



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

ALAN WILLY LEISER

REDES DE LONGO ALCANCE E BAIXO CONSUMO DE
ENERGIA

LONDRINA
2022

ALAN WILLY LEISER

**REDES DE LONGO ALCANCE E BAIXO CONSUMO DE
ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Ciência da Computação da Universidade Estadual de Londrina para obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Elieser Botelho Manhas Jr.

LONDRINA

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Leiser, Alan Willy .

Redes de longo alcance e baixo consumo de energia / Alan Willy Leiser. - Londrina, 2022.
59 f. : il.

Orientador: Elieser Botelho Manhas Junior.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência da Computação) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Graduação em Ciência da Computação, 2022.

Inclui bibliografia.

1. O trabalho teve o foco no estudo das redes de baixa potência e longo alcance e suas principais tecnologia. - TCC. I. Junior, Elieser Botelho Manhas . II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas. Graduação em Ciência da Computação. III. Título.

CDU 519

ALAN WILLY LEISER

**REDES DE LONGO ALCANCE E BAIXO CONSUMO DE
ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Bacharelado em Ciência da Computação da Universidade Estadual de Londrina para obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Elieser Botelho
Manhas Jr.
Universidade Estadual de Londrina

Prof. Dr. Mario Lemes Proença Júnior
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Prof. Ms. Fabio Cezar Martins
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Londrina, 01 de junho de 2022.

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo a Deus por ter me acompanhado e ajudado em toda essa caminhada. Agradeço a toda minha família, de forma especial meus agradecimentos vão para meus pais por sempre me darem o suporte necessário e incentivo para fazer o curso que me agrada, meus avós pelos conselhos e meus tios por sempre oferecerem uma conversa para distrair a mente. Agradeço também meus amigos de curso, em especial ao Renan Ricoldi e ao Fernando Morgado, pelo carinho e companherismo desde o começo do curso.

Agradeço a todos os professores, em especial ao professor Elieser Botelho Manhas Jr. por me instruir nesse trabalho. E por último gostaria de agradecer à Universidade Estadual de Londrina e ao Departamento de Computação pela oportunidade.

*“O que as suas mãos tiverem que fazer, que
o façam com toda a sua força, pois na
sepultura, para onde você vai, não há
atividade nem planejamento, não há
conhecimento nem sabedoria.
(Bíblia Sagrada, Eclesiastes 9,10)*

LEISER, A. W.. **Redes de longo alcance e baixo consumo de energia**. 2022. 59f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência da Computação) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2022.

RESUMO

Devido ao crescimento do mercado de Internet das Coisas (IoT), que têm como objetivo principal conectar sensores e dispositivos à Internet, estão surgindo novas aplicações e demandas. Essas aplicações, em sua maioria, implicam em redes de comunicação que devem ser implantadas em áreas extensas, com muitos nós sensores que, por sua vez, têm a função de coletar informações do ambiente e enviá-las para estações base (*gateways*) que podem estar posicionados a uma grande distância. Tais redes, cujos nós são tipicamente alimentados por baterias, são normalmente projetadas para terem uma vida útil de operação de vários anos. Como as tecnologias tradicionais de comunicação sem fio (Wi-Fi, celular, WPANs) não foram desenvolvidas para atender essas restrições, surgiram as redes de baixo consumo e longo alcance (LPWAN, do inglês, *Low Power Wide Area Networks*). Assim, este trabalho tem como objetivo principal o estudo das principais tecnologias disponíveis no mercado, que utilizam tanto frequências licenciadas quanto não licenciadas, finalizando com um estudo de caso que simula dois cenários de uma rede LoRa, por meio da ferramenta LoraSim.

Palavras-chave: IoT. LPWAN. LoRaWAN. Sigfox. LTE-M. NB-IoT. IEEE 802.11ah

LEISER, A. W.. **Low Power Wide Area Networks**. 2022. 59p. Final Project (Bachelor of Science in Computer Science) – State University of Londrina, Londrina, 2022.

ABSTRACT

Due to the growth of the Internet of Things (IoT) market, which aims to connect sensors and devices to the Internet, new applications and demands arise. However, there are applications in which large areas separate the device from the gateways and the network can only be deployed if a more efficient communication method is used. In this context, Low Power Wide Area Networks (LPWAN) emerged. Thus, this work aims to study the main technologies that use licensed and unlicensed frequencies, in addition to presenting a case study simulating two scenarios through the LoraSim tool.

Keywords: IoT. LPWAN. LoRaWAN. Sigfox. LTE-M. NB-Io. IEEE 802.11ah

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplos de aplicações de IoT: adaptado de [1]	24
Figura 2 – Classificação das tecnologias pela distância e taxa de transmissão de dados. Fonte: adaptado de [1]	25
Figura 3 – Exemplos de topologias. fonte: [2]	26
Figura 4 – Panorama do uso de tecnologias LPWAN. Fonte: [3]	28
Figura 5 – Duração dos símbolos para diferentes valores de SF. Fonte: [4]	30
Figura 6 – Tipo de dispositivos LoRa. Fonte: adaptado de [5]	32
Figura 7 – Arquitetura LoRaWAN. Fonte: adaptado de [6]	34
Figura 8 – Arquitetura da rede Sigfox[7]	36
Figura 9 – Composição dos pacotes de dados de uplink(a) e downlink(b) [8]	38
Figura 10 – Modos de operação NB-IoT [5]	44
Figura 11 – Arquitetura NB-IoT. Fonte: adaptado de [9]	45
Figura 12 – Cenário 1: DER em função do n ^o de nós com restrição de <i>duty cycle</i> de 0,1%	52
Figura 13 – DER em função do n ^o de nós com restrição de 30 mensagens por dia	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais características das tecnologias LPWANs. Fonte: [1, 10, 11, 12]	48
Tabela 2 – Valores de RSSI em função do SF e de BW	50
Tabela 3 – Distância máxima do nó em relação ao gateway em função do SF . . .	51
Tabela 4 – N ^o máximo de nós aproximado, função do SF, com restrição de <i>duty cycle</i> de 0,1%	53
Tabela 5 – N ^o máximo de nós aproximado , função do SF, com restrição de 30 mensagens por dia	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
ADR	<i>Adaptive Data Rate</i>
AMR	<i>Automated Meter Reading</i>
AP	<i>Access Point</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
BW	<i>Band Width</i>
CF	<i>Carrier Frequency</i>
CR	<i>Code Rate</i>
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
DBSK	<i>Differential Binary Phase Shift Keying</i>
DER	<i>Data Extraction Rate</i>
eDRx	<i>Extended Discontinuous Reception</i>
eNodeB	<i>Evolved Node B</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
GFSK	<i>Gaussian Frequency Shift Keying</i>
GPS	<i>Global positioning System</i>
GSM	<i>Global System for Mobile communications</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISM	<i>Industrial Scientific and Medic</i>
LoRa	<i>Long-Range</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-M	<i>Long Term Evolution for Machine</i>
M2M	<i>Machine to Machine</i>

NB-IoT	<i>Narrowband for Internet Of Things</i>
NEC	<i>Network Energy Consumption</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OM	<i>Outage Monitoring</i>
OTDOA	<i>Observed Time Difference Of Arrival</i>
PSM	<i>Power Save Mode</i>
QRM	<i>Quasi-Real-Time Monitoring</i>
RAW	<i>Restricted Access Window</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
SF	<i>Spread Factor</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
TDOA	<i>Time-Difference-Of-Arrival</i>
TIM	<i>Traffic Received Map</i>
TOU	<i>Time Of Use</i>
TP	<i>Transmission Power</i>
TWT	<i>Target Wake Time</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UNB	<i>Ultra Narrow Band</i>
WUS	<i>Wake-up signal</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	LPWAN - LOW POWER WIDE AREA NETWORKS	23
3	PRINCIPAIS TECNOLOGIAS LPWAN	29
3.1	Tecnologias LPWAN que utilizam frequências não licenciadas	29
3.1.1	LoRaWAN	29
3.1.2	Sigfox	35
3.1.3	IEEE 802.11ah	39
3.2	Tecnologias LPWAN que utilizam frequências licenciadas . . .	41
3.2.1	LTE-M	41
3.2.2	NB-IoT	43
3.3	Análise comparativa	46
4	ESTUDO DE CASO	49
4.1	Cenários analisados	51
4.2	Cenário 1	51
4.3	Cenário 2	53
5	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

A internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*) surgiu com o objetivo de interconectar e transferir dados entre sensores e dispositivos. A IoT pode revolucionar o modo de vida, de trabalho, através de inúmeras aplicações práticas em diversas áreas, incluindo segurança, rastreamento, agricultura e cidades inteligentes, entre outras. Para que isso aconteça, os dispositivos e sensores precisam captar os dados, compartilhar entre si e fornecer os dados para que o usuário tome as melhores decisões [1, 13].

Essa mudança na vida dos seres humanos só irá acontecer se existir informações suficientes para auxiliar na tomada de decisão mais assertiva, mas para isso é necessário o aumento de dispositivos e sensores captando dados, portanto há muito interesse e investimento nessa área. Há previsões de que no ano de 2025 o número de dispositivos chegue à marca de 75 bilhões e que, já em 2024, o mercado de IoT tenha movimentado 4,3 trilhões de dólares em diversos setores como indústria, agricultura, *smart meters* e *smart cities* [2, 13].

Após o surgimento do conceito de IoT e M2M (*machine-to-machine communication*), o número de dispositivos conectados à internet cresceu muito. Atualmente, muitos dos dispositivos utilizados no dia a dia estão conectados à internet, como celulares, tablets, computadores, impressoras, relógios, aparelhos de ar-condicionado, televisores, geladeiras, lâmpadas entre outros. A maioria desses dispositivos utilizam diversas tecnologias, como *Wi-Fi*, *ZigBee*, rede celular (2G, 3G, 4G e 5G) e *Bluetooth*, que foram desenvolvidas para aplicações de curto e médio alcance.

Existem aplicações nas quais grandes áreas separam o sensor dos receptores e a comunicação só poderá ser feita se for utilizado um método mais eficiente de conexão à internet. Nesse contexto, surgiram as redes de baixo consumo e longo alcance (LPWAN, do inglês, *Low Power Wide Area Networks*), que será o tema abordado neste trabalho.

Este trabalho está dividido da seguinte forma: no capítulo 2 é apresentada a razão do surgimento das LPWANs, seu conceito, características e tecnologias presentes no mercado. No capítulo 3 as principais tecnologias LPWANs são detalhadas e uma análise comparativa é realizada. O capítulo 4 apresenta um estudo de caso, simulando dois cenários de uma rede LoRa, com o objetivo de analisar a influência de alguns parâmetros na escalabilidade da rede. Finalmente, o capítulo 5 apresenta as conclusões e perspectivas de trabalhos futuros.

2 LPWAN - LOW POWER WIDE AREA NETWORKS

São diversas as áreas nas quais o conceito de Internet das Coisas pode estar inserido e alguns exemplos de aplicações são apresentados na figura 1.

Algumas aplicações agrícolas que podem utilizar as redes LPWAN são: estações meteorológicas que monitoram temperatura, umidade do ar, pressão atmosférica e outros parâmetros da lavoura; medidores do nível de silos de grãos, sensores enterrados no solo para captar a umidade do solo, sensores nos veículos utilizados na plantação como tratores, colheitadeiras, monitoramento de estufas e plantadeiras.

Outra área de possíveis aplicações para as LPWANs são as indústrias, incluindo: monitoramento da linha de montagem, monitoramento dos operários para evitar acidentes, monitoramento da temperatura, de umidade, monitoramento de veículos, rastreamento de veículos, manutenção preventiva, monitoramento de gasto energético, monitoramento de gases e outras tantas possibilidades.

Além da indústria, a área de logística também pode ser beneficiada em aplicações como: rastreamento de frotas, organização de veículos autônomos dentro do armazém, monitoramento da qualidade da carga, monitoramento de carros compartilhados, monitoramento de trens e outros.

A área da saúde também oferece oportunidades, como: sensores para monitorar de radiação e raios ultravioletas, monitoramento de pacientes, monitoramento de doenças, monitoramento de ambientes refrigerados, detectores de queda, telemedicina, entre outros [2].

Essas aplicações possuem, em sua maioria, algumas características em comum, como: nós da rede distribuídos em uma área ampla (eventualmente com mobilidade), baixa taxa de dados transmitidos e alimentação dos nós por meio de baterias. As tecnologias sem fio de curto alcance (ZigBee, Bluetooth e etc) não são aptas para as aplicações que necessitam de um longo alcance. As soluções que utilizam comunicação celular (2G, 3G, 4G e 5G) podem suportar um alcance bem maior, mas seu consumo excessivo de energia torna a sua aplicação inviável, pois seu foco está na grande taxa de dados. Este é o mesmo problema das redes Wi-Fi que também são projetadas para oferecerem uma grande taxa de dados, sendo o consumo eficiente de energia uma questão secundária. As comunicações via satélite, por sua vez, se destacam pela ampla cobertura, mas é mais apropriada para o recebimento de dados do satélite [1].

Desta forma, tornou-se necessário o desenvolvimento de novas técnicas que possibilitassem atender demandas com baixa taxa de dados e um longo alcance, surgindo assim o conceito de *Low Power Wide Area Networks* (LPWAN). As LPWANs são redes



Figura 1 – Exemplos de aplicações de IoT: adaptado de [1]

que complementam a lacuna deixada pelas demais tecnologias de comunicação sem fio existentes para atender as demandas da IoT, como pode ser observado no canto inferior direito do gráfico da figura 2.

As principais características das redes LPWANs são o baixo consumo de energia e uma grande área de cobertura. além de, tipicamente, possuírem uma baixa taxa de dados, pela característica das suas aplicações.

Assim, as redes de longo alcance têm um papel essencial no desenvolvimento de aplicações de IoT que demandam uma cobertura grande e/ou baixo consumo de energia. Dessa forma, algumas características das redes LPWAN merecem destaque, como: eficiência energética, baixo custo de implantação e operação, escalabilidade, uso de faixas de frequências licenciadas ou não licenciadas e uso de faixas de frequência abaixo de 1 GHz.

Várias estudos, como [1, 2, 5, 13]. apontam características semelhantes entre as diversas tecnologias LPWANs, todas elas compartilhando objetivos comuns para se atingir os requisitos de uma LPWAN.

