UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

IGOR SIQUEIRA DOS SANTOS

INTEGRAÇÃO DAS TECNOLOGIAS *BLUETOOTH LOW ENERGY* E LORA EM UM CONTEXTO DE IOT

VITÓRIA
2020

IGOR SIQUEIRA DOS SANTOS

INTEGRAÇÃO DAS TECNOLOGIAS *BLUETOOTH LOW ENERGY* E LORA EM UM CONTEXTO DE IOT

Parte manuscrita do Proposta de Projeto de Graduação do aluno **Igor Siqueira dos Santos**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Jair A. L. Silva
Coorientador: Prof. Dr. Helder R. de O. Rocha

VITÓRIA
2020

IGOR SIQUEIRA DOS SANTOS

INTEGRAÇÃO DAS TECNOLOGIAS *BLUETOOTH LOW ENERGY* E LORA EM UM CONTEXTO DE IOT

Parte manuscrita do Proposta de Projeto de Graduação do aluno **Igor Siqueira dos Santos**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 09 de dezembro de 2020.

COMISSÃO EXAMINADORA:

_____

Prof. Dr. Jair A. L. Silva
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

_____

Prof. Dr. Helder R. de O. Rocha
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador

_____

Prof. PhD. Marcelo Eduardo Vieira Segatto
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

_____

Eng. Augusto Cesar Federici Pertele
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

RESUMO

No presente trabalho é apresentado um Projeto de Graduação do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), cujo desenvolvimento se baseia na integração de tecnologias que emergiram junto com a Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) para a construção de um sistema flexível capaz de atender as exigências do mercado. Aplicações como as Cidades Inteligentes (SC, do inglês *smart cities*) usam IoT para extrair informações do domínio urbano, e por isso necessitam atender características como baixo custo, longo alcance e baixo consumo de energia. Interfaces LPWAN (*low-power wide-area network*), como a tecnologia LoRa (*Long Range*), num cenário ideal, seriam suficientes para atender estas exigências. Entretanto, os dispositivos fabricados atualmente geralmente não têm compatibilidade com interfaces deste tipo, mas são compatíveis com redes WPAN (*wireless personal area network*) tais como as baseadas em BLE (*Bluetooth Low Energy*). Desta forma, este trabalho contempla a implementação de uma estrutura que integra uma interface BLE à um dispositivo conectado a uma rede LoRaWAN, bem como a análise do seu desempenho com base em indicadores de qualidade da comunicação e autonomia de bateria. Os resultados obtidos comprovaram que a integração proposta foi capaz de agregar compatibilidade a uma aplicação de baixo consumo e longo alcance, mantendo boa performance para atender as exigências de aplicações IoT em domínios urbanos.

Palavras-chave: Internet das Coisas. *Bluetooth Low Energy*. LoRa.

ABSTRACT

This work presents an under-graduation project in the Electrical Engineering Course of the Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). The main goal is to integrate emerging Internet of Things (IoT) technologies to build a flexible system, which is able to meet market demands. Smart Cities (SC) applications use IoT to extract information from urban spaces. In order to make it possible, it is necessary to implement low-cost infrastructure, long range communication and low-power consumption. To compose these scenarios, only a Low-Power Wide-Area Networks (LPWAN) interface like Long Range (LoRa) technology is needed. However, currently manufactured devices do not generally support interfaces of this type, but they have WPAN interfaces like Bluetooth Low Energy (BLE). Therefore, this work proposes an implementation of an application that integrates a BLE interface in a device connected to a LoRaWAN network, as well as the analysis of its performance based on communication quality indicators and battery life. The results show that the proposed integration was able to add compatibility to a low consumption and long-range application, maintaining good performance to meet the requirements of IoT applications in urban domains.

Keywords: Internet of Things. Bluetooth Low Energy. LoRa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação entre características das tecnologias LPWAN, ZigBee e 3G/4G 16
Figura 2 – Classificação dos tipos de pesquisa 19
Figura 3 – Arquitetura generalizada de uma solução IoT 20
Figura 4 – Representação gráfica (a) de um sinal *chirp* senoidal no domínio do tempo e (b) da variação de frequência no tempo de um sinal *chrip* 23
Figura 5 – Estrutura típica de uma rede LoRaWAN 25
Figura 6 – Estrutura de um pacote LoRa nas camadas física (PHY), MAC e de Aplicação .. 26
Figura 7 – Topologia de rede *piconet* e *scatternet* 28
Figura 8 – Arquitetura BLE 29
Figura 9 – Divisão dos canais do BLE no espectro 30
Figura 10 – Comportamento do rádio nos perfis definidos pela GAP 32
Figura 11 – Formato de um pacote de anúncio BLE 33
Figura 12 – Formato do pacote de anúncio do protocolo iBeacon 33
Figura 13 – Esquema da estrutura integrando BLE a rede LoRaWAN 35
Figura 14 – Máquina de estados simplificada do funcionamento do módulo LoRa 37
Figura 15 – Máquina de estados simplificada do funcionamento do módulo BLE 39
Figura 16 – Ilustração do módulo *beacon Hanabee mini* 41
Figura 17 – Cobertura da rede ATC LoRaWAN na Região da Grande Vitória - ES 44
Figura 18 – Ilustração da PHR_v3.4, em destaque os módulos BLE e LoRa 44
Figura 19 – Circuito de seleção de antena da PHR_v3.4 com casamento de impedância 45
Figura 20 – Foto dos protótipos com antena externa e embarcada embalados 46
Figura 21 – Interface da plataforma KORE (a) no agendamento de *downlink* e (b) na transmissão do pacote para o observador 49
Figura 22 – Requisição de *downlink* e recepção do pacote no observador 50
Figura 23 – Comunicação serial dentro do observador durante o processamento e envios dos dados do ponto de vista do (a) módulo BLE e (b) LoRa 51
Figura 24 – Recepção do *uplink* feito pelo observador na plataforma KORE e tradução da mensagem de base 64 para UTF-8 52
Figura 25 – Estrutura de medição de corrente utilizada para ordem de grandeza de µA 54
Figura 26 – Localização do *gateway* escolhido e os pontos de medição dos indicadores 55
Figura 27 – Interface de configuração do aplicativo *BLE scanner* para *smartphones* 58

Figura 28 – Estrutura do teste feito (a) simulando *beacons* no *smartphone* e (b) recebendo a quantidade de objetos por *Major* encontrados pelo observador antes e depois da ativação dos *beacons* 59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Relação entre mediana da SNR e distância entre transmissor e *gateway*.....62
Gráfico 2 – Relação entre mediana do RSSI e distância entre transmissor e *gateway*.....62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Comparativo entre *Bluetooth* clássico e BLE 29
Quadro 2 – Pacote de anúncio típico de um *beacon Hanabee* 40
Quadro 3 – Consumo de corrente típico do SPBTLE-1s durante diferentes condições de funcionamento 42
Quadro 4 – Consumo de corrente típico do CMWX1ZZABZ-091 durante diferentes condições de funcionamento 43
Quadro 5 – Comparação das especificações técnicas das antenas embarcada e externa utilizadas no projeto 45
Quadro 6 – Protocolo de comunicação entre os módulos BLE e LoRa 47
Quadro 7 – Cabeçalho do pacote de *uplink* 47
Quadro 8 – Pacote *uplink* de envio do status da bateria dos objetos 47
Quadro 9 – Pacote *uplink* de envio da tabela com a lista de objetos por grupo 48
Quadro 10 – Pacote *downlink* requisitado pelo dispositivo 48
Quadro 11 – Relação entre ambiente de teste e alcance do observador 56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cálculo do consumo médio e da autonomia de bateria do observador com perfis de alto, médio e baixo consumo de corrente 60
Tabela 2 – Médias de SNR e RSSI das transmissões efetuadas para todos *gateways* e a porcentagem de perda de pacotes 63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3G	Terceira geração da telefonia
4G	Quarta geração da telefonia
5G	Quinta geração da telefonia
ADC	*Analog-to-digital converter*
ADR	*Adaptative data rate*
ATT	*Attribute Protocol*
BLE	*Bluetooth Low Energy*
BW	*Bandwidth*
CR	*Code rate*
CRC	*Cyclic redundancy check*
CSS	*Chirp spread spectrum*
DR	*Data rate*
ES	Espírito Santo
FHSS	*Frequency-hopping spread spectrum*
GAP	*Generic Access Protocol*
GATT	*Generic Attribute Protocol*
GFSK	*Gaussian frequency-shift keying*
GPIO	*General purpose input/output*
HCI	*Host-Controller Interface*
I^2C	*Inter-integrated circuit*
IoT	*Internet of Things*
IPv6	*Internet Protocol version 6*
ISM	*Industrial, scientific and medical*
L2CAP	*Logical Link Control and Adaptation Protocol*
LoRa	*Long Range*
LPWAN	*Low-power wide-area network*
M2M	*Machine-to-machine*
MAC	*Media access control*
MCU	*Microcontroller unit*
NB-IoT	*Narrowband Internet of Things*
NFC	*Near field communication*
OTA	*Over-the-air*

PER	*Packet error rate*
PCB	*Printed circuit board*
PHY	*Physical layer*
RSSI	*Received signal strength indicator*
RTC	*Real-time clock*
SIG	*Special Interest Group*
SNR	*Signal-to-noise ratio*
SoC	*System-on-a-chip*
SPI	*Serial peripheral interface*
UART	*Universal asynchronous receiver transmitter*
USB	*Universal serial bus*
UTF-8	*8-bit Unicode Transformation Format*
UUID	*Universally unique identifier*
VSWR	*Voltage standing wave ratio*
Wi-Fi	*Wireless Fidelity*
WPAN	*Wireless personal area network*
WWW	*World Wide Web*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
1.1 Apresentação 14
1.2 Justificativas 16
1.3 Objetivos 18
1.3.1 Objetivo geral 18
1.3.2 Objetivos específicos 18
1.4 Procedimentos Metodológicos 18
2 EMBASAMENTO TEÓRICO 20
2.1 Arquitetura IoT 20
2.1.1 Camada de percepção e atuação 20
2.1.2 Camada de transporte 21
2.1.3 Camada de gerenciamento e processamento 21
2.1.4 Camada de aplicação 21
2.2 LoRa 22
2.2.1 LoRa PHY 22
2.2.2 LoRaWAN 24
2.2.3 Estrutura do Pacote 26
2.3 *Bluetooth Low Energy* 27
2.3.1 Arquitetura 29
2.3.2 Trabalhando com anúncios 32
3 CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA PROPOSTA 35
3.1 Descrição do Funcionamento do Observador 36
3.1.1 Máquina de estados do módulo LoRa 36
3.1.2 Máquina de estados do módulo BLE 38
3.2 Descrição de *Hardware* 39
3.3 Estruturação dos Protocolos de Comunicação 46
3.4 Validação do Funcionamento 49
4 ANÁLISE DE DESEMPENHO 53
4.1 Autonomia de Bateria 53
4.2 Qualidade de Comunicação com a Rede ATC LoRaWAN 54
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 56

5.1 Análise da Aplicabilidade da Integração 56
5.1.1 Rastreamento de *beacons* em diferentes ambientes 56
5.1.2 Compatibilidade com diferentes *hardwares* e protocolos 56
5.2 Autonomia de Bateria 59
5.3 Qualidade de Comunicação com a Rede ATC LoRaWAN 61
6 CONCLUSÕES 64
6.1 Propostas de Trabalhos Futuros 65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 66

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

O mundo está presenciando a ascensão de dispositivos, sistemas e ambientes sempre ativos e conectados (DELIC, 2015). Este cenário teve início devido à constante evolução da Internet nas últimas décadas (WHITMORE; AGARWAL; XU, 2015).

A padronização da Internet possibilitou a construção de uma rede mundial de comunicação e a criação do projeto *World Wide Web* (WWW), que descrevia uma rede de documentos, também chamados de "páginas", o que levou à popularização do uso da Internet nos computadores (BERNERS-LEE et al., 1994; LINS, 2013). As duas gerações de serviços na rede seguintes possibilitaram a interação de usuários com as páginas e a organização de toda informação para que máquinas e mecanismos de pesquisa pudessem processar e compartilhar os dados de forma mais inteligente, e assim tornarem-se mais autônomos (BERNERS-LEE; HENDLER; LASSILA, 2001; BLANK; REISDORF, 2012).

Simultaneamente ao avanço da Internet, as tecnologias nas áreas de rede de sensores e de comunicação por campo de proximidade (NFC, do inglês *near field communication*) também evoluíram. A convergência destas tecnologias levou a novas possibilidades, como a comunicação de máquina para máquina (M2M, do inglês *machine-to-machine*) pela Internet, o que fez com que os cientistas e pesquisadores investigassem os benefícios de conectar mais máquinas à rede, formando uma grande rede autônoma de dispositivos. Esta estrutura idealizada nas pesquisas passou a ser chamada de Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) (WHITMORE; AGARWAL; XU, 2015).

A ideia da IoT é construir redes inteligentes, que conectam objetos utilizados no dia-a-dia à Internet, constantemente trocando informações extraídas de campo, com o intuito de facilitar e agilizar a vida cotidiana do homem moderno e de otimizar os gastos de recursos naturais e humanos (SILVA et al., 2016).

Como uma tecnologia emergente, a IoT recebeu muita atenção e promete entregar inúmeros benefícios para várias aplicações (HE; YAN; XU, 2014). Ela abriu o caminho para criação de

infraestruturas conectadas para suportar serviços inovadores e promete sistemas mais flexíveis e eficientes.

Nos últimos anos muitas pesquisas e desenvolvimento tecnológico foram direcionados para aplicações IoT nos domínios urbano e industrial, objetivando a implementação de Cidades Inteligentes (SC, do inglês *smart cities*). Por definição, são projetos situados em meio urbano utilizados para extrair informações e usá-los para gerir recursos e ativos de maneira eficiente. (THEODORIDIS; MYLONAS; CHATZIGIANNAKIS, 2013; FERREIRA; OLIVEIRA; SILVA, 2019).

Estruturas de baixo custo, comunicando-se em longas distâncias e dispositivos com baixo consumo de energia são necessários para tornar essas aplicações possíveis. Tecnologias como 5G e NB-IoT (*Narrow Band* - IoT) são muito recentes e ainda tem custos de compra e manutenção elevados, e as redes móveis e o Wi-Fi (do inglês *Wireless Fidelity*) consomem muita energia, o que inviabiliza alimentação por baterias em locais de difícil acesso (FERREIRA; OLIVEIRA; SILVA, 2019).

As opções de baixo consumo são as redes de área ampla e baixa potência (LPWAN, do inglês *low-power wide-area network*) e as de área pessoal sem fio (WPAN, do inglês *wireless personal area network*) (FERREIRA; OLIVEIRA; SILVA, 2019).

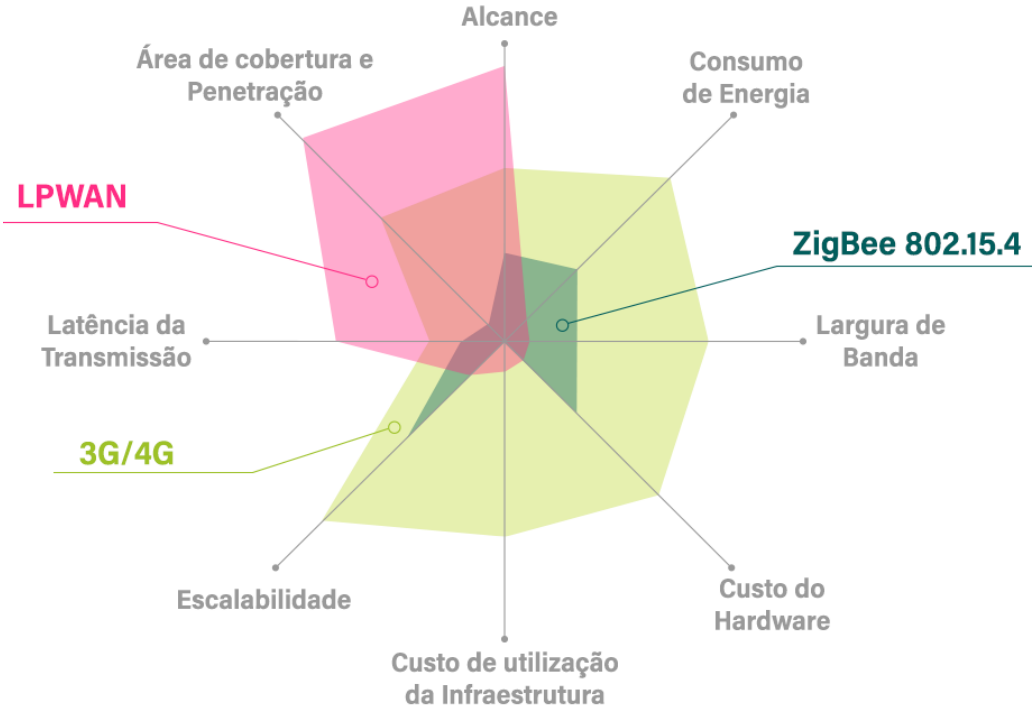
Segundo Ferreira, Oliveira e Silva (2019), para implementar SC utilizando IoT, num cenário ideal, apenas uma interface LPWAN, como LoRa (do inglês *Long Range*), seria suficiente para atender essas exigências. Entretanto, os dispositivos fabricados atualmente geralmente não possuem compatibilidade com esse tipo interface, mas são compatíveis com as WPAN como as existentes no *Bluetooth Low Energy* (BLE) (BLUETOOTH SIG, 2010; LORA ALLIANCE, 2015).

Portanto, a integração de uma interface BLE a um dispositivo conectado a uma rede LoRaWAN pode gerar uma aplicação flexível e que atende os requerimentos esperados para aplicações IoT em domínios urbanos, como as SC. Dentro desta perspectiva, neste trabalho foi proposto a implementação da referida estrutura, assim como a análise do seu desempenho baseado em indicadores de qualidade de comunicação e autonomia de bateria.

1.2 Justificativas

Atualmente, as principais tecnologias de comunicação sem fio consolidadas no mercado podem ser divididas em três grupos: as LPWAN, as WPAN e as redes de telefonia (AL-SARAWI et al., 2017). A Figura 1 compara as principais características dos grupos citados, sendo as WPAN representadas pelo protocolo *ZigBee* e as redes de telefonia por sua terceira (3G) e quarta (4G) gerações.

Figura 1 – Comparação entre características das tecnologias LPWAN, ZigBee e 3G/4G



Fonte: WAVIOT (2020).
Nota: Adaptado pelo autor.

Tecnologias como 3G, além do alto custo de instalação e manutenção, têm consumo de energia muito alto, o que inviabiliza aplicações onde os dispositivos são de difícil acesso (RATASUK; MANGALVEDHE; GHOSH, 2015). Wi-Fi, do grupo WPAN, é uma opção de baixo custo de *hardware* que opera em faixas de frequência não licenciadas, mas também apresenta alto consumo de energia. Como boa parte das aplicações industriais e urbanas têm dispositivos instalados em lugares em que não podem ser substituídos constantemente, como em ruas e plantas industriais, as tecnologias apresentadas anteriormente não são boas alternativas (FERREIRA; OLIVEIRA; SILVA, 2019).

NB-IoT, LTE M e a futura quinta geração da telefonia (5G) tem a cobertura e o consumo de energia desejados. Entretanto, são redes privadas e, para alguns países, o custo do *hardware* e as taxas de utilização e manutenção são inviáveis num ambiente com muitos dispositivos (FERREIRA; OLIVEIRA; SILVA, 2019).

Sigfox e LoRa, do grupo LPWAN, permitem transmissões de pequenas mensagens em longas distâncias, com longa duração das baterias e custos extremamente baixos (FERREIRA; OLIVEIRA; SILVA, 2019). Embora as duas tecnologias tenham características muito parecidas, como pode ser visto no estudo comparativo de Mekki e outros (2019), o custo de desenvolvimento do LoRa é melhor para aplicações com poucos dispositivos conectados à rede. Outra grande diferença é a limitação do tamanho e da quantidade diária de mensagens na rede Sigfox, o que restringe a quantidade de aplicações possíveis.

