

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



**MATHEUS LESSA ARANTES BOY**

**UM ESTUDO SOBRE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE  
REDES LORAWAN, NB-IOT E SIGFOX**

VITÓRIA-ES

MAIO/2022

Matheus Lessa Arantes Boy

# **UM ESTUDO SOBRE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE REDES LORAWAN, NB-IOT E SIGFOX**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Matheus Lessa Arantes Boy, 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.

Vitória-ES

Maio/2022

Matheus Lessa Arantes Boy

## UM ESTUDO SOBRE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE REDES LORAWAN, NB-IOT E SIGFOX

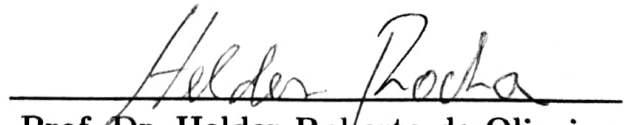
Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Matheus Lessa Arantes Boy, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em 13 de maio de 2022.

COMISSÃO EXAMINADORA:



**Prof. Dr. Jair Adriano Lima Silva**  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador



**Prof. Dr. Helder Roberto de Oliveira  
Rocha**  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador



**Me. Menno Jan Faber**  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador

Vitória-ES

Mai/2022

*A Deus, minha amada, minha família e meus amigos.*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à toda a minha família pela ajuda, pelo amor e pela motivação dada desde minha tenra idade até os meus dias de maturidade. Não há como agradecer pelas oportunidades que me foram dadas e nem como expressar o amor que tenho por tudo que foi feito em meu favor.

A meu orientador, Dr. Jair Silva, pela paciência e pela ajuda que me deu ao longo de todo processo. Um homem formidável e excelente professor cuja metodologia de ensino não me esquecerei. Para sempre lembrarei de tudo que fez por mim como aluno e pessoa.

À banca examinadora pela aceitação do convite e pelo tempo investido para leitura e avaliação desse trabalho.

Agradeço à Universidade Federal do Espírito Santo pela minha formação e pela oportunidade que tive. Poucos podem se orgulhar de ter uma formação, ainda mais por uma instituição de prestígio e, por isso, sou mais do que afortunado.

À minha namorada e futura mulher pela paciência, pela amizade, pelo amor e carinho. Muitas foram as vezes que me animou em momentos de decepção e esteve comigo em meio ao desespero. A minha alegria tem seu nome.

Por fim, agradeço a Deus. Ele não me deixou desamparado, antes a Sua bondade e misericórdia me sustentaram. Ele me criou e guiou meus passos até aqui. Louvado seja Seu nome e seja engrandecido de eternidade a eternidade.

## RESUMO

A presença de implementações de *Internet of Things* (IoT) tem aumentado consideravelmente nos últimos anos, de sorte que diversas tecnologias tem surgido em decorrência disso. No caso de tecnologias *Low Power Wide Area Network* (LPWAN), estas buscam possibilitar a implementação de redes de internet das coisas que possuam longo alcance e baixo consumo energético. Tecnologias como LoRaWAN, NB-IoT e SigFox são amplamente utilizadas, contudo, dada a diferença existente entre elas surge o interesse em saber como cada uma delas coloca em prática os requerimentos de longo alcance e baixo consumo de energia. Muitos estudos focam no aspecto do longo alcance, e os que tem como ênfase o consumo energético deixam por desejar as comparações, se contentando com a estimativa de dados. Assim, este trabalho visa entender quais os fatores que mais influenciam no consumo de energia dos dispositivos LoRaWAN, NB-IoT e SigFox. Para tanto, foi realizada uma análise sistemática de estudos correlacionados com o tema deste trabalho. Além disso, dada a importância de se conhecer as técnicas LPWAN, cada tecnologia foi estudada a parte. Por fim, foi identificado como o tempo de transmissão do sinal influencia no custo energético dos dispositivos, sendo que métodos e tecnologias que permitam reduzir tal tempo se mostram como os melhores candidatos para a solução de eficiência energética em redes LPWAN.

**Palavras-chave:** IoT; LPWAN; LoRaWAN; SigFox; NB-IoT; Eficiência energética.

## ABSTRACT

The number of Internet of Things (IoT) applications has been increasing considerably recently in a way that a varied sort of new technologies have been developed because of it. When it comes to Low Power Wide Area Network (LPWAN) technologies, in special, it is understood that they seek to allow the implementation of internet of things networks with long range and low power consumption. Technologies like LoRaWAN, NB-IoT and SigFox are widely used and the major difference between them generates the need to understand how each one of them allows the LPWA networks to meet the requirements of long range and low power. The majority of the studies in the LPWAN field focus on exploring long range, and even the ones that do research low power do so without a proper comparison and analysis of the results found, only showcasing the values found. That been said, this work seeks to understand the main factors regarding the energy consumption of LoRaWAN, NB-IoT and SigFox devices. To do so, a systematically and meticulous analysis was conducted regarding other works in the area of LPWAN energy consumption. Another section of this work is done regarding the technical aspects of each one of the these technologies. In the end, is was found that the transmission time of the signal is the main cause of energy consumption in the LPWAN devices, and that methods and technologies that allow the reduction of said time seem to be the best solution for better energy efficiency in LPWAN networks.

**Keywords:** IoT; LPWAN; LoRaWAN; SigFox; NB-IoT; Energy efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Projeção de mercado IoT por setor até 2025 . . . . .	15
Figura 2 – Projeção de mercado de tecnologias de rede LPWA até 2027 . . . . .	16
Figura 3 – Exemplo de um <i>downchirp</i> . . . . .	21
Figura 4 – Comparação de sinais LoRa com SF de 7 a 12 . . . . .	22
Figura 5 – Exemplo do uso de <i>chips</i> . . . . .	23
Figura 6 – Processo de demodulação de um sinal LoRa . . . . .	23
Figura 7 – <i>Stack</i> de rede LoRaWAN . . . . .	24
Figura 8 – Topologia de rede LoRaWAN . . . . .	24
Figura 9 – Diagrama de Constelação QPSK . . . . .	27
Figura 10 – Forma de Onda de um Sinal QPSK . . . . .	28
Figura 11 – Modos de operação NB-IoT . . . . .	28
Figura 12 – Forma de Onda de um Sinal BPSK . . . . .	29
Figura 13 – Diagrama de Constelação BPSK . . . . .	29
Figura 14 – Modulador BPSK . . . . .	30
Figura 15 – Demodulador BPSK . . . . .	30
Figura 16 – Topologia de rede SigFox . . . . .	31
Figura 17 – Representação do consumo de energia por etapa de operação de um dispositivo LPWAN . . . . .	33
Figura 18 – Estrutura de medição utilizada . . . . .	34
Figura 19 – Perfil de consumo energético LoRaWAN . . . . .	36
Figura 20 – Perfil de consumo energético SigFox . . . . .	36
Figura 21 – Perfil de consumo energético NB-IoT - Estados 1 a 6 . . . . .	37
Figura 22 – Perfil de consumo energético NB-IoT - Estados 5 e 7 . . . . .	37
Figura 23 – Vida útil de bateria por capacidade . . . . .	38
Figura 24 – Ilustração do cálculo do <i>Link Budget</i> . . . . .	40
Figura 25 – Resultados experimentais para <i>payload</i> de 12 bytes . . . . .	42
Figura 26 – Resultados experimentais para <i>payload</i> de 24 bytes . . . . .	42
Figura 27 – Resultados experimentais para <i>payload</i> de 64 bytes . . . . .	43
Figura 28 – Resultados experimentais para <i>payload</i> de 512 bytes . . . . .	43



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Planos de frequências por país (TTN, c2015)	20
Tabela 2	– $T_S$ para os valores usuais de SF e largura de banda de 125 kHz	22
Tabela 3	– Fase por símbolo para modulação QPSK - Adaptado de Xiong (2006)	27
Tabela 4	– Dados medidos para LoRaWAN - Adaptado de Singh et al. (2020)	36
Tabela 5	– Dados medidos para SigFox - Adaptado de Singh et al. (2020)	37
Tabela 6	– Dados medidos para NB-IoT - Adaptado de Singh et al. (2020)	38
Tabela 7	– Dados medidos para o cenário real LoRaWAN - Adaptado de Singh et al. (2020)	38
Tabela 8	– Valores de EPB para os testes com LoRaWAN - Adaptado de Ballerini et al. (2020)	46
Tabela 9	– Valores de EPP para os testes com LoRaWAN - Adaptado de Ballerini et al. (2020)	46
Tabela 10	– Valores determinados para NB-IoT - Adaptado de Ballerini et al. (2020)	47
Tabela 11	– Energia por bit para transmissões NB-IoT - Adaptado de Ballerini et al. (2020)	47
Tabela 12	– Valores de energia de transmissão para LoRaWAN, NB-IoT e SigFox - Adaptado de Singh et al. (2020)	48
Tabela 13	– Valores de EPB para os testes com LoRaWAN (DR5) e NB-IoT (B) - Adaptado de Ballerini et al. (2020)	49