Em relação à área de cobertura das LPWANs, o principal objetivo é que a área de atuação seja extremamente grande se for comparada a outras tecnologias como *Bluetooth*; é desejado que as redes LPWANs possam ter uma cobertura de 10 a 40 km em zonas rurais e de 1 a 5 km em zonas urbanas. Mesmo a área de alcance nas zonas urbanas sendo grande ela é muito menor do que o alcance atingido em zonas rurais, isso acontece pela existência de muitos obstáculos físicos e interferência de outros sinais na zona urbana.

A grande área de cobertura de um dispositivo LPWAN se deve à utilização de

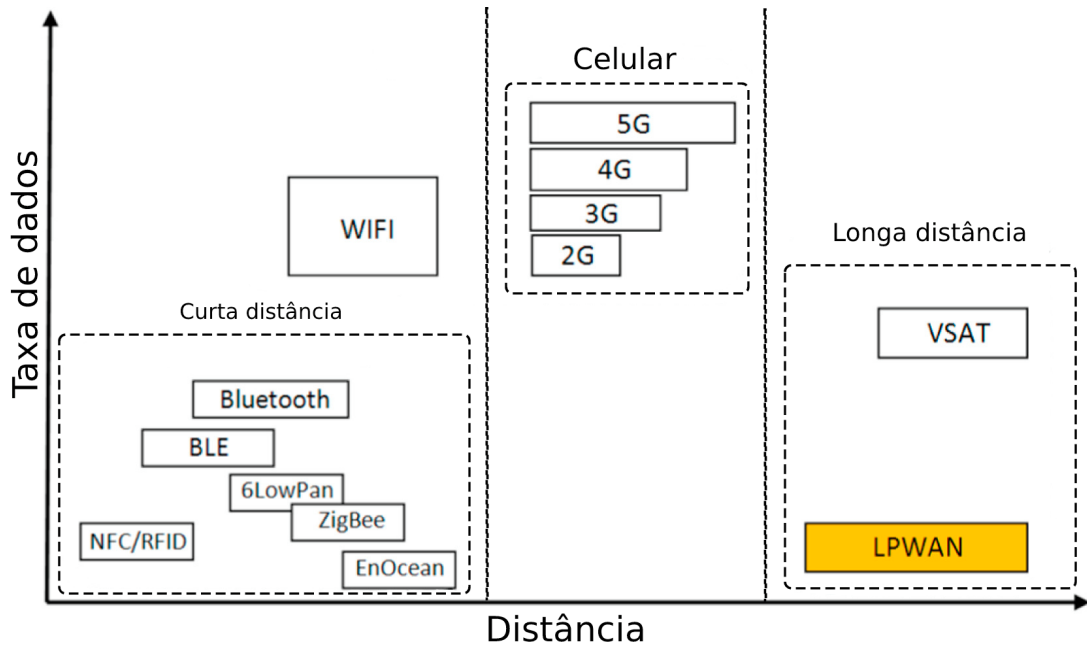


Figura 2 – Classificação das tecnologias pela distância e taxa de transmissão de dados. Fonte: adaptado de [1]

bandas de frequências abaixo de 1 GHz, ao contrário das demais tecnologias que utilizam em sua maioria bandas de frequência de alguns GHz. A utilização de baixa frequência facilita a transmissão de dados por longas distâncias e consome menos energia para efetuar as transmissões. Outra característica proveniente do uso de frequências abaixo de 1 GHz é a maior confiabilidade e robustez dos dados transmitidos, além da maior facilidade em penetrar obstáculos no trajeto, como paredes ou objetos [2].

Outra meta de projeto é o baixo consumo de energia, possibilitando ao dispositivo operar por longos períodos sem manutenção ou troca de baterias. Essa característica se deve à grande área de cobertura e muitas das vezes o difícil acesso ao local onde o transmissor se encontra. Assim, é desejado que o dispositivo LPWAN tenha uma vida útil de vários anos. Geralmente, a fonte de energia é uma pequena bateria.

Uma das estratégias utilizadas para diminuir o consumo de energia os dispositivos emissores, além do uso de frequências abaixo de 1 GHz é a utilização de ciclos de trabalho limitados, ou seja, o dispositivo só sai do modo *standby* para receber ou enviar alguma mensagem e logo após volta para seu estado de hibernação.

Outra estratégia para diminuir o consumo de energia é a utilização de topologias mais simples como a estrela. Embora a topologia *mesh* tenha sido amplamente utilizada para atingir longas distâncias de cobertura, essa arquitetura de rede apresenta custo elevado de implementação e durante de transferência de dados alguns nós sofrem com sobrecarregamento drenando, mais rápido do que o normal, a energia disponível. Esse problema é resolvido com a conexão direta do nó com um ou mais *gateways*, também

chamada de topologia estrela [2].

As estruturas dos dois tipos de organização de rede podem ser vistos na figura 3, sendo a imagem (a) uma rede com a topologia estrela e a imagem (b) uma rede com a estrutura *mesh*.

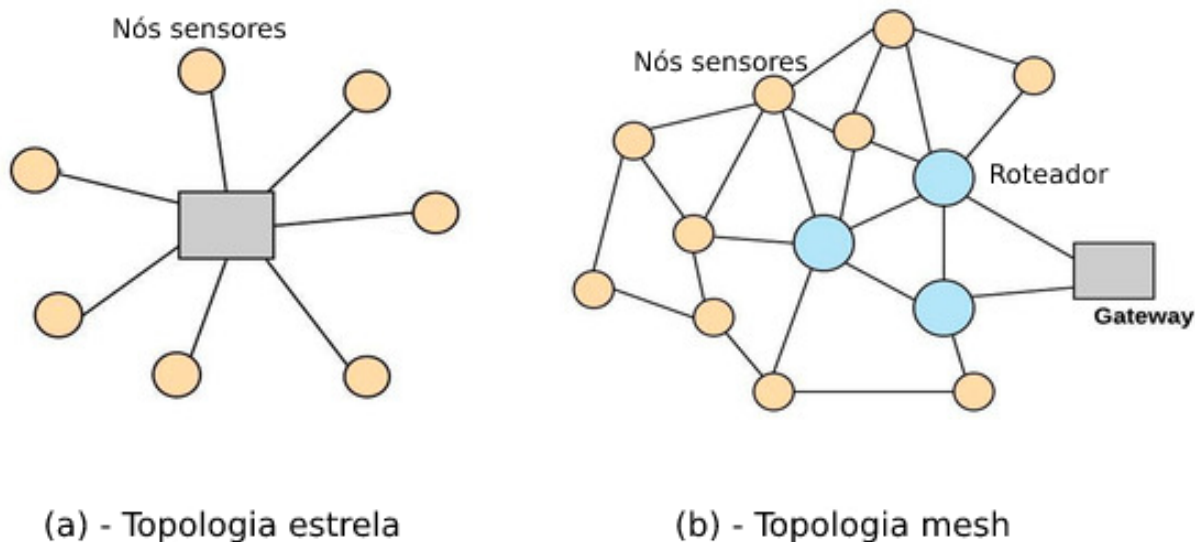


Figura 3 – Exemplos de topologias. fonte: [2]

Outro ponto a ser considerado é que os dispositivos LPWANs devem ser o mais simples possível, deixando as tarefas mais complexas para o *backend*, onde espaço e energia não são um problema. Desta forma, algumas tarefas que antes eram de responsabilidade do nó, como estar sempre sincronizado com a estação base e sinalizar quando for começar a transmissão de uma mensagem, são deixadas para a estação base.

A simplificação dos dispositivos ajuda também a diminuir o custo de cada unidade, pois quanto mais simples de fabricar e operar um dispositivo, mais barato é para adquiri-lo. Essa relação é necessária para redes que pretendem operar em uma grande área de cobertura e com uma grande quantidade de dispositivos. Outra questão é a possibilidade de uma estação base administrar milhares de nós, reduzindo o custo de aquisição.

Por isso, é preciso que o custo de implementação da rede e a implantação dos dispositivos no local desejado seja o menor possível. Caso contrário, muitas aplicações que necessitam de muitos sensores se tornam inviáveis em função do custo elevado dos equipamentos [2].

A escalabilidade é mais uma característica desejável, pois o número de dispositivos vêm crescendo a cada ano e existem aplicações que precisam de muitos nós, devido a sua grande área. Por isso, as LPWAN precisam se desenvolver com a possibilidade de suportar aplicações com muitos dispositivos conectados à rede.

Outro fator importante das LPWANs é quanto ao uso faixas de frequência licen-

ciadas ou não licenciadas. As frequências licenciadas precisam ser adquiridas e o custo certamente será repassado para os clientes ou usuários da rede, encarecendo a utilização. Tipicamente, são as companhias de telefonia que detêm tais licenças, já que algumas tecnologias de LPWAN existentes utilizam faixas de frequências destinadas à telefonia celular.

Em contrapartida, as frequências licenciadas oferecem menos interferência de outros sistemas, pois só o proprietário da licença está autorizado a usá-la. Já as frequências não licenciadas não possuem um "dono" e são faixas de frequências destinadas para fins industriais, científicos e na área médica, conhecidas como bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medic*).

Apesar das frequências não licenciadas serem gratuitas, elas apresentam algumas questões que devem ser levadas em consideração quando utilizadas para a implantação de uma rede LPWAN. Nas frequências ISM podem existir outros sistemas utilizando os mesmos canais, causando interferência e concorrência para a transferência de dados. Além disso, por estar utilizando frequências públicas, existem certas limitações impostas por órgãos reguladores na tentativa de minimizar os transtornos com interferências e congestionamentos dos canais. Tais interferências podem ser externas, quando proveniente de outro sistema, como explicado acima, mas podem ocorrer interferências internas. Uma interferência interna ocorre quando os próprios nós da rede LPWAN começam a competir e a congestionar a utilização dos canais. É por isso que as LPWANs precisam ser escaláveis e precisam ter um sistema próprio que coordene o acesso à rede [5].

No capítulo 3, serão abordadas mais profundamente as tecnologias LoRaWAN, Sigfox, IEEE 802.11ah, NB-IoT e LTE-M. Embora existam várias outras tecnologias disponíveis no mercado (como Ingenu, Telensa, Qowise, Dash7, Weightless, Nwave, NB-Fi e EC-GSM-IoT, por exemplo), LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT e LTE-M são as mais utilizadas atualmente, conforme se observa na figura 4.

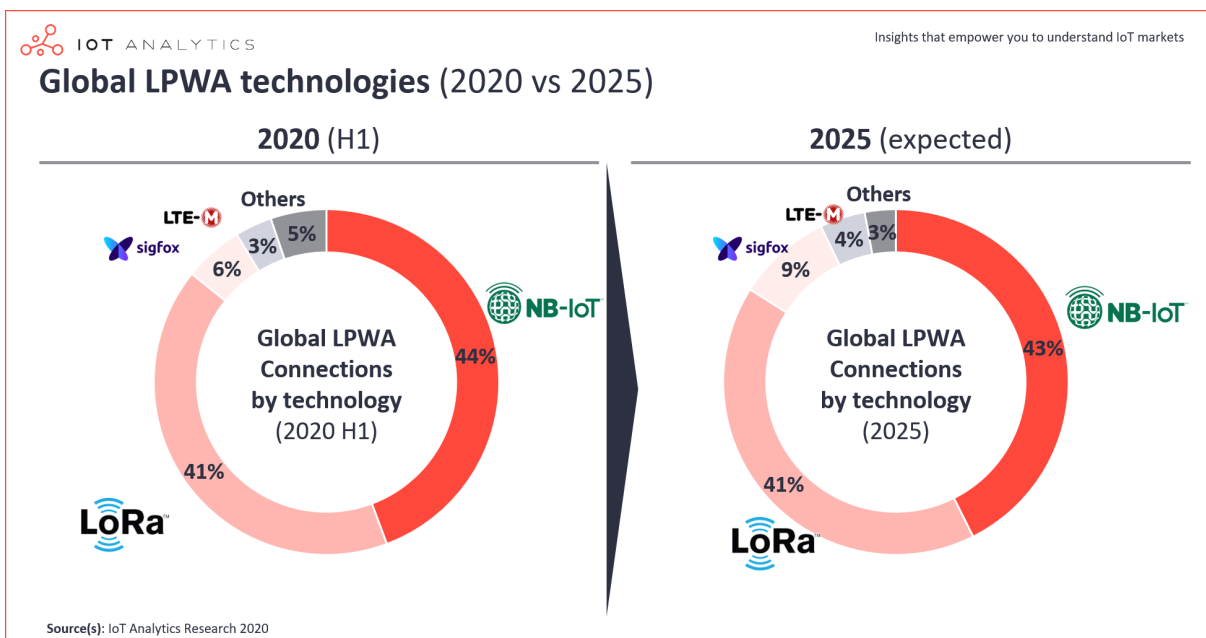


Figura 4 – Panorama do uso de tecnologias LPWAN. Fonte: [3]

3 PRINCIPAIS TECNOLOGIAS LPWAN

Este capítulo descreve as características típicas das principais tecnologias LPWAN conforme pode ser visualizado no gráfico da figura 4 que elenca as tecnologias mais utilizadas no mercado IoT. Dessa forma, está organizado em três seções principais: tecnologias que utilizam frequências não licenciadas, tecnologias que utilizam frequências licenciadas e por último um comparativo entre as tecnologias.

Na seção de tecnologias LPWAN que utilizam frequências não licenciadas são apresentadas as seguintes tecnologias: LoRAWAN, Sigfox e IEEE 802.11ah. Já na seção de tecnologias que utilizam frequências licenciadas são abordadas o LTE-M e o NB-IoT. Para concluir o do capítulo por último, é feita uma breve comparação entre as tecnologias abordadas.

3.1 Tecnologias LPWAN que utilizam frequências não licenciadas

Nessa seção apresenta as tecnologias LoRaWAN, Sigfox e IEEE 802.11ah. As tecnologias LoRaWAN e Sigfox foram escolhidas por serem as mais utilizadas no mercado entre as LPWANs que utilizam frequências não licenciadas, conforme visto na figura 4. Já a tecnologia IEEE 802.11ah, apesar do seu alcance mediano, foi escolhida por se tratar de um novo padrão no mercado, ser derivada do protocolo Wi-Fi, que é um padrão aberto e por possuir uma alta taxa de dados, sendo assim, uma opção intermediária, destinada a atender nichos específicos [3, 11].