As principais opções WPAN disponíveis no mercado são *Bluetooth*, BLE e *ZigBee*. A tecnologia *ZigBee* oferece mais eficiência no consumo de energia em relação ao *Bluetooth*, mas possui menos compatibilidade e menor taxa de transmissão de dados. O BLE adotou muitas características de ambas tecnologias, melhorando as fraquezas presentes no *Bluetooth*, tornando-o superior em recursos como consumo de energia, escalabilidade, segurança e autenticação/correção de erros (GEORGAKAKIS et al., 2010).

LoRa, num cenário ideal, seria suficiente para aplicações de envio de pequenas mensagens frequentemente durante o dia. Entretanto, devido ao problema de compatibilidade das interfaces LPWAN, é recomendado adicionar uma tecnologia WPAN, como o BLE, nos dispositivos para suprir essa carência (FERREIRA; OLIVEIRA; SILVA, 2019).

Misturando tecnologias diferentes é possível obter a melhor parte de cada uma delas (PÉREZ CAMPOS, 2019). Como exemplos de integração de LoRa e BLE os seguintes trabalhos podem ser citados: Ferreira, Oliveira e Silva (2019) que adaptaram um *gateway* LoRa para receber informações de dispositivos *Bluetooth* em curta distância, numa aplicação de Cidade Inteligente (CI); e Chang e Li (2019) implementaram um sistema que permite os semáforos detectarem ambulâncias próximas para melhorar o atendimento de emergências.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em integrar uma interface BLE à um dispositivo conectado à uma rede LoRaWAN capaz de atende os requerimentos esperados para aplicações IoT em domínios urbanos. Além disto, a estrutura integrada deve ser capaz de categorizar objetos com interfaces *Bluetooth* e enviar para o usuário pela rede LoRaWAN. A análise do desempenho do sistema como um todo deve ser realizada com base em indicadores de qualidade de comunicação e autonomia de bateria.

1.3.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, os seguintes objetivos específicos foram almejados:

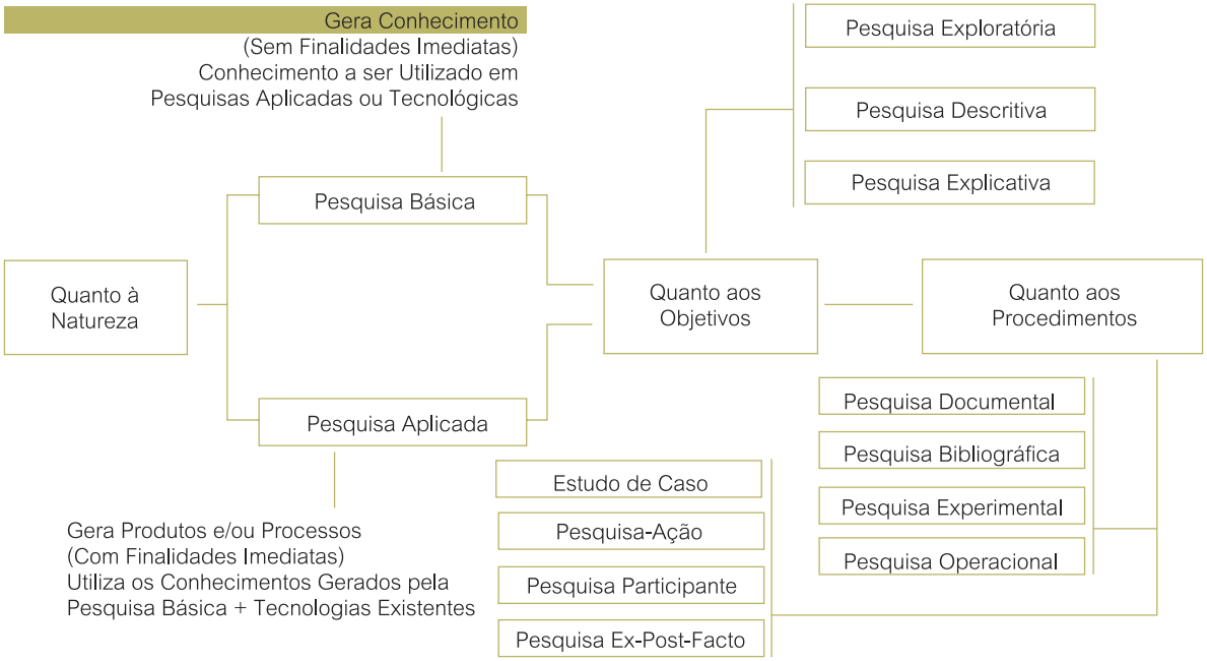
i. aprofundar os estudos do estado da arte dos protocolos LoRa, LoRaWAN e *Bluetooth Low Energy*, para melhorar o entendimento sobre o funcionamento dessas redes, suas topologias e os parâmetros de configuração necessários para implementar um sistema;
ii. estudar o funcionamento dos módulos de comunicação embarcados BLE (SPBTLE-1s) e LoRa (CMWX1ZZABZ-091);
iii. estruturar os protocolos de comunicação serial entre os módulos e entre o dispositivo e o servidor da rede LoRaWAN;
iv. fazer o levantamento de medições dos indicadores de desempenho de comunicação e autonomia de bateria do sistema;
v. avaliação da viabilidade e potencial da aplicação em um contexto de IoT.

1.4 Procedimentos Metodológicos

A ciência utiliza a pesquisa como forma de obtenção e observação de fatos e leis para resolver problemas e solucionar dúvidas relativos a um campo de conhecimento. A pesquisa científica é um conjunto de procedimentos sistemáticos, que se apoia no raciocínio lógico e usa métodos científicos com objetivo de encontrar a solução para um problema ou obter o conhecimento sobre determinado assunto.

Como existem diversos tipos de procedimentos, objetivos e temas no mundo cientifico, é importante classificar a pesquisa de acordo com suas peculiaridades para que ela seja abordada da melhor maneira possível. As formas clássicas de classificação dividem as pesquisas científica em três categorias: quanto à natureza, quanto aos objetivos e quanto à abordagem do problema. A Figura 2 apresenta estas categorias de forma detalhada.

Figura 2 – Classificação dos tipos de pesquisa



Fonte: Prodanov e Freitas (2013).

A proposta de projeto contida nesse documento tem natureza aplicada, pois tem como finalidade gerar um protótipo que atenda as exigências de uma aplicação no domínio urbano e que tenha interface compatível com os dispositivos fabricados atualmente.

Quanto aos objetivos e procedimentos, a proposta se caixa como pesquisa explicativa e experimental, respectivamente, pois são utilizados métodos experimentas, com locais e instrumentos de medição apropriados, para demonstrar como e porque a integração de LoRa e BLE pode ser uma boa alternativa.

A abordagem dessa pesquisa em relação ao problema é quantitativa, pois procura traduzir certas características de funcionamento do protótipo implementado em números para analisar seu desempenho.

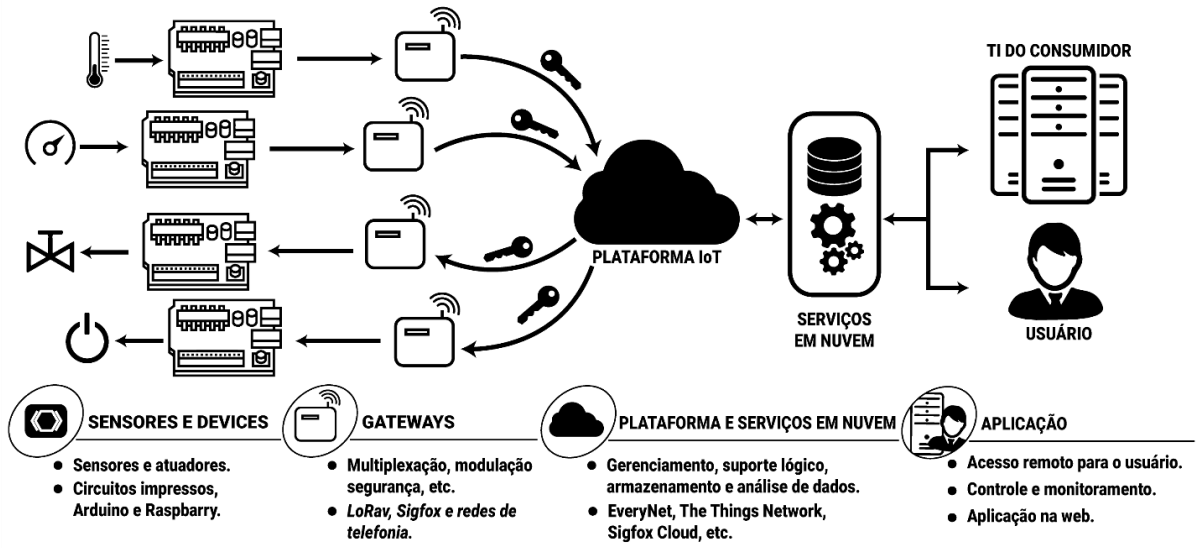
2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Nesta seção são apresentados os principais conceitos utilizados no entendimento e execução desse trabalho. Na seção 2.1 é apresentada uma revisão geral do funcionamento de uma aplicação IoT, para facilitar o entendimento do sistema como um todo. Os protocolos de comunicação utilizados neste trabalho são detalhados nas seções 2.2 e 2.3.

2.1 Arquitetura IoT

Arquiteturas IoT variam de solução para solução, baseadas nas características desejadas, como pode ser visto no artigo de Al-Fuqaha e outros (2015), que faz uma revisão das arquiteturas IoT mais relevantes. O modelo proposto por Yaqoob e outros (2017) é composto por quatro camadas: a) camada de percepção e atuação, b) camada de transporte, c) camada de gerenciamento e processamento e d) camada de aplicação. A Figura 3 ilustra um diagrama de blocos contendo as referidas camadas.

Figura 3 – Arquitetura generalizada de uma solução IoT



Fonte: Produção do próprio autor.

2.1.1 Camada de percepção e atuação

A principal função desta camada é perceber características físicas de objetos ou ambientes usando sensores, processar e digitalizar essas informações para facilitar a transmissão pela rede

(WU et al., 2010). Os dispositivos presentes nesta camada também podem ser responsáveis por atuar no ambiente de acordo com comandos enviados pela rede ou pelo usuário.

Nesta camada existe uma grande quantidade de dispositivos distintos, como celulares, veículos, sensores, *beacons*, objetos inteligentes, entre outros. Grande parte deles não pode ser integrados diretamente na rede, por isso são implantados em seu "corpo" placas com circuitos impressos (PCB, do inglês *printed circuit board*) equipadas com *microchips* que podem medir temperatura, velocidade, localização, entre outros (WU et al., 2010).

2.1.2 Camada de transporte

Essa camada é responsável pela transferência de dados da camada de percepção e atuação para a camada de processamento através de várias redes (WU et al., 2010). Os operadores dessa camada são os *gateways* e torres de comunicação, também denominadas estações rádio base.

As principais tecnologias presentes no mercado são Wi-Fi, *ZigBee*, *Bluetooth*, LoRa, *Sigfox*, entre outros. Nessa camada é possível identificar vários protocolos, como a sexta versão do Protocolo de Internet (IPv6, do inglês *Internet Protocol version 6*), extremamente necessários para endereçamento de bilhões de objetos.

2.1.3 Camada de gerenciamento e processamento

Esta provê armazenamento, análise e processamento dos dados obtidos pela camada de transporte e gerenciamento dos dispositivos da camada de percepção e atuação. As plataformas mais famosas que fornecem esse tipo de serviço são *Google Cloud* e *Amazon EC2*. Para aplicações IoT os exemplos de plataforma são *Things.io*, *The Things Network* e *KORE Wireless* (WU et al., 2010; YAQOOB et al., 2017; KORE WIRELESS, 2020).

2.1.4 Camada de aplicação

A camada de aplicação é responsável pela apresentação dos dados de uma forma mais agradável e customizada. Ela permite usuários sem conhecimento técnico interagir com a aplicação IoT por meio de painéis e relatórios.

2.2 LoRa

A tecnologia LoRa provê um sistema de comunicação do tipo LPWAN, desenvolvido para ser capaz de transmitir em longas distâncias com dispositivos de baixo consumo de energia para aumentar a longevidade da bateria (LORA ALLIANCE, 2015).

Opera na faixa de frequência não licenciadas ISM, de 915 a 928 MHz no Brasil. Possibilitam transmissões com alcance de mais de 10 km em áreas urbanas com dispositivos alimentados por baterias com expectativa de vida de até 105 meses. O tamanho do *payload* (termo do inglês usado para se referir ao conteúdo útil do pacote) de cada transmissão varia entre 2 e 225 bytes, e a taxa de transmissão de dados pode chegar até 50 kbps (LORA ALLIANCE, 2015).

O nome LoRa é comumente referido ao sistema de comunicação como um todo, que é composto de protocolos de duas camadas distintas: a) o protocolo de camada física, denominado de LoRa ou LoRa PHY, que é uma técnica de modulação desenvolvida pela Semtech; e b) o protocolo de camada de controle de acesso ao meio, o LoRaWAN, que atua como protocolo de roteamento, gerenciando a comunicação entre os *gateways* e os dispositivos. LoRaWAN é um padrão aberto, desenvolvido e fomentado pela associação LoRa Alliance (LORA ALLIANCE, 2015; SEMTECH, 2015).

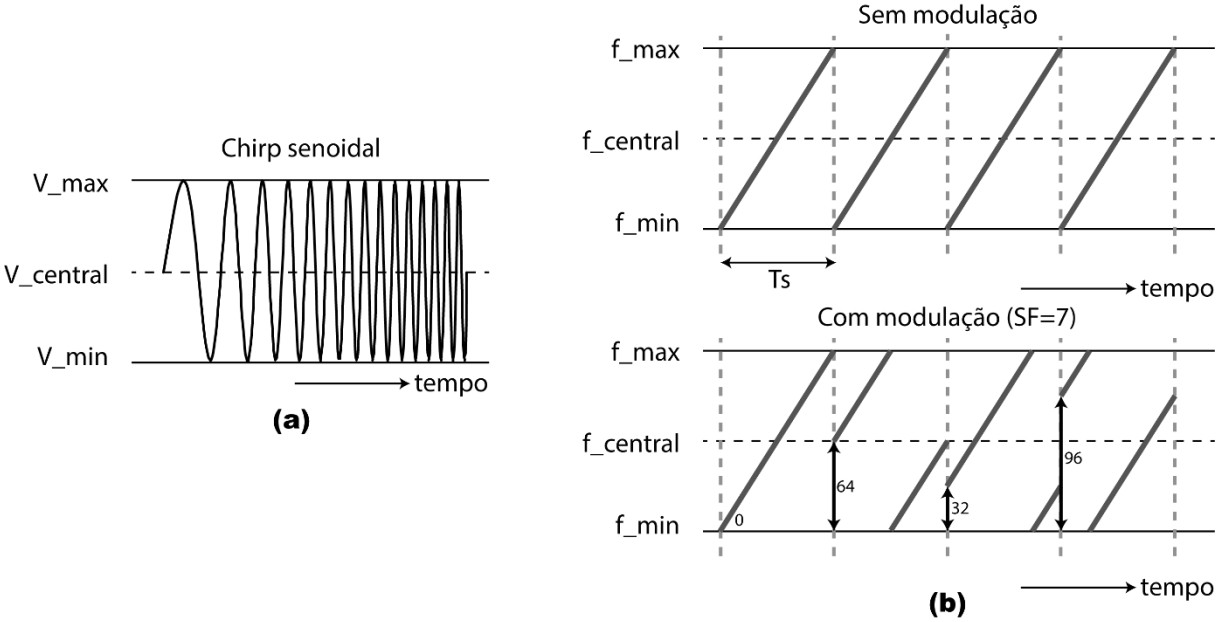
2.2.1 LoRa PHY

LoRa PHY representa o modelo de camada física desenvolvido pela Semtech que especifica uma técnica de espalhamento no espectro de frequências que usa os pulsos *chirp* para modular informação, chamada de *Chirp Spread Spectrum* (CSS). Os pulsos *chirp* são sinais de amplitude constante que varrem toda a largura de banda, variando a frequência de forma linear em um determinado tempo (AUGUSTIN et al., 2016).

A Figura 4(a) ilustra um sinal *chirp* senoidal, com frequência limitada pela largura de banda, também conhecida pelo termo do inglês *bandwidth* (BW), variando linearmente de f_min para f_max. Esses saltos de frequência podem ser positivos ou negativos, denominados de *up-chirp* e *down-chirp*, respectivamente.

A informação a ser transmitida é codificada em símbolos, que são representados por deslocamentos cíclicos de frequência, como ilustrado na Figura 4(b). Dentro do período *Ts* referente a um símbolo, quando a frequência atinge o valor máximo da BW, o salto continua a partir do valor mínimo.

Figura 4 – Representação gráfica (a) de um sinal *chirp* senoidal no domínio do tempo e (b) da variação de frequência no tempo de um sinal *chrip*



Fonte: Produção do próprio autor.

Um símbolo representa um ou mais bits de dados e apresenta 2^{SF} valores possíveis, onde SF é o fator de espalhamento, traduzido do termo do inglês *spread factor* (SF). Na Figura 4(b), como o SF da modulação é 7 (1 símbolo é composto de 7 bits), um deslocamento de frequências de 96 unidades representa o símbolo 1011111b. Na prática, SF varia entre 7 e 12 e, a cada unidade incrementada, o intervalo das frequências cai na metade e a duração do símbolo dobra. A equação (1) relaciona os parâmetros de implementação de rede mais importantes, quais sejam o *Ts*, *SF* e *BW*.

$$Ts = \frac{2^{SF}}{BW}\ [s] \tag{1}$$

Além disso, o LoRa possui um código de correção de erros de tamanho variável, melhorando a robustez do sinal transmitido em detrimento da redundância e fornecendo recursos de recuperação contra a corrupção de bits. A taxa de codificação (CR, do inglês *code rate*) é

determinada pela razão 4/(4+n), tal que n pode assumir valores inteiros entre 1 e 4. Este parâmetro impacta diretamente na taxa de erro de pacotes (PER, do inglês *packet error rate*) e é importante na análise de performance de uma rede LoRaWAN (FABER et al., 2020).

Esta correção possibilita a tecnologia uma alta resiliência contra interferências, com sensibilidade de 154 dBm (LORA ALLIANCE, 2015). A sensibilidade é um parâmetro que contabiliza os ganhos e perdas em um sistema de comunicação, e foi estabelecida para garantir que o receptor receba a informação com uma relação sinal-ruído (SNR, do inglês *signal-to-noise ratio*), adequada para decodificação. Levando todos esses parâmetros em conta, a equação (2) permite calcular a taxa de transmissão de bits *Rb* da rede implementada.

$$Rb = SF \times \frac{BW}{2^{SF}} \times CR \; [bps] \tag{2}$$

2.2.2 LoRaWAN

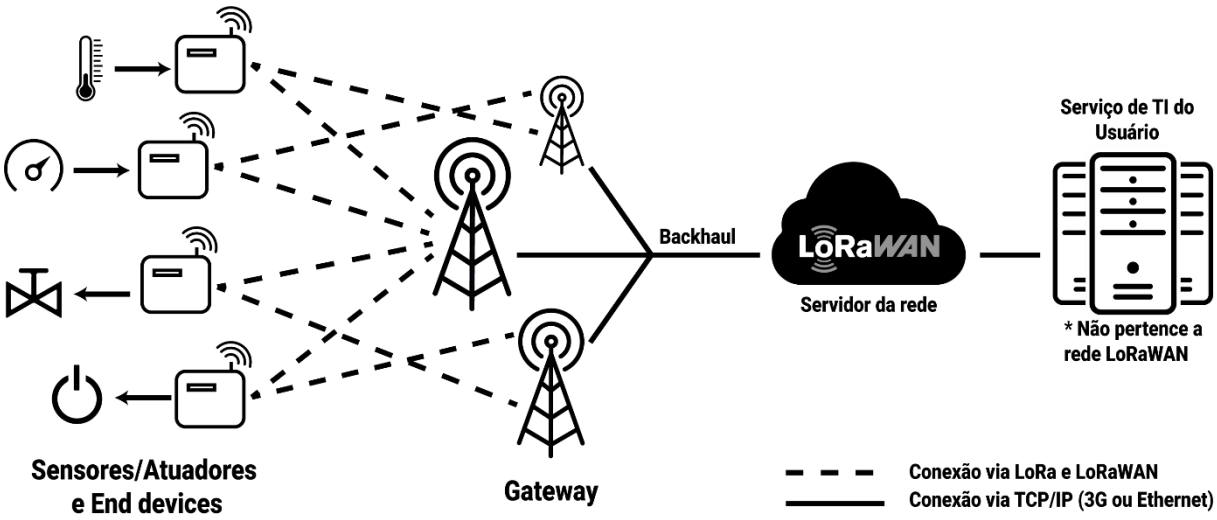
LoRaWAN é um protocolo de controle de acesso ao meio (MAC, do inglês *media access control*), construído para usar a LoRa PHY. Foi desenvolvido principalmente para redes de sensores, que enviam pacotes com pouca constância e baixa taxa de transferência (AUGUSTIN et al., 2016).