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2G	Segunda Geração de Telefonia Móvel
3G	Terceira Geração de Telefonia Móvel
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
BLAST	<i>Bursty, Light, Asynchronous, Stealth, and Transitive</i>
bps	Bits por segundo
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CR	<i>Coding Rate</i>
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
DL	<i>Downlink</i>
DR	<i>Datarate</i>
eDRX	<i>Extended Discontinuous Reception Mode</i>
GFSK	<i>Gaussian Frequency Shift Keying</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
kbps	Quilobits por segundo
kHz	Quilohertz
LB	<i>Link Budget</i>
LoRa	<i>Long Range</i>
LoRaWAN	<i>Long Range Wide Area Network</i>
LPWA	<i>Low Power Wide Area</i>
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i>
LTE	<i>Long-Term Evolution</i>

mA	Miliampere
MHz	Megahertz
mJ	Milijoule
NB	<i>Narrow Band</i>
NB-IoT	<i>Narrow Band - Internet of Things</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
SF	<i>Spreading Factor</i>
TOA	<i>Time On Air</i>
UL	<i>Uplink</i>
UNB	<i>Ultra Narrow Band</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Amplitude do sinal
$BW$	Largura de banda (Hz)
$DRE$	Valor estimado de <i>Datarate</i> (bps)
$E_{med}$	Energia média (J)
$EPB$	Energia consumido por bit (J)
$EPP$	Energia consumido por <i>packet</i> (J)
$f_c$	Frequência do sinal (Hz)
$G_{RX}$	Ganho da antena receptora (dBi)
$G_{TX}$	Ganho da antena transmissora (dBi)
$I_{med}$	Corrente média de operação (A)
$L_{EN}$	Perdas plásticas para o ambiente (dB)
$L_{PL}$	Perdas de propagação do sinal no meio (dB)
$L_{RX}$	Perdas nos conectores do receptor (dB)
$L_{TX}$	Perdas nos conectores do transmissor (dB)
$N_{PHY}$	Número de símbolos por pacote de dados
$N_{pre}$	Número de símbolos por preâmbulo
$PL$	Tamanho do pacote de dados (bytes)
$P_{RX}$	Potência de recepção do sinal (dBm)
$P_{TX}$	Potência de transmissão do sinal (dB)
$s_i$	Sinal modulado
$T$	Período de duração do sinal (s)
$T_C$	Tempo de transmissão de um <i>chip</i> (s)
$T_{op}$	Tempo de operação (s)

$T_{Packet}$	Tempo de transmissão de um <i>packet</i> (s)
$T_{rx1}$	Tempo de espera para a primeira janela de recepção LoRaWAN (s)
$T_{rxw}$	Tempo de duração da janela de recepção (s)
$T_S$	Tempo de transmissão de um símbolo (s)
$T_{tx}$	Tempo de duração da transmissão (s)
$V_{op}$	Tensão de operação (V)
$\theta_i$	Fase do sinal (rad)

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Apresentação</b>	<b>15</b>
<b>1.2</b>	<b>Trabalhos Relacionados</b>	<b>16</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>18</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do Texto</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>TECNOLOGIAS LPWAN</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>LoRa e LoRaWAN</b>	<b>19</b>
2.1.1	LoRa	19
2.1.1.1	Propriedades	19
2.1.1.2	Especificações	20
2.1.2	LoRaWAN	24
<b>2.2</b>	<b>NB-IoT</b>	<b>26</b>
<b>2.3</b>	<b>SigFox</b>	<b>28</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS DE ESTUDOS CORRELACIONADOS</b>	<b>32</b>
<b>3.1</b>	<b>Análise do Consumo de Energia de Tecnologias LPWAN e Estimativa de Durabilidade para Aplicações IoT - (SINGH et al., 2020)</b>	<b>32</b>
3.1.1	Objetivos e motivação	32
3.1.2	Metodologia empregada	33
3.1.3	Resultados alcançados	35
<b>3.2</b>	<b>Comparação Entre Tecnologias LPWAN: Baixo Consumo Energético com NB-IoT, LoRaWAN e Sigfox - (OELERS; NAUMANN, 2021)</b>	<b>39</b>
3.2.1	Objetivos e motivação	39
3.2.2	Metodologia empregada	39
3.2.3	Resultados alcançados	41
<b>3.3</b>	<b>NB-IoT Versus LoRaWAN: Uma Avaliação Experimental para Aplicações Industriais - (BALLERINI et al., 2020)</b>	<b>44</b>
3.3.1	Objetivos e motivação	44
3.3.2	Metodologia empregada	44
3.3.3	Resultados alcançados	45
<b>4</b>	<b>DISCUSSÃO</b>	<b>48</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>51</b>

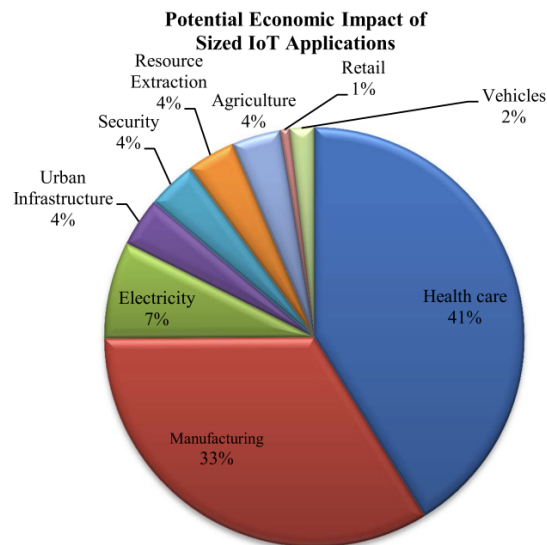
**REFERÊNCIAS . . . . . 52**

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação

Desde o advento dos primeiros transistores, o avanço dos sistemas de telecomunicação tem sido notável. A cada ano as tecnologias já existentes são aperfeiçoadas, atingindo novos patamares, podendo citar exemplos como transmissões de rádio, telefonia móvel e a própria internet, que se tornaram mundanos dada a larga participação de tais tecnologias no dia a dia. Com isso resta imaginar quais as possíveis novas direções que podem ser tomadas. Felizmente, a capacidade de inovação dentro do campo das tecnologias de telecomunicações ainda não foi esgotada e uma das respostas para esse dilema é a chamada *Internet of Things* - IoT (tradução livre, Internet das Coisas). Como a Figura 1 demonstra, os campos para aplicações IoT são muito variados e, por isso, não há como se entender IoT como uma solução única, mas sim como um conjunto de técnicas e implementações específicas que atendam as necessidades de cada aplicação.

Figura 1 – Projeção de mercado IoT por setor até 2025



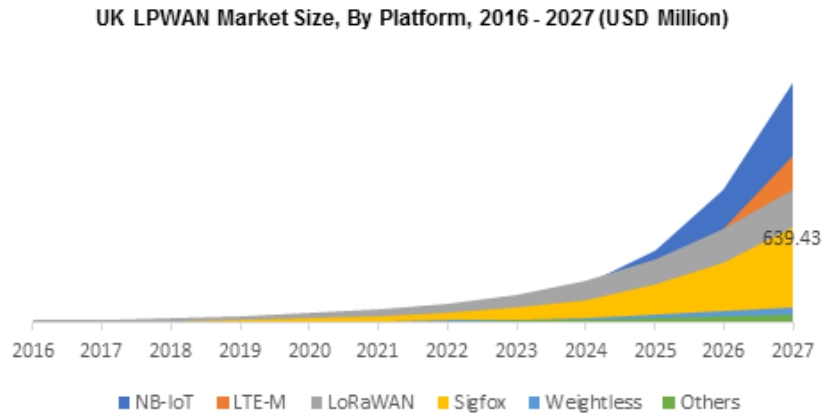
Fonte: Al-Fuqaha et al. (2015)

Algumas tecnologias vêm sendo desenvolvidas como LoRaWAN, Sigfox, NB-IoT, Telensa, RPMA, Qowisio, Weightless, dentre outras, com o intuito de implementar uma rede *Low Power Wide Area* - LPWA (tradução livre, Grande Área e Baixo Consumo Energético) e, conseqüentemente, tornar real aplicações IoT. Contudo, dado o grande número de tecnologias existentes, este trabalho se viu limitado a estudar apenas uma fração delas. Para isso, foram selecionadas as três com a maior participação de mercado. Como bem apontam IoT-Analytics (2021) e GMI (2021), estudos de percepção de mercado, as principais tecnologias utilizados em implementações IoT de redes LPWA são LoRaWAN,



NB-IoT e SigFox, conforme indica, inclusive, a Figura 2. Por conta disso, tais foram as tecnologias escolhidas para o desenvolvimento deste trabalho.

Figura 2 – Projeção de mercado de tecnologias de rede LPWA até 2027



Fonte: GMI (2021)

Dada a singularidade entre as tecnologias LoRaWAN, NB-IoT e SigFox, esse estudo resta limitado pelo aspecto do consumo energético, colocando em foco, portanto, o aspecto *Low Power* das redes LPWA. Para isso, será encaminhada uma revisão bibliográfica de outros trabalhos cujo tema seja o perfil de consumo energético de tecnologias de redes LPWA.

