Acessado: 14 dez. 2018. Disponível em: <<http://fritzing.org>>. Acesso em: 14 dez. 2018.
- [51] DRAGINO. *Dragino - Lora Shield*. 2018. Acessado: 28 ago. 2018. Acesso em: 28 ago. 2018.

- [52] HOPERF. *RFM95W feature the LoRaTM long range model*. 2018. Acessado: 14 nov. 2018. Disponível em: <<https://www.hoperf.com/modules/lora/RFM95.html>>. Acesso em: 14 nov. 2018.
- [53] KOOIJMAN, M. *Arduino-LMIC library*. 2018. Acessado: 28 nov. 2018. Disponível em: <<https://github.com/matthijskooijman/arduino-lmic>>. Acesso em: 28 nov. 2018.
- [54] WESTENBERG, M. *Single Channel LoRaWAN Gateway*. 2018. Acessado: 14 nov. 2018. Disponível em: <<https://github.com/things4u/ESP-1ch-Gateway-v5.0>>. Acesso em: 14 nov. 2018.
- [55] KERSING, J. *Build your own RAK831 based gateway*. 2018. Acessado: 14 nov. 2018. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/gateways/rak831/>>. Acesso em: 14 nov. 2018.
- [56] NETWORK Architecture - The Things Network. 2018. Acessado: 14 nov. 2018. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/network/architecture.html>>. Acesso em: 14 nov. 2018.
- [57] Györödi, C. et al. A comparative study: MongoDB vs. mysql. *2015 13th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)*, p. 1–6, June 2015.
- [58] Boicea, A.; Radulescu, F.; Agapin, L. I. MongoDB vs oracle – database comparison. *2012 Third International Conference on Emerging Intelligent Data and Web Technologies*, p. 330–335, Sep. 2012.
- [59] BLACKSTOCK, M.; LEA, R. Toward a distributed data flow platform for the web of things (distributed node-red). In: *Proceedings of the 5th International Workshop on Web of Things*. New York, NY, USA: ACM, 2014. (WoT '14), p. 34–39. ISBN 978-1-4503-3066-4. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/2684432.2684439>>.
- [60] FOUNDATION, J. *Node-RED About*. 2018. Acessado: 14 dez. 2018. Disponível em: <<https://nodered.org/about/>>. Acesso em: 14 dez. 2018.
- [61] STOKKING, J. *Node-RED Library for TTN Applications*. 2018. Acessado: 14 dez. 2018. Disponível em: <<https://github.com/TheThingsNetwork/nodered-app-node>>. Acesso em: 14 dez. 2018.
- [62] CONWAY-JONES, D. *node-red-dashboard*. 2018. Acessado: 14 dez. 2018. Disponível em: <<https://github.com/node-red/node-red-dashboard>>. Acesso em: 14 dez. 2018.
- [63] ROCKETScream. *Low Power Library for Arduino*. 2018. Acessado: 4 out. 2018. Disponível em: <<https://github.com/rocketscream/Low-Power>>. Acesso em: 16 dezembro. 2018.
- [64] LEITE, J. M. B. L. *Aplicabilidade de sensores de baixo custo a redes de monitorização da qualidade do ar*. Tese (Doutorado) — Instituto Politécnico de Viseu, 2016.

- [65] GOMES, P. A. M. V. *Utilização de sensores de baixo custo na medição de monóxido de carbono no ar ambiente*. Tese (Doutorado) — Instituto Politécnico do Porto, 2015.
- [66] CASTELL, N. et al. Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environment international*, Elsevier, v. 99, p. 293–302, 2017.
- [67] MAZUTTI, J. *Monitoramento da Qualidade do Ar na Construção de um Smart e Learning Campus*. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade de Passo Fundo, 2018.
- [68] SOUZA, F. V. M. de; MAZUTTI, J. *Smart e Learning Campus UPF*. 2018. Acessado: 11 dez. 2018. Disponível em: <<http://upf-smart-campus.manchini.com.br>>. Acesso em: 11 dez. 2018.
- [69] AGENCY, E. E. *European Air Quality Index*. 2018. Acessado: 11 dez. 2018. Disponível em: <<http://airindex.eea.europa.eu/>>. Acesso em: 11 dez. 2018.
- [70] INC, G. *Google Analytics - Google Developers*. 2018. Acessado: 20 dez. 2018. Disponível em: <<https://developers.google.com/analytics/devguides/platform/?hl=pt-br>>. Acesso em: 20 dez. 2018.
- [71] THETHINGSNETWORK. *TTN Mapper*. 2018. Acessado: 28 dez. 2018. Disponível em: <<https://ttnmapper.org/>>. Acesso em: 28 dez. 2018.
- [72] LORIoT. *Lora Gateways and concentrators*. 2018. Acessado: 10 dez. 2018. Disponível em: <<https://www.loriot.io/lora-gateways.html>>. Acesso em: 10 dez. 2018.
- [73] Petäjäjärvi, J. et al. Evaluation of lora lpwan technology for remote health and wellbeing monitoring. *2016 10th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT)*, p. 1–5, March 2016. ISSN 2326-8301.
- [74] BRASIL, M. da F. *Tributado - Calculadora de Imposto de Importação*. 2018. Acessado: 28 nov. 2018. Disponível em: <<http://www4.receita.fazenda.gov.br/simulador/>>. Acesso em: 28 nov. 2018.
- [75] FERGO, F. B. aka. *Tributado - Calculadora de Imposto de Importação*. 2018. Acessado: 28 nov. 2018. Disponível em: <<https://www.tributado.net/>>. Acesso em: 28 nov. 2018.
- [76] CORREIOS. *Importa Fácil Ciência*. 2018. Acessado: 28 nov. 2018. Disponível em: <<https://www.correios.com.br/a-a-z/importa-facil-ciencia>>. Acesso em: 28 nov. 2018.
- [77] SOUZA, F. V. M. de; RABELLO, R. dos S. Desenvolvimento de um protótipo com utilização de lorawan como solução de comunicação de baixo custo. *1st Workshop on Computational Intelligence and Smart Cities*, p. 25–35, 2017.
- [78] COELHO V., M. C. I. A. d. O. T. S. O. L. N. *Smart and Digital Cities*. [S.l.]: Springer, 2019. ISBN 978-3-030-12254-6.