A tecnologia adaptativa de taxa de transmissão de dados (ADR, do inglês *adaptative data rate*) é parte das especificações do protocolo LoRaWAN. Seu objetivo é ajustar os parâmetros de camada física, como SF e potência de transmissão, para equilibrar o consumo e eficiência dos dispositivos, assim como controlar o uso dos canais de rádio.

A topologia típica de uma rede LoRaWAN é a estrela, como é ilustrado na Figura 5. Nessas estruturas, existem três tipos de dispositivos: O dispositivo final, ou *end device*, o *gateway* e o servidor. Os *end devices* transmitem os dados coletados para os *gateways* usando os protocolos LoRa e LoRaWAN. O *gateway* recebe esse pacote de informações LoRaWAN e transmite para o servidor da rede por uma interface de maior velocidade, chamada de *backhaul*, como 3G ou Ethernet. O servidor é responsável por decodificar as informações enviadas pelos *end devices*, os *uplinks*, e gerar pacotes que são transmitidos de volta, os *downlinks* (AUGUSTIN et al., 2016).

A maioria das tecnologias atuais são baseadas na topologia *mesh*, onde todos dispositivos funcionam como roteadores de informação. Isso aumenta a extensão da rede, mas também a torna mais complexa e diminui o tempo de vida da bateria. Na topologia estrela, existem dispositivos específicos para roteamento de pacotes (*gateways*), o que permite aos *end devices* passarem mais tempo em um estado de baixo consumo de energia (DEVALAL; KARTHIKEYAN, 2018). Um *end device* LoRaWAN com bateria de 2000 mAh tem tempo de vida esperado de 105 meses, aproximadamente 9 anos (LORA ALLIANCE, 2015).

Figura 5 – Estrutura típica de uma rede LoRaWAN



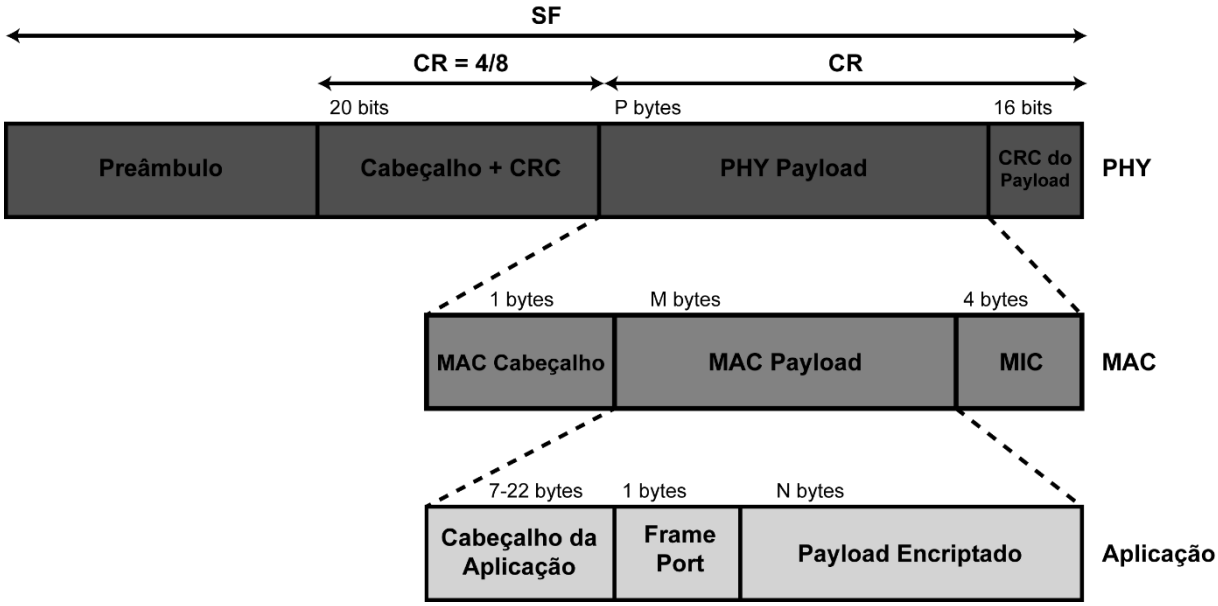
Fonte: Produção do próprio autor.

Existem três classes de *end devices* LoRaWAN e suas características se diferem apenas em questões de agendamento de *downlinks*. A **classe A** permite *downlinks* em duas janelas de tempo após *uplink* e qualquer outra recepção tem que esperar até outro *uplink*. São os dispositivos com mais tempo de vida da bateria e menos flexibilidade na recepção de dados. A **classe B** opera de maneira similar a A, mas possui janelas extras de recepção em horários programados. Para isso, os *gateways* tem um sinal de sincronização de tempo que informam o servidor quando o *end device* está pronto para receber o pacote. Os dispositivos de **classe C** possuem janelas praticamente continuas de recepção, limitadas apenas aos momentos em que estão transmitindo. Entretanto, são os dispositivos que consumem mais energia por estarem aguardando pacotes do servidor o tempo todo (LORA ALLIANCE, 2015).

2.2.3 Estrutura do Pacote

O pacote LoRa na camada física é ilustrado na Figura 6. Este é composto por quatro estruturas: a) o preâmbulo, que identifica o início do pacote; b) o cabeçalho, que carrega informações importantes para interpretação da mensagem, como o tamanho, por isso é transmitido com CR máximo ($n = 4$); c) uma estrutura de redundância, presente em cabeçalhos e *payloads* de *uplinks*, chamada de *cyclic redundancy check* (CRC); e d) o *payload* da camada PHY, que contém a mensagem encapsulada desde a camada de Aplicação até a camada MAC.

Figura 6 – Estrutura de um pacote LoRa nas camadas física (PHY), MAC e de Aplicação



Fonte: Liando e outros (2019).
Nota: Adaptado pelo autor.

O *payload* PHY é o pacote interpretado na camada MAC. Além da estrutura da camada de aplicação, é constituído por um código de integridade da mensagem (MIC) e um cabeçalho, com informações relevantes para encaminhamento da mensagem, como tipo de transmissão, versão do protocolo, entre outros. Por fim, a estrutura da camada de aplicação contém cabeçalho, implementado pelo usuário, o campo denominado de *Frame Port*, que determina o a porta usada pela aplicação, e um *payload* encriptado com os dados enviados pelo *end device* ou servidor.

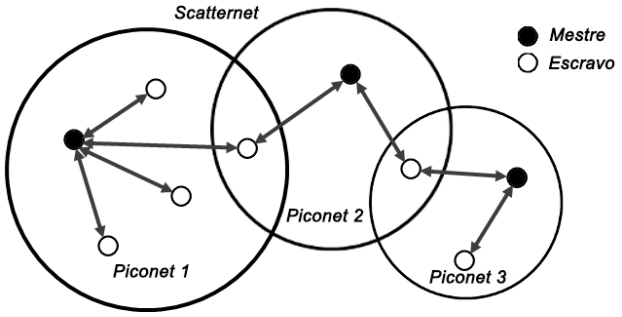
2.3 *Bluetooth Low Energy*

O *Bluetooth* é uma tecnologia inicialmente desenvolvida em 1994 pela companhia *Ericsson Mobile Communications*, buscando uma forma de implementar uma interface sem fio para conectar os dispositivos móveis e seus acessórios. Em 1998, foi criado o consórcio *Bluetooth Special Interest Group* (abreviadamente *Bluetooth* SIG) para estabelecer o conjunto de protocolos quem vêm sendo desenvolvidos até hoje (HAARTSEN, 1998).

Esta tecnologia foi elaborada para trabalhar com transmissão de dados contínua entre dispositivos pessoais, como telefones, celulares e computadores, através de uma frequência de rádio de curto alcance de maneira segura (RECK, 2017). Para funcionar em todo mundo, operam nas faixas de frequência de rádio pertencentes a banda de espectro livre (também denominada de ISM, do inglês *industrial, scientific and medical*), que compreende frequências entre 2,4 GHz e 2,485 GHz. O *Bluetooth* divide o espectro em 79 canais de 1 MHz e, para evitar as prováveis interferências, utiliza a técnica denominada *Frequency-hopping spread spectrum* (FHSS), através do qual os dispositivos executam saltos entre os canais de forma aleatória numa ordem conhecida pelo transmissor e receptor (BLUETOOTH SIG, 2020b).

Os dispositivos dessa tecnologia usam comunicação ponto-a-ponto e geralmente formam redes ad-*hoc* (sistema de comunicação sem fio, onde todos funcionam como roteadores), denominadas de *piconets*. Nestas redes, o dispositivo que iniciou a conexão é denominado mestre e os demais são chamados de escravos, ou pelos termos *central* e *peripheral* em inglês. Os mestres podem controlar e se comunicar com até sete escravos, já os escravos podem apenas se comunicar com o mestre e não podem se comunicar entre si. Entretanto, um escravo pode participar de mais de uma *piconet*, conectando as duas redes, e formando o que é conhecido como *scatternet*, como ilustrado na Figura 7 (LAIRD, 2013; BLUETOOTH SIG, 2020b).

Figura 7 – Topologia de rede *piconet* e *scatternet*



Fonte: Laird (2013).

O *Bluetooth Low Energy*, também conhecido por *Bluetooth Smart*, é entendido como detentor de uma funcionalidade que integra o protocolo *Bluetooth* desde sua versão 4.0, lançada em 2010 (BLUETOOTH SIG, 2010).

Foi projetado para funcionar com níveis de consumo de energia reduzidos em dispositivos que não precisam transmitir grandes volumes de dados, podendo chegar em até 10% em relação ao *Bluetooth* convencional (chamado de *Bluetooth* Clássico para diferenciar do BLE), o que o torna ideal para dispositivos que utilizam pequenas células de energia (HEYDON, 2012). O tempo de vida esperado para uma célula, com capacidade de carga armazenada de 230 mAh, é de 9583 horas, ou aproximadamente 13 meses, com intervalo entre conexões de 800 ms. (TEXAS INSTRUMENTS, 2010). No Quadro 1 é apresentado um comparativo entre o BLE e a versão clássica, contendo características que são discutidas nos parágrafos sobre a camada física da arquitetura BLE.

O baixo consumo, a compatibilidade e a portabilidade dos dispositivos permitem que a tecnologia BLE tenha uma grande diversidade de aplicações, como monitoramento de pulso e pressão sanguínea de pacientes e automação de tarefas em uma residência ou no ambiente de trabalho. Essa diversidade leva à criação de perfis, definidos pela camada *Generic Attribute Profile* (GATT) da arquitetura do BLE, para otimizar o funcionamento do *chip* com o menor consumo de energia possível para determinada aplicação (HEYDON, 2012).

Quadro 1 – Comparativo entre *Bluetooth* clássico e BLE

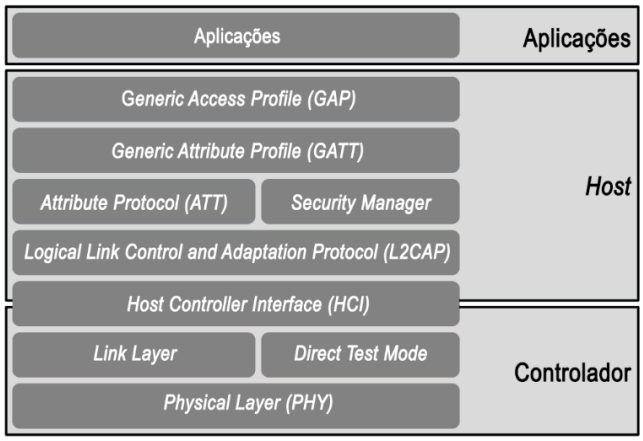
Especificações técnicas	*Bluetooth* clássico	BLE
Consumo de energia	1 (valor de referência)	0,1 ~ 0,05 (de acordo a utilização)
Tempo de vida esperado da bateria	1 mês* (230 mAh) 11 meses* (2000 mAh)	13 meses (230 mAh) 115 meses (2000 mAh)
Alcance	100 m	50 m
Banda de Frequência	2,4 GHz (2,402 ~ 2,480 GHz)	2,4 GHz (2,402 ~ 2,480 GHz)
Canais	79 canais de 1 MHz	40 canais de 2 MHz
Modulação	GFSK e PSK	GFSK
Taxa de transmissão de dados / *Data rate*	1 ~ 3 Mbps	1 Mbps
Capacidade de transmissão / *Throughput*	0,7 ~ 2,1 Mbps	0,27 Mbps (305 kbps)
Latência	100 ms	6 ms
Tempo de conexão	20 ms	2,5 ms
Topologias	Ponto-a-ponto	Ponto-a-ponto, *Broadcast* e *Mesh*

Fonte: *Bluetooth* SIG (2020b), Laird (2013) e Texas *Instruments* (2010).
Nota: * Valor estimado com base no consumo de energia das tecnologias.

2.3.1 Arquitetura

A arquitetura para BLE é mostrada na Figura 8, sendo dividida em 3 partes básicas: controlador, *host* e aplicações. O controlador é um dispositivo físico que pode transmitir e receber sinais de rádio e os interpretar como pacotes de informações. O *host* é um conjunto de programas responsáveis por gerenciar como dois ou mais dispositivos se comunicam entre si e como diferentes funcionalidades podem ser executadas ao mesmo tempo. As aplicações são as ferramentas (físicas e lógicas) utilizadas para integrar o dispositivo BLE em uma determinada aplicação (HEYDON, 2012).

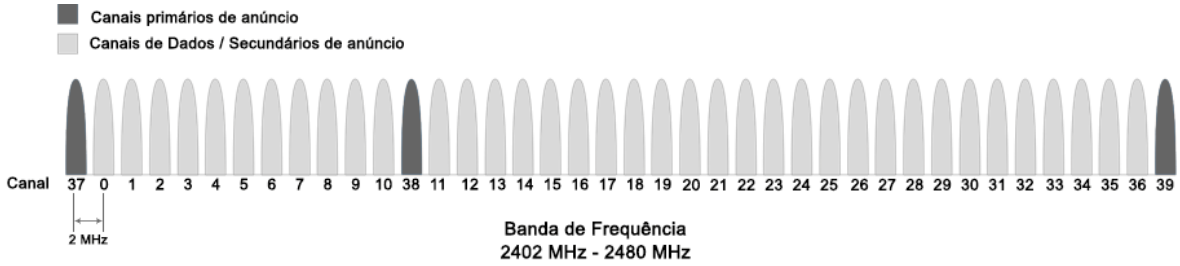
Figura 8 – Arquitetura BLE



Fonte: Heydon (2012).

A camada física ou ***physical layer*** **(PHY)** refere-se à parte física do rádio usado para a comunicação, contendo as codificações, bem como a modulação dos sinais com dados de informação. Assim como a versão clássica do *Bluetooth*, opera na banda ISM e faz uso de técnicas para evitar interferências como o FHSS. Além disso, divide o espectro em 40 canais com 2 MHz de espaçamento, como ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Divisão dos canais do BLE no espectro



Fonte: Afaneh (2016).

Os canais de anúncio, também conhecidos pelo termo do inglês *advertising channels*, têm a função de descobrir outros dispositivos, estabelecer conexões e transmissão *broadcast*. Como essas funções são muito importantes, elas são dispostas nos canais com menor interferência com as comunicações via Wi-Fi. Os canais secundários de anúncio ou de transmissão de dados são utilizados após a conexão entre os dispositivos ser estabelecida nos canais primários (CHANG, K.-H., 2014).

A modulação utilizada é a *Gaussian frequency-shift keying* (GFSK), que transmite informações por meio de uma portadora chaveando a sua frequência instantânea. No caso do BLE, dois níveis de frequência são usados, também chamados de símbolos que representam os valores binários “1” ou “0”. A técnica utiliza um filtro Gaussiano para garantir transições nos pulsos mais suaves, o que reduz a largura espectral dos sinais apesar de aumentar a interferência intersimbólica.

Teoricamente, sem considerar perdas e interferência, o BLE é capaz de transmitir 1 milhão de símbolos por segundo, o que é equivalente a uma taxa de transmissão de dados de 1 Mbps. Na prática, esse número cai para até 0,27 Mbps (305 kbps), dependendo das características do meio de propagação.

A camada ***Direct Teste Mode*** é uma camada separada pra testes de operação do rádio. Em modo de operação normal a camada ***Link Layer*** é utilizada, sendo responsável por gerenciar o estado do rádio e pelo controle de tempo para atender as especificações dos protocolos BLE. Existem cinco estados que descrevem o comportamento do rádio:

- *Standby* – não recebe nem envia pacotes;
- *Advertising* – pode enviar pacotes pelos canais de anuncio e responder requisições de outros dispositivos;
- *Scanning* – pode buscar por pacotes enviados nos canais de anuncio e solicitar informações adicionais de outros dispositivos;
- *Initiating* – ao localizar um dispositivo em *advertising*, pode responde-lo requisitando o início de uma conexão;
- *Connection* – quando a conexão é formada entre os dispositivos, ambos entram nesse estado e passam a se comunicar pelos canais de dados.

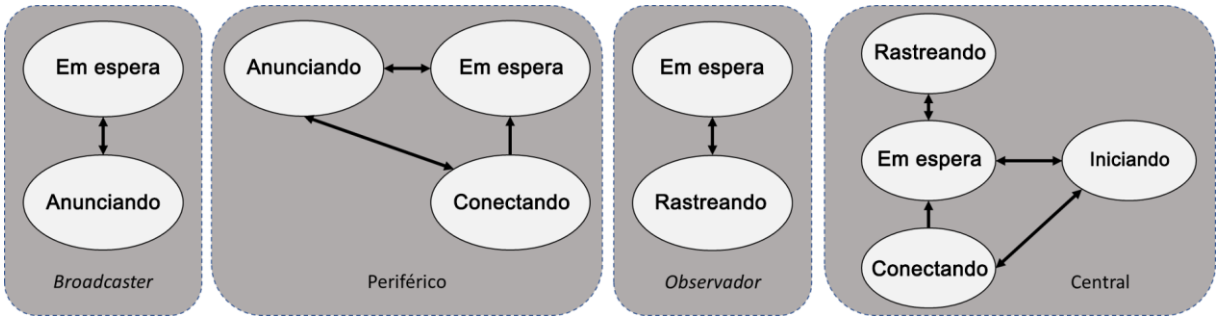
A camada ***Host Controller Interface*** **(HCI)** apresenta um protocolo padronizado pela *Bluetooth* SIG que especifica a comunicação entre o controlador e o *host*. Isso é importante pois essas camadas podem existir em placas separadas. O ***Logical Link Control and Adaptation Protocol*** **(L2CAP)** é o protocolo simplificado da L2CAP do *Bluetooth*, responsável pelo encapsulamento das mensagens para as camadas superiores. E a ***Security Manager*** oferece funções relacionadas a segurança na troca de informações para as outras camadas.

A ***Attribute Protocol*** **(ATT)** define os papéis de um dispositivo: o servidor, que pode expor uma série de atributos (estrutura de dados que contém informações), e o cliente, que faz a solicitação dessas informações. Esses papéis são designados pela camada ***Generic Attribute Profile*** **(GATT)**, de modo que cliente e servidor possam interagir de modo estruturado, trocando características.