## 1.2 Trabalhos Relacionados

São muitas as possíveis implementações IoT e isso tem levado ao surgimento de métodos distintos com o objetivo de concretizar os diversos projetos existentes, levando em consideração as singularidades de cada um. No cenário de baixo custo, longo alcance e baixo consumo energético surge o paradigma das *Low Power Wide Area Networks* - LPWANs (tradução livre, Redes de Grande Área e Baixo Consumo Energético): redes que fornecem recursos, como a comunicação em longo alcance usando dispositivos de baixo consumo energético e baixa taxa de transferência de dados, que outras tecnologias sem fio não seriam capazes de proporcionar (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017).

Quando fazemos um comparativo entre as tecnologias consolidadas até este ponto vemos que não há uma boa alternativa que sirva para o caso de redes LPWA. Isso porque as ferramentas sem fio antigas, como Wi-Fi, Bluetooth, Zig-Bee, dentre outras, possuem um alcance muito curto, o que dificulta a implementação ao longo de áreas extensas. A solução

seria instalar um grande quantidade de dispositivos de maneira que houvesse uma rede densa e capaz de cobrir maiores extensões. Isso, contudo, leva a um aumento considerável nos custos de execução e manutenção dos projetos. Outra possibilidade está em utilizar tecnologias de comunicação celular, como as redes de segunda (2G) e terceira geração (3G), que possibilitam maior alcance. Contudo, por decorrência da maior complexidade necessária dos dispositivos, o consumo energético é consideravelmente maior, além do aumento do custo por dispositivo (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017).

Em meio a esse cenário de escassez, novas tecnologias surgiram para atender as demandas de projetos LPWAN, dentre elas pode-se destacar: LoRaWAN, NB-IoT, RPMA, SigFox, Telensa, Weightless, etc. Cada uma delas busca ofertar a habilidade de se construir redes com baixo consumo energético, suporte para um grande número de dispositivos dentro de uma ampla extensão territorial e a baixo custo de implementação. Como cada uma dessas tecnologias realiza essa tarefa lançando mão de técnicas e métodos distintos, surge o interesse em saber como essas distinções afetam as aplicações reais.

Dado que este trabalho tem como foco o estudo dos requisitos de baixo consumo energético das redes LPWA, os demais trabalhos que serão mencionados possuem o mesmo ponto de interesse em suas abordagens.

Em Mutescu, Petrariu e Lavric (2021) é realizado um estudo que busca averiguar o comportamento de soluções LPWAN disponíveis no mercado em relação ao consumo energético. Os autores, por meio de testes empíricos, realizam o levantamento de diversos dispositivos utilizados em redes LoRaWAN e SigFox, além de validar as informações dadas pelos fabricantes em relação ao comportamento realmente observado. Semelhantemente, Oelers e Naumann (2021) também comparam LoRaWAN e SigFox, além de trazer dados referentes ao NB-IoT em suas análises. Ainda podemos citar, fazendo referência a trabalhos com dados experimentais, o estudo Ballerini et al. (2020), que compara os resultados entre LoRaWAN e NB-IoT para aplicações industriais, e Singh et al. (2020), que compara dados medidos dentre aplicações reais e laboratoriais para LoRaWAN, NB-IoT e SigFox.

Alguns trabalhos chegam a sugerir modelos de previsão de consumo energético, como em Hernandez et al. (2017), que propõe um modelo energético para estimar o tempo de vida útil da bateria de dispositivos SigFox. Em Lykov et al. (2020) há uma outra comparação entre SigFox e LoRaWAN em relação à eficácia energética, contudo, os autores também propõem um modelo para previsão do consumo energético dessas tecnologias.

No geral, a maioria dos trabalhos anteriores mencionados não possuem um padrão intercambiável de configurações para as comparações, o que torna suas conclusões muito

dependentes de considerações referentes ao valor do *Link Budget* - LB (tradução livre, Orçamento de Enlace), *Spreading Factor* - SF (tradução livre, Fator de Espalhamento), tamanho do *payload*, número de retransmissões, dentre outros fatores. Este trabalho pretende então, realizar uma análise dos resultados comparáveis a fim de chegar a uma conclusão normalizada em relação ao consumo energético das tecnologias LoRaWAN, NB-IoT e SigFox.

### 1.3 Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é identificar as principais tecnologias LPWAN existentes e utilizadas na atualidade, além, claro, de entender e comparar o comportamento de consumo energético de cada uma delas. Para isso, foram elencados os seguintes objetivos específicos:

- Estudar redes LPWA;
- Esclarecer conceitos das tecnologias LoRaWAN, Sigfox e NB-IoT;
- Entender o consumo energético em aplicações das tecnologias supracitadas.

### 1.4 Estrutura do Texto

O presente trabalho está estruturado da seguinte maneira:

- **Introdução:** este capítulo inicial tem como objetivo introduzir o problema estudado e trazer contextualização do assunto;
- **Tecnologias LPWAN:** neste capítulo é realizada a apresentação das tecnologias envolvidas neste estudo;
- **Resultados de Estudos Correlacionados:** neste capítulo são expostos os resultados encontrados para esse problema na literatura;
- **Discussão:** neste capítulo os resultados apresentados no capítulo anterior são debatidos no contexto de uma análise de eficiência energética;
- **Conclusão:** no capítulo final deste trabalho são feitas as conclusões desse estudo.

## 2 TECNOLOGIAS LPWAN

Ao longo deste capítulo será estudada com mais detalhes as principais tecnologias envolvidas com o paradigma LPWAN, servindo, portanto, de embasamento teórico para o desenvolvimento deste trabalho.

### 2.1 LoRa e LoRaWAN

Antes de tratar de LoRaWAN é necessário dedicar-se ao entendimento do que é a tecnologia LoRa. Isso decorre pelo fato do LoRa implementar a camada física de transmissão e o protocolo LoRaWAN controlar as camadas de enlace de dados e de rede. Por esse motivo, essa seção é dividida primeiramente em uma subseção sobre LoRa e uma sobre LoRaWAN.

#### 2.1.1 LoRa

LoRa é uma tecnologia de modulação em radiofrequência para redes LPWA, proprietária da empresa Semtech. Seu nome é derivado da expressão *long range*, fazendo referência a uma das suas principais características.

##### 2.1.1.1 Propriedades

As principais propriedades dessa tecnologia são apresentadas em Semtech (2019) e são listadas a seguir:

- Longo Alcance: em zonas rurais os sinais LoRa são capazes de cobrir distâncias de até 15km, e até 5km em zonas urbanas consideradas as circunstâncias de implementação;
- Baixo Consumo Energético: como o os pacotes de dados são pequenos e transmitidos apenas algumas vezes ao dia, o custo de transmissão acaba sendo mínimo, aumentando a vida útil das baterias;
- Alta Capacidade: uma rede LoRa pode aceitar um grande número de dispositivos - um único *gateway* de oito canais é capaz de suportar até 1 milhão e meio de mensagens por dia;

- Baixo Custo: os dispositivos LoRa abusam da simplicidade da tecnologia para manter um custo de produção baixo. Além disso, como apenas poucos *gateways* são suficientes para a implementação de uma rede ampla, os custos gerais acabam sendo baixos.

### 2.1.1.2 Especificações

Os sinais LoRa operam com largura de banda de 125 e 500kHz, sendo que os canais de *uplink* - UL (tradução livre, sinal ascendente) utilizam ambas as bandas e canais de *downlink* - DL (tradução livre, sinal descendente) apenas a de 500kHz.

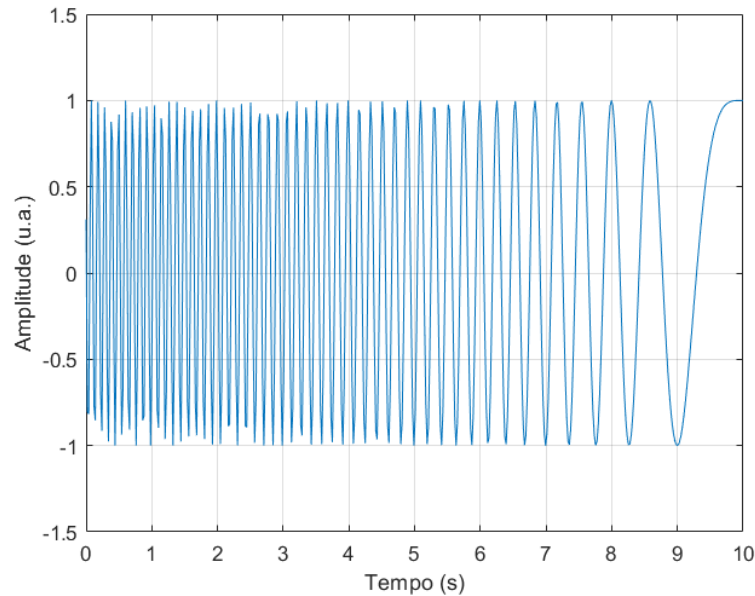
A frequência de operação é variável de acordo com a legislação local, isso por conta do LoRa operar em bandas de rádio *industrial, scientific and medical* (ISM), que possuem diferentes especificações em cada país de acordo com cada órgão regulador responsável. A Tabela 1 traz os principais planos de frequência por país.