3.1.1 LoRaWAN

LoRa e LoRaWAN são dois termos semelhantes, que representam conceitos diferentes. LoRa define a camada física da rede sem fio, já LoRaWAN são os protocolos que formam a rede sem fio por onde são transmitidos os dados e ambas se unem em um conjunto.

A palavra LoRa vem do inglês *long-range* e representa uma das principais características de funcionamento do sistema LoRa e dos dispositivos LPWAN. A tecnologia da camada física LoRa é propriedade da *Semtech Corporation*, sendo a única organização autorizada a comercializar dispositivos LoRa, mas apesar disso é permitido que outros fabricantes produzam dispositivos que tenham a possibilidade de integrar com o sistema LoRa, cabendo à Semtech analisar e certificar esses produtos em desenvolvimento.

A modulação implementada no sistema LoRa é derivada da modulação *chirp spread*

spectrum (CSS). O CSS foi primariamente desenvolvido nos anos 1940 para compor radares, mas devido à sua robustez e seu longo alcance essa técnica de modulação foi utilizada por décadas para aplicações de comunicações militares e espaciais [14].

A tecnologia *chirp* consome pouca energia para efetuar suas transmissões, o que ajuda a prolongar a vida útil do dispositivo LoRa. A modulação CSS consiste em um sinal na qual sua frequência aumenta e diminui conforme o tempo. Assim, os termos *up-chirp* e *down-chirp* representam respectivamente, o aumento e a diminuição da frequência do sinal [15].

Os equipamentos LoRa possuem a opção de alterar a configuração do CSS através do fator de espalhamento, ou *Spread Factor* (SF) em inglês. O SF pode ser configurado de 7 até 12, sendo que o fator 7 possui uma taxa de transmissão de dados maior, porém seu tempo de transmissão é menor e, dessa forma, consome menos energia para transmitir mais informações. As durações dos símbolos, em função do spread factor, são mostradas na figura 5. Conforme se aumenta o SF, a taxa de transmissão de dados vai diminuindo, o tempo de transmissão vai aumentando e, por consequência, o consumo de energia aumenta. Então, quando existe uma mudança do SF, existe uma alteração na performance e na taxa de transmissão de dados do aparelho. A relação que ocorre é, quanto maior o fator de espalhamento menor a frequência de transmissão de dados [2, 13].

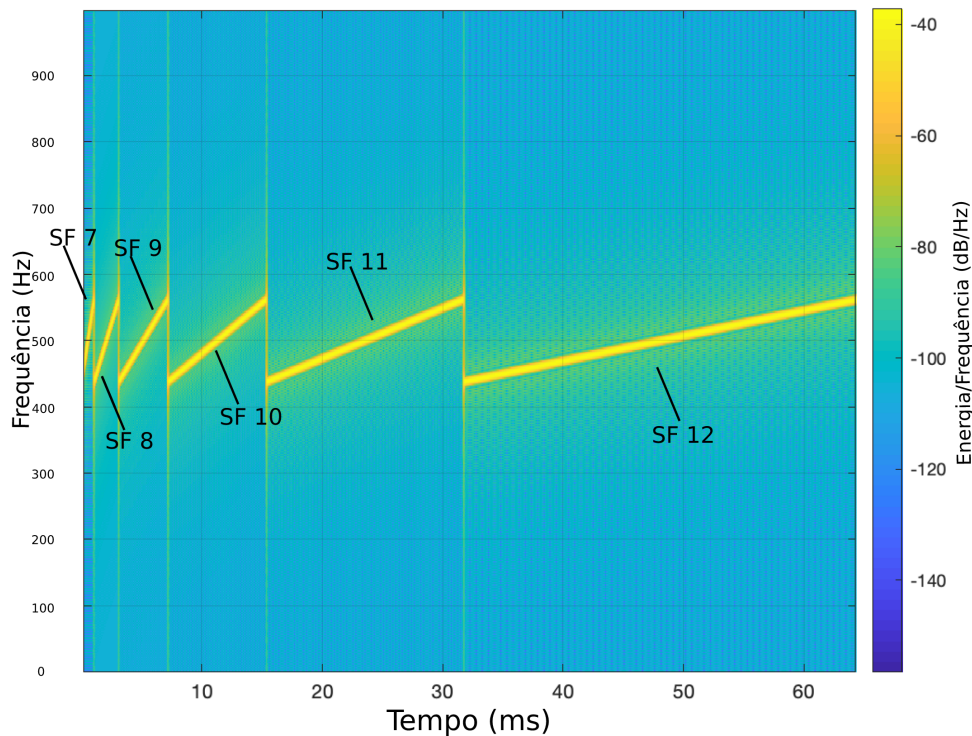


Figura 5 – Duração dos símbolos para diferentes valores de SF. Fonte: [4]

Devido à possibilidade de alteração do SF, os dispositivos LoRa possuem um *data rate* variado, pois cada SF leva um tempo determinado para transmitir seus dados. En-

tretanto, pode-se definir um intervalo que vai de 290 bps até 50 Kbps. Outro aspecto é o tamanho do *payload* que os dispositivos LoRa podem enviar. O tamanho do *payload* pode variar devido a alguns fatores, entre eles o SF, a largura de banda (*bandwidth* em inglês) e a taxa de codificação (*code rate*), porém o tamanho máximo possível dentro do sistema LoRa é de 243 bytes por mensagem. [1, 6] Neste sentido, é importante utilizar uma configuração adequada para cada aplicação, caso contrário, pode significar uma diminuição desnecessária do tempo de vida, além de poder infringir questões regulatórias do uso de espectro de frequência [16].

A camada física também possui suporte para comunicação bidirecional. Além disso, seu alcance em áreas rurais está entre 18 e 25 km. Já em áreas urbanas seu alcance fica abaixo desse valor devido à grande interferência de outros sinais ou até mesmo de barreiras físicas. Portanto, o alcance máximo em áreas urbanas fica próximo dos 5 km.

O sistema LoRa possui uma largura de banda bem menor em relação a tecnologias LPWANs de comunicação celular, que como veremos mais à frente, são entre 1,4 MHz a 20 MHz. Já o sistema LoRa adota uma largura de banda de 7,8 até 500 kHz, porém na prática as opções 125, 250 e 500 KHz são as mais utilizadas [5].

Como já mencionado, LoRaWAN é um conjunto de protocolos que devem ser seguidos para as operações de transmissão de uma rede LoRa que são definidos pela LoRa Alliance. Essa organização é aberta para qualquer pessoa ou organização que queira participar do desenvolvimento de novas tecnologias para o protocolo LoRa. Outra função desse grupo é certificar o desenvolvimento dos produtos que vão utilizar a tecnologia LoRaWAN para a operação. O desenvolvimento do protocolo LoRaWAN foi especialmente feito para o setor de IoT. Portanto, os protocolos levam em consideração a conexão de sensores com suas aplicações.

Apesar de todas as características já citadas, que ajudam a estender a vida útil do dispositivo LoRa, o protocolo LoRaWAN possui mais recursos que ajudam a aumentar ainda mais seu período de operação sem troca de bateria. Esse recurso está relacionado ao ciclo de trabalho do transmissor.

Os dispositivos LoRa utilizam um método de comunicação assíncrona, isso quer dizer que o dispositivo só irá sair do seu estado de hibernação quando tiver algum dado para transmitir. Logo após o encerramento da transmissão o dispositivo retorna para o estado de hibernação até que seja necessário transmitir novos dados [15].

O sistema LoRaWAN buscou uma forma mais simples de implementar o método utilizado em sua camada MAC. Por isso o método escolhido foi o ALOHA, um sistema bem antigo e simples e, desse modo, a rede LoRaWAN permite que vários dispositivos se comuniquem ao mesmo tempo, mas usando diferentes canais ou códigos ortogonais[13].

Outro recurso que pode ser acionado é o ADR ou *Adaptive Data Rate* em inglês.

Esse recurso permite que a taxa de dados e o consumo de energia sejam otimizados conforme a posição do nó em relação à estação base. Entretanto o acionamento ou não desse recurso não é controlado pelo próprio nó e sim por sua estação base.

Quando acionado o ADR, um nó que esteja próximo da estação base, consumirá menos energia na transmissão de dados. Essa economia de energia acontece através da diminuição do *Spread Factor*, assim quanto mais perto um dispositivo estiver de uma estação base menor será seu SF. Já com um dispositivo mais distante acontece o contrário. Por estar mais distante, o dispositivo usará um SF maior e consumirá mais energia para transmitir seus dados [17].

O protocolo LoRaWAN também aumenta sua eficiência energética não utilizando o *Global Positioning System* (GPS) para efetuar a geolocalização de seus nós; ao invés do GPS é utilizada a técnica *Time-Difference-Of-Arrival* (TDOA). Essa técnica compara o tempo embutido em cada pacote que chega nas estações base, deste modo o nó não precisa fazer nenhum processamento extra, já que todo o processamento é feito por algoritmos nos servidores da aplicação [15].

Os dispositivos na rede LoRa podem ser classificados em três classes: classe A para *all*, classe B para *beacon* e classe C para *continuous*. Cada classe possui características distintas em relação ao comportamento de comunicação com as estações base.

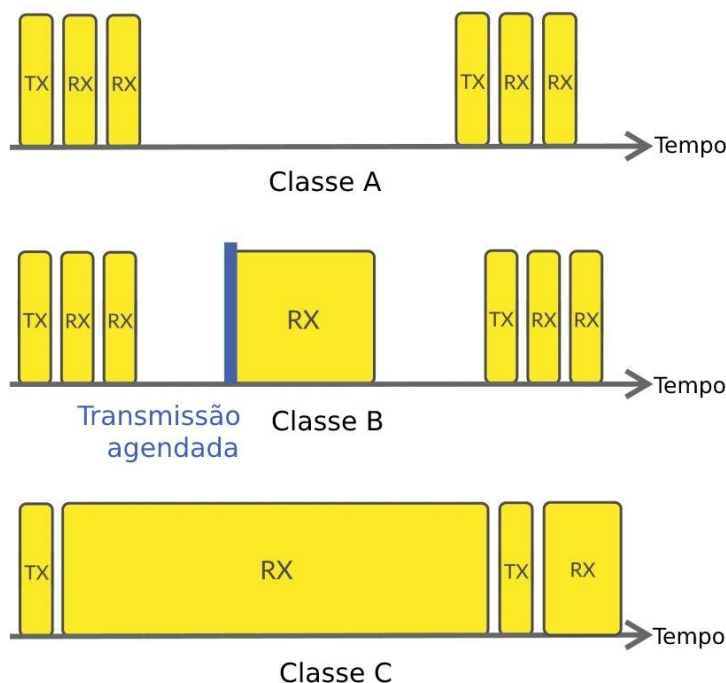


Figura 6 – Tipo de dispositivos LoRa. Fonte: adaptado de [5]

A primeira e com as funcionalidades mais simples é a classe A; ela possui uma comunicação restrita da base com o dispositivo, tendo unicamente duas janelas de *downlink* (representadas pelo RX na figura 6). O recebimento de mensagens ocorre somente após o

envio de dados (representado pelo TX na figura 6) para a estação base. Nessa classe, as mensagens de *downlink* são unicamente utilizadas para confirmar o sucesso do envio dos dados.

Apesar de limitada, essa característica permite o aumento do tempo de operação do dispositivo sem a necessidade de manutenção. Devido a essa simplicidade na operação este padrão é o básico para todos os dispositivos LoRa, apesar de alguns dispositivos terem a opção de alternar para as demais classes.

Os dispositivos classificados como Classe B possuem todas as funcionalidades da classe A e, além disso, possuem a opção de agendar um momento para o recebimento de dados da estação base. Esse agendamento é feito através das mensagens de *downlink* padrão, informando que o nó deve se sincronizar com a base e em certo momento específico aguardar o recebimento da mensagem. Assim, o dispositivo fica esperando o recebimento de dados da estação base somente naquele período agendado [18].

Já a classe C é caracterizada por estar o tempo todo disponível para receber mensagens da estação base, possuindo uma única exceção para o recebimento das mensagens, que é o momento de envio dos dados do sensor para a estação base. Uma das desvantagens, ao ficar sempre disponível para receber mensagens das estações base, é o alto consumo de energia, tendo portanto seu tempo de vida útil consideravelmente reduzido. Devido a esses fatores os dispositivos da classe C não são muito utilizados para aplicações que possuem um acesso limitado a energia [5].

Cada classe pode ser utilizada para aplicações que se encaixam melhor a suas características. Algumas aplicações nas quais os dispositivos da classe A podem ser utilizados: rastreamento de animais, detecção de incêndio e detecção de terremotos. Dispositivos da classe B podem ser utilizados, por exemplo, para medidores de energia. E por último, os dispositivos da classe C podem ser utilizados para monitoramento de iluminação urbana, pois normalmente nesta situação, é possível uma alimentação que não dependa do uso de baterias. Esses são só alguns exemplos de várias possibilidades de aplicações existentes para cada uma das classes de dispositivos LoRa.

Para organizar melhor as redes que utilizam o protocolo LoRaWAN, a Lora Alliance classifica os tipos de redes em três grupos. São eles, público, privado e híbrido.

Uma rede é classificada privada quando uma organização ou indivíduo constrói sua própria rede LoRa. Essa rede pode ser para o uso particular ou para prestação de serviço para terceiros. Ter uma rede privada tem seus pontos positivos como: saber exatamente onde é preciso instalá-la, construir a rede da forma e quando precisa, não ter a necessidade de compartilhar a rede com outros, ter o controle do tráfego de dados e possuir uma flexibilidade alta pois pode ser alterada a qualquer momento.

Já a rede pública segue na direção contrária da rede privada. Uma rede é classi-

ficada como pública quando o usuário paga uma quantia a uma fornecedora do serviço LoRa para conectar seus sensores. Nesse caso o usuário não precisa instalar gateways ou servidores para ter a rede funcionando. Apesar de ser muito fácil e prático existem alguns pontos negativos, como a necessidade de que a fornecedora tenha cobertura para a área desejada.

E, por último, existem as redes híbridas. Uma rede é classificada como híbrida quando existe a possibilidade do usuário alternar entre a utilização de uma rede privada e uma rede pública quantas vezes for necessário[19].