Existem vários perfis de serviços GATT disponíveis para diferentes aplicações, como monitoramento de pressão sanguínea, proximidade, batimentos cardíacos, etc (BLUETOOTH SIG, 2016). O mais famoso é o ***Generic Access Profile*** **(GAP)** no qual é definido o funcionamento de aplicações genéricas: a) *broadcaster*, que transmite dados para todos dispositivos em seu alcance através dos canais de anúncio, sem poder se conectar com outros dispositivos; b) observador, que busca anunciantes, sem poder iniciar uma conexão; c)

periférico, um anunciante que pode se conectar e atua como escravo; d) central, que busca anunciantes e inicia as conexões, atuando como mestres. A Figura 10 ilustra como o rádio se comporta em cada um desses perfis.

Figura 10 – Comportamento do rádio nos perfis definidos pela GAP



Fonte: DeCuir (2013).
Nota: Traduzido pelo autor.

Quando não há necessidade de uma conexão entre os dispositivos, trabalhar apenas com anúncios é uma boa maneira de simplificar a complexibilidade e de melhorar a autonomia de bateria do sistema. Para isso, são utilizados *broadcasters*, observadores e *beacons*.

2.3.2 Trabalhando com anúncios

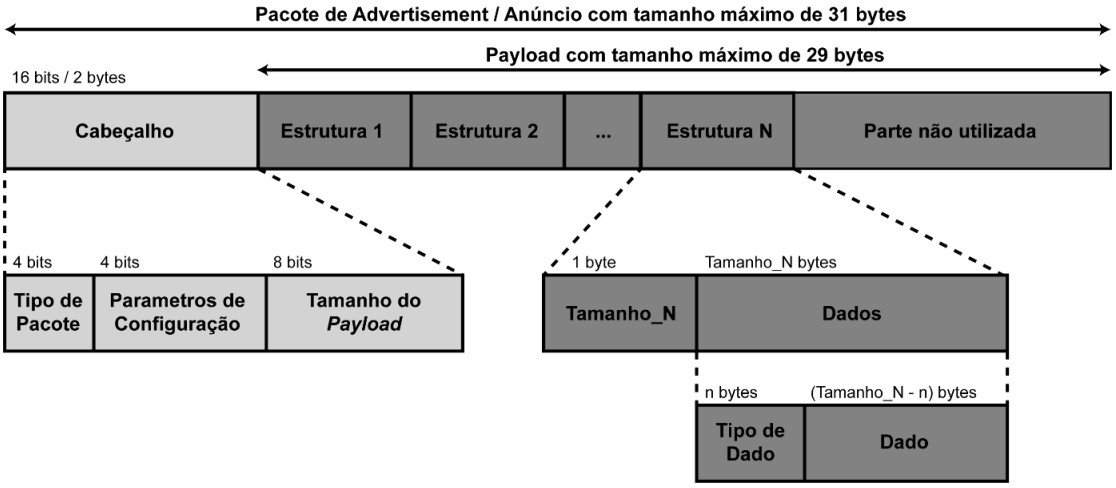
Os pacotes de anúncio BLE são constituídos de um cabeçalho de 16 bits e um *payload* com tamanho variando de 1 a 255 bytes (conjunto de 8 bits), dependo do tipo de mensagem definido no cabeçalho.

No cabeçalho são informados o tipo de pacote (4 bits) e o tamanho do corpo da mensagem (8 bits). Dentre os diversos tipos de pacotes definidos no protocolo *Bluetooth*, um tipo é usado para envio exclusivo de anúncios e tem suporte em todas versões das especificações: ADV_NONCONN_IND (0b0010 em binário ou 2 decimal) em que o anunciante não pode ser conectado, escaneado e envia pacotes para todos dispositivos em alcance (chamado de forma indireta) (BLUETOOTH SIG, 2010).

Para esse tipo de pacote, o corpo da mensagem pode ser preenchido com diversos tipos de dados e o tamanho máximo permitido é de 29 bytes (com os 2 bytes do cabeçalho, o pacote é limitado a 31 bytes). As informações são organizadas no corpo da mensagem, como é ilustrado na Figura

11, e são definidas na especificação do protocolo *Bluetooth* (BLUETOOTH SIG, 2019). Dentre estas, podem ser citadas: *local name*, nome do dispositivo; *manufacturer spesific data*, usado para incluir dados customizados por empresas; *service universally unique identifier* (UUID), usada como identificação de serviços; e a potência de transmissão (Tx *Power*) do pacote.

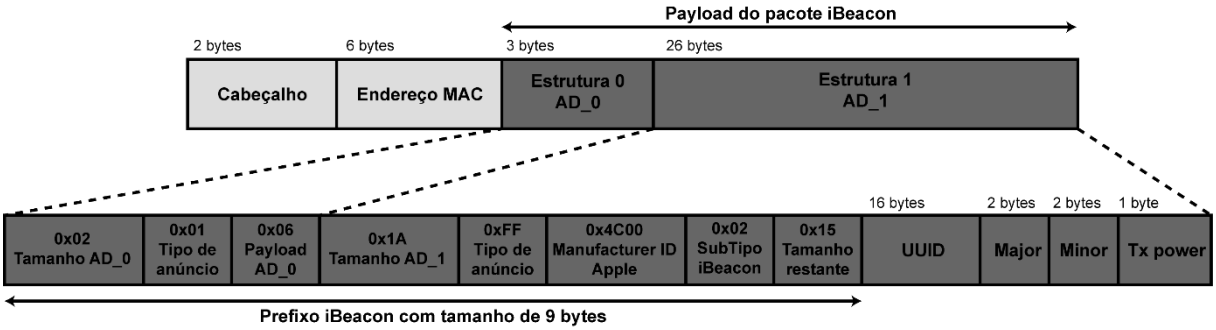
Figura 11 – Formato de um pacote de anúncio BLE



Fonte: *Bluetooth* SIG (2019).
Nota: Adaptado pelo autor.

Outro tipo de dispositivo que envia anúncios é o *beacons*. Funcionam de forma similar a um *broadcaster*, mas seus padrões são definidos por outras empresas, como os padrões *iBeacon*, *EddyStone e AltBeacon*. A Figura 12 ilustra o formato do pacote do protocolo *iBeacon* da *Apple*, que usam o formato básico das estruturas de anúncios BLE (denominadas de ADs), porém com alguns campos específicos.

Figura 12 – Formato do pacote de anúncio do protocolo iBeacon



Fonte: Apple (2016) e Novel Bits (2020).
Nota: Adaptado pelo autor.

O pacote *iBeacon* é constituído pelo cabeçalho, endereço MAC e o *payload*. O *payload* geralmente é composto de duas estruturas: a primeira (Tipo de anúncio = 0x01 = Flags) entrega informações sobre as capacidades do dispositivo e a segunda (Tipo de anúncio = 0xFF = Dados especificados pelo fabricante) especifica informações sobre o *iBeacon*.

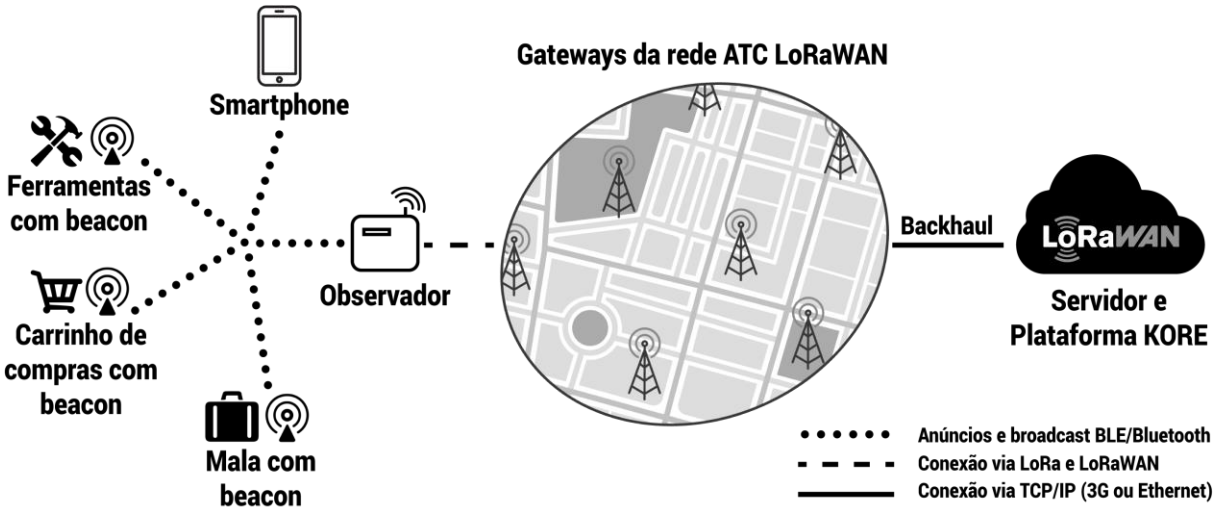
Em suma, os primeiros 9 bytes do *payload* são prefixos, pois são a identificação do pacote como *iBeacon*. Os outros 21 bytes são a parte mais importante do pacote e contêm o UUID do dispositivo, os identificadores individuais e de grupos (*Major* e *Minor*), bem como o complemento de 2 do Tx *Power* medido a 1 m da antena, usado para inferir proximidade junto ao indicador de intensidade do sinal recebido (RSSI, do inglês *received signal strength indicator*).

Para a maioria dos dispositivos é possível controlar o intervalo entre anúncios e por quanto tempo um dispositivo continua enviando mensagens até desligar o rádio e entrar em *Standby*, funções importantes para reduzir o consumo de energia e aumentar o tempo de vida da bateria.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ESTRUTURA PROPOSTA

Para simular uma aplicação real, foi implementada uma estrutura capaz monitorar e gerenciar um grupo de objetos remotamente. Cada objeto tem acoplado a seu corpo uma interface BLE embarcada, responsável por compartilhar, via *broadcast*, informações como identificadores (individual e de grupo), estado da bateria e a potência de transmissão. O observador, construído em uma PCB com os módulos BLE e LoRa, é o dispositivo responsável por captar essas informações, contabilizar os objetos com base nos identificadores e criar uma lista de alertas. As informações processadas são codificadas e transmitidas para o servidor LoRaWAN e, em seguida, para uma plataforma IoT. Nessa plataforma é possível visualizar as informações obtidas pelo observador e configurar alguns parâmetros de funcionamento da rede, como a janela de tempo para rastreamento e o intervalor entre transmissões, fazendo um agendamento de *downlink*. A Figura 13 ilustra a estrutura descrita.

Figura 13 – Esquema da estrutura integrando BLE a rede LoRaWAN



Fonte: Produção do próprio autor.

As características da estrutura são detalhadas nas seções: 3.1) descrição de funcionamento do observador, 3.2) descrição de *hardware* e 3.3) estruturação dos protocolos de comunicação entre os módulos e entre o observador e a rede. Depois da caracterização do sistema, na seção 3.4), é feita a validação do seu funcionamento.

3.1 Descrição do Funcionamento do Observador

Como o observador é constituído de dois sistemas diferentes interligados, seu funcionamento é detalhado em duas máquinas de estados nas seções 3.1.1 e 3.1.2 para o módulo LoRa e BLE respectivamente.

3.1.1 Máquina de estados do módulo LoRa

A Figura 14 ilustra a máquina de estados simplificada, que representa o funcionamento do módulo LoRa. Na inicialização, além das configurações do microprocessador e dos periféricos, são definidos os parâmetros de camada física LoRa: taxa de dados (DR, em inglês *data rate*) DR3, SF 9, canais na faixa de frequência entre 915 e 928 MHz com BW de 125 kHz, taxa de transmissão de dados de 1760 bps e tamanho máximo do pacote de aplicação de 242 bytes.

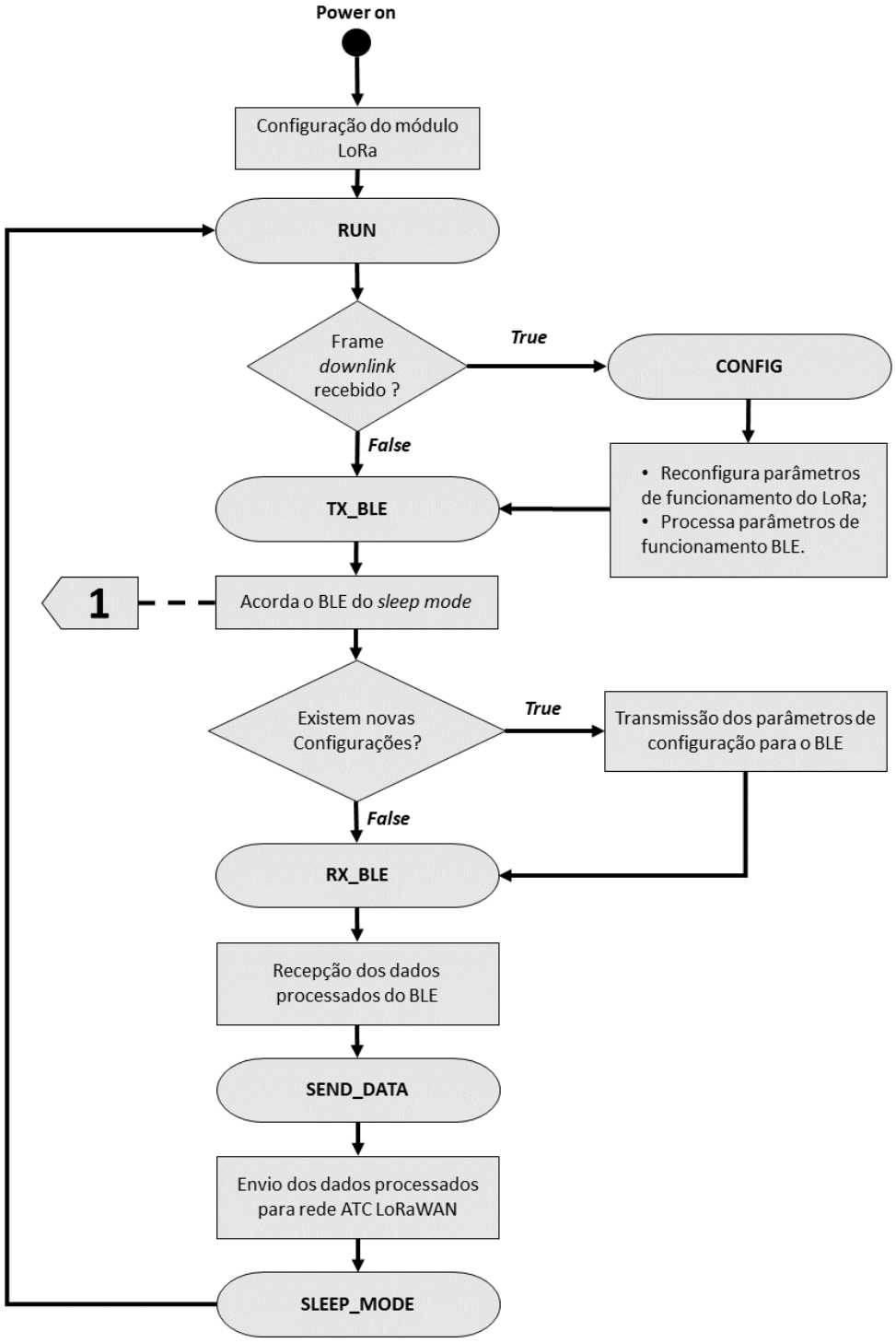
Após a inicialização, o *firmware* entra no estado RUN, onde verifica se existe algum pacote de configuração requisitado pela rede LoRaWAN. Como o módulo opera na classe A, essa verificação é feita enviando um *uplink* vazio e aguardando a resposta do servidor. Quando o servidor confirma que existem dados agendados para *downlink*, uma requisição formal é feita e o pacote é enviado para *end device*. Várias tentativas são feitas pelo servidor, usando *gateways* e canais diferentes, caso o pacote seja recebido o estado muda para CONFIG.

Em CONFIG, as informações são decodificadas e armazenadas, e o *timer* de funcionamento do LoRa, descrito na seção 3.3, é reconfigurado. No estado TX_BLE o módulo BLE é acordado através de uma interrupção causada pelo microcontrolador (MCU, do inglês *microcontroller unit*) associado ao módulo LoRa, representada na Figura 14 pelo bloco 1. Os *timers* usados nó módulo BLE são enviados via comunicação serial do MCU LoRa para o MCU BLE, caso exista uma nova configuração, e o estado muda para RX_BLE.

Em seguida é feita a recepção das informações processadas pelo BLE e o *uplink* das tabelas pela rede LoRaWAN no estado SEND_DATA. Após a transmissão o dispositivo entra em modo de baixo consumo de energia, representado pelo estado SLEEP_MODE, e só acorda após o cronometro do relógio em tempo real (RTC, do inglês *real-time clock*) ultrapassar o *timer* configurado anteriormente.

Quando reativado para modo de funcionamento normal, no estado RUN, o sistema só faz novas verificações de agendamento de *downlink* uma vez por dia, pois mesmo os *uplinks* vazios consumem uma corrente elevada da bateria.

Figura 14 – Máquina de estados simplificada do funcionamento do módulo LoRa



Fonte: Produção do próprio autor.

3.1.2 Máquina de estados do módulo BLE

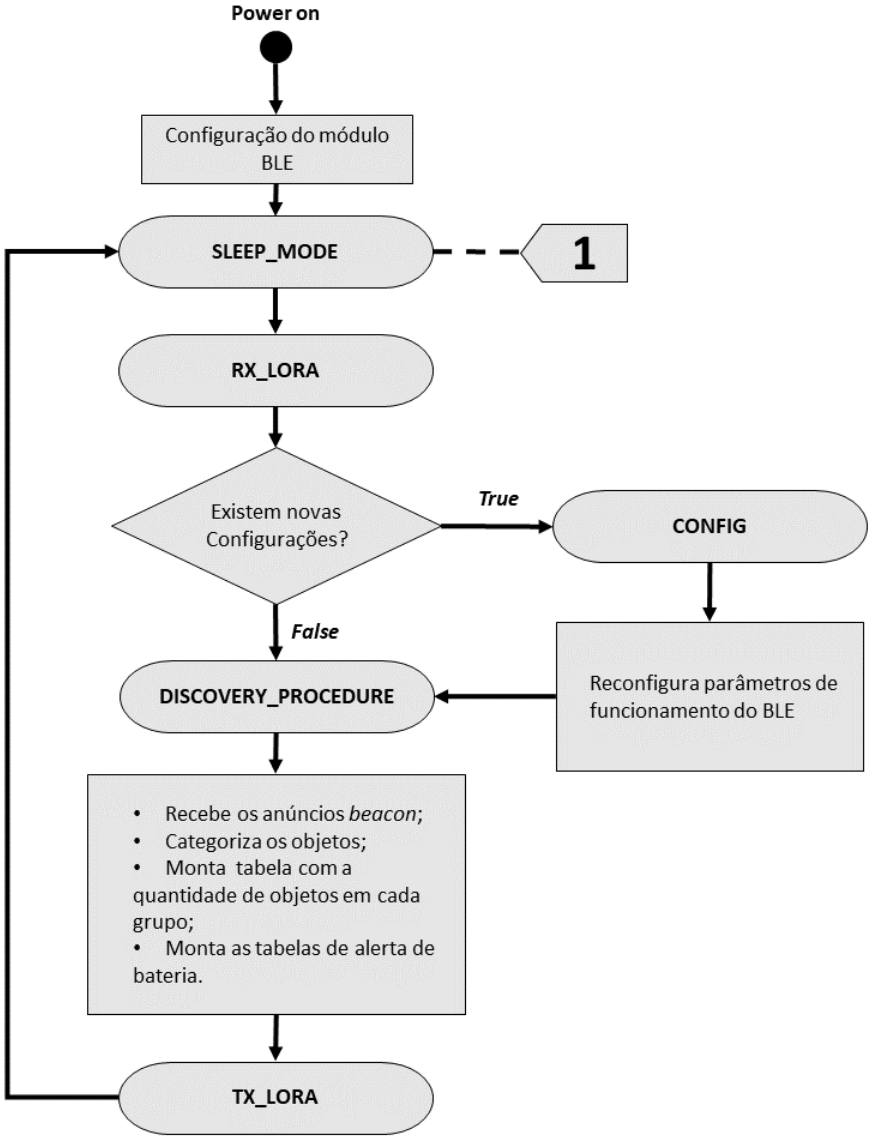
A Figura 15 ilustra a máquina de estados simplificada, que representa o funcionamento do módulo BLE. As configurações da camada física *Bluetooth* são feitas na inicialização, sendo que as mais relevantes são: definição do comportamento do rádio como observador (perfil de serviço GAP, ilustrado na Figura 10), privacidade pública e potência de saída da antena ajustada para 4 dBm.