País	Plano de Frequência
Alemanha	433MHz e 863-870MHz
Austrália	915-928MHz
Brasil	915-928MHz
Canadá	902-928MHz
China	470-510MHz e 779-787MHz
EUA	902-928Mhz
França	433MHz e 863-870MHz

Tabela 1 – Planos de frequências por país (TTN, c2015)

LoRa implementa um tipo de modulação conhecido como *Chirp Spread Spectrum* - CSS (tradução livre, Espalhamento Espectral por Chirp), sendo um *chirp* um pulso senoidal, cuja frequência varia linearmente de acordo com o tempo. Os *chirps* possuem valor limitado de frequência máxima e mínima e podem oscilar tanto positivamente, da menor para a maior frequência, quanto negativamente, da maior para a menor. No caso de uma variação positiva de frequência, o pulso recebe o nome de *upchirp*, e no caso de ser negativa *downchirp*. A Figura 3 exemplifica um *chirp* de oscilação negativa visto no domínio do tempo.

Apesar da possibilidade dos *chirps* variarem tanto positiva, quanto negativamente, apenas os *upchirps* são usados para a transmissão de símbolos. O *downchirp* é utilizado em algumas situações específicas, como a composição do cabeçalho do pacote de dados e no momento da recuperação da informação pelo receptor.

Figura 3 – Exemplo de um *downchirp*

Fonte: Produção do próprio autor.

Uma propriedade muito importante que dá grande versatilidade as redes LoRa é o SF, que permite o *trade-off* entre as suas características e possibilita uma implementação que atenda as demandas específicas de cada rede. O SF indica a quantidade de símbolos que podem ser alocados dentro da largura de banda (BW) por transmissão dentro de um canal, ou seja, pra cada valor de SF distinto será possível representar  $2^{SF}$  símbolos. O valor usual do SF é de no mínimo 7 e no máximo 12.

O SF acaba tendo grande impacto em duas características do sinal transmitido: a taxa de transmissão de bits e o *time on air* - TOA (tradução livre, tempo no ar). O tempo de duração de um símbolo ( $T_S$ ) está diretamente ligado ao TOA de um sinal e pode ser determinado pela Equação 2.1.

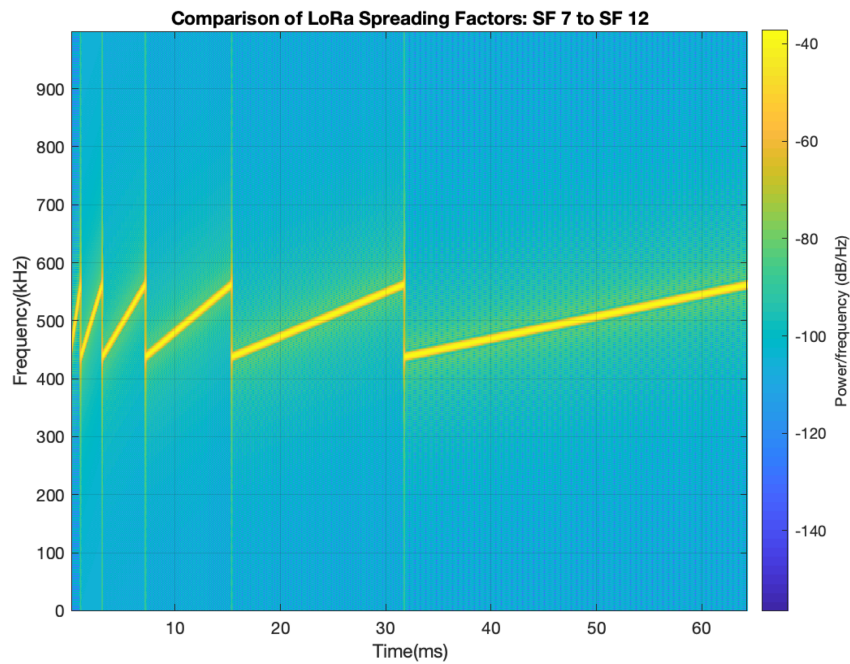
$$T_S = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (2.1)$$

A Tabela 2 apresenta a duração de cada símbolo para os valores usuais de SF e para um sinal com largura de banda de 125 kHz. Fica claro que com o aumento do SF, ocorre o aumento imediato do TOA do sinal e isso acarreta na redução da taxa de transmissão de bits, mostrando a natureza inversa dessas duas propriedades. Na Figura 4 está comparado visualmente o impacto do aumento do SF em relação ao tempo de duração do sinal. É interessante notar também o efeito de espalhamento do sinal ao longo do tempo, efeito esse que dá nome a essa propriedade dos sinais LoRa.

SF	$T_S(ms)$
7	1,024
8	2,048
9	4,096
10	8,192
11	16,384
12	32,768

Tabela 2 –  $T_S$  para os valores usuais de SF e largura de banda de 125 kHz

Figura 4 – Comparação de sinais LoRa com SF de 7 a 12

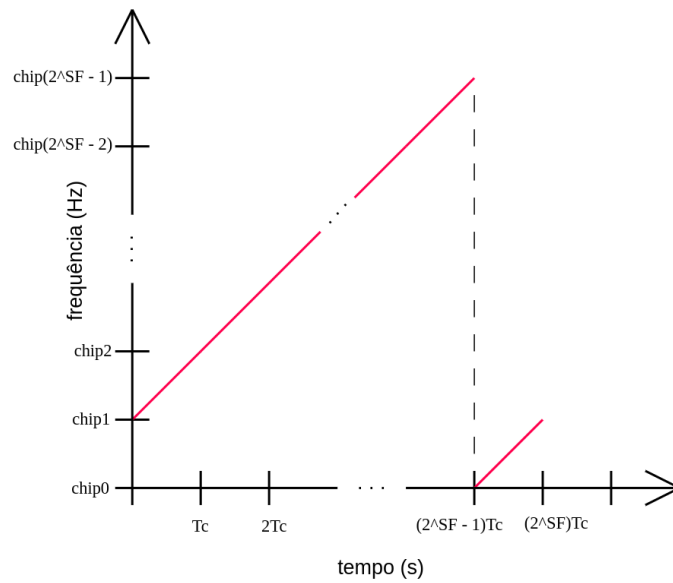


Fonte: Kim, Lee e Kim (2019)

Para que seja feita a modulação de um *upchirp* é realizado o seu deslocamento em um número de *chips*, que são parcelas lineares de mesma duração no tempo e de tamanho regular do sinal transmitido. O número de *chips* de um sinal é equivalente ao número de símbolos e o valor do intervalo de tempo de duração dos *chips* ( $T_C$ ) é determinado conforme a Equação 2.2. A Figura 5 exemplifica o uso dos *chips* para a representação de símbolos. No exemplo dado, para que seja realizada a transmissão do símbolo 1, o sinal sofre uma defasagem e começa a ser transmitido a partir do  $chip^1$ . Após o último *chip* ser transmitido,  $chip^{(2^{SF}-1)}$ , o sinal retorna ao primeiro *chip*, o  $chip^0$ , e prossegue até atingir o *chip* inicialmente transmitido.

$$T_C = \frac{1}{BW} \quad (2.2)$$

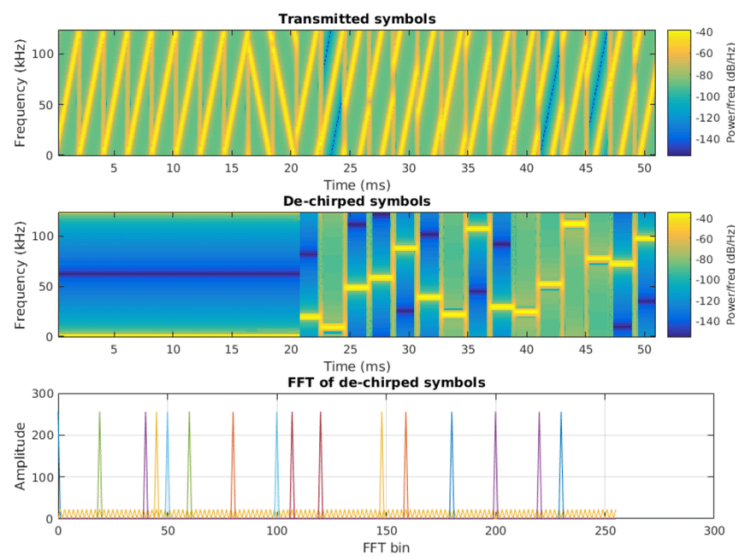
Figura 5 – Exemplo do uso de *chips*



Fonte: Produção do próprio autor.

A demodulação é realizada fazendo uso do *downchirp*. Durante o processo a sequência do *upchirp* modulado que foi recebido é multiplicada por um *downchirp*. Isso resulta em uma oscilação de frequência constante que pode ser recuperada e cujo tom resultante do processo de transformada rápida de Fourier indica o símbolo original transmitido. Todo esse processo está exemplificado na Figura 6.