As tecnologia, *AES encryption* e IEEE 802.15.4/2016 são utilizadas pela LoRaWAN para segurança e autenticação. Ela possui duas camadas de segurança em sua rede, diferente de outras tecnologias que implementam uma única camada de proteção, sendo elas: camada de proteção de rede e camada de aplicação. A camada de proteção de rede efetua a autenticação dos nós que se conectam à rede e a camada segurança da aplicação busca evitar que o operador da rede tenha acesso aos dados transportados [17].

A topologia utilizada pela LoRaWAN é conhecida como estrela de estrela (ou *star-of-star* em inglês), como pode ser observado na figura 7. Sua estrutura é formada por quatro principais elementos: nós (sensores), estação base (gateways), servidores de rede e servidores de aplicação.

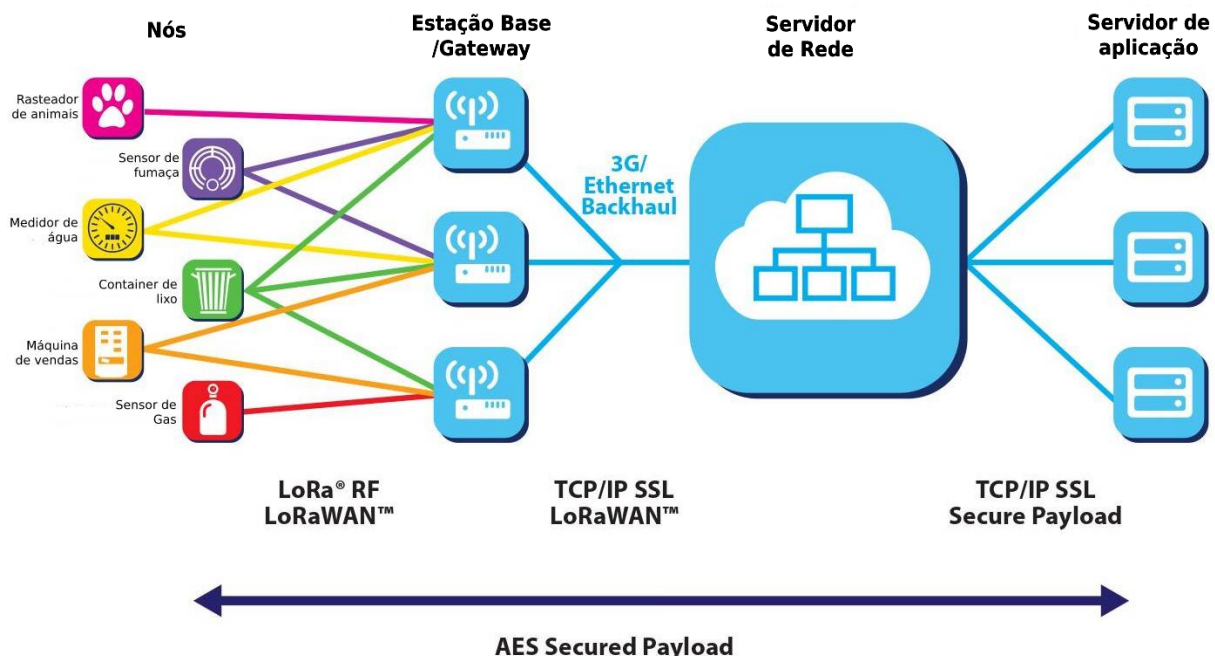


Figura 7 – Arquitetura LoRaWAN. Fonte: adaptado de [6]

1 - Nós LoRa: são a base de todo o sistema, pois são eles que vão captar os dados e transmitir para as estações base ou atuar na modificação do ambiente em que estão inseridos. Os nós podem ter vários tipos de sensores tais como, sensor de umidade,

temperatura, gás, fumaça entre outros.

2 - Gateway (estação base): são os elementos da rede LoRa que se comunicam com os nós LoRa. Cada um dos gateways se conecta com todos os nós LoRa disponíveis para ele. Ao receber os dados provenientes dos nós LoRa, o gateway repassa os dados para o servidor. A comunicação entre servidor e gateway pode ser feita de inúmeras formas, como Wi-Fi, rede celular, rede cabeada ou via satélite.

3 - Servidor de Rede: esse elemento da rede LoRa faz toda a administração dos pacotes de dados. Ele possui toda a inteligência e complexidade que foram retirados dos sensores e dos gateways. Portanto, ele filtra por mensagens repetidas, faz checagens de segurança, adapta a taxa de dados e constrói os pacotes a serem enviados para o servidor da aplicação [17].

4 - Servidor de aplicação: recebe os pacotes provenientes do servidor de rede e os organizam de forma que fique adequados para o usuário final [20].

A tecnologia LoRaWAN é uma das mais expressivas no mercado das LPWAN que utilizam frequências não licenciadas. Essa tecnologia vem sendo utilizada por empresas como Amazon, Semtech e Microsoft [21].

3.1.2 Sigfox

Sigfox é uma tecnologia proprietária pertencente à *SigFox Foundation*. A Sigfox foi fundada em 2010 por dois franceses, Ludovic Le Moan e Christophe Fourtet. A organização foi criada com o principal objetivo de conectar qualquer objeto do universo físico com o universo digital [22].

Além da tecnologia Sigfox, a organização traz consigo um modelo de negócio, pois ela não só desenvolve a tecnologia para os dispositivos mas também é uma provedora da rede LPWAN. Cada usuário que deseja conectar seus dispositivos a essa rede deve pagar uma assinatura para utilizá-la.

Ao contrário do sistema LoRa, que disponibiliza para o mercado a compra dos dispositivos e protocolos de comunicação, o sistema Sigfox se responsabiliza por todo o desenvolvimento e manutenção da rede que será utilizada para a troca dos dados. Cabe ao usuário só a coleta de dados e o envio para o gateway da Sigfox [23].

Outro ponto importante é que os dispositivos Sigfox são autônomos, alimentados por bateria e transmitem poucos bytes por dia, semanas ou meses, de maneira assíncrona. Não precisam de uma coordenação constante, todo o sistema foi desenvolvido pensando em aumentar a eficiência energética para que os dispositivos operem por muitos anos. Desse modo, os dispositivos Sigfox podem até ser enterrados e permanecer lá por anos sem necessidade de troca de bateria. Estima-se que uma única bateria tenha uma vida útil de cerca de 10 a 15 anos[24, 25].

O sistema Sigfox é comumente dividido em duas partes: a arquitetura da rede e a interface de rádio.

A arquitetura de rede da Sigfox é simples mas robusta. Por isso a rede foi implementada utilizando a topologia estrela, isso implica que um sensor não se comunica especificamente com um gateway mas sim com todos os gateways que estiverem ao seu alcance.

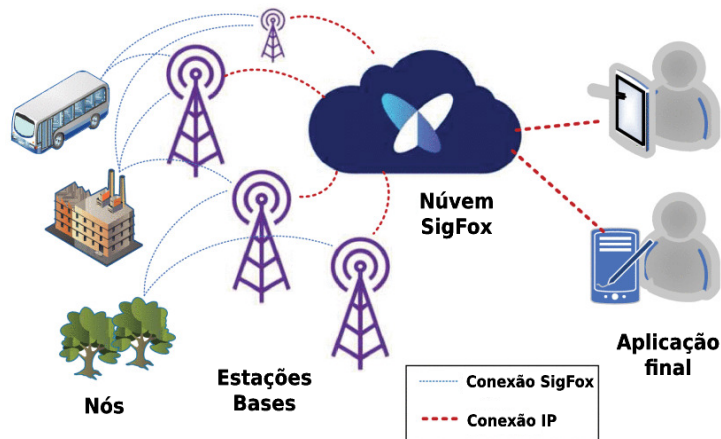


Figura 8 – Arquitetura da rede Sigfox[7]

A rede possui uma estrutura com quatro elementos: sensores ou dispositivos, gateway ou estação base, serviço de *cloud* da Sigfox e os dispositivos finais.

1 - Sensores ou dispositivos: esses dispositivos coletam os dados e os enviam para as estações base. Os dispositivos podem ficar fixos em um local ou podem estar em movimento, o deslocamento é possível justamente pelo fato de não estar conectado a nenhuma estação base específica. Sendo assim, a Sigfox oferece geolocalização, pois basta que três estações base recebam o sinal de um dispositivo para obter sua localização aproximada.

2 - Estação base ou gateway: as estações bases recebem as mensagens dos dispositivos e as encaminham através da internet para os serviços de *cloud* da Sigfox.

3 - Serviço de *cloud*: o serviço de *cloud* da Sigfox é dividido em duas partes, sendo elas entidade de registro e centro de serviço. A entidade de registro fica responsável por autorizar o acesso dos dispositivos a rede da sigfox, já o centro de serviço controla e administra as estações bases e os dispositivos [8]. O sistema Sigfox possui um único serviço de *cloud* para receber, administrar e enviar dados para o mundo todo permitindo, com isso, a comunicação de qualquer dispositivo em qualquer país que possua cobertura da rede Sigfox [24].

4 - Dispositivo final: Os dispositivos finais podem interagir com os dados obtidos e com os dispositivos através de uma interface web e várias APIs.

A interface de rádio da Sigfox é baseada na comunicação em *Ultra Narrow Band* (UNB). Essa característica permite o longo alcance e o pouco uso de energia para a comunicação dos dispositivos. Os canais da rede Sigfox são divididos em canais *bandwidth* de 100 Hz, sendo extremamente pequenos se comparados às demais tecnologias LPWAN [25, 8].

Além disso, as frequências utilizadas pelo sistema Sigfox são as bandas ISM semelhantes às do protocolo LoRa; as principais frequências utilizadas são 868 MHz na Europa e 902 MHz nos Estados Unidos. Como consequência, existe um aumento no alcance que o sinal atinge, com estimativas de cobertura entre 10 a 40 km [26].

A simplicidade do Sigfox também é caracterizada pela utilização do protocolo ALOHA em sua camada MAC para o acesso dos dispositivos à rede. Com o intuito de fornecer geolocalização mas sem aumentar a complexidade dos nós, foram implementados algoritmos que utilizam medições *Received Signal Strength Indicator* (RSSI); deste modo é feita uma estimativa utilizando o método de triangulação. A precisão alcançada foi de aproximadamente 500 metros[23, 26].

A Sigfox classifica as comunicações de duas maneiras: comunicação unidirecional, só *uplink*, ou bidirecional, *uplink* e *downlink*. Entretanto, o sistema é melhor otimizado para comunicações unidirecionais e, em função disso, os métodos para *uplink* e *downlink* são diferentes e a sincronização para o *downlink* é necessária.

As mensagens de *uplink* utilizam a modulação *differential binary phase shift keying* (DBPSK) e o pacote é dividido em 6 partes. Algumas partes do pacote têm seu tamanho fixo e outras são variáveis. A primeira parte é o preâmbulo, com tamanho de 19 bits, depois o cabeçalho com 29 bits, ID do dispositivo de 32 bits, payload de 0 a 96 bits, código de autenticação com 16 a 40 bits e, por último, uma checagem de sequência de 16 bits.

Já as mensagens de *downlink* utilizam a modulação *gaussian frequency shift keying* (GFSK) e alguns campos se alteram mas mantendo as 6 divisões, sendo elas: preâmbulo de 91 bits, cabeçalho de 13 bits, código de correção de erro de 32 bits, payload de 0 a 64 bits, autenticação de 16 bits e checagem de sequência de 8 bits [25].

O *payload* de ambos, *uplink* e *downlink*, é opcional, podendo conter informações ou não, pois existem casos em que a aplicação não necessita de dados a mais para o seu processamento. O simples recebimento de um pacote vazio já é informação suficiente mostrando que o sensor ainda se encontra ativo e funcional [22].

Para que um dispositivo receba uma mensagem de *downlink* é preciso que ele abra uma janela de recepção logo após o envio de dados. O atraso entre a transmissão e a recepção é definido pelo sistema Sigfox. Assim, a rede transmite os dados para o dispositivo nesta janela determinada. A rede também seleciona uma estação base específica que deve transmitir os dados para o dispositivo [24].

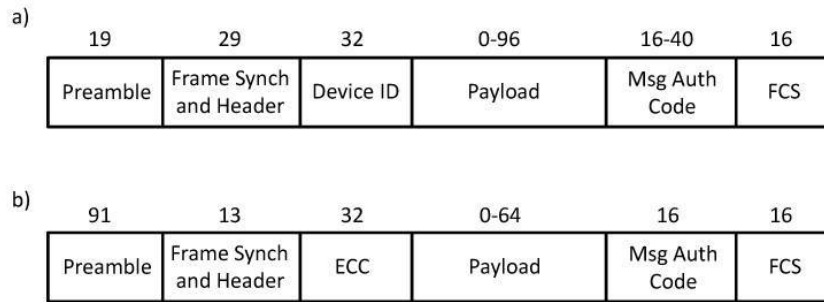


Figura 9 – Composição dos pacotes de dados de uplink(a) e downlink(b) [8]

Cada mensagem enviada pelos sensores ao gateway da Sigfox possui um payload que pode variar de 0 até 12 bytes. A mensagem com payload, portanto, é opcional, essa situação ocorre quando a própria mensagem enviada para o sensor já é a comunicação necessária pelo cliente [22].

O protocolo Sigfox foi pensado em simplificar ao máximo a complexidade das estruturas dos dispositivos ou sensores. Dessa forma, a maioria da complexidade foi transferida para o serviço de *cloud* da instituição. Com isso, existem algumas regras e limitações em relação à administração e à comunicação com os dispositivos [22].

Cada dispositivo tem um número máximo permitido de mensagens que pode enviar e receber diariamente e esse número é diferente para *uplink* e *downlink*. O limite diário para *uplink* é de 140 mensagens, já para o *downlink* é de 4 mensagens. Assim, pode-se facilmente notar que os sensores não recebem a confirmação da entrega bem sucedida dos pacotes de dados à estação base [26]. Entretanto, existem outros meios de aumentar as chances de que as estações bases recebam os pacotes de dados dos dispositivos. Um desses meios é o uso de redundância, com o envio da mesma mensagem várias vezes e, para aumentar ainda mais as chances de sucesso, essas mensagens são enviadas em canais diferentes, ou seja, um dispositivo Sigfox envia a mesma mensagem 3 vezes, em canais distintos. Dessa forma, a troca de mensagens entre o dispositivo e as estações base se torna mais robusta à perda de pacotes [27].