Após inicialização, o sistema permanece no estado de baixo consumo de energia SLEEP_MODE. A interrupção externa do módulo LoRa, representada pelo bloco 1 da Figura 15, e o estouro do cronometro do RTC, retomam o funcionamento. Ao acordar, no estado RX_LORA, o *timer* e a janela de busca são recebidos pela serial quando chegam novas configurações.

Em DISCOVERY_PROCEDURE, é feita uma varredura buscando por *beacons* próximos durante a janela de busca configurada anteriormente. Apenas pacotes com os identificadores descrito na seção 3.3 são decodificados e categorizados. Essas informações geram duas tabelas: uma contendo a relação de quantos objetos de cada grupo foram encontrados e uma com a lista de alertas de bateria baixa.

Essas tabelas são enviadas para o LoRa, também por comunicação serial, e o módulo BLE volta para o SLEEP_MODE até ser reativado novamente.

Figura 15 – Máquina de estados simplificada do funcionamento do módulo BLE



Fonte: Produção do próprio autor.

3.2 Descrição de *Hardware*

O conjunto de *hardware* utilizado neste projeto pode ser dividido em: os emissores anúncios, o receptor de anúncios, o transceptor LoRa e a PCB que integra os sistemas embarcados nos módulos.

Quaisquer interfaces, *Bluetooth* ou BLE, podem ser utilizadas nas redes de anúncio, entretanto, devido à portabilidade e a durabilidade da bateria, os *beacons* são as melhores opções. Como exemplo, pode-se citar o módulo *Hanabee mini*, ilustrado na Figura 16 que opera com uma

célula de bateria de 3 V e 620 mAh, com autonomia variando entre 6 meses e um ano dependendo da configuração, têm dimensões de 40x40x12,5 mm e alcance em média de 50 m (HANA MICRON, 2016).

É possível configurar, pelo aplicativo *Hanabee Manager*, parâmetros como potência de transmissão, o canal de anúncio, intervalo entre transmissões e o *payload* do pacote. Utilizam uma variação do protocolo *iBeacon* com formato do pacote detalhado no Quadro 2.

Quadro 2 – Pacote de anúncio típico de um *beacon Hanabee*

Byte	Valor Típico	Descrição
AD0 (0~2)	0x02	Tamanho do AD0 (2 bytes)
	0x01	Tipo de AD = *Flags* variadas
	0x06	Modo de funcionamento
AD1 (3~29)	0x1A	Tamanho do AD1 (26 bytes)
	0xFF	Tipo de AD = Dados definidos pelo fabricante
	0x4C00	ID da *Apple* (fabricante)
	0x15	Tamanho do *payload* restante (21 bytes)
	0x5369676D6169735F	Parte 1 do UUID (7 bytes): “Sigmais_” codificado em UTF-8*, usado para identificar os dispositivos da empresa
	0x0000000000000000	Parte 2 do UUID (8 bytes): Espaço livre para futura implementação
	0x0000	*Major*, usado para categorizar objetos em grupos
	0x0000	*Minor*, usado para diferenciar objetos de mesmo grupo
	0xC9	Complemento de 2 do Tx *Power* medido a 1m da antena
AD2 (30~38)	0x08	Tamanho do AD2 (8 bytes)
	0x09	Tipo do AD = Nome completo exposto para dispositivos remotos
	0x48616E61426565	“*HanaBee*” codificado em UTF-8*
AD3 (39~41)	0x02	Tamanho do AD3 (2 bytes)
	0x0A	Tipo de AD = Indica o Tx *Power* do pacote
	0x08	8 dBm
AD4 (42~47)	0x05	Tamanho do AD4 (5 bytes)
	0x12	Tipo de AD = Configurações do intervalo de conexão, usado para conectar o celular com o *beacon* na hora da configuração
	0x50002003	Intervalo mínimo (0x5000) = 80x1,25 = 100 ms Intervalo máximo (0x2003) = 800x1,25 = 1 s
AD5 (48~51)	0x03	Tamanho do AD5 (3 bytes)
	0x03	Tipo de AD = UUID encurtado (16 bits) de serviço GATT
	0xF0FF	UUID de serviço customizado (não reservado pela SIG *Bluetooth*)

Fonte: Produção do próprio autor.
Nota: * *8-bit Unicode Transformation Format* (UTF-8), padrão que codifica caracteres de texto em computadores (letras, pontuação, etc.) em cadeias de 8 bits.

Figura 16 – Ilustração do módulo *beacon Hanabee mini*

Fonte: Hana Micron (2016).

Para receber os anúncios, assim como as soluções para transmitir, qualquer interface *Bluetooth* ou BLE pode ser utilizada. Entretanto, soluções como *smartphones* e *notebooks* não possuem compatibilidade com LoRa e consumem muita energia. Para aplicações IoT, os sistemas construídos em um *chip* (SoC, do inglês *system-on-a-chip*) são as soluções mais viáveis. Como são criados para executar poucas funcionalidades, e são embarcados em PCBs com poucos periféricos, têm tamanho reduzido e mais autonomia de bateria.

O SoC, também chamado de módulo, utilizado é o SPBTLE-1s, compatível com todas versões de *Bluetooth* v4.2 ou superior. As características de *hardware* relevantes para a implementação da estrutura são (STMICROELECTRONICS, 2020):

- tensão de alimentação entre 1,7 e 3,6 V;
- processador de alta performance e baixo consumo de energia, baseado em arquitetura 32 bits;
- antena embutida com sensibilidade de -84 dBm e *Tx Power* de 4 dBm;
- interfaces disponíveis:
    - transmissor-receptor universal assíncrono (UART, do inglês *universal asynchronous receiver transmitter*) para comunicação serial usada para troca de informações com o módulo LoRa;
    - 14 portas programáveis de propósito geral de entrada e saída (GPIO, do inglês *general purpose input/output*) que desempenham diversas funções como porta de entrada para interrupções e de saída para medições, entre outros;

- conversor analógico-digital (ADC, do inglês *analog-to-digital converter*) de 10 bits para leitura da tensão de alimentação;
- RTC para referência temporal do sistema;
- interface de depuração serial para os procedimentos de testes durante a fase de implementação do *firmware*.

Em seu *datasheet*, ficha de dados relevantes para operação do componente eletrônico ou módulo em questão, o fabricante relata o consumo de corrente típico durante diferentes condições de funcionamento, exibidos no Quadro 3.

Quadro 3 – Consumo de corrente típico do SPBTLE-1s durante diferentes condições de funcionamento

Condições do funcionamento	Valor típico
Standby	500 nA
Sleep mode	0,9 µA
Active mode	1,9 mA
Recepção	7,7 mA
Transmissão (Tx *Power* = +5dBm)	15 mA
Transmissão (Tx *Power* = 0dBm)	11 mA

Fonte: STMICROELECTRONICS (2020).

O alcance entre dois dispositivos pode ser estimado pela ferramenta disponibilizada pela *Bluetooth* SIG (BLUETOOTH SIG, 2020a). O sistema leva em consideração sensibilidade do receptor, Tx *Power* e o ganho das antenas dos dois dispositivos para os cálculos. A distância varia de 14 a 18 m em escritórios, 26 a 61 m em ambientes industriais e pode chegar até 68 m em lugares abertos.

O transceptor LoRa utilizado é o *Semtech* SX1276, embutido no SoC CMWX1ZZABZ-091 (SEMTECH, 2016; MURATA, 2018). As características de hardware relevantes para essa aplicação são:

- tensão de alimentação entre 2,2 e 3,6 V;
- processador de alta performance e baixo consumo de energia, baseado em arquitetura 32 bits;
- potência de saída típica de 14 dBm, com possibilidade de amplificação em 20 dBm para aplicações de sinal de baixa qualidade;
- sensibilidade de até -148 dBm e SNR requerido para demodulação de até -20 dB;

- taxa de transmissão programável até 300 kbps;
- além das interfaces UART, 18 portas GPIO, ADC e RTC, são utilizados:
    - o barramento serial integrado (I^2C, do inglês *inter-integrated circuit*) para comunicação com os sensores da PCB;
    - a interface serial periférica (SPI, do inglês *serial peripheral interface*) para comunicação entre o SX1276 e o microprocessador.

Outra característica importante é o consumo de corrente nos diversos modos de funcionamento. Esses valores podem ser obtidos no *datasheet* do dispositivo, sendo que os mais relevantes para este projeto são exibidos na Quadro 4.

Quadro 4 – Consumo de corrente típico do CMWX1ZZABZ-091 durante diferentes condições de funcionamento

Condições do funcionamento	Valor típico
Standby	1,49 µA
Sleep mode	1,65 µA
Recepção com BW = 125 kHz	21,5 mA
Recepção com BW = 250 kHz	22,2 mA
Recepção com BW = 500 kHz	23,6 mA
Transmissão (Tx *Power* = 10 dBm)	36 mA
Transmissão (Tx *Power* = 14 dBm)	47 mA
Transmissão com amplificação de 20 dBm	128 mA

Fonte: Murata (2018).

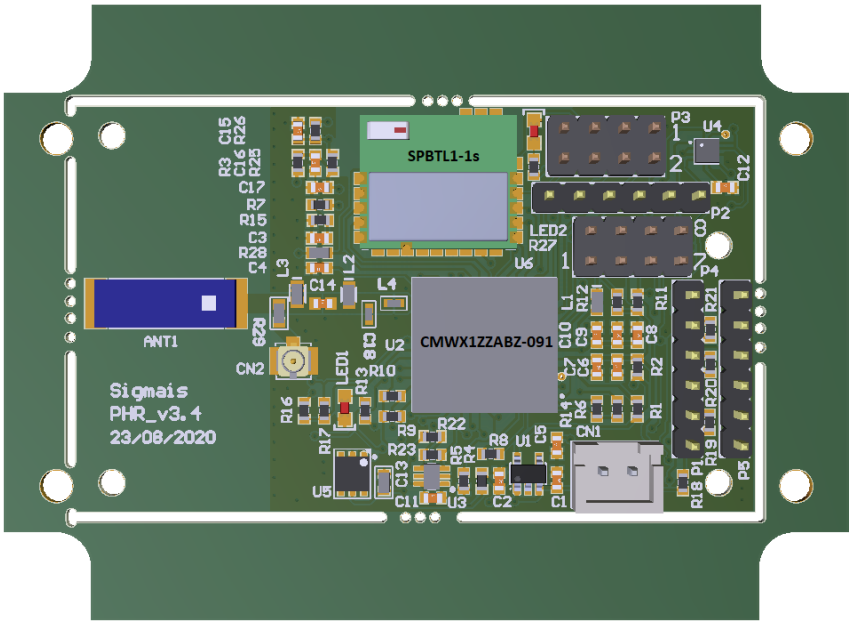
A infraestrutura de rede LoRaWAN utilizada foi a ATC da empresa *American Tower*, presente em todo território nacional, fornecida pela empresa Sigmais (AMERICAN TOWER, 2020; SIGMAIS, 2020). A cobertura recentemente ampliada para a região da Grande Vitória - Espírito Santo (ES) é apresentada na Figura 17.

A placa PHR_v3.4, ilustrada na Figura 18, é o suporte que provê a conexão elétrica entre os componentes, os periféricos e *chips* soldados nela. Esta placa foi disponibilizada pela empresa local Sigmais para exercer a função de observador nesse projeto, integrando os módulos BLE e LoRa.

Figura 17 – Cobertura da rede ATC LoRaWAN na Região da Grande Vitória - ES

Fonte: IoT *OpenLabs* (2020).

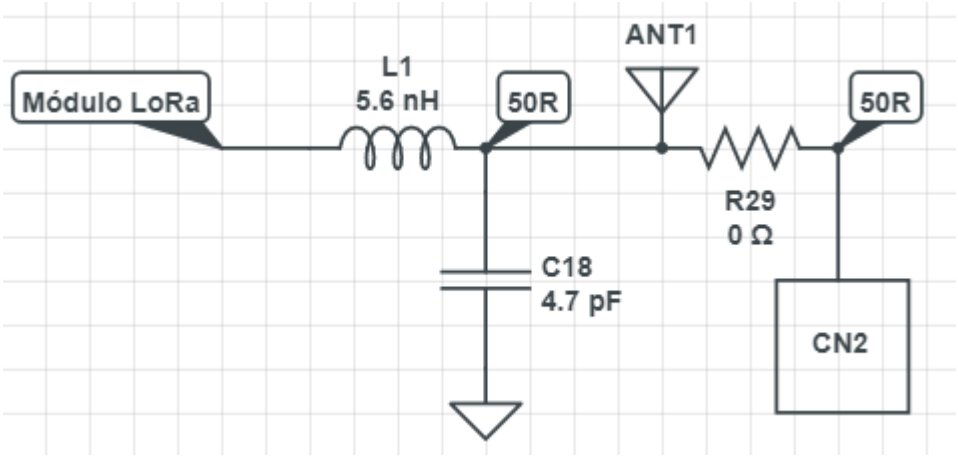
Figura 18 – Ilustração da PHR_v3.4, em destaque os módulos BLE e LoRa



Fonte: Produção do próprio autor.

O circuito, representado na Figura 19, seleciona a antena utilizada pelo módulo LoRa, o Quadro 5 descreve as especificações técnicas das duas opções utilizadas nesse projeto. A antena embarcada (ANT1) é menos intrusiva que a externa, mas possui menor eficiência, indicada pela relação de ondas estacionárias de tensão (VSWR, do inglês *voltage standing wave ratio*), menor ganho e potência máxima de saída. A antena externa é conectada na entrada CN2 com um conversor do padrão SMA-RP fêmea para U.FL de 50 Ω. O casamento de impedância presente na PCB, utilizado para maximizar a transmissão de potência do modulo para antena, está fora do escopo desse projeto.

Figura 19 – Circuito de seleção de antena da PHR_v3.4 com casamento de impedância



Fonte: Produção do próprio autor.

Quadro 5 – Comparação das especificações técnicas das antenas embarcada e externa utilizadas no projeto

Característica	Antena embarcada	Antena externa
Frequência central	915 MHz	915 MHz
Largura de banda (BW)	20 MHz	26 MHz
Voltage standing wave ratio (VSWR)	< 2,0	< 1,5
Máximo ganho	3,32 dBi	3 dBi
Impedância	50 Ω	50 Ω
Máxima potência de saída	1 W	50 W
Dimensões (Largura x Comprimento)	12 mm x 4 mm	210 mm x 12 mm

Fonte: Yageo (2013) e Alibaba (2020).

A alimentação é feita com baterias 3,6 V de tensão e 5600 mAh de capacidade de carga. São acondicionadas junto com a PCB em uma embalagem de plástico com dimensão de 8,0 cm x 5,8 cm x 3,0 cm, ilustrada com e sem antena externa na Figura 20.

Figura 20 – Foto dos protótipos com antena externa e embarcada embalados

Fonte: Produção do próprio autor.

3.3 Estruturação dos Protocolos de Comunicação

A comunicação entre os módulos é feita pela porta UART. O Quadro 6 descreve o protocolo usado nos estados BLE_RX, BLE_TX, LORA_RX e LORA_TX, citados nas seções 3.1.1 e 3.1.2. Existem quatro tipos de pacotes previstos, diferenciados pelo cabeçalho: a) “[H:0” identificador de erro no sistema, b) “[H:1” tabela de dados processados, c) “[H:2” dados de configuração do BLE recebida por *downlink* e d) “[H:3” lista de dispositivos com bateria baixa.

Com relação à comunicação LoRa, o observador pode enviar para o servidor LoRaWAN a tabela de grupos encontrados (*uplink*) ou receber configuração (*downlink*). O acesso ao servidor da rede ATC LoRaWAN é feito através da plataforma *KORE Wireless*.

O protocolo criado para transmissão de dados nessa rede é constituído por: três tipos de *uplink* e dois de *downlink*. O cabeçalho dos *uplinks* é descrito no Quadro 7, e os tipos de pacotes existentes são: a) requisição de *downlink* (000b), formada apenas pelo cabeçalho, b) a tabela com o *status* da bateria dos objetos (010b), descrita no Quadro 8, e c) e tabela com a lista de objetos por grupo (001b), em detalhe no Quadro 9.

Quadro 6 – Protocolo de comunicação entre os módulos BLE e LoRa

Byte	Caráter UTF-8	Descrição
(0~4)	[H:**X**,	Cabeçalho do protocolo, onde **X** determina o tipo de pacote: **X** = 0 – Erro; **X** = 1 – Categorização dos objetos encontrados; **X** = 2 – Configuração do BLE; **X** = 3 – Dados de bateria.
Caso X = 0: (6~7)	--	Nenhum dado enviado quando o sistema apresenta erro, e os módulos são reiniciados.
Caso X = 1: (6~[5+8M])	MJ:NUMB, ...]	Tabela dos M grupos categorizados, onde MJ é o *Major* do grupo de objetos e NUMB é o número de objetos pertencente ao grupo MJ encontrados (Ex.: 20:0100 – 100 objetos do *major* 20 encontrados). Nesse trabalho são utilizados 3 grupos de *major*: 0x1F (malas), 0x20 (carrinhos) e 0x21 (ferramentas)
Caso X = 2: (6~13)	OP,TB,TECO]	OP – Campo para seleção de modo de funcionamento, nesse projeto apenas o modo padrão é utilizado (111b). TB – Janela de busca do módulo BLE em segundos (Ex.: 0x05 = 5 segundos) TECO – Duração do modo de economia de energia do módulo BLE em segundos (Ex.: 3C00 = 60 s)
Caso X = 3: (6~[5+6N])	MJ:MN, ...]	Lista de N objetos com pouca bateria, onde MJ é o *Major* do objeto e MN é o *Minor*.

Fonte: Produção do próprio autor.

Quadro 7 – Cabeçalho do pacote de *uplink*

Bit	Valor Típico	Descrição
0~1	00b	Vazio
2	0b – Bateria baixa 1b – Bateria OK	Status da bateria do observador
3	0b – Dados completos 1b – Dados faltando	Caso a quantidade de dados seja maior que 240 bytes esse bit indica que o observador ainda há dados faltando
4~7	000b – Requisição de configuração 001b – Envio da tabela de dispositivos 010b – Envio do status da bateria dos objetos	Tipo de pacote de Uplink

Fonte: Produção do próprio autor.

Quadro 8 – Pacote *uplink* de envio do status da bateria dos objetos

Byte	Exemplo	Descrição
0	00100010b	Cabeçalho
1~2	Ferramenta (*Major* = 0x20): 0x3230	*Major* do objeto com bateria baixa em UTF-8
3~4	Objeto de *Minor* = 0x10 0x3130	*Minor* do objeto com bateria baixa em UTF-8
...	**...**	**...**

Fonte: Produção do próprio autor.

Quadro 9 – Pacote *uplink* de envio da tabela com a lista de objetos por grupo

Byte	Exemplo	Descrição
0	00100001b	Cabeçalho
1~2	Mala (*Major* = 0x1F): 0x3136	*Major* do grupo 1 em UTF-8
3~6	1 objeto (0x0001): 0x30303031	Número de dispositivos encontrados (em hexadecimal) do grupo 1 convertidos para UTF-8
7~8	Ferramenta (*Major* = 0x20): 0x3230	*Major* do grupo 2 em UTF-8
9~12	100 objetos (0x0064): 0x30303634	Número de dispositivos encontrados (em hexadecimal) do grupo 2 convertidos para UTF-8
...	**...**	**...**
235~236	Carrinho (*Major* = 0x21): 0x3231	*Major* do grupo 40 em UTF-8
237~240	1000 objetos (0x03E8): 0x30334538	Número de dispositivos encontrados (em hexadecimal) do grupo 40 convertidos para UTF-8

Fonte: Produção do próprio autor.

As estruturas de *downlink* podem ser agendadas diariamente pelo servidor (000b) ou requisitadas pelo dispositivo (001b). O campo OP_CODE foi criado para diferenciar modos de operação do dispositivo, nesse trabalho apenas o modo padrão é utilizado (111b). O Quadro 10 descreve um pacote requisitado pelo dispositivo, com dados para atualizar os intervalos de tempo de funcionamento do sistema.