Figura 6 – Processo de demodulação de um sinal LoRa



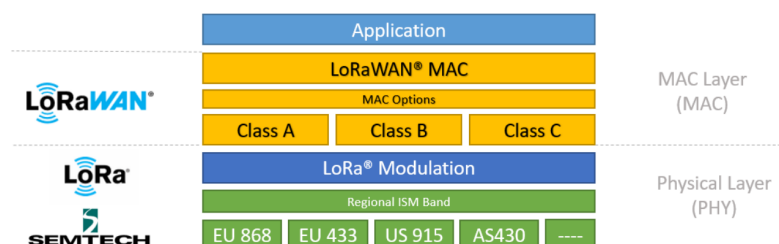
Fonte: Liando et al. (2019)



### 2.1.2 LoRaWAN

LoRaWAN é um protocolo de rede que permite a implementação segura de comunicação bidirecional entre dispositivos, utilizando a modulação LoRa como mecanismo de implementação de transmissão física, este *stack* de rede está ilustrado na Figura 7. Esse protocolo é curado pela *LoRa Alliance*, uma associação sem fins lucrativos que visa a padronização e desenvolvimento do LoRaWAN.

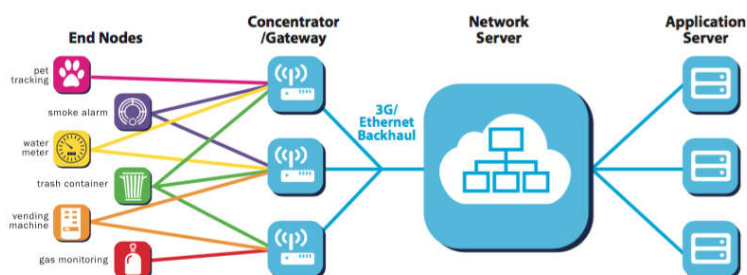
Figura 7 – *Stack* de rede LoRaWAN



Fonte: Semtech (2019)

A topologia de uma rede LoRaWAN possui algumas características específicas que podem ser notadas pela Figura 8. Ao se examinar tal figura fica clara a existência de alguns dispositivos pertinentes: os *End Nodes*, os *Gateways*, o *Network Server* e o *Application Server*.

Figura 8 – Topologia de rede LoRaWAN



Fonte: Lora-Alliance (2015)

Os *End Nodes* são os dispositivos que funcionam como sensores e atuadores da rede, recebendo e enviando informação via LoRa para os *Gateways*. Eles são também comumente chamados de *End Devices*, e são os dispositivos que formam a maior parte da rede. Seu custo de implementação é o menor dada a simplicidade que esses dispositivos possuem e eles podem ser classificados conforme o seu perfil de funcionamento. São 3 tipos distintos de *End Devices* que podem ser encontrados em uma rede LoRaWAN: classe A, B e C.

Os dispositivos classe A operam abrindo duas janelas de recepção após a transmissão de dados. Apenas uma das janelas pode ser usada para o envio de sinais para tais dispositivos. Nos demais momentos de operação, os dispositivos classe A ficam em estado de hibernação, esperando um novo momento de transmissão. Por conta disso, tais dispositivos costumam operar através do uso de baterias e células de alimentação. Os dispositivos classe B, semelhantemente aos classe A, também implementam duas janelas de recepção após a transmissão de dados. A diferença em relação a classe A é que, além dessas janelas, os dispositivos classe B abrem outras janelas de recepção de acordo com seu cronograma de atuação. Para que tal cronograma seja eficaz, um sinal para sincronização temporal é enviado para tais dispositivos, possibilitando ainda que os servidores saibam o momento que o dispositivo irá abrir as janelas extras de recepção. Nos demais momentos, os dispositivos classe B permanecem em um estado de hibernação. Ainda que esses dispositivos possam atuar por meio de baterias, a sua eficiência energética acaba sendo um tanto quanto comprometida por conta dessas janelas extras de recepção. Por fim, os dispositivos classe C implementam as mesmas duas janelas de recepção após a transmissão de dados, contudo, durante os demais momentos, tais dispositivos permanecem com uma janela de recepção aberta continuamente, e isso faz com que *End Nodes* classe C não possam operar, ou ao menos operar de maneira funcional, com o uso de baterias, dado que o consumo energético reduziria drasticamente a vida útil de ditas baterias.

Os *Gateways* são os dispositivos de rede que possibilitam a comunicação entre os *End Nodes* e os servidores *backend*, estes implementam uma interface entre a tecnologia LoRa e os protocolos de comunicação esperados pelo *Network Server*. Por sua vez, tais servidores recebem as mensagens dos *End Devices*, realizando o controle de duplicatas, no caso de mais de um *Gateway* realizar o envio de uma mesma mensagem. Eles também realizam o gerenciamento dos diversos *Gateways* da rede e reencaminham as mensagens recebidas para o *Application Server* de destino. Cada *Application Server* fica responsável por decodificar e gerenciar os dados enviados pelos dispositivos de borda da rede, executando o processamento dos dados conforme as necessidades dos usuários finais.

Conforme apresentado, fica evidente que uma rede LoRaWAN possui topologia estrela, sendo que não há expectativa de retransmissão de dados pelos *End Devices* entre si. Cada mensagem é devidamente enviada para um ou mais *Gateways*. Por conta disso, os dispositivos de borda podem reservar a integridade da vida útil de suas baterias com suas próprias operações, uma economia que não seria possível caso eles também tivessem que realizar transmissões de dados que não lhes diz respeito.

## 2.2 NB-IoT

*Narrow Band - IoT* (NB-IoT) é uma tecnologia IoT desenvolvida pelo *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) para aplicações em redes LPWA. A sua implementação está integrada ao padrão *Long-Term Evolution* (LTE), contudo, muitos dos aspectos foram deixados de lado para garantir o baixo custo, simplicidade dos dispositivos e prolongamento da duração da vida útil das baterias (SINHA; WEI; HWANG, 2017). Os sinais são transmitidos em bandas licenciadas LTE e *Global System for Mobile Communications* (GSM) (MEKKI et al., 2018).

Dada a capacidade de operar em mais de um plano de frequências, NB-IoT pode operar em 3 modos distintos de operação:

- ***Standalone Operation***: neste modo de operação uma das bandas GSM disponíveis é utilizada, possibilitando o uso de toda a potência de transmissão disponível pela estação base (BEYENE et al., 2017);
- ***In-Band Operation***: numa implementação *in-band* são utilizados blocos dos recursos das portadoras LTE. Nesse caso a potência é compartilhada entre LTE e NB-IoT. Há, ainda, algumas restrições em relação ao uso desses blocos por conta de alguns serem exclusivos para operações LTE;
- ***Guard Band Operation***: neste caso são utilizados blocos da banda de guarda não usados pelas aplicações LTE. Em relação ao modo *in band*, há o benefício de haver menos interferência, por conta dos sinais LTE se aproximarem da banda por apenas um dos lados, conforme mostra a Figura 11, e de não haver restrição quanto ao uso dessas bandas.

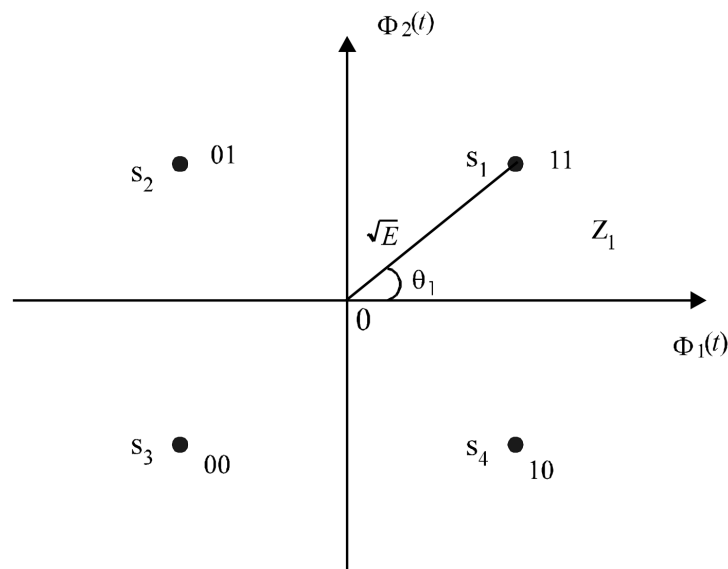
A modulação utilizada para os sinais em radiofrequência é a *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK), um tipo de modulação por chaveamento de fase. Como o nome sugere, o sinal da portadora pode assumir 4 valores distintos de fase a depender do valor do símbolo representado, uma vez que são modulados dois bits por vez. A Equação 2.3 descreve o sinal ( $s_i(t)$ ) de acordo com a sua amplitude ( $A$ ), a frequência da portadora ( $f_c$ ), a fase ( $\theta_i$ ) e o período de operação ( $T$ ). A Tabela 3 descreve o valor de fase relacionado a cada símbolo modulado e a Figura 9 ilustra o diagrama de constelação para a modulação QPSK.