A segurança da rede Sigfox é feita através da autenticação de cada pacote através de um *ID* único para cada nó Sigfox e da tecnologia AES-128. Cada chave criptografada dos dispositivos é independente. Essas chaves são relacionadas com o *ID* do dispositivo mas são utilizadas unicamente quando a aplicação demanda. A encriptação dos dados da aplicação também é opcional, dependendo do quão críticos são os dados e da avaliação se vale a pena o custo adicional, se os dados não forem tão sensíveis [24].

Atualmente a tecnologia Sigfox tem vários usuários importantes com Atari, Airbus, BMW, Domino's Pizza, Engie, General Motors, Michelin, Nestlé entre outros [28].

3.1.3 IEEE 802.11ah

O padrão IEEE 802.11 é um dos padrões mais utilizados nas redes sem fio. Sua primeira versão comercial de sucesso, IEEE 802.11b, foi introduzida em 1999 com um *data rate* 11 Mb/s (bastante alta para a época). Desde então, novas emendas ao padrão vêm sendo lançadas, com várias modificações e melhorias para atender à crescente demanda por aumento na velocidade de comunicação e pelo atendimento a um maior número de usuários.

Embora a versão IEEE 802.11ax (também conhecida como Wi-Fi 6) seja a mais recente, o IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5) ainda é responsável pela padronização da maioria das redes Wi-Fi atualmente. O padrão ac foi lançado em 2013 com suporte para 6,9 Gb/s, 5 GHz de banda e canais com largura máxima de 80 MHz e 160 MHz.

Entretanto, não havia um padrão que suportasse a implantação de sistemas IoT, pois o padrão ac tem como objetivo suportar download e upload em altas velocidades e *data rate* altos para poucos dispositivos. Já aplicações de IoT, como visto, demandam o suporte para um grande número de dispositivos, mas que transmitem a uma taxa de dados (*data rate*) mais baixa que os dispositivos Wi-Fi padrão.

Por esta razão, em 2010 foi formalmente formado pelo IEEE 802.11, *Working Group* o *Task Group* 802.11ah, com o objetivo de definir um novo padrão que operasse em frequências abaixo de 1 GHz. O grupo levou em consideração alguns cenários de uso dessa tecnologia como sensores e medidores e a extensão do Wi-Fi [10].

O padrão IEEE 802.11ah, também conhecido como Wi-Fi HaLow, busca um alcance médio e uma alta taxa de dados se comparado às outras LWPANs. Desse modo, o Wi-Fi HaLow pretende ser uma tecnologia intermediária entre as WPANs/WLANs e as LPWANs. Após seis anos da sua criação, em 2016, o protocolo foi oficialmente lançado.

Ao decorrer do processo de desenvolvimento foram desenvolvidos diversos novos mecanismos, como *Restricted Access Window* (RAW), *Traffic Information Map* (TIM), *segmentation* e *Target Wake Time* (TWT). Todos esses mecanismos visam melhorar a eficiência energética e diante de um cenário com alta densidade de dispositivos [11].

O IEEE 802.11ah define protocolos para camada física e para camada de protocolo MAC. Diferentemente dos outros padrões IEEE 802.11 (a, b, g, n, ac e ax) que operam em 2.4 GHz e 5 GHz, este novo padrão opera em frequências sub 1 GHz não licenciadas ISM. Esse protocolo possui, portanto, a habilidade de efetuar transmissões de longo alcance, conseguindo ainda que cada ponto de acesso suporte até 8192 nós/dispositivos [29].

Essas características tornam esse protocolo atrativo para aplicações IoT que necessitam de uma ampla cobertura como aplicações baseadas em sensores, *smart meters* ou automação residencial.[30]

Para se obter um maior alcance, de no mínimo 1 Km, foram tomadas algumas decisões de projeto. Entre elas estão a utilização de baixa frequência, diminuição da banda dos canais de transmissão e um robusto esquema de redundância.

O IEEE 802.11ah define uma *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* OFDM com operação em frequências sub 1 GHz, que é baseada na camada física do protocolo 802.11 ac/n mas com um *down clock* de dez vezes. Devido à utilização de frequências sub 1 GHz, ocorre um aumento da relação sinal-ruído (*signal-to-noise ratio* - SNR) nos receptores.

As frequências utilizadas pelo padrão IEEE 802.11ah são as faixas de 863 a 868 MHz na Europa, de 902 a 928 MHz na América do Norte e de 755 a 787 MHz na China. Outra característica é a sua alta taxa de dados, 150 kb/s a 78 Mb/s, se comparado com outras tecnologias LPWAN [11].

A mesma redução em 10 vezes ocorre nas larguras de bandas se comparadas com o padrão IEEE 802.11n por exemplo. Os receptores do padrão ah possuem suporte para larguras de banda de 1 MHz, 2 MHz, 4 MHz, 8 MHz e 16 MHz, sendo que as largura de banda 1 MHz e 2 MHz são obrigatórias. Além disso, o padrão ah utiliza um esquema de repetição de código com uma taxa de codificação de 1/2 nos canais de 1 MHz [10, 31].

Assim como acontece na camada física, na camada MAC grande parte dos protocolos IEEE 802.11 foram reutilizados também. Entretanto, algumas alterações tiveram que ser feitas para atender aos objetivos e às demandas das aplicações IoT. As mudanças dos protocolos padrões para a construção do protocolo IEEE 802.11ah visam aumento do número de estações bases e uma maior eficiência energética para situações *indoor* e *outdoor* [32]..

Um desses novos mecanismos introduzidos ao protocolo ah é a *Restricted Access Window* (RAW), que consiste em uma janela de tempo, na qual somente um grupo de nós específicos pode se comunicar com o ponto de acesso (AP). Esse intervalo de tempo é dividido em *slots*, sendo que cada *slot* é geralmente dedicado a uma estação base, entretanto em algumas situações pode ser dedicado a mais de uma estação base.

Esse mecanismo busca mitigar o problema de interferência entre nós conhecido como *hidden node*, no qual dois nós transmitem dados ao mesmo tempo e o ponto de acesso não consegue ter sucesso na recepção das transmissões. Dessa maneira, ocorre um maior consumo de energia por parte das nós, pois precisam ficar mais tempo ativos para transmitir os dados.

Outro mecanismo que contribui para a economia de energia no protocolo ah é o chamado *Traffic Identification Map* (TIM). Esse mecanismo permite ao ponto de acesso monitorar qual nó base possui informações a serem enviadas. Esse mecanismo ocorre por meio de um *buffer* de dados; quando o *buffer* separado para algum nó possui dados, o

TIM é ativado e altera o bit para 1, indicando que um certo nó base possui dados a serem enviados.

Quando um nó acorda, ele se comunica com o ponto de acesso e verifica se existe alguma informação a ser transmitida. Essa verificação demora algum tempo, pois o ponto de acesso poder estar enviando ou recebendo outros dados. Para tentar reduzir essa demora na comunicação entre o ponto de acesso e os nós foi introduzido o conceito denominado *Target Wake-up Time* (TWT), que busca sincronizar o tempo de hibernação dos nós com a operação do ponto de acesso. Com isso, o ponto de acesso sabe quando o nó irá acordar e pode se antecipar preparando os dados a serem transmitidos [10].

Assim, o protocolo procura atingir uma vida útil de 5 a 10 anos sem manutenção ou troca de baterias. E, para aumentar a vida útil dos nós, o protocolo utiliza algoritmos que ajudam a reduzir o gasto de energia [32].

3.2 Tecnologias LPWAN que utilizam frequências licenciadas

Esta seção tem como foco o estudo das tecnologias *Long Term Evolution for machine* (LTE-M) e *Narrowband IoT* (NB-IoT), que utilizam frequências licenciadas. Ambas foram desenvolvidas pela 3rd Generation Partnership Project (3GPP), organização responsável pelo desenvolvimento de padrões para a rede de comunicação celular.

A 3GPP utiliza o formato de *Releases* para divulgar seus novos sistemas ao público. As *Releases* são documentos descritivos, que oferecem as informações sobre cada parte dos novos padrões para que os desenvolvedores e empresas tenham conhecimento suficiente para desenvolver suas aplicações utilizando as tecnologias 3GPP.

As duas tecnologias, LTE-M e NB-IoT, foram definidas primeiramente na *Release* 13 e, nas duas *Releases* posteriores, 14 e 15, foram acrescentadas mais funcionalidades e configurações buscando a otimização e o melhoramento das tecnologias [5].

3.2.1 LTE-M

A tecnologia LTE-M foi criada para atender às necessidades do mercado IoT, mas diferentemente das tecnologias estudadas até agora, ela possui uma taxa de dados maior e a possibilidade de compartilhar mensagens de voz e streaming de vídeo [5].

Ao invés de desenvolver uma estrutura de rede totalmente nova a 3GPP decidiu utilizar a estrutura já existente da tecnologia LTE (do inglês *Long Term Evolution* e que, no Brasil, corresponde à tecnologia de celular 4G). Essa decisão se torna um atrativo para a utilização da tecnologia LTE-M, pois não é preciso instalar novas estações bases ou mesmo a aquisição de uma nova frequência licenciada. A única alteração a ser feita é uma atualização do software das estações bases para suportarem a nova tecnologia.

Devido ao desenvolvimento da tecnologia específica para a área de IoT, o LTE-M é focado na comunicação entre máquinas, que é encontrado na literatura como *machine to machine* (M2M) no inglês. A comunicação M2M não ocorre da mesma maneira que a comunicação entre usuários humanos. Assim, foram feitas diversas adaptações nos padrões de comunicação criados pela 3GPP [2].

A principal diferença é que as máquinas são projetadas para transmitirem menos dados do que os usuários humanos quando se utiliza a internet. Por isso, foi definida uma taxa de dados, *data rate* de, no máximo 1 Mbps, que é considerada uma taxa alta para uma tecnologia LPWAN. Outra característica é a largura de banda, que varia de 1,4 MHz a 5 MHz (uma diminuição no valor máximo da largura de banda do LTE, que é de 20 MHz).

A tecnologia LTE-M possui dois modos de operação. O modo de operação A é padrão para todos os dispositivos LTE-M e tem seu foco em atingir uma cobertura moderada. O modo B, por sua vez, tem o objetivo de atingir uma cobertura maior e mais profunda.

Outro recurso disponível da tecnologia LTE-M é a mobilidade. A mobilidade é a possibilidade dos sensores transitarem entre estações bases sem perder a conexão. Ou seja, os sensores não são obrigados a sempre estarem conectados com a mesma estação base durante a sua operação. Esse recurso está disponível para os dispositivos LTE-M, podendo ser parcial ou ilimitado, de acordo com a preferência do usuário.

Com a necessidade de obter um dispositivo que consuma pouca energia, a LTE-M procura otimizar ao máximo o *hardware* através de algoritmos que demandam menos da transmissão e da sincronização com as estações bases. Alguns desses algoritmos implementados são o *extended discontinuous reception* (eDRx) e o *power save mode* (PSM).

O eDRx é uma melhoria no algoritmo DRx que já existia no sistema LTE. Esse mecanismo permite que o tempo entre o recebimento de mensagens seja aumentado para 10,24 segundos e o monitoramento e o rastreamento por parte da estação base tenha um intervalo maior, de 44 minutos até 3 horas. Esse monitoramento e rastreamento acontece pois a LTE-M, como já mencionado, utiliza frequências licenciadas em toda a infraestrutura da tecnologia LTE, por isso os sensores precisam estar em constante contato com as estações bases para sincronização.

Já o modo PSM permite que o dispositivo fique em *stand-by* entre transferências de dados e, deste modo, o sensor pode aumentar o tempo de hibernação sem precisar entrar em contato com a estação base para efetuar a sincronização de rotina.

A grande diferença do sistema LTE-M é o suporte ao envio de voz; essa opção ocorre pois o *hardware* do sensor LTE-M não é tão simplificado quanto o dos sensores do sistema NB-IoT, que não suportam essa opção. O envio de mensagens de voz é suportado

em modo half-duplex [12].

O LTE-M consegue atender às necessidades de aplicações que precisam de acompanhamento em tempo real e também suporta aplicações que não têm essa necessidade. Ou seja, a tecnologia LTE-M suporta aplicações tanto de alta quanto de baixa latências [2].

Essas foram as características definidas na *Release 13*, já na *Release 14* ocorreram melhorias em algumas partes da tecnologia LTE-M. Primeiramente a taxa de transferência de dados foi aumentada para 4 Mbps no *downlink* e 7 Mbps no *uplink*.

Devido à necessidade de algumas aplicações IoT, principalmente as de rastreamento, foi introduzido um método que possibilita a geolocalização dos nós. O protocolo introduzido é chamado *Observed Time Difference Of Arrival (OTDOA)*, que consiste em comparar o tempo de chegada dos pacotes em algumas estações bases e, de acordo com a diferença desse com o tempo de chegada, uma estimativa de localização pode ser traçada. Outro aspecto alterado foi a transmissão de voz, que recebeu mais parâmetros para sua configuração, com otimizações para melhorar sua operação.

Já na *Release 15* foram feitas melhorias para aumentar a eficiência energética dos nós LTE-M. Uma dessas melhorias foi a implementação do método *Wake-up signal (WUS)*; este método permite que a estação base envie sinais para um nó específico com o objetivo de realizar as operações padrão e, no restante do tempo, o dispositivo fica "dormindo".

Desse modo, o dispositivo não precisa ficar esperando as mensagens de sincronização, pois a estação base transmite um sinal para informar que é a hora de serem feitas as devidas operações. Foram ainda implementadas melhorias no sistema de aquisição, *system acquisition time*, para diminuir o tempo de latência do sistema [12].

O acesso da rede LTE-M pode ser feito através de vários provedores de rede ao redor do mundo, alguns deles são ATT, Orange, T-mobile, Telstra entre outros [33].

3.2.2 NB-IoT

Pelo fato das tecnologias LTE-M e NB-IoT pertencerem à 3GPP, alguns mecanismos são compartilhados pelos dois sistemas. Dessa forma, para evitar a repetição de textos e definições, alguns algoritmos serão apenas mencionados, pois já foram descritos na seção referente à tecnologia LTE-M.