Quadro 10 – Pacote *downlink* requisitado pelo dispositivo

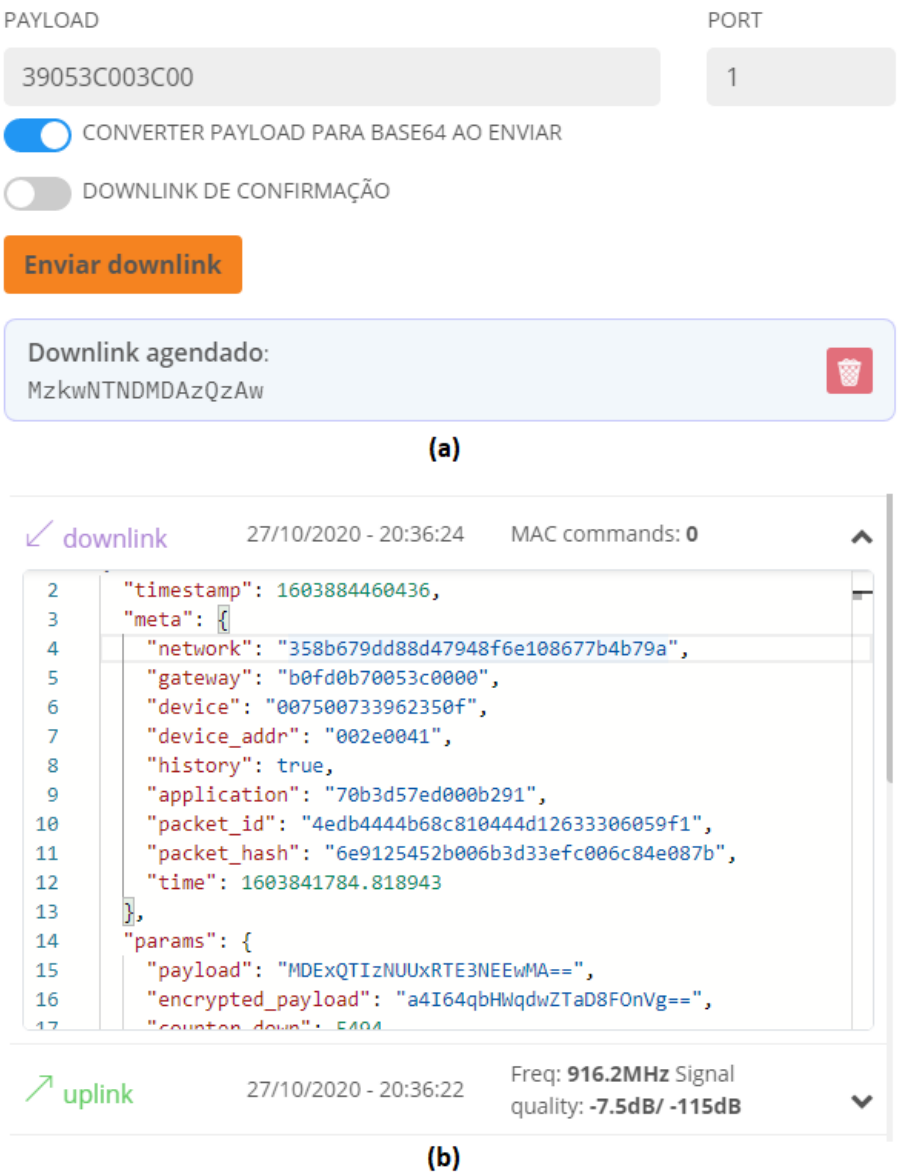
Byte	Exemplo	Descrição
0	0b - Vazio Dados faltando = 0b – false OP_CODE = 111b – Vazio Tipo de Downlink = 001b	Cabeçalho
1	0x05 = 5 segundos	Janela de busca do módulo BLE em segundos
2~3	0x3C00 = 60 segundos	Duração do modo de economia de energia do módulo BLE. Unidade em segundos e formato *little endian byte order**
4~5	0x3C00 = 60 segundos	Duração do modo de economia de energia do módulo LoRa. Unidade em segundos e formato *little endian byte order**
...	**...**	**...**

Fonte: Produção do próprio autor.
Nota: * Refere-se à ordem utilizada para representar dados. No caso *Little Endian*, o byte menos significativo é colocado no menor endereço.

3.4 Validação do Funcionamento

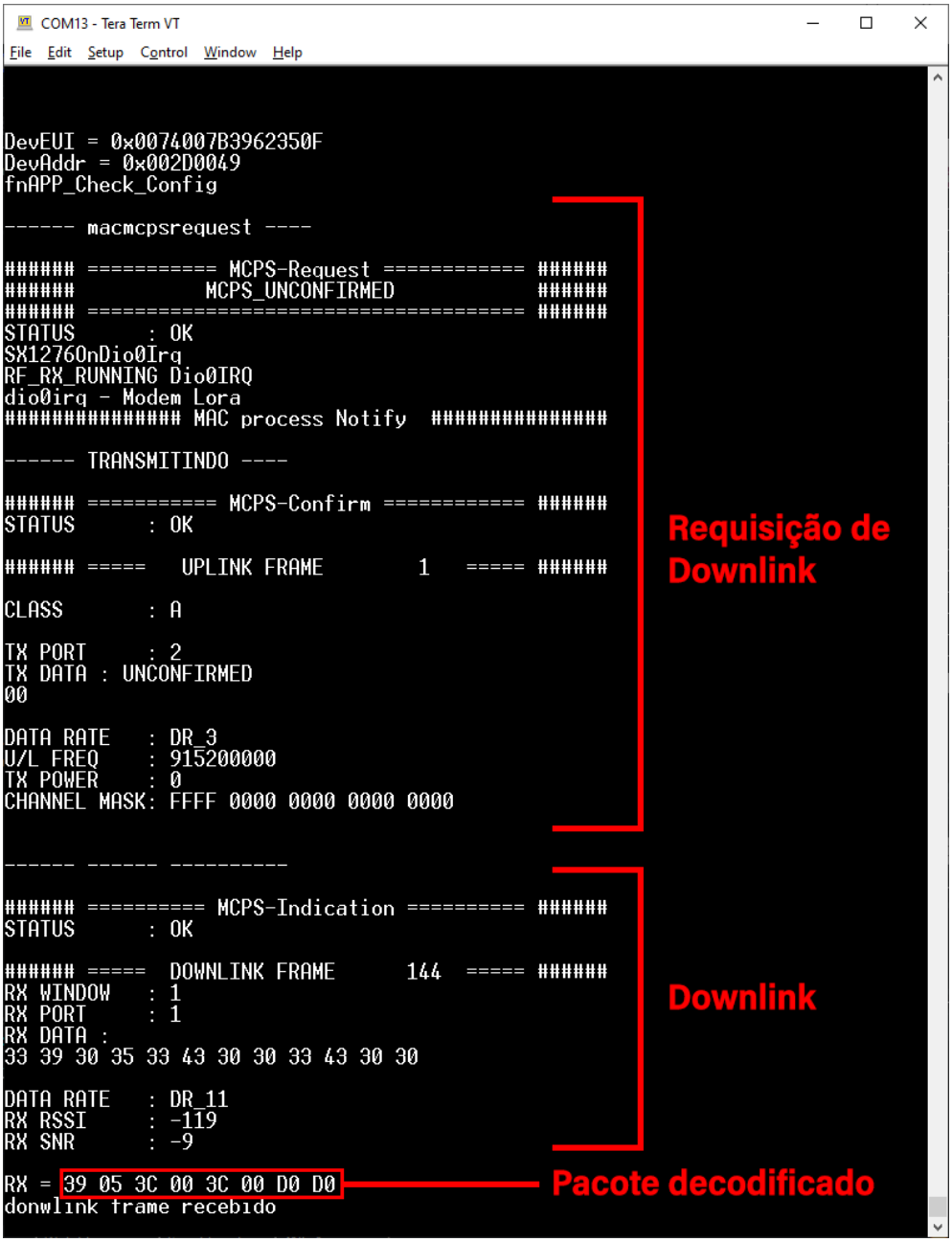
Após a inicialização dos módulos, o observador faz *uplink* para a rede ATC requisitando configuração e um *downlink* agendado previamente é encriptado e enviado. Caso não haja resposta da rede em até 3 requisições sucessivas, o sistema permanece com as configurações pré-definidas. A Figura 21 ilustra o agendamento de um pacote similar ao do Quadro 10 (0x39053C003C00), que é codificado para base64 e transmitido, e a Figura 22 o processo de requisição de *downlink* e a recepção do pacote no observador.

Figura 21 – Interface da plataforma *KORE* (a) no agendamento de *downlink* e (b) na transmissão do pacote para o observador



Fonte: *KORE Wireless* (2020).

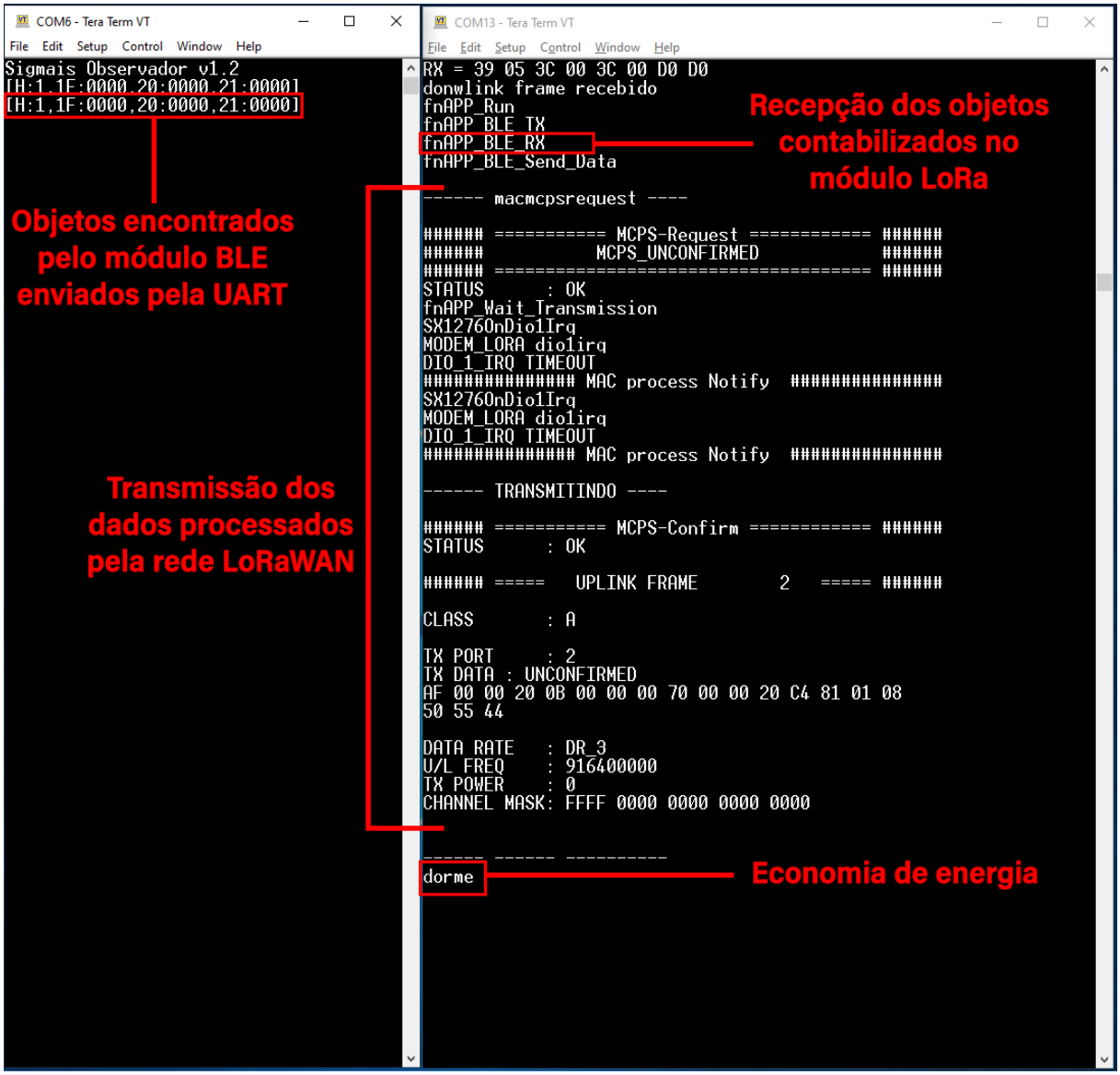
Figura 22 – Requisição de *downlink* e recepção do pacote no observador



Fonte: Produção do próprio autor.

O módulo BLE é acordado por interrupção externa e inicia o procedimento de busca por anúncios próximos. Após a categorização dos objetos encontrados, os dados são enviados pela UART para o módulo LoRa, que os codifica e transmite pela rede ATC LoRaWAN para a plataforma. Esse processo é apresentado na Figura 23, detalhando as mensagens enviadas por ambos módulos.

Figura 23 – Comunicação serial dentro do observador durante o processamento e envios dos dados do ponto de vista do (a) módulo BLE e (b) LoRa



Fonte: Produção do próprio autor.

A última etapa é a recepção do *uplink* feito pelo observador na plataforma e a decodificação para interpretação do resultado. Na Figura 24 é ilustrado um *uplink* recebido e tradução da mensagem de base 64 para UTF-8, onde é possível identificar uma estrutura similar ao protocolo do Quadro 9 com zero objetos encontrados.

Figura 24 – Recepção do *uplink* feito pelo observador na plataforma *KORE* e tradução da mensagem de base 64 para UTF-8

Fonte: *KORE Wireless* (2020).
Nota: Adaptado pelo autor.

4 ANÁLISE DE DESEMPENHO

A análise do desempenho da estrutura implementada foi feita com base nos indicadores autonomia de bateria e qualidade da comunicação com a rede ATC LoRaWAN. Entretanto, foi necessário observar a operação da estrutura proposta em situações diferentes das testadas em laboratório. Isso foi importante para delimitar as condições necessárias para a estrutura operar corretamente e explorar seu potencial em outros cenários de aplicações IoT. Este estudo foi feito utilizando um caderno de testes, que forçou a atuação do sistema nos principais tipos de ambientes e com diferentes tipos de *hardware*. As situações contempladas neste experimento foram:

- rastreamento de *beacons* nos ambientes: residencial, comercial e externo;
- compatibilidade com diferentes *hardwares* e protocolos: rastreamento de diferentes tipos de anúncios;

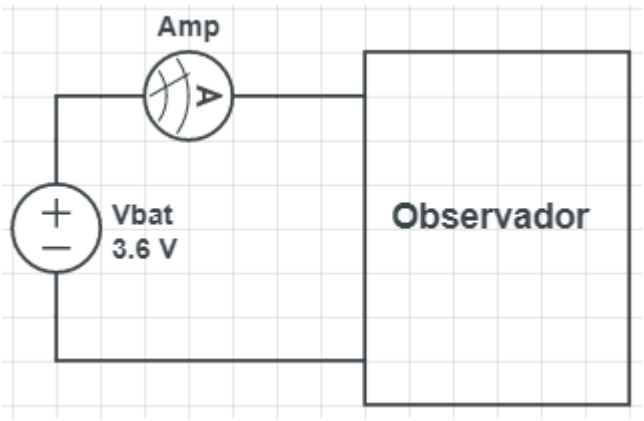
4.1 Autonomia de Bateria

A autonomia de bateria dos dispositivos foi avaliada comparando a longevidade da bateria dos módulos *beacons* e da PCB do observador com as outras tecnologias do mercado. Para os *beacons*, o tempo de vida pode ser obtido nos *datasheets*, fornecidos pelos fabricantes.

No caso da PCB, obter estas informações dos *datasheets* não é uma boa alternativa. O consumo de corrente dos SoC varia dinamicamente dependendo da tarefa que está sendo executada. Além disso, os sensores e circuitos integrados também têm consumo significante. Uma alternativa mais precisa para esses casos consiste em é aproximar a curva de consumo durante os eventos, como no documento da Texas *Instruments* (2010).

O circuito da Figura 25 mostra a estrutura utilizada para essas medições. O observador é alimentado por uma fonte de tensão de 3,6 V (*Vbat*) e o amperímetro (*Amp*) obtém o valor eficaz da corrente consumida pelos módulos da PCB. O amperímetro utilizado foi o HIKARI HM-2090, que possui resolução mínima na leitura de corrente continua de 0,1 μA (HIKARI, 2020).

Figura 25 – Estrutura de medição de corrente utilizada para ordem de grandeza de µA



Fonte: *CircuitLab* (2020).

Durante o funcionamento dos módulos várias tarefas ocorrem simultaneamente, com períodos e consumo de corrente diferentes. Para simplificar a medição, os eventos foram agrupados em estados baseado nas tarefas sendo executadas. Com o valor eficaz da corrente consumida e a duração de cada estado foram calculados o consumo médio (*Im*) e a autonomia de bateria (*Ab*) com as equações (3) e (4), respectivamente.

$$Im = \frac{I1 \cdot T1 + I2 \cdot T2 + \cdots}{T1 + T2 + \cdots} \; [A] \tag{3}$$

$$Ab = \frac{C}{Im} \; [h] \tag{4}$$

Na equação (3), o valor médio de corrente em cada estado é representado pelas variáveis *Ix* e a duração por *Tx*, onde *x* é o índice do estado. Na equação (4), a variável *C* é a capacidade de carga da bateria utilizada e *Im* o consumo médio obtido anteriormente.

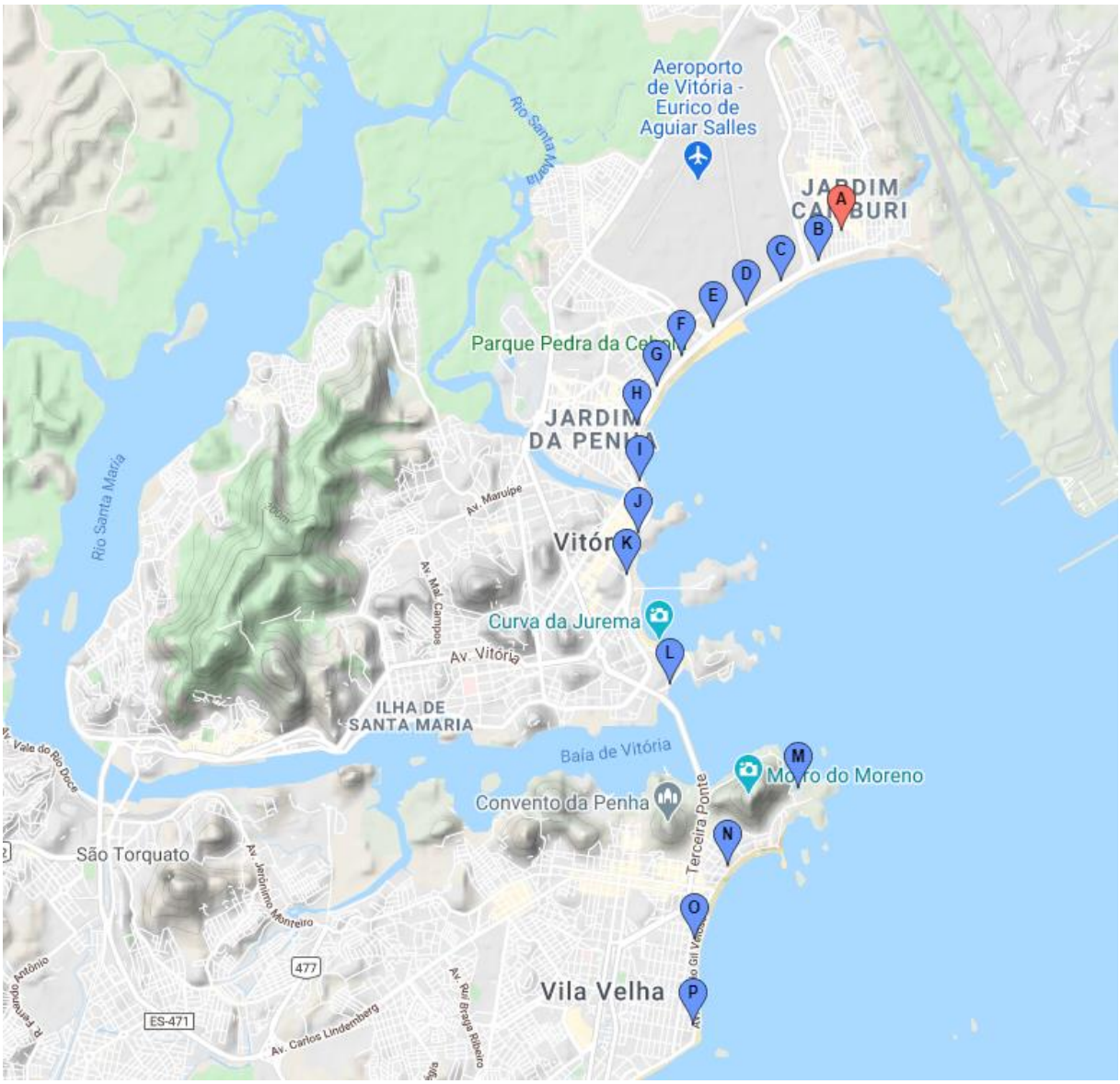
4.2 Qualidade de Comunicação com a Rede ATC LoRaWAN

Os indicadores SNR e RSSI foram utilizados para avaliar a qualidade do sinal na comunicação entre a rede ATC e o observador, utilizado as antenas externa e embarcada. Os dados foram obtidos variando os pontos de aquisição a cada 500 m do *gateway* escolhido para as medições até o ponto onde a transmissão com o dispositivo com antena embarcada começa a falhar. Na

sequência, a variação mudou para 1 km até a comunicação com antena externa falhar. Na Figura 26 estão representadas as localizações do *gateway* escolhido (A) e locais de medição (B até P).