$$s_i(t) = A \cos(2\pi f_c t + \theta_i), \quad 0 \leq t \leq T, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (2.3)$$

Símbolo	$\theta_i$ (rad)
11	$\pi/4$
01	$3\pi/4$
00	$-3\pi/4$
10	$-\pi/4$

Tabela 3 – Fase por símbolo para modulação QPSK - Adaptado de Xiong (2006)

Figura 9 – Diagrama de Constelação QPSK

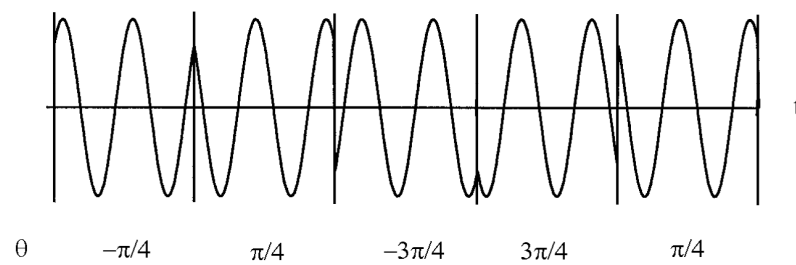


Fonte: Xiong (2006)

O uso da modulação QPSK permite melhor utilização da largura de banda do sinal em relação as modulações de chaveamento de fase de ordem inferior. Uma outra vantagem que o QPSK possui é em relação à redução da degradação da taxa do erro de bit quando comparado as demais modulações por chaveamento de fase de ordem superior. Essas características fazem com que o uso da modulação por chaveamento em quadratura seja maior em relação ao uso das técnicas de modulação de mesma natureza, mas de ordem superior (XIONG, 2006). Por fim, a Figura 10 ilustra a forma de onda de um sinal QPSK.

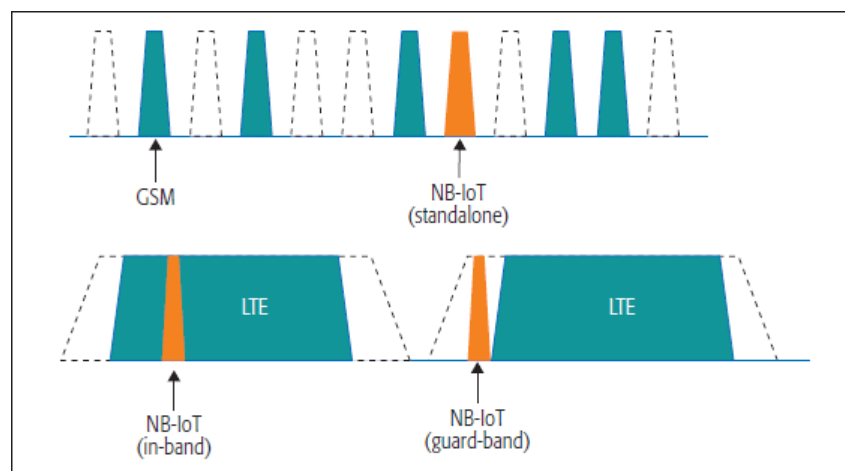
O nome *Narrow Band* - NB (tradução livre, Banda Estreita) se dá pela largura de banda do sinal que assume o valor de 200kHz em implementações GSM e LTE (MEKKI et al., 2018). A vantagem do sinal ter uma banda estreita é que isso possibilita uma vantagem em relação ao ruído, fazendo com que a recepção seja devidamente melhorada. Por fim, Mekki et al. (2018) também aponta algumas características importantes, como a capacidade de uma única célula operando em uma rede NB-IoT pode suportar até 100000 dispositivos, com velocidades de *downlink* de 200 kbps e *uplink* de 20 kbps, e com pacotes de dados de até 1600 bytes.

Figura 10 – Forma de Onda de um Sinal QPSK



Fonte: Xiong (2006)

Figura 11 – Modos de operação NB-IoT



Fonte: Beyene et al. (2017)

### 2.3 SigFox

SigFox se trata de uma tecnologia proprietária da empresa francesa homônima. Assim como a modulação LoRa, SigFox opera em bandas não licenciadas ISM de acordo com as normas e leis vigentes em cada país. Outra semelhança é compartilhada pelo NB-IoT, uma vez que o SigFox é uma tecnologia de transmissão que emprega técnicas NB, sendo que o sinal está concentrado em uma banda de 100Hz. Por conta dessa banda tão estreita essa tecnologia é também chamada de *Ultra Narrow Band* - UNB (tradução livre, Banda Ultra Estreita). Dada a eficiência que há no uso da BW, os sinais SigFox gozam de alguns benefícios, como o baixo nível de ruído em suas transmissões, alta sensibilidade de recepção do sinal, baixo consumo energético e baixo custo de desenvolvimento das antenas dos dispositivos da rede (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017). Essas vantagens surgem a custo da taxa de transmissão, que fica limitada a 100 bps.

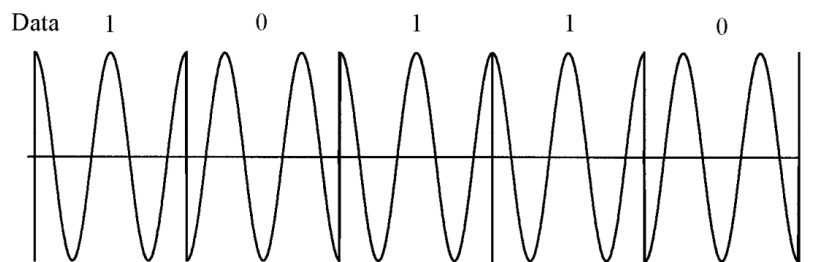
A modulação utilizada para a transmissão de sinais em radiofrequência é a *Binary Phase*

*Shift Keying* (BPSK), sendo ela utilizada entre os *End Devices* e as estações base. Semelhantemente ao QPSK, o BPSK utiliza um bit para modular o sinal da portadora, alterando entre dois valores de fase, 0 e  $\pi$  radianos. Com isso, a portadora pode assumir a forma descrita pela Equação 2.4 ou 2.5, caso o símbolo representado seja 1 ou 0, respectivamente. A Figura 12 ilustra a forma de onda de um sinal BPSK genérico e a Figura 13 demonstra o diagrama de constelação.

$$s_1(t) = A \cos 2\pi f_c t, \quad 0 \leq t \leq T \quad (2.4)$$

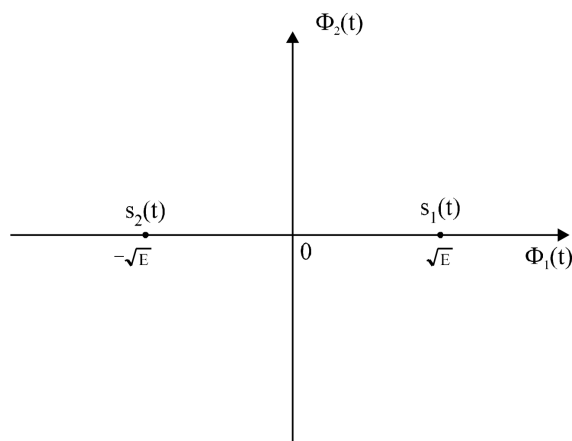
$$s_2(t) = -A \cos 2\pi f_c t, \quad 0 \leq t \leq T \quad (2.5)$$

Figura 12 – Forma de Onda de um Sinal BPSK



Fonte: Xiong (2006)

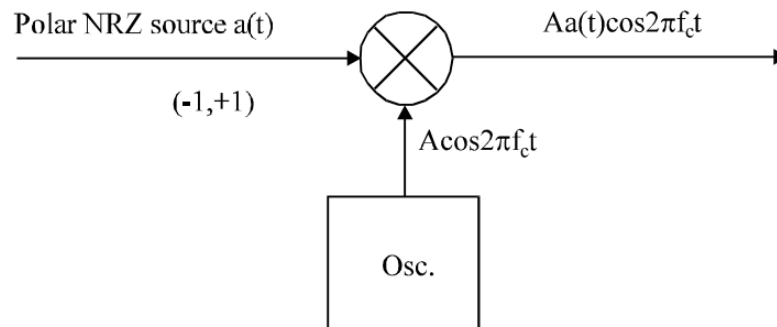
Figura 13 – Diagrama de Constelação BPSK



Fonte: Xiong (2006)

A modulação ocorre por meio do produto entre uma série de pulsos binários retangulares, gerada a partir da sequência de dados a serem transmitidos, e uma portadora senoidal, conforme exemplifica a Figura 14.