O protocolo *Narrowband Internet of Things* foi lançado em 2016 pela 3GPP, através da *Release 13*, como mais uma opção para as redes LPWANs. Além disso, esse novo protocolo utiliza partes do espectro de frequências da *long term evolution (LTE)* para enviar e receber os pacotes de dados. Assim, essa tecnologia tem a capacidade de coexistir sem interferir com as outras tecnologias de comunicação de aparelhos celulares e com a

LTE.

Da mesma forma que o LTE-M, a NB-IoT tem a vantagem de não precisar construir uma nova infraestrutura para que a rede funcione, pois ela utiliza toda a infraestrutura já existente da rede LTE, as estações base apenas precisam ter seu software atualizado para aceitar os modos de operação da NB-IoT.

Cada estação base NB-IoT pode se conectar com pelo menos 50 mil dispositivos, mas para que a conexão ocorra, é preciso um mínimo de 180 kHz de banda. Além disso, o protocolo NB-IoT foi desenvolvido para otimizar e simplificar as funcionalidades existentes na tecnologia LTE [2].

A rede NB-IoT suporta *half duplex Frequency Division Duplex* (FDD) atingindo 60 kbs para *uplink* e 30 kbs para *downlink* e o tamanho máximo do *payload* é de 1600 bytes e assim como o nome da tecnologia, o NB-IoT utiliza uma largura de banda estreita de 180 KHz e 200 KHz [25].

O NB-IoT possui três modos de operação: *stand-alone*, *guard-band* e *in-band* [1]. Os três modos de operação utilizam frequências licenciadas. Por isso, sua operação nessas frequências não possui limitações de utilização com relação aos ciclos de trabalho, podendo efetuar seus ciclos de trabalho da forma que achar melhor [25].

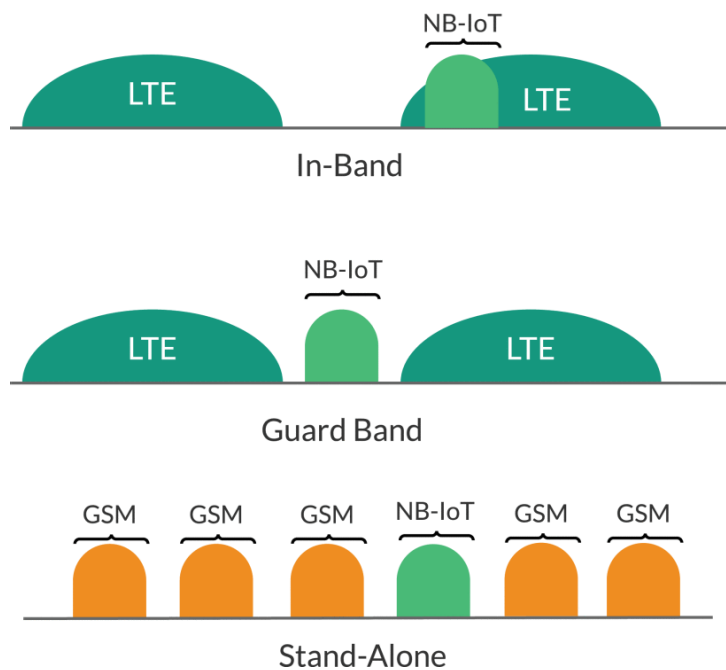


Figura 10 – Modos de operação NB-IoT [5]

Como se observa na figura 10, quando o dispositivo está em modo *stand-alone* ele utiliza as frequências do *Global System for Mobile communications* (GSM) para operar. Esse é o modo de operação no qual a NB-IoT utiliza o espectro de frequência dedicado à sua operação e não algum bloco de frequência do LTE.

Quando o dispositivo NB-IoT está no modo *guard-band*, ele utiliza blocos de recursos não usados pela rede LTE. Dessa forma, como as largura de bandas utilizadas pelo NB-IoT são muito menores do que as larguras de bandas da tecnologia LTE, é possível posicionar um canal de transmissão NB-IoT entre dois blocos utilizados por outra tecnologia LTE [1, 25].

E, por último, quando o dispositivo NB-IoT está no modo *in-band*, ele compartilha do mesmo bloco de operação do LTE, utilizando assim uma parte da mesma banda de frequência de outros recursos LTE.

Com o objetivo de obter um menor consumo de energia, os dispositivos NB-IoT utilizam os algoritmos PSM e eDRx, de modo que a vida útil estimada seja de aproximadamente 10 anos, utilizando uma única bateria. [25].

A arquitetura de rede da tecnologia NB-IoT possui alguns elementos principais, sendo eles: os terminais, as estações bases, o *core* da rede, a plataforma de *cloud* e o servidor de aplicação.

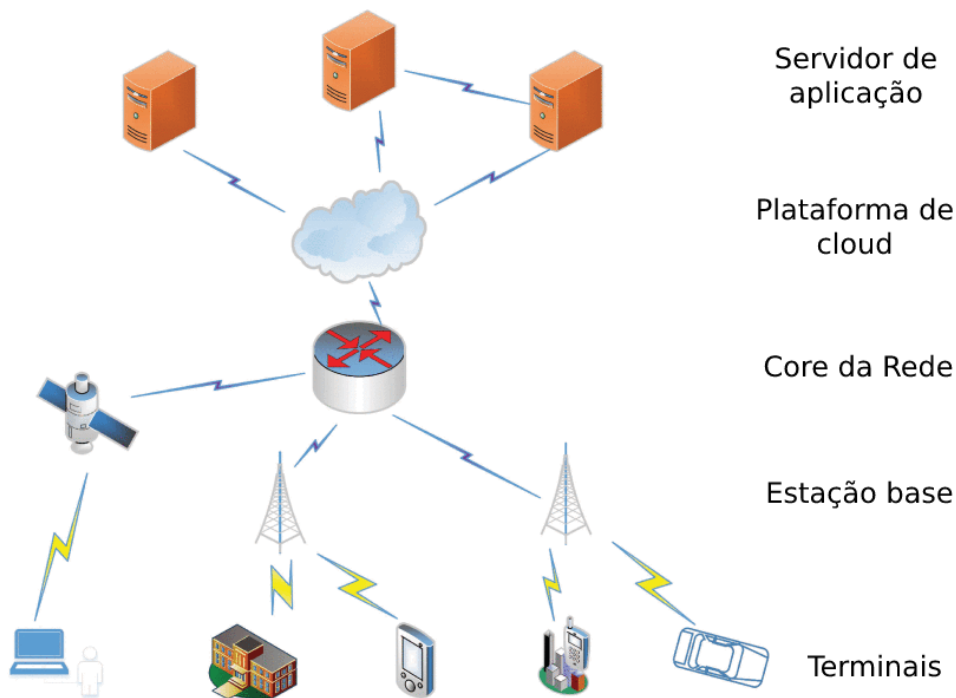


Figura 11 – Arquitetura NB-IoT. Fonte: adaptado de [9]

Os terminais são dispositivos que possuem o cartão *SIM* da operadora da rede de comunicação utilizada pela NB-IoT. Esses dispositivos são chamados de *User Equipment* (UE) e, tradicionalmente, eram dispositivos celulares utilizados pelos assinantes da LTE para poder acessar a rede, mas no caso da NB-IoT os UEs podem ser dispositivos que possuem dispositivos de comunicação M2M embarcados [9, 34].

As estações bases são estações que vão se comunicar diretamente com os terminais/nós e encaminhar os dados para os demais elementos da rede LTE. Como mencionado, a NB-IoT utiliza a mesma infraestrutura da rede LTE, dessa forma as estações bases já foram instaladas pelo operador de telecomunicações da rede NB-IoT e, após a atualização, podem suportar os três modos de operação. Na literatura é utilizado o termo *eNodesB* para se referenciar às estações bases.

O *core* da rede recebe todas as transmissões das estações bases e encaminha para o serviço de *cloud* da LTE, sendo o meio no qual as estações bases têm de se comunicar com a plataforma de *cloud*.

Plataforma de *cloud* é onde todos os dados provenientes dos terminais são reunidos e processados de acordo com a exigência das aplicações. Após o processamento os dados são enviados para o centro de armazenamento.

Servidor de aplicação é onde o usuário final pode ter acesso a todos os dados recolhidos pelos nós e controlar os terminais de acordo com os dados avaliados [9].

Essas foram as definições feitas no lançamento do padrão NB-IoT na *Release* 13, e assim como na tecnologia LTE-M, nas demais *Releases* (14 e 15) foram feitas alterações e aprimoramentos como, por exemplo, a introdução dos protocolos de localização através do OTDOA, na *Release* e, na *Release* 15, a implementação do protocolo WUS e alterações para melhorar o tempo de aquisição do sistema.

Já existem várias operadoras de rede que disponibilizam o acesso a rede NB-IoT como TIM, T-mobile, Velcom, Orange entre outras operadoras [33].

3.3 Análise comparativa

Como visto no decorrer deste trabalho, as tecnologias LPWANs não buscam ser a única opção para todas as aplicações existentes. Mesmo porque é quase impossível uma tecnologia LPWAN atender a todas as necessidades da diversas aplicações existente no mercado de IoT.

Deste modo, após o estudo das tecnologias LoRa, Sigfox, IEEE 802.11ah, LTE-M e NB-Iot é possível elencar algumas aplicações que possivelmente se encaixam melhor mediante as características de cada LPWAN.

Uma aplicação que vem se tornando cada vez mais popular são os *smart meters*. A comunicação dos *smart meters* pode ser classificada em quatro grupos, sendo elas: *Automated Meter Reading* (AMR), *Time of Use* (TOU), *Outage Monitoring* (OM) e *Quasi-Real-Time Monitoring* (QRM).

A AMR é a tradicional função de leitura e envio dos dados para as respectivas instituições; a OM é o envio de alerta na ocorrência de alguma interrupção ou falha no

sistema; o TOU é quando, de acordo com os comandos da central, o preço cobrado é alterado e o QRM é a comunicação que envia uma variedade de informações a cada cinco minutos [5].

A aplicação de *smart meter* não precisa de suporte a mobilidade, pois os medidores são, na maioria das vezes, estáticos. Dessa forma, todas as tecnologias avaliadas neste trabalho se encaixam em algum dos tipos de comunicação.

Sobre o uso dos sistemas NB-IoT e LTE-M, apesar de terem as funções necessárias para suportar as comunicações, o uso pode se tornar inviável devido ao maior custo dos dispositivos. Já os dispositivos Sigfox não suportam os modos de comunicação que precisam enviar uma quantidade maior dados, como o TOU e o QRM, mas é compatível com aplicações que precisam mandar informações algumas poucas vezes por dia.

A tecnologia 802.11ah também é uma candidata para a utilização em *smart meter*, mas por se tratar de uma rede de médio alcance, é mais indicada para aplicações *indoor*. E, por último, a tecnologia LoRaWAN possui uma taxa de dados suficiente para as comunicações mais exigentes como TOU e OM, possui a possibilidade de o usuário implantar sua própria rede e possui um bom suporte à grande quantidade de nós por estação base [5, 32].

Outra aplicação que se beneficia grandemente das tecnologias LPWANs é o agronegócio. Essas aplicações são muito abrangentes, pois podem conter várias outras aplicações relacionadas como *smart meter*, rastreamento de animais, gerenciamento de logística, monitoramento do meio ambiente e outros.

Neste tipo de aplicação, além de monitorar um evento, a tecnologia IoT pode ser utilizada para modificar os eventos observados, que é o caso de uma estufa, por exemplo. Ao monitorar um evento, como a elevação da temperatura, o proprietário precisa ter a possibilidade de refrigerar o ambiente [5].

A tecnologia mais recomendada para aplicações do agronegócio é a LoRaWAN por alguns motivos: eficiência energética, alcance, mobilidade e localização. Entretanto, em algumas situações, em uma grande área com cobertura da rede celular, a tecnologia NB-IoT poderia ser utilizada. Por outro lado, uma aplicação com baixa demanda de dados, em termos de volume e velocidade, poderia se beneficiar da boa penetração em obstáculos da tecnologia Sigfox em uma aplicação *indoor*, por exemplo.

O transporte urbano representa mais uma possibilidade de aplicação para as redes de longo alcance e baixa potência. As aplicações de transporte podem ser classificadas como de alto risco (quando existem vidas envolvidas) ou de baixo risco, quando não representam perigo, caso haja uma falha.

Deste modo, as tecnologias LoRaWAN e Sigfox não são recomendadas para aplicações de alto risco, devido à possibilidade de atrasos na comunicação e não serem adaptadas

à baixa latência. Para aplicações de baixo risco a tecnologia NB-IoT pode ser indicada, quando a taxa de dados ou a confiabilidade das mensagens são prioridades. Caso a aplicação não priorize a taxa e a confiabilidade dos dados, a tecnologia LoRaWAN pode ser utilizada [5].

De maneira geral, a tecnologia LTE-M seria a mais indicada para as situações de alto risco, pois foi desenvolvida para suportar baixa latência, possui suporte para aplicações que precisam de acompanhamento em tempo real e porque em grandes centros a cobertura de rede celular é disponível em quase todas as regiões.

Há ainda inúmeras aplicações possíveis de serem implementadas com as LPWANs, como monitoramento de animais selvagens, aplicações de cuidados médicos, logística e até mesmo aplicações militares [5].

Para finalizar, é apresentado na tabela 1 um resumo das características das tecnologias LPWANs estudadas anteriormente nesse capítulo.