Os indicadores obtidos na plataforma *KORE* em cada transmissão foram selecionados para corresponder ao *gateway* A e processados com a mediana das cinco medições efetuadas em cada local de medição. A perda de pacotes, média de SNR e RSSI correspondentes as transmissões para todos os *gateways* foram calculadas para analisar a cobertura da infraestrutura da rede ATC completa.

Figura 26 – Localização do *gateway* escolhido e os pontos de medição dos indicadores



Fonte: BatchGeo (2020).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise da Aplicabilidade da Integração

5.1.1 Rastreamento de *beacons* em diferentes ambientes

O objetivo desse teste foi determinar se o observador era capaz receber anúncios BLE de maneira eficaz em diversos ambientes, cujo resultado é ilustrado no Quadro 11. O alcance foi escolhido como parâmetro de análise pois influencia diretamente na quantidade de dispositivos rastreadores precisão ser dispostos em uma aplicação.

Quadro 11 – Relação entre ambiente de teste e alcance do observador

Ambiente de teste	Alcance máximo
Residencial	25 m
Escritório	10 m
Aberto	35 m

Fonte: Produção do próprio autor.

Mesmo com a antena embarcada, o módulo BLE do observador foi capaz de rastrear beacons com alcance de até 25 m em residências e 35 m em ambientes abertos. Em escritórios o resultado obtido não foi satisfatório, pois esse tipo de ambiente sofre com muita interferência de dispositivos operando na frequência de 2,4 GHz, como redes Wi-Fi e outros dispositivos *Bluetooth*. Uma possível solução para esse problema consiste em utilizar múltiplos observadores, entretanto, isto demanda processamento dos dados em nuvem para tratar problemas do mesmo anúncio ser rastreado por vários dispositivos.

5.1.2 Compatibilidade com diferentes *hardwares* e protocolos

Para testar a compatibilidade da aplicação foram utilizados diferentes tipos de emissor de anúncios *Bluetooth*. O observador foi capaz de rastrear todos tipos de pacotes, pois têm configuração de privacidade pública. Entretanto, como o objetivo desse teste é comprovar a capacidade do sistema com os experimentos, apenas o padrão *iBeacon* foi identificado e interpretado. Esses padrões são diferenciados pelo *Manufacturer ID*, categorizados pelo microprocessador dos módulos e enviados a plataforma *KORE* pela rede ATC LoRaWAN.

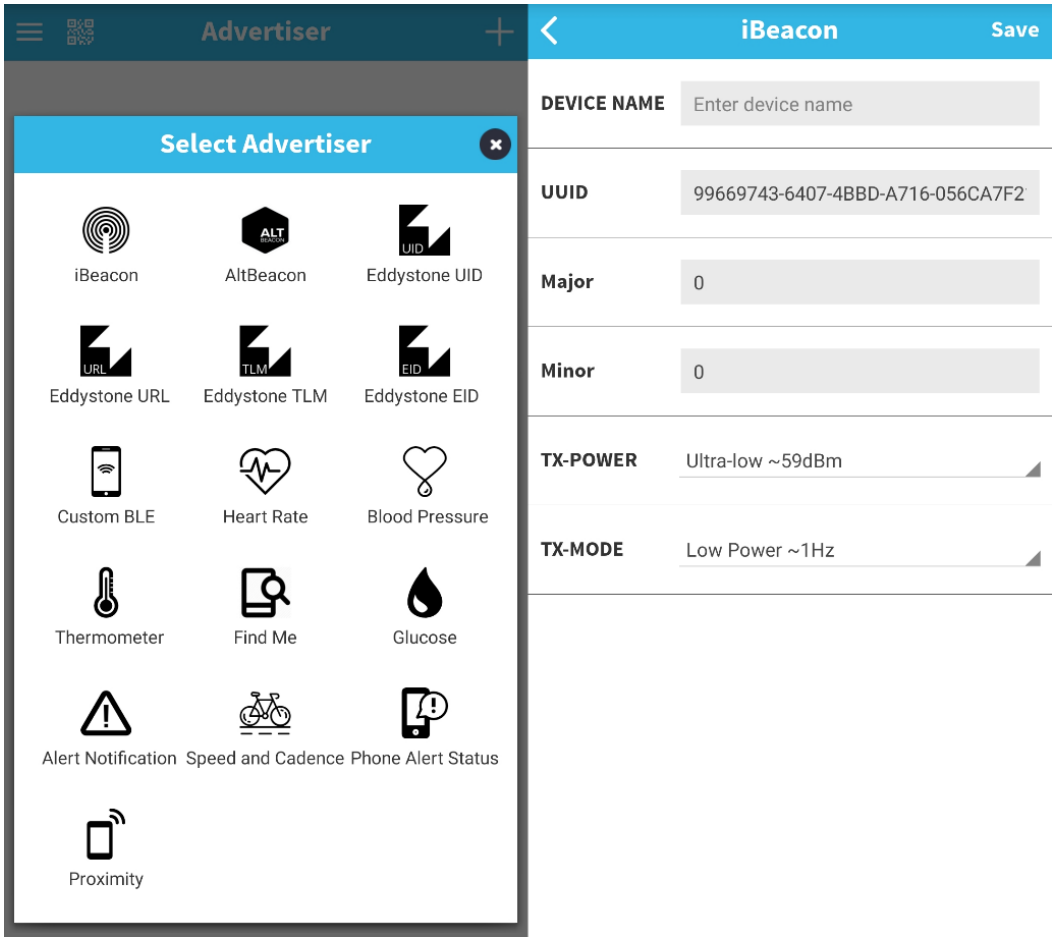
Os periféricos representam tipo de emissores de pacotes *Bluetooth*, geralmente configurados para privacidade pública. Entretanto, o objetivo desses dispositivos é se comunicar apenas com o dispositivo receptor do seu fabricante, como teclados sem fio comunicando-se com computadores pelo receptor na porta serial universal (USB, do inglês *universal serial bus*). Os pacotes desse grupo têm endereçamento feito para um destinatário específico, comunicação *unicast*, e possuem estrutura definida pelo fabricante, com padrão distinto nos anúncios citados anteriormente. Devido a esta série de problemas, identificar e interpretar este tipo de pacote está fora do escopo deste trabalho.

Smartphones estão entre os dispositivos mais utilizados pelo ser humano, por isso são o principal alvo de compatibilidade. Para impedir que aplicações como lojas enviem propagandas ou obtenham informações dos usuários, a partir da versão 4.2 do protocolo *Bluetooth*, os novos aparelhos vêm com configurações de privacidade muito restritas (ARMASU, 2014).

Essas configurações impedem o observador rastreá-los, mesmo quando usuários habilitam o modo de pareamento, que os tornam visíveis para outros *smartphones*. Uma alternativa para resolver este problema está em faze-los funcionar como emissor de anúncios *beacon* BLE, combinando baixo consumo com alta performance. Existem aplicações que possibilitam alguns aparelhos funcionar enviando anúncios continuamente em segundo plano, como a biblioteca *AltBeacon* para o sistema operacional *Andriod*, e aplicativos que permitem qualquer tipo de aparelho emitir anúncios por períodos limitados (ALTBEACON, 2020).

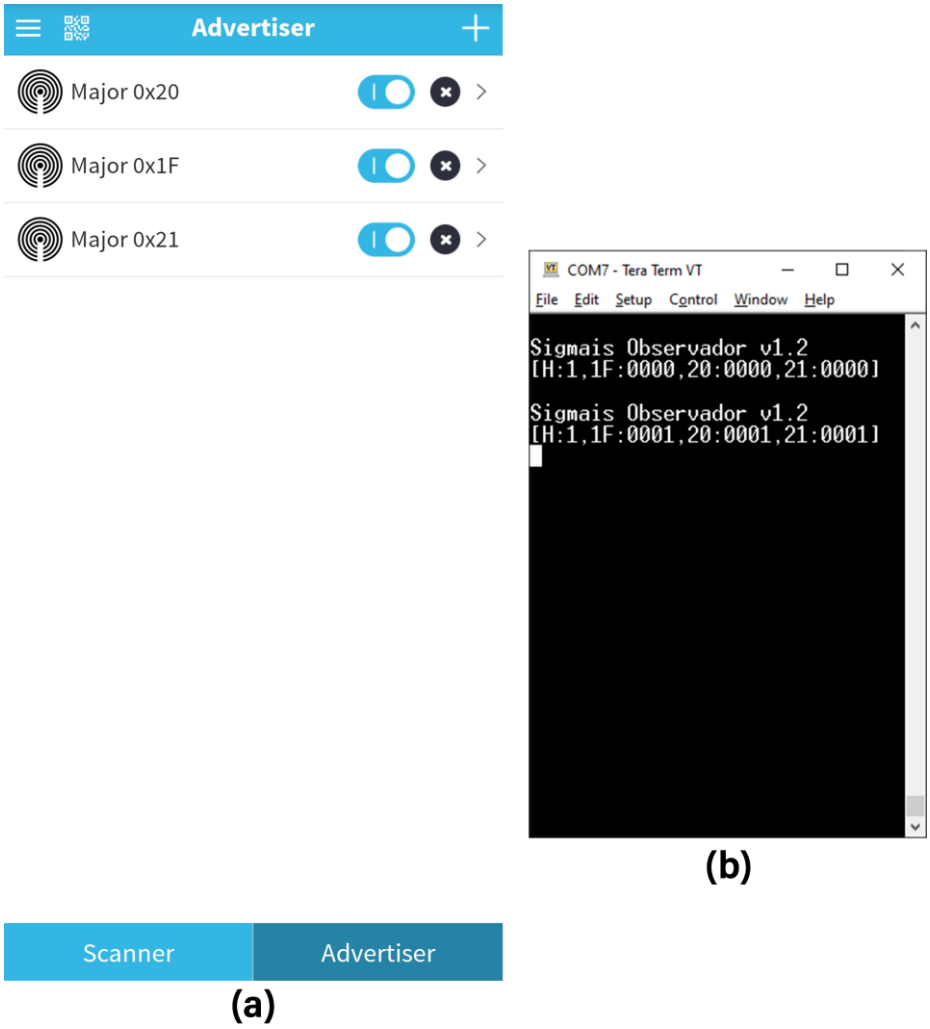
O aplicativo *BLE scanner*, disponível para os sistemas *Andriod* e iOS (*Apple*), foi utilizado para os testes dessa seção (BLUEPIXEL TECHNOLOGIES, 2020). Ele permite simular *beacons* com diversos perfis GATT, configurando cada parâmetro de operação, como UUID, *Major*/*Minor*, *Tx Power* e intervalo entre anúncios, como pode ser observado na Figura 27. O observador foi capaz de identificar *smartphones* utilizando a maioria dos perfis disponíveis, mas para o experimento foram utilizados três pacotes *iBeacon* simultaneamente. A Figura 28 apresenta a interface do aplicativo e o pacote similar ao do Quadro 6, descrevendo a quantidade de objetos por *Major* encontrados, em momentos antes e depois dos *beacons* simulados serem ativados.

Figura 27 – Interface de configuração do aplicativo *BLE scanner* para *smartphones*



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 28 – Estrutura do teste feito (a) simulando *beacons* no *smartphone* e (b) recebendo a quantidade de objetos por *Major* encontrados pelo observador antes e depois da ativação dos *beacons*



Fonte: Produção do próprio autor.

5.2 Autonomia de Bateria

O processo de escolha dos estados foi feito baseado nos valores de corrente observador no amperímetro e na periodicidade do evento. Portanto, como a inicialização e a recepção de *downlink* ocorrem poucas vezes, foram desconsideradas da análise. Os estados escolhidos são descritos nos tópicos a seguir:

- *WAKE UP*: reinicialização do módulo e dos periféricos;
- PROCESSAMENTO: rastreamento dos *beacons*, processamento dos anúncios e comunicação serial entre os módulos;
- LORA TX: transmissão de dados para a rede ATC;

- *WAIT*: período de espera após transmissão e fechamento dos periféricos;
- *SLEEP*: modo de economia de energia.

A duração dos estados PROCESSAMENTO e *SLEEP* dependem respectivamente da janela de rastreamento (*TB*) e do período de economia de energia (*TECO*), descritas no Quadro 6. Neste experimento foram utilizadas três configurações:

- alto consumo - *TB* = 2,0 s e *TECO* = 60 s;
- médio consumo - *TB* = 1,0 s e *TECO* = 2 min;
- baixo consumo - *TB* = 1,0 s e *TECO* = 10 min.

A Tabela 1 apresenta o consumo típico de corrente e duração de cada estado para as configurações descritas anteriormente. Nesta tabela também são apresentadas médias de consumo e a autonomia de bateria, calculadas com as equações (3) e (4). Os resultados variaram de 2 até 19 anos de duração teórica da bateria, mostrando que a estrutura tem capacidade de operar continuamente por vários anos sem necessidade de manutenções para reposição de bateria. Entretanto, devido ao efeito natural de descarga nas baterias, a duração teórica prevista não é alcançável. Para as configurações com autonomia maior que 5 anos é possível reduzir a carga da bateria, diminuindo o custo de produção e as dimensões do dispositivo.

Tabela 1 – Cálculo do consumo médio e da autonomia de bateria do observador com perfis de alto, médio e baixo consumo de corrente

Estado	Consumo típico	Duração do estado com alto consumo	Duração do estado com médio consumo	Duração do estado com baixo consumo
WAKE UP	3,15 mA	0,2 s	0,2 s	0,2 s
PROCESSAMENTO	9,15 mA	2,0 s	1,0 s	1,0 s
LORA TX	26,85 mA	0,2 s	0,2 s	0,2 s
WAIT	144,0 µA	14,0 s	14,0 s	14,0 s
SLEEP	6,0 µA	60,0 s	120,0 s	600,0 s
Valor médio de consumo	-	0,349 mA	0,132 mA	0,034 mA
Autonomia de bateria (C = 5600 mAh)	-	16038 h 2 anos	42393 h 5 anos	165956 h 19 anos

Fonte: Produção do próprio autor.

O consumo de corrente típico do observador montado apenas com o módulo BLE é de 8,95 mA na janela de rastreamento e 2,6 µA no modo de economia de energia. Utilizando a equação (3) o consumo médio obtido foi de 0,069 mA, o que representa aproximadamente 52% do consumo

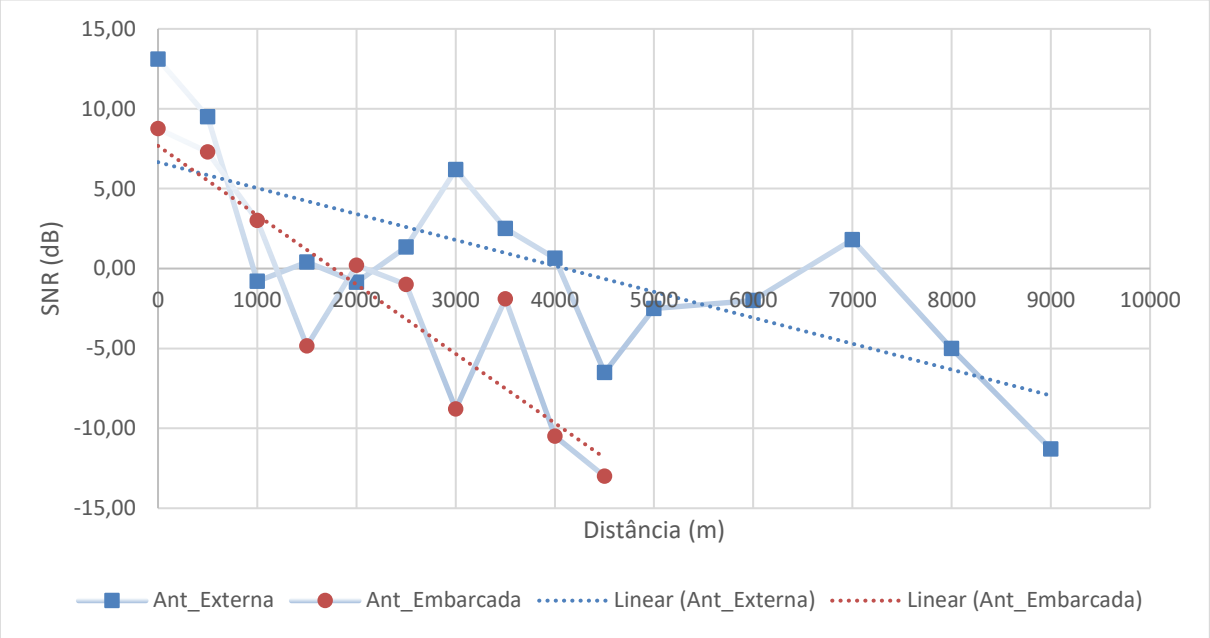
do observador com as configurações de médio consumo da Tabela 1. Este acréscimo foi significante pois na aplicação proposta nesse trabalho os módulos passam a maior parte do seu tempo em economia de energia. Em cenários onde o módulo LoRa é mais ativo, realizando tarefas de leitura e processamentos de dados continuamente, o impacto da integração é muito menor.

5.3 Qualidade de Comunicação com a Rede ATC LoRaWAN

Os resultados das medições descritas na seção 4.2, relacionando SNR e RSSI com distância, são apresentados, respectivamente, nos Gráficos Gráfico 1 e Gráfico 2. No ponto de medição B, localizado à 500 m do *gateway*, as médias dos indicadores obtidos foram SNR = 9,5 dB e RSSI = -99,0 dB com a antena externa, e SNR = 7,3 dB e RSSI = - 101,5 dB com antena embarcada. Entre 1 e 3 km, as grandezas medidas oscilaram muito, existindo casos em que a antena embarcada obteve indicadores superiores. No ponto J, afastado do *gateway* A em 4,5 km, as médias decresceram para SNR = - 6,5 dB e RSSI = - 115,0 dB com a antena externa, sendo iguais a - 13,0 e - 115,0 dB, respectivamente, com a antena embarcada.