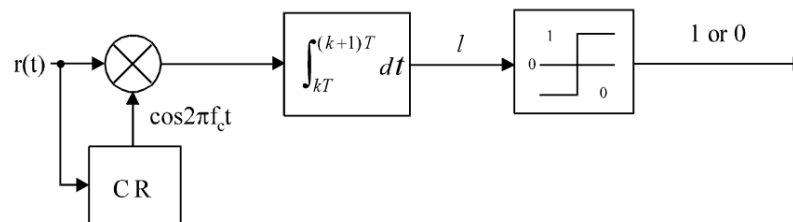
Figura 14 – Modulador BPSK



Fonte: Xiong (2006)

A demodulação é realizada pelo uso de um demodulador coerente para sinais binários. Primeiramente o sinal recebido é multiplicado pelo sinal senoidal da portadora que é recuperado do sinal de entrada. Em sequência é realizada a integração do produto da etapa anterior e a filtragem do sinal integrado para a eliminação de potenciais parcelas de frequência indesejada. Por fim, os dados são recuperados da série de pulsos binários resultantes após a filtragem. A Figura 15 traz um exemplo de demodulador BPSK conforme o procedimento descrito.

Figura 15 – Demodulador BPSK



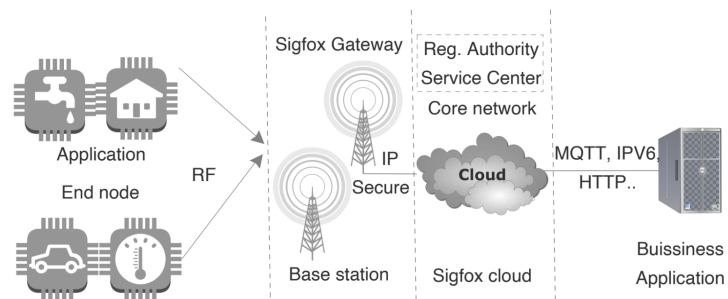
Fonte: Xiong (2006)

Os pacotes de dados transmitidos são limitados em 12 bytes para *payload*, sendo o tamanho total limitado em 24 bytes, contando os 12 bytes fixos que formam o preâmbulo e demais metadados. O número de mensagens também é limitado a um máximo de 140 por dia, dadas as regulações sobre o uso de bandas não licenciadas em alguns países. Outro fator que faz variar o número máximo de mensagens transmitidas é o plano de inscrição para uso da infraestrutura de nuvem SigFox.

Como a Figura 16 mostra, a topologia de uma rede SigFox em muito se assemelha a uma rede LoRaWAN. Os destaques feitos ficam a cargo do *Core Network*, que opera de maneira semelhante ao *Network Server*, mas é proprietário, requerendo uma subscrição dos serviços SigFox para uso. Um aspecto importante que deve ser levado em conta é o fato de que

apenas um número máximo de 4 mensagens podem ser enviadas das estações base para os *End Devices*. Isso significa que uma relevante parcela das transmissões não podem ter a sua recepção validada por meio de sinais de *acknowledge*, o que leva os dispositivos a realizarem diversas transmissões da mesma mensagem, por padrão são 3 transmissões.

Figura 16 – Topologia de rede SigFox



Fonte: Singh et al. (2020)



### 3 RESULTADOS DE ESTUDOS CORRELACIONADOS

Neste capítulo serão abordados os resultados referentes ao assunto deste trabalho, sendo estes encontrados por meio de revisão literária. Cada seção abordará uma fonte literária, apontando:

- Objetivos e motivação;
- Metodologia empregada;
- Resultados alcançados.

Dentre os estudos que abordam o mesmo tema deste trabalho, foram escolhidos as seguintes pesquisas para esta seção de revisão literária:

- *Energy Consumption Analysis of LPWAN Technologies and Lifetime Estimation for IoT Application* - (SINGH et al., 2020);
- *LPWAN COMPARISON: Low Energy Consumption with NB-IoT, LoRaWAN and Sigfox* - (OELERS; NAUMANN, 2021);
- *NB-IoT Versus LoRaWAN: An Experimental Evaluation for Industrial Applications* - (BALLERINI et al., 2020).

Foi tomada a liberdade para se traduzir os títulos dos estudos para as seções subsequentes.

#### 3.1 Análise do Consumo de Energia de Tecnologias LPWAN e Estimativa de Durabilidade para Aplicações IoT - (SINGH et al., 2020)

##### 3.1.1 Objetivos e motivação

Levado pela importância que o esgotamento das baterias de dispositivos de redes LPWA impõe, Singh et al. (2020) busca estudar o comportamento do consumo energético de tais dispositivos. Os autores fazem referência também aos demais trabalhos que tratam desse tema, mencionando a abordagem superficial que eles possuem e o fato de suas investigações estarem restritas a apenas uma tecnologia LPWAN.

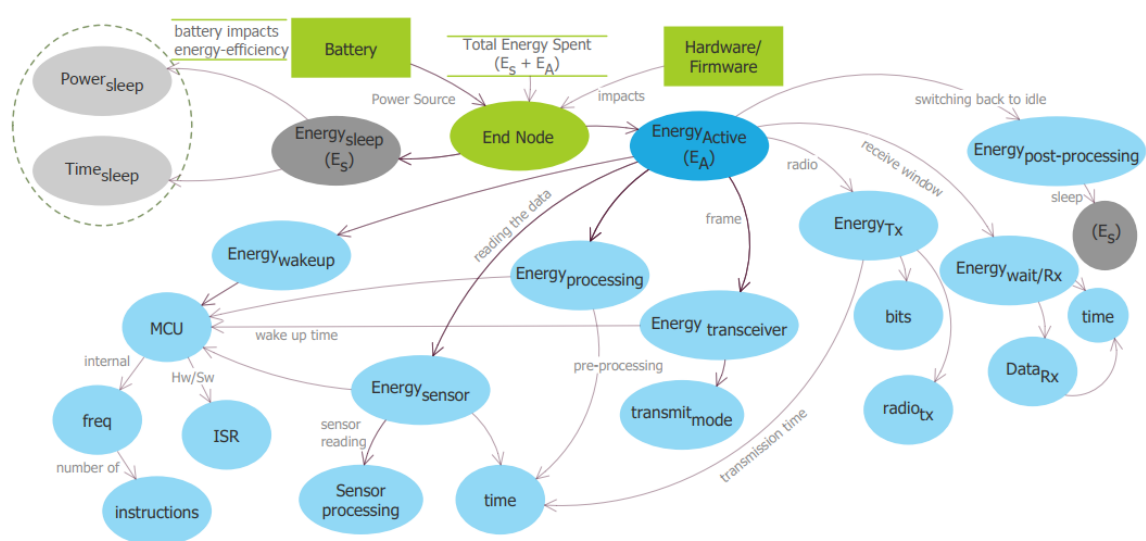
Dado o exposto, os autores levantam um rol de objetivos que serão abordados pela sua pesquisa:

- Estudo e representação do perfil de consumo energético de cada estado de operação das tecnologias LoRaWAN, DASH7, SigFox e NB-IoT;
- Análise do consumo de energia em tempo real para transmissão de dados;
- Estipulação da vida útil de uma bateria de acordo com a tecnologia LPWAN empregada;
- Avaliação de uma implementação IoT real para estudo de consumo energético.

### 3.1.2 Metodologia empregada

Para que fosse feita a análise do consumo energético, foi necessário estipular como seria realizada a aferição dos dados, por isso, Singh et al. (2020) discute com profundidade os principais pontos de consumo dos dispositivos LPWAN, como está representado pela Figura 17. Dada tal complexidade, foi considerado que o consumo durante as etapas de sensoriamento, processamento e transferência de dados são os mais predominantes e, por isso, foram eles os medidos na etapa de experimentação.

Figura 17 – Representação do consumo de energia por etapa de operação de um dispositivo LPWAN

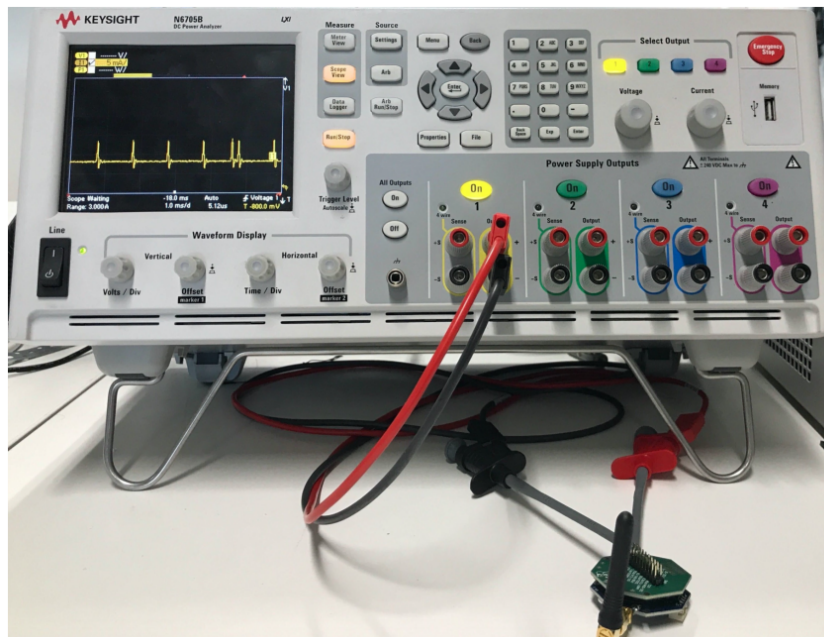


Fonte: Singh et al. (2020)

Além disso, para garantir a integridade do experimento, foi estipulada uma série de parâmetros e configurações entre os dispositivos: nenhum outro *hardware* externo deve ser conectado aos dispositivos, uso do mesmo tipo de bateria e com mesma capacidade para todos os dispositivos, uso somente de mensagens de *uplink* com pacotes de 5 bytes, nível de tensão de 3,7 V comum para a alimentação de todos os dispositivos.