Tabela 1 – Principais características das tecnologias LPWANs. Fonte: [1, 10, 11, 12]

	LoRaWAN	Sigfox	IEEE 802.11ah	LTE-M	NB-IoT
Modulação	CSS	BPSK	BPSK e QPSK	QPSK	QPSK
Frequência	Não licenciada	Não licenciada	Não licenciada	Licenciada	Licenciada
Largura de banda	125, 250, 500 kHz	100 Hz	1 até 16MHz	1,4 até 5MHz	180kHz, 200kHz
Máx. taxa de dados	50 kbps	100bps(UL), 600(DL)	150Kbs até 78Mbps	1Mbs	200kbps
Bidirecionalidade	Sim/half-duplex	Limitado/half-duplex	Sim/half-duplex	sim/half-duplex	sim/half-duplex
MAC	ALOHA	ALOHA	OFDM	OFDM	OFDM
Mensagens por dia	Ilimitado	140(up), 4(down)	Ilimitado	Ilimitado	Ilimitado
Tamanho do payload	243 bytes	12 bytes(up), 8 bytes(down)	Ilimitado	871bytes	1600bytes
Alcance	5-20 km	10-40 km	1 km	1-10 km	1-10 km
Autenticação e criptografia	Sim(AES 128)	Sim(AES 128)	Sim(AES 128)	sim(LTE encriptação)	sim(LTE encriptação)
ADR	Sim	Não	Não	Não	Não
Localização	Sim(TDOA)	Sim(RSSI)	Não	Sim(OTDOA)	Não
Rede privada	Sim	Não	Sim	Não	Não
Reguladora	LoRa-Alliance	Sigfox	IEEE	3GPP	3GPP

4 ESTUDO DE CASO

Uma das características da rede LoraWAN é a possibilidade de se construir uma rede privada, sem depender de uma infraestrutura pública. É importante ressaltar que diversos parâmetros da tecnologia de modulação LoRa, como potência de transmissão (TP – *Transmission Power*), frequência da portadora (CF – *Carrier Frequency*), fator de espalhamento (SF – *Spread Factor*), largura de banda (BW – *Band Width*) e a taxa de codificação (CR – *Coding Rate*) afetam diretamente o desempenho da transmissão em termos de *throughput* máximo, alcance da comunicação e consumo de energia. Assim, serão apresentados neste capítulo, o impacto da seleção de alguns destes parâmetros, por meio de vários cenários simulados de uma comunicação Lora.

Para realizar as simulações foram testados inicialmente alguns simuladores disponíveis e open-source como: NS-3, Omnet++, LoraFREE e LoRaSim. A utilização do simulador NS-3 foi descartada devido ao tempo de processamento que se mostrou muito longo, o simulador Omnet++ também não foi utilizado devido às dificuldades de instalação do ambiente e execução das simulações; o simulador LoraFREE não foi utilizado pois utiliza um modelo próprio de sincronização de dados e de acesso ao meio, específico para aplicações que não possuam muitas restrições quanto ao atraso no envio dos dados.

O simulador utilizado foi o LoraSim [35]. Um dos objetivos deste simulador é avaliar a escalabilidade da rede e, para tal, a distância máxima é definida de modo que todos os nós (distribuídos aleatoriamente em uma área circular ao redor do nó *gateway*) sejam alocados dentro deste limite.

A perda de percurso (*path loss*), que também tem influência direta no cálculo da distância máxima pode ser calculada utilizando-se vários modelos de propagação. No LoraSim, os autores utilizam o modelo log-distância, cuja dependência da distância d entre o nó transmissor e o nó receptor é descrita como:

$$L_{pl}(d) = \overline{L_{pl}}(d_0) + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right), \quad (4.1)$$

na qual, $L_{pl}(d)$ é a perda de percurso em dB, $\overline{L_{pl}}(d_0)$ é a perda média de percurso na distância de referência d_0 e γ é um fator de perda, cujo valor depende do tipo de ambiente. No simulador, os autores utilizaram $L_{pl}(d_0) = 127,41$ dB, para uma distância $d_0 = 40$ metros e $\gamma = 2,08$. Estes valores foram obtidos empiricamente, considerando-se uma área urbana [35].

A sensibilidade do rádio receptor depende, entre outros fatores, da largura de banda (BW) e do fator de espalhamento e uma das métricas é o RSSI (*Received Signal*

Strength Indicator), dado em dBm. Embora o programa utilize valores de sensibilidade do receptor obtidos experimentalmente para diferentes larguras de banda e fatores de espalhamento, optou-se por utilizar, nas simulações realizadas neste trabalho, os valores de RSSI definidos pela Semtech [36], conforme tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Valores de RSSI em função do SF e de BW

Spread Factor	RSSI em 125 kHz	RSSI em 250 kHz	RSSI em 500 kHz
SF7	-123 dBm	-120 dBm	-116 dBm
SF8	-126 dBm	-123 dBm	-119 dBm
SF9	-129 dBm	-125 dBm	-122 dBm
SF10	-131 dBm	-128 dBm	-125 dBm
SF11	-133 dBm	-130 dBm	-128 dBm
SF12	-136 dBm	-133 dBm	-130 dBm

O simulador define, como resultado da avaliação das simulações, duas métricas. A primeira é a DER (*Data Extraction Rate*) ou Taxa de Extração de Dados que, por sua vez, é calculada como o número de mensagens recebidas dividido pelo número de mensagens enviadas. Quanto mais próximo de 1,0 for o valor do DER, mais efetiva é a comunicação da rede LoRa. A segunda métrica é o NEC (*Network Energy Consumption*) ou Consumo de Energia da Rede, que é calculada como a energia gasta pela rede para extrair com sucesso uma mensagem transmitida. Obviamente, quanto menor for o valor do NEC, mais eficiente será a rede em termos de economia de energia. Vale destacar que ambas as métricas capturam o comportamento da rede com um todo e não do nós individualmente [35].

O sucesso da transmissão de um pacote também depende da ocorrência ou não de colisões entre pacotes. O simulador LoraSim modela o comportamento das colisões por meio da análise da superposição de transmissão de pacotes no receptor. Para analisar essa superposição, são utilizados diversos parâmetros, como o intervalo de recepção, a frequência da portadora, o fator de espalhamento (fatores de espalhamentos distintos são considerados ortogonais) e o efeito de captura, que depende da diferença potência entre os sinais recebidos simultaneamente.

O simulador possui alguns experimentos já programados, com parâmetros pré-definidos. Em todos eles o usuário deve fornecer, como parâmetros de entrada: o número de nós, o intervalo médio de transmissão de pacotes (em milissegundos), o número do experimento, o tempo total de simulação (em milissegundos) e a verificação do tipo de colisão (verificação simplificada, que considera a ocorrência de uma colisão quando dois pacotes chegam ao mesmo tempo, na mesma frequência e com o mesmo SF; e verificação total, que leva em conta o efeito de captura). O experimento utilizado como base para as simulações usa uma configuração padrão de redes LoRaWAN (*Spread Factor* SF = 12, largura de banda BW = 125 kHz e *coding rate* CR = 4/5).

Tabela 3 – Distância máxima do nó em relação ao gateway em função do SF

Spread Factor	Distância máxima
SF7	63,4 metros
SF8	73,3 metros
SF9	84,6 metros
SF10	93,2 metros
SF11	102,6 metros
SF12	118,5 metros

É importante ressaltar que alguns valores de parâmetros no programa foram definidos para atender restrições regulatórias da união europeia como, por exemplo, potência de transmissão de 14 dBm, e *duty cycle* máximo de 0,1% ou 1,0%, dependendo da banda de frequência usada (embora fique a cargo do usuário calcular esse valor, já que o *duty cycle* tem relação com o intervalo médio de transmissão de pacotes, que é um parâmetro de entrada do programa definido pelo usuário).

4.1 Cenários analisados

Com o intuito de se verificar o impacto da seleção dos parâmetros na escalabilidade de uma rede LoRa utilizando o simulador LoraSim, foram definidos alguns cenários de teste.

Primeiramente, foram calculadas as distâncias máximas que um nó pode ser posicionado a partir do gateway, para valores de SF utilizados nos cenários simulados (a partir da fórmula 4.1, com os valores dos parâmetros $L_{pl}(d_0)$, d_0 e γ definidos anteriormente). Essas distâncias podem ser vistas na Tabela 3 e consideram, para todos os casos, uma largura de banda 125 kHz.

Nos Cenários 1 e 2 o Experimento 4 listado anteriormente foi usado como base e adaptado para poder simular além do SF12 os SFs de 7 a 11.

4.2 Cenário 1

Neste cenário, para cada SF, foram geradas curvas de DER em função do número de nós. O programa distribui aleatoriamente os nós, dentro do alcance máximo da transmissão, para determinado SF. Como a distribuição dos nós é aleatória, a cada vez que o programa é rodado, os valores gerados do DER serão diferentes. Em função disso, para cada SF, foram feitas 10 rodadas de simulação e plotados os valores médios obtidos. Foi considerado um tamanho total de pacote de 20 bytes (nestes 20 bytes estão incluídos, além do payload, o cabeçalho e os bits de preâmbulo), que gera um tempo no ar (ToA - *Time on Air*) máximo de 1318,9 milissegundos para (este é o valor calculado para o SF12, que possui o maior ToA entre os vários SFs sendo, portanto, o mais restritivo).

Dessa forma, o intervalo de envio entre as mensagens de 22 minutos, para um período de simulação de 7 dias. Este é o valor mínimo que atende ao *duty cycle* de 0,1%. As curvas são apresentadas na 12.

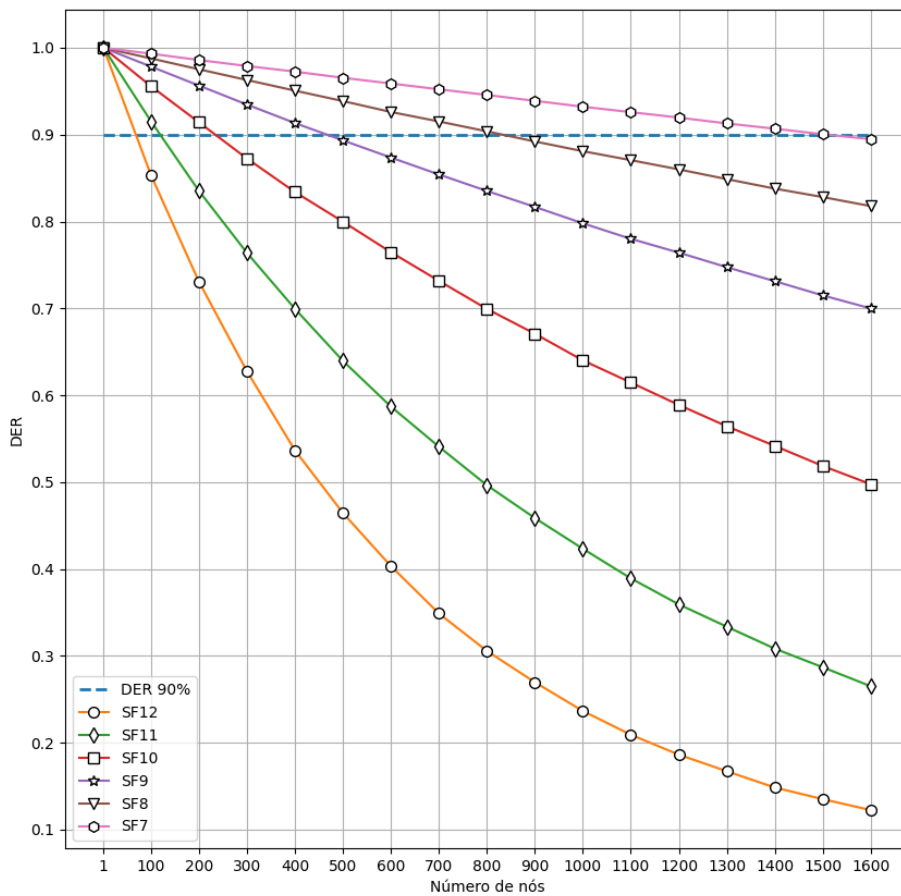


Figura 12 – Cenário 1: DER em função do nº de nós com restrição de *duty cycle* de 0,1%

Observa-se nas curvas da Figura 12 que o aumento no fator de Spread Factor provoca um decréscimo exponencial na taxa de extração de dados (DER). Considerando, por exemplo, uma aplicação que requeira uma DER de pelo menos 90%, o número máximo aproximado de nós para cada SF é dado pela Tabela 4. Obviamente, o ganho na quantidade de nós com o uso de valores menores de SF é obtido às custas da redução no alcance máximo dos nós da rede, como mostrado na Tabela 3. Portanto, o melhor ajuste do Spread Factor depende inteiramente dos requisitos da aplicação.

Tabela 4 – N^o máximo de nós aproximado, função do SF, com restrição de *duty cycle* de 0,1%

<i>Spread Factor</i>	N ^o de nós
SF7	1510
SF8	850
SF9	474
SF10	231
SF11	116
SF12	69

Tabela 5 – N^o máximo de nós aproximado, função do SF, com restrição de 30 mensagens por dia

<i>Spread Factor</i>	N ^o de nós
SF7	1600
SF8	1600
SF9	999
SF10	500
SF11	254
SF12	146

4.3 Cenário 2

Neste cenário foram utilizadas as mesmas configurações do Cenário 1, com exceção do intervalo de envio entre as mensagens. Neste caso, utilizou-se como critério, a “política de acesso justo” recomendada pela The Things Network (TTN), uma rede LoRaWAN comunitária pública, que limita o ToA das mensagens de uplink em 30 segundos por dia (24 horas) por nó. Com essa restrição, o intervalo de envio entre as mensagens foi configurado para 48 minutos. Os resultados são apresentados na Figura 13.

Como esperado, com o aumento no intervalo de envio entre as mensagens, há uma menor probabilidade de colisões pacotes e, dessa maneira, há um ganho na escalabilidade da rede, conforme pode-se observar na Tabela 5, podendo-se distribuir uma maior quantidade de nós, para um mesmo spreading factor. Novamente, a possibilidade de se enviar uma menor quantidade de mensagens por dia depende integralmente da aplicação.