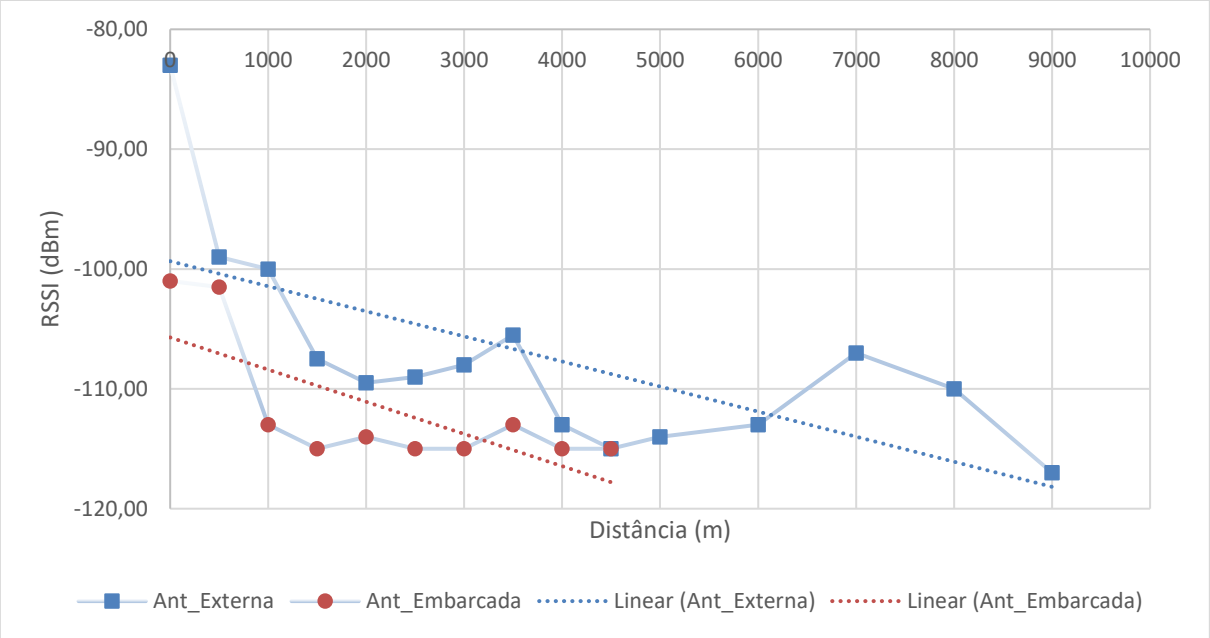
As curvas ilustradas no Gráfico 1 e no Gráfico 2 também mostram retas pontilhadas obtidas por aproximação linear das médias de SNR e RSSI, que representam a tendência do decaimento das medições com o aumento da distância. Apesar das oscilações nas medições citadas anteriormente, geradas por fatores externos presentes no ambiente de medição, observando-se estas retas, é possível constatar que os indicadores de qualidade de comunicação sofrem menor impacto com o aumento de distância quando o observador utiliza a antena externa.

Gráfico 1 – Relação entre mediana da SNR e distância entre transmissor e *gateway*



Fonte: Produção do próprio autor.

Gráfico 2 – Relação entre mediana do RSSI e distância entre transmissor e *gateway*



Fonte: Produção do próprio autor.

A Tabela 2 apresenta dados pertinentes sobre as medições de SNR, RSSI e perda de pacotes sem seleção de *gateway*, ou seja, contemplando todas as transmissões efetuadas. As médias destacam que, mesmo a antena externa tendo desempenho superior nos testes descritos anteriormente, a diferença de desempenho entre as duas opções de antenas é baixa, uma característica esperada em regiões com muitos *gateways* distribuídos.

Tabela 2 – Médias de SNR e RSSI das transmissões efetuadas para todos *gateways* e a porcentagem de perda de pacotes

Parâmetro de Desempenho	Antena Embarcada	Antena Externa
Valor mínimo SNR	-13,8 dB	-14,0 dB
Valor máximo SNR	13,0 dB	13,8 dB
Valor médio SNR	-0,2 dB	-1,5 dB
Valor mínimo RSSI	-117 dBm	-119 dBm
Valor máximo RSSI	-83 dBm	-73 dBm
Valor médio RSSI	-111 dBm	-109 dBm
Perda de pacotes por *gateway*	9,40 %	23,18 %

Fonte: Produção do próprio autor.

A porcentagem de perda de pacotes é alta pois as transmissões são feitas para múltiplos *gateways* simultaneamente. Na plataforma, geralmente, a cada transmissão feita são recebidos 3 pacotes iguais de *gateways* diferentes. Logo, esses altos índices de perda não correspondem a razão entre recepções feitas na plataforma e transmissões efetuadas pelo observador.

Os parâmetros utilizados para analisar o desempenho da comunicação com a rede LoRa são descritos no *datasheet* do transceptor LoRa SX1276 da Semtech (2016): sensibilidade de até -148 dBm e valor mínimo de SNR requerido para demodulação de até -20 dB. Comparando os valores da Tabela 2 com estes parâmetros percebe-se que as menores medições de RSSI e SNR obtidas se encontram acima da sensibilidade e do valor mínimo para demodulação.

Portanto, é possível afirmar que a estrutura proposta nesse documento é capaz de se comunicar com a rede ATC LoRaWAN com indicadores de qualidade satisfatórios. O *hardware* com antena embarcada é mais atrativo por ter desempenho similar a opção com antena externa com maior portabilidade. Entretanto, em regiões com pior infraestrutura de rede ou menor densidade de *gateways* distribuídos, a antena externa é uma boa alternativa para melhorar o desempenho dos indicadores de qualidade.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, propôs-se o desafio de integrar uma interface BLE à um dispositivo conectado a uma rede LoRa, para construir uma aplicação com as características de baixo consumo e longo alcance das LWPAN e alta compatibilidade das WPAN. Foi implementada uma pequena estrutura composta de um dispositivo com os módulos integrados e múltiplos beacons para realização de experimentos e avaliar sua aplicabilidade observando seu funcionamento em situações comuns em contextos de IoT. O desempenho do sistema proposto foi analisado baseado no desempenho dos indicadores de qualidade de comunicação e autonomia de bateria.

A integração obteve desempenho satisfatório nos experimentos realizados em laboratório, ambientes abertos e residenciais. Nos testes de compatibilidade foi possível constar o grande potencial da aplicação em operar com diversos tipos de *hardware*, inclusive *smartphones*.

Os dados obtidos na análise de desempenho dos indicadores de qualidade da comunicação mostraram que a estrutura é capaz de se comunicar de maneira satisfatória em domínio urbano caso a infraestrutura de rede presente na região tenha boa distribuição de *gateways*. Os gráficos de decaimento de RSSI e SNR também atestaram a antena externa como uma alternativa viável para melhorar o desempenho dos indicadores em regiões com pior infraestrutura de rede ou menor densidade de *gateways* distribuídos.

Analisando o consumo de corrente da estrutura foi possível avaliar o impacto da integração da interface BLE ao observador. Apesar de representar cerca de 52% da média de consumo, esse acréscimo tende a reduzir em aplicações que exigem maior atividade do módulo LoRa, como tarefas de leitura e processamentos de dados continuamente. A autonomia de bateria da estrutura completa é satisfatória, possibilitando operação continua durante anos sem necessidade de manutenção para troca de bateria, reduzindo o custo total de implementação e habilitando a aplicação em locais de difícil acesso.

Portanto, ao analisar os resultados conclui-se que a integração proposta foi capaz de agregar compatibilidade a uma aplicação de baixo consumo e longo alcance mantendo uma boa performance para atender as exigências de aplicações IoT em domínios urbanos.

6.1 Propostas de Trabalhos Futuros

Durante os testes de aplicabilidade foi possível perceber a dificuldade do usuário de interpretar os pacotes recebidos na plataforma e no tratamento de pacotes replicados em casos onde mais de um observador opera num mesmo espaço. Como trabalho futuro, é proposto a resolução destes problemas integrando uma camada de aplicação à arquitetura IoT do sistema, tornando a estrutura ainda mais flexível e acessível ao usuário. Isto pode ser feito implementando servidores de *back-end* e *front-end* para extrair os dados da plataforma, processar e apresentar de maneira mais clara para o usuário final.

Também é possível explorar mais o potencial da estrutura adicionando mais periféricos, como acelerômetros, magnetômetros e sensores de temperatura, para resolver problemas mais complexos nos domínios urbanos, como contagem de trafego, mapeamento de temperatura, entre outros. Pode-se inda realizar estudos sobre atualização remota pelo ar (OTA, do inglês *over-the-air*), que possibilita alteração de *firmware* para múltiplos dispositivos através de um servidor central. Esta técnica pode ser utilizada para prover a um dispositivo sem OTA a capacidade de se atualizar remotamente através de uma interface BLE, como o SPBTLE-1s, sem causar grande impacto no consumo médio de corrente do dispositivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFANEH, M. **The Basics of Bluetooth Low Energy (BLE)**. 2016. Disponível em: https://www.novelbits.io/basics-bluetooth-low-energy. Acesso em: 22 abr. 2020.

AL-FUQAHA, A.; GUIZANI, M.; MOHAMMADI, M.; ALEDHARI, M.; AYYASH, M. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 17, n. 4, p. 2347-2376, 2015.

AL-SARAWI, S.; ANBAR, M.; ALIEYAN, K.; ALZUBAIDI, M. Internet of Things (IoT) communication protocols. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION TECHNOLOGY, 8., 2017, Amman. **Proceedings** [...]. Amman: IEEE, 2017, p. 685-690.

ALIBABA. **RF 900MHz External Flexible Rubber 915MHz Reverse SMA male Antenna**. 2020. Disponível em: https://www.alibaba.com/product-detail/RF-900MHz-External-Flexible-Rubber-915MHz_62347608108.html. Acesso em: 18 out. 2020.

ALTBEACON. **AltBeacon - The Open and Interoperable Proximity Beacon Specification**. 2020. Disponível em: https://altbeacon.org/. Acesso em: 27 out. 2020.

AMERICAN TOWER. **ATC LoRaWAN Networks: Cidades onde estamos presentes**. 2020. Disponível em: http://www.americantower.com.br/pt/solutions/atc-lorawan-network/cidades-onde-estamos-presentes/index.htm. Acesso em: 29 mar. 2020.

ARMASU, L. **Bluetooth 4.2 To Bring Increased Privacy, Speed And Efficiency**. 2014. Disponível em: https://www.tomshardware.com/news/bluetooth-4.2-privacy-speed-improvements,28159.html. Acesso em: 25 out. 2020.

AUGUSTIN, A.; YI, J.; CLAUSEN, T.; TOWNSLEY, W. M. A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things. **Sensors**, v. 16, n. 9, p. 1466, 2016.

BATCHGEO. **Crie mapas dos seus dados**. 2020. Disponível em: https://pt.batchgeo.com/. Acesso em: 12 out. 2020.

BERNERS-LEE, T.; CAILLIAU, R.; LUOTONEN, A.; NIELSEN, H. F.; SECRET, A. The world-wide web. **Communications of the ACM**, v. 37, n. 8, p. 76-82, 1994.

BERNERS-LEE, T.; HENDLER, J.; LASSILA, O. The semantic web. **Scientific American**, v. 284, n. 5, p. 34-43, 2001.

BLANK, G.; REISDORF, B. C. The participatory web: A user perspective on Web 2.0. **Information, Communication & Society**, v. 15, n. 4, p. 537-554, 2012.

BLUEPIXEL TECHNOLOGIES. **BLE Scanner**. 2020. Disponível em: https://www.bluepixeltech.com/portfolio/ble-scanner/. Acesso em: 27 out. 2020.

BLUETOOTH SIG. **Bluetooth Core Specification v. 4.0**. 2010. Disponível em: https://www.bluetooth.com/specifications/archived-specifications. Acesso em: 05 abr. 2020.

BLUETOOTH SIG. **GATT Specifications**. 2016. Disponível em: https://www.bluetooth.com/specifications/gatt. Acesso em: 18 maio 2020.

BLUETOOTH SIG. **Bluetooth Core Specification v. 5.2**. 2019. Disponível em: https://www.bluetooth.com/specifications/bluetooth-core-specification. Acesso em: 19 maio 2020.

BLUETOOTH SIG. **The Bluetooth Range Estimator**. 2020a. Disponível em: https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/bluetooth-technology/range/#estimator. Acesso em: 11 out. 2020.

BLUETOOTH SIG. **Radio Versions**. 2020b. Disponível em: https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/bluetooth-technology/radio-versions. Acesso em: 27 abr. 2020.

CHANG, K.-H. Bluetooth: a viable solution for IoT? [Industry Perspectives]. **IEEE Wireless Communications**, v. 21, n. 6, p. 6-7, 2014.

CHANG, T.-Y.; LI, W.-C. Emergency Ambulance Support System using LoRa and Bluetooth Technologies. **Management Review**, v. 38, p. 127-142, 2019.

DECUIR, J. Introducing Bluetooth Smart: Part 1: A look at both classic and new technologies. **IEEE Consumer Electronics Magazine**, v. 3, n. 1, p. 12-18, 2013.

DELIC, K. A. The Third Wave: The internet of things: The Internet of Things (Ubiquity symposium). **Ubiquity**, v. 1, p. 1-4, 2015.

DEVALAL, S.; KARTHIKEYAN, A. LoRa technology-an overview. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS, COMMUNICATION AND AEROSPACE TECHNOLOGY, 2., 2018, Coimbatore. **Proceedings** [...]. Coimbatore: IEEE, 2018, p. 284-290.

FABER, M. J.; ZWAAG, K. M.; SANTOS, W. G. V.; ROCHA, H. R. O.; SEGATTO, M. E. V.; SILVA, J. A. L. A Theoretical and Experimental Evaluation on the Performance of LoRa Technology. **IEEE Sensors Journal**, v. 20, n. 16, p. 9480-9489, 2020.

FERREIRA, C. M. S.; OLIVEIRA, R. A. R.; SILVA, J. S. Low-Energy Smart Cities Network with LoRa and Bluetooth. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE CLOUD COMPUTING, SERVICES, AND ENGINEERING, 7., 2019, Newark. **Proceedings** [...]. Newark: IEEE, 2019, p. 24-29.

GEORGAKAKIS, E.; NIKOLIDAKIS, S. A.; VERGADOS, D. D.; DOULIGERIS, C. An Analysis of Bluetooth, Zigbee and Bluetooth Low Energy and Their Use in WBANs *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS MOBILE COMMUNICATION AND HEALTHCARE, 55., 2010, Ayia Napa. **Proceedings** [...]. Berlin: Springer, 2010, p. 168-175.

HAARTSEN, J. Bluetooth - The universal radio interface for ad hoc, wireless connectivity. **Ericsson Review**, v. 3, n. 1, p. 110-117, 1998.

HANA MICRON. **About Hanabee**. 2016. Disponível em: http://web-old.archive.org/web/20161002124526/http://hanabee.co.kr/#pricing. Acesso em: 10 out. 2020.

HE, W.; YAN, G.; XU, L. D. Developing vehicular data cloud services in the IoT environment. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 10, n. 2, p. 1587-1595, 2014.

HEYDON, R. **Bluetooth Low Energy**: The Developer's Handbook. ed. 1. [S.l.]: Prentice Hall, 2012.

HIKARI. **Multímetro Digital HM-2090**. 2020. Disponível em: http://www.hikariferramentas.com.br/multimetro-digital/291/104/. Acesso em: 16 dez. 2020.

IOT OPENLABS. **Rede LoRaWAN™ American Tower**. 2020. Disponível em: https://iotopenlabs.io/rede-atc-lorawan/#cobertura. Acesso em: 12 out. 2020.

KORE WIRELESS. **KORE Wireless Home**. 2020. Disponível em: https://www.korewireless.com. Acesso em: 05 abr. 2020.

LAIRD. **Specification of the Bluetooth System-Covered Core Package version: 4.0**. 2013. Disponível em: http://www.summitdata.com/blog/ble-overview. Acesso em: 21 abr. 2020.

LIANDO, J. C.; GAMAGE, A.; TENGOURTIUS, A. W.; LI, M. Known and unknown facts of LoRa: Experiences from a large-scale measurement study. **ACM Transactions on Sensor Networks**, v. 15, n. 2, p. 1-35, 2019.

LINS, B. F. E. A evolução da Internet: uma perspectiva histórica. **Cadernos Aslegis**, v. 17, n. 48, p. 11-45, 2013.

LORA ALLIANCE. **A technical overview of LoRa and LoRaWAN**. 2015. Disponível em: https://lora-alliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf. Acesso em: 24 mar. 2020.

MEKKI, K.; BAJIC, E.; CHAXEL, F.; MEYER, F. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. **ICT Express**, v. 5, n. 1, p. 1-7, 2019.

MURATA. **Sub-G Module Data Sheet**. 2018. Disponível em: https://wireless.murata.com/pub/RFM/data/type_abz.pdf. Acesso em: 20 jun. 2020.

NOVEL BITS. **An overview of Bluetooth Beacons – Part 2**. 2020. Disponível em: https://www.novelbits.io/overview-bluetooth-beacons-part-2. Acesso em: 19 maio 2020.

PÉREZ CAMPOS, R. **Analysis of LoRa and Bluetooth Low Energy to create networks for IoT**. 2019. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Telecomunicações) – Departamento de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, 2019.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. ed. 2: Editora Feevale, 2013.

RATASUK, R.; MANGALVEDHE, N.; GHOSH, A. Overview of LTE enhancements for cellular IoT. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PERSONAL, INDOOR, AND MOBILE RADIO COMMUNICATIONS, 26., 2015, Hong Kong. **Proceedings** [...]. Hong Kong: IEEE, 2015, p. 2293-2297.

RECK, M. S. **Beacons BLE-Bluetooth Low Energy-design e análise de um sistema de localização indoor**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2017.

SEMTECH. **AN1200.22, LoRa Modulation Basics**. 2015. Disponível em: https://web.archive.org/web/20190718200516/https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf. Acesso em: 31 maio 2020.

SEMTECH. **Datasheet - SX1276/77/78/79**. 2016. Disponível em: https://www.mouser.com/datasheet/2/761/sx1276-1278113.pdf. Acesso em: 10 out. 2020.

SIGMAIS. **Sigmais IoT Company**. 2020. Disponível em: https://sigmais.io/br. Acesso em: 20 jun. 2020.

SILVA, A. M.; JÚNIOR, C. J. P.; SANTOS, R. F.; MARTINS, R. T.; OLIVEIRA, W. H. Criatividade e inovação: Internet das coisas (iot–internet of things). **Revista Expressão**, n. 9, p. 1-20, 2016.

STMICROELECTRONICS. **Datasheet - SPBTLE-1S**. 2020. Disponível em: https://www.st.com/resource/en/datasheet/spbtle-1s.pdf. Acesso em: 20 jun. 2020.

TEXAS INSTRUMENTS. **AN092, Measuring bluetooth low energy power consumption**. 2010. Disponível em: https://discourse-production.oss-cn-shanghai.aliyuncs.com/original/3X/7/c/7c84d1dc683e86d61f4db95f90223453fc25861f.pdf. Acesso em: 31 maio 2020.

THEODORIDIS, E.; MYLONAS, G.; CHATZIGIANNAKIS, I. Developing an IoT Smart City framework. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION, INTELLIGENCE, SYSTEMS AND APPLICATIONS, 2013, Piraeus. **Proceedings** [...]. Piraeus: IEEE, 2013, p. 1-6.

WAVIOT. **What is LPWAN**. 2020. Disponível em: https://web.archive.org/web/20191102191533/https://waviot.com/technology/what-is-lpwan. Acesso em: 24 mar. 2020.

WHITMORE, A.; AGARWAL, A.; XU, L. D. The Internet of Things—A survey of topics and trends. **Information Systems Frontiers**, v. 17, n. 2, p. 261-274, 2015.

WU, M.; LU, T.-J.; LING, F.-Y.; SUN, J.; DU, H.-Y. Research on the architecture of Internet of Things. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED COMPUTER THEORY AND ENGINEERING, 3., 2010, Chengdu. **Proceedings** [...]. Chengdu: IEEE, 2010, p. 484-487.

YAGEO. **Ceramic Chip Antenna ANT1204LL05R0915A**. 2013. Disponível em: https://br.mouser.com/datasheet/2/447/An_Ceramic_915_1204_CHE_0-248042.pdf. Acesso em: 18 out. 2020.

YAQOOB, I.; AHMED, E.; HASHEM, I. A. T.; AHMED, A. I. A.; GANI, A.; IMRAN, M.; GUIZANI, M. Internet of things architecture: Recent advances, taxonomy, requirements, and open challenges. **IEEE Wireless Communications**, v. 24, n. 3, p. 10-16, 2017.