Os cenários 1 e 2 mostram que, redes cujos nó são configurados com um valor alto de *Spread Factor*, são bem limitadas quanto ao número de nós que podem ser distribuídos na rede. Por outro lado, é importante notar que em ambos os cenários o valor do SF é fixo, o que não é a maneira mais adequada de configuração dos nós, pois os nós que foram alocados aleatoriamente mais próximos ao *gateway* poderiam utilizar valores de SF proporcionalmente menores. Com isso, esses nós teriam menores valores de tempo no ar, aumentando assim a DER (como consequência da redução na probabilidade de colisão de pacotes) e reduzindo também o consumo de energia total da rede. Por isso, sempre que

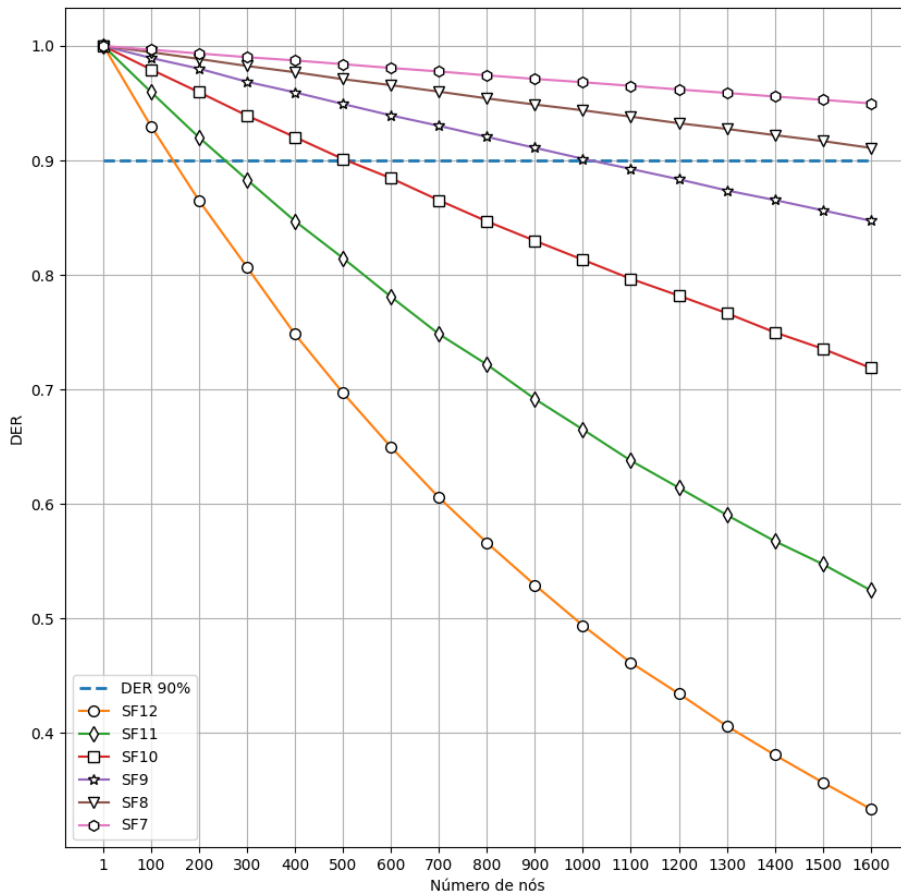


Figura 13 – DER em função do nº de nós com restrição de 30 mensagens por dia

possível, o ADR (*Adaptive Data Rate*) deve ser utilizado.

Este capítulo apresentou alguns cenários, utilizando o simulador LoraSim, que mostram como a escalabilidade da rede LoRa depende dos parâmetros configurados, principalmente como a seleção do *Spread Factor* pode estender o alcance da rede limitando, porém, o número de nós que a rede pode conter. Além disso, como existem restrições regulatórias quanto ao tempo que um pacote fica no ar, valores mais altos de *Spread Factor* implicam num intervalo maior entre *uplink* de pacotes pelos nós. Vale destacar que, países como os Estados Unidos e o Brasil, não estipulam um limite de ToA em função do *duty cycle*, porém determinam um tempo máximo do pacote no ar de 400 milissegundos. Com isso, os *Spread Factors* de números 11 e 12 não podem ser utilizados, pois o ToA dos pacotes ultrapassaria os 400 ms, mesmo considerando um payload sem dados (isso é válido considerando o uso de uma largura de banda de 125 kHz).

5 CONCLUSÃO

Esse trabalho teve como objetivo o estudo das redes de baixa potência e longo alcance (LPWAN). As LPWANs são uma tecnologia nova e promissora, pois tem um baixo consumo de energia e um alcance muito maior do que as tecnologias WPAN, Wi-Fi e celular. Portanto, esse novo conceito de redes sem fio torna-se extremamente útil para a área de IoT.

Assim, este trabalho apresentou uma breve explanação do conceito de LPWAN e as justificativas para o surgimento desse tipo de rede, motivadas pelo surgimento da Internet das Coisas (IoT). Foram destacadas as principais características que orientaram o desenvolvimento dessas redes como, por exemplo, a utilização de frequências sub-1 GHz, a busca por hardwares mais simples possíveis, topologia de rede, possibilidade de escalar o número de nós de dezenas até milhares e o aumento de vida operacional dos nós, chegando a vários anos.

Após isso, foi feito um estudo das tecnologias mais populares do mercado, pontuando as características típicas de cada uma. As tecnologias estudadas que utilizam frequências não licenciadas foram: LoraWAN, que possui entre as principais características, o efeito da seleção do spread factor no alcance, na escalabilidade e no consumo de energia da rede; Sigfox, cujo ambiente extremamente simplificado restringe sua utilização a aplicações com taxas de dados bastante limitadas e IEEE 802.11ah, com seu objetivo de estender o alcance das redes Wi-Fi para cerca de 1 km, de modo a preencher a lacuna deixada entre as redes de uso pessoal e as redes de longo alcance.

As tecnologias que utilizam frequências licenciadas apresentadas foram a LTE-M, que possui as maiores taxas de dados e suporte para transmissão de arquivos de mídia e *streaming* de vídeo e, por último, a tecnologia NB-IoT, que tem um foco em aplicações que não precisam transferir grandes quantidades de dados e que não exigem baixa latência sendo, por conta disso, uma opção tecnologia mais barata, quando comparada com o LTE-M.

Foi elaborada também uma seção para a análise de algumas aplicações com objetivo de mencionar as possíveis tecnologias LPWANs a serem utilizadas com base em suas características. Como pode ser notado, não há uma escolha exata, pois cada aplicação tem suas demandas e a escolha de uma tecnologia LPWAN depende de vários fatores como: quantidade e frequência da dados a serem transmitidos, infraestrutura e rede disponível, restrições da legislação local, segurança da transmissão dos dados e entre outros.

E para concluir esse trabalho, foram executadas várias simulações utilizando um simulador rede LoRa. A tecnologia LoRa foi escolhida por não ser restrita ao uso de redes

públicas, sendo possível de criação de uma rede privada, ser uma das tecnologias mais populares do mercado atual e ter o código fonte de seus protocolos disponíveis ao público. O simulador utilizado foi o LoRaSim devido à facilidade de instalação e manejo.

Através das simulações, pode-se notar como a alteração dos parâmetros de configuração da transmissão influenciam o desempenho do sistema em relação ao consumo de energia, alcance e *throughput* máximo. Como foi demonstrado nos dois cenários, que a alteração de poucos parâmetros, como quantidade de nós, *spread factor* e intervalo das transmissões, pode alterar significativamente a qualidade da comunicação da rede da comunicação da rede. Deste modo, a análise da aplicação e o estudo das necessidades da aplicação para a escolha correta dos parâmetros torna-se de extrema importância.

Algumas possibilidades de continuidade deste trabalho seriam a realização de estudos para identificar o grau de influência dos demais parâmetros de configuração da comunicação LoRa, como largura de banda, taxa de código tamanhos de payload, na qualidade de transmissão da rede e também no consumo de energia da rede. Além disso, como os parâmetros utilizados no simulador LoraSim para o modelo de perda de percurso adotado, são apropriados para áreas densamente populadas, podem ser realizados estudos com modelos de propagação adequados para áreas rurais, por exemplo. Ainda com relação ao LoRa, a análise de cenários que atendam à legislação brasileira com relação à utilização do espectro de frequências, também seria uma possibilidade de trabalho futuro. Finalmente, podem ser desenvolvidos estudos comparativos de desempenho mais aprofundados entre as tecnologias, como LoraWAN e Sigfox, por exemplo.

REFERÊNCIAS

- [1] MEKKI, K. et al. A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment. *ICT Express*, v. 5, n. 1, p. 1–7, 2019. ISSN 2405-9595. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517302953>>.
- [2] CHAUDHARI, B. S.; ZENNARO, M.; BORKAR, S. Lpwan technologies: Emerging application characteristics, requirements, and design considerations. *Future Internet*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 3, p. 46, 2020.
- [3] LUETH, K. L. *LPWA market*. 2022. <<https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-2020-12-billion-iot-connections-surpassing-non-iot-for-the-first-time/>>.
- [4] KIM, D.-H.; LEE, E.-K.; KIM, J. Experiencing lora network establishment on a smart energy campus testbed. *Sustainability*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 11, n. 7, p. 1917, 2019.
- [5] BUURMAN, B. et al. Low-power wide-area networks: Design goals, architecture, suitability to use cases and research challenges. *IEEE Access*, v. 8, p. 17179–17220, 2020.
- [6] WHAT is LoRaWAN? Disponível em: <https://lora-alliance.org/resource_hub/what-is-lorawan/>.
- [7] PETRARIU, A.-I.; LAVRIC, A. Sigfox wireless communication enhancement for internet of things: A study. *2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, p. 1–4, 2021.
- [8] C VERAS JC, V. R. C. L. P. J. G. A sigfox energy consumption model. *Sensors*, 2019.
- [9] CHEN, M. et al. Narrow band internet of things. *IEEE access*, IEEE, v. 5, p. 20557–20577, 2017.
- [10] PARK, M. Ieee 802.11 ah: sub-1-ghz license-exempt operation for the internet of things. *IEEE Communications Magazine*, IEEE, v. 53, n. 9, p. 145–151, 2015.
- [11] TIAN, L. et al. Wi-fi halow for the internet of things: An up-to-date survey on ieee 802.11 ah research. *Journal of Network and Computer Applications*, Elsevier, v. 182, p. 103036, 2021.
- [12] DIAN, F. J.; VAHIDNIA, R. Lte iot technology enhancements and case studies. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, IEEE, v. 9, n. 6, p. 49–56, 2020.
- [13] RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 19, n. 2, p. 855–873, 2017.
- [14] SINHA, R. S.; WEI, Y.; HWANG, S.-H. A survey on lpwa technology: Lora and nb-iot. *ICT Express*, v. 3, n. 1, p. 14–21, 2017. ISSN 2405-9595. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517300061>>.

- [15] LORA Technology: Ecosystem, Applications and Benefits. Disponível em: <https://info.semtech.com/ecosystem_benefits_white_paper_download>.
- [16] BOR, M.; ROEDIG, U. Lora transmission parameter selection. In: *2017 13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 27–34.
- [17] DEVALAL, S.; KARTHIKEYAN, A. Lora technology-an overview. In: IEEE. *2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*. [S.l.], 2018. p. 284–290.
- [18] HAXHIBEQIRI, J. et al. A survey of lorawan for iot: From technology to application. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 18, n. 11, p. 3995, 2018.
- [19] ALLIANCE, L. *Private LoRaWAN® Networks Your LPWAN Network Your Way*. 2022. <<https://lora-alliance.org/private-networks/>>.
- [20] SILVA, J. de C. et al. Lorawan—a low power wan protocol for internet of things: A review and opportunities. In: IEEE. *2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech)*. [S.l.], 2017. p. 1–6.
- [21] NETWORK, T. things. 2022. <<https://www.thethingsindustries.com/>>.
- [22] SIGFOX. 2022. <<https://www.sigfox.com/en/what-sigfox/technology>>.
- [23] LAVRIC, A.; PETRARIU, A. I.; POPA, V. Sigfox communication protocol: The new era of iot? In: *2019 International Conference on Sensing and Instrumentation in IoT Era (ISSI)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–4.
- [24] ZÚÑIGA, J.-C.; PONSARD, B. *SIGFOX System Description*. [S.l.], 2017. Work in Progress. Disponível em: <<https://datatracker.ietf.org/doc/html/draft-zuniga-lpwan-sigfox-system-description-04>>.
- [25] FARRELL, S. *Low-Power Wide Area Network (LPWAN) Overview*. RFC Editor, 2018. RFC 8376. (Request for Comments, 8376). Disponível em: <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc8376>>.
- [26] AERNOUTS, M. et al. Sigfox and lorawan datasets for fingerprint localization in large urban and rural areas. *Data*, v. 3, n. 2, 2018. ISSN 2306-5729. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2306-5729/3/2/13>>.
- [27] LAVRIC, A.; PETRARIU, A. I.; POPA, V. Long range sigfox communication protocol scalability analysis under large-scale, high-density conditions. *IEEE Access*, v. 7, p. 35816–35825, 2019.
- [28] SIGFOX. 2022. <<https://www.sigfox.com/en/customers>>.
- [29] OUKESSOU, Y.; BASLAM, M.; OUKESSOU, M. Lpwan ieee 802.11 ah and lorawan capacity simulation analysis comparison using ns-3. In: IEEE. *2018 4th International Conference on Optimization and Applications (ICOA)*. [S.l.], 2018. p. 1–4.
- [30] TIAN, L.; FAMAHEY, J.; LATRÉ, S. Evaluation of the ieee 802.11 ah restricted access window mechanism for dense iot networks. In: IEEE. *2016 IEEE 17th international symposium on a world of wireless, mobile and multimedia networks (WoWMoM)*. [S.l.], 2016. p. 1–9.

- [31] DOMAZETOVIĆ, B.; KOČAN, E.; MIHOVSKA, A. Performance evaluation of ieee 802.11 ah systems. In: IEEE. *2016 24th Telecommunications Forum (TELFOR)*. [S.l.], 2016. p. 1–4.
- [32] AUST, S.; PRASAD, R. V.; NIEMEGEREERS, I. G. Outdoor long-range wlans: A lesson for ieee 802.11 ah. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, IEEE, v. 17, n. 3, p. 1761–1775, 2015.
- [33] LEHNER, H. *Overview of LTE-M and NB-IoT commercial launches worldwide*. 2022. <<https://www.mavoco.com/commercial-iot-networks-worldwide/>>.
- [34] ZAYAS, A. D.; MERINO, P. The 3gpp nb-iot system architecture for the internet of things. In: *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 277–282.
- [35] BOR, M. et al. Do lora low-power wide-area networks scale? In: *MSWiM '16 Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. [S.l.]: ACM Press, 2016. p. 59–67. A Corrected version. A bug was found in the simulator, whereby previously collided packets would be in some cases marked as ‘not collided’, thereby overestimating the goodput of the network. The bug was fixed and all figures and numbers have been updated accordingly. The overall conclusions, however, has stayed the same.
- [36] SEMTECH. *Semtech SX1272*. 2022. <<https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-core/sx1272>>.