Para a aferição dos dados, foi utilizado o analisador de potência N6705B da Keysight, conforme indica a Figura 18. Também foi utilizado um analisador de precisão de consumo energético da Joulescope.

Figura 18 – Estrutura de medição utilizada



Fonte: Singh et al. (2020)

Por fim, com as informações do valor de corrente média ( $I_{med}$ ) e do tempo de operação ( $T_{op}$ ) de cada etapa, a energia média consumida ( $E_{med}$ ) pode ser determinada pela Equação 3.1, uma vez que a tensão de operação da bateria ( $V_{op}$ ) já é conhecida.

$$E_{med} = V_{op} \cdot I_{med} \cdot T_{op} \quad (3.1)$$

Quanto ao experimento em uma aplicação de uso real, foram utilizadas duas implementações LoRaWAN diferentes: uma em uma estufa e outra em no subsolo para monitoramento do sistema de distribuição de água. As diferenças observadas em relação aos testes em laboratório são por conta de haver sensores acoplados aos *End Devices*, mais tempo durante as etapas de computação e exposição aos fatores externos.

Os demais experimentos com a tecnologia DASH7 não foram considerados, uma vez que o DASH7 não faz parte do escopo deste trabalho. Por questão de esclarecimento, os próximos parágrafos trarão uma breve explicação sobre essa tecnologia.

O DASH7 é um protocolo de comunicação baseado no padrão ISO/IEC 18000-7 para aplicações *Radio Frequency Identification* (RFID), operando em bandas ISM e sendo curado pelo grupo DASH7 *Alliance*. Todo o desenvolvimento do DASH7 está relacionado ao conceito *Bursty, Light, Asynchronous, Stealth, and Transitive* (BLAST), que busca permitir a implementação de redes com resposta curtas entre dispositivos, com *payload* máximo de 256 bytes, sendo as transmissões assíncronas. O conceito BLAST ainda indica que os dispositivos da rede serão atrelados aos seus respectivos *gateways*, de maneira que sinais de identificação não sejam necessário, e também permite que esses dispositivos transitem dentro da área de cobertura da rede, mudando de *gateway* conforme o necessário.

Existem três tipos de dispositivos em uma rede DASH7: *gateways*, *sub-controllers* e *end devices*. Tanto os *gateways* como os *end devices* operam de maneira análoga as outras tecnologias LPWAN, com destaque que os *end devices* implementam apenas uma versão mínima do protocolo, realizando varreduras intermitentes dos canais para detectar se algum pacote foi enviado, estando em modo de baixo consumo de energia nos demais momentos. Os *sub-controllers* operam essencialmente como *end devices*, com a exceção que eles implementam o protocolo DASH7 em sua integralidade.

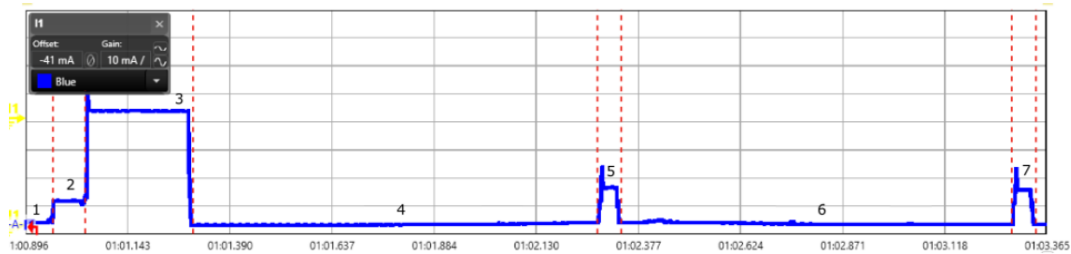
Para a modulação do sinal é utilizado *Gaussian Frequency Shift Keying* (GFSK), um tipo de modulação por chaveamento de frequência da portadora. Outro ponto importante são os dois modos possíveis de comunicação de uma rede DASH7: PULL e PUSH. No modo PUSH os *end devices* enviam periodicamente seus pacotes de dados para o *gateway*, conforme o seu padrão de operação predeterminado. Já no modo PULL, o *gateway* envia uma solicitação para que os *end devices* enviem seus pacotes de dados. Para que isso possa ocorrer, os *end devices* abrem janelas intermitentes de varredura para checar a emissão de tal solicitação.

### 3.1.3 Resultados alcançados

O experimento foi realizado com a tecnologia LoRaWAN, utilizando uma implementação classe A e com SF 9. O perfil do consumo energético para a transmissão de um *uplink* está representado na Figura 19. A Tabela 4 resume os resultados encontrados para cada estado de operação, sendo o estado 1 relativo ao período de hibernação do dispositivo, o estado 2 ao período de ativação do microcontrolador, o estado 3 indica a transmissão de dados, os

estados 4 e 6 representam a espera para as janelas de recepção 1 e 2, respectivamente, e os estados 5 e 7 representam as janelas de recepção 1 e 2, respectivamente.

Figura 19 – Perfil de consumo energético LoRaWAN



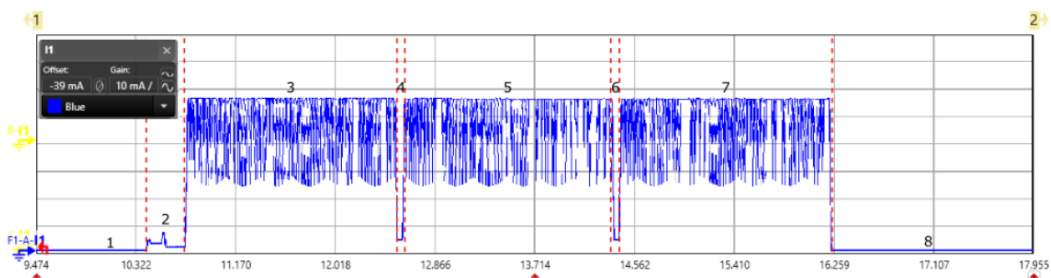
Fonte: Singh et al. (2020)

Estado	Duração (ms)	Corrente Média (mA)	Energia Consumida (mJ)
1	variável	0,081	variável
2	80,28	7,79	2,31
3	255,89	39,14	37,05
4	993,48	0,081	0,29
5	50,17	11,24	2,08
6	951,33	0,081	0,28
7	50,17	10,49	1,94

Tabela 4 – Dados medidos para LoRaWAN - Adaptado de Singh et al. (2020)

Semelhantemente ao LoRaWAN, o perfil de consumo para transmissão de um *uplink* para SigFox foi registrado conforme mostra a Figura 20, e na Tabela 5 está registrado os valores calculados para a energia média consumida ao longo de cada estado de operação, sendo os estados 4 e 8 estados de hibernação, os estados 4 e 6 períodos de espera entre transmissões, estado 2 o período de ativação do dispositivo e os estados 3, 5 e 7 as janelas de transmissão 1, 2 e 3, respectivamente.

Figura 20 – Perfil de consumo energético SigFox



Fonte: Singh et al. (2020)

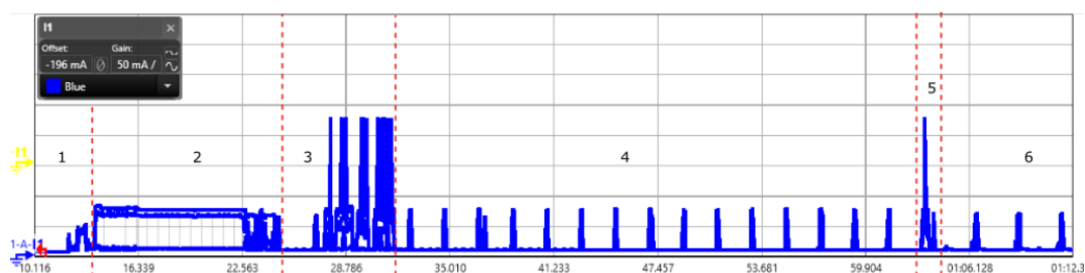
Nas Figuras 21 e 22 vê-se o perfil de consumo para o NB-IoT, e na Tabela 6 está o valor calculado da energia média consumida. O estado 1 corresponde ao período de inicialização

Estado	Duração (ms)	Corrente Média (mA)	Energia Consumida (mJ)
1 e 8	variável	0,0065	variável
2	316,6	2,06	2,46
3	1798	48,32	321,45
4 e 6	48,03	3,78	0,67
5	1795	49,5	328,75
7	1803	49,57	330,68

Tabela 5 – Dados medidos para SigFox - Adaptado de Singh et al. (2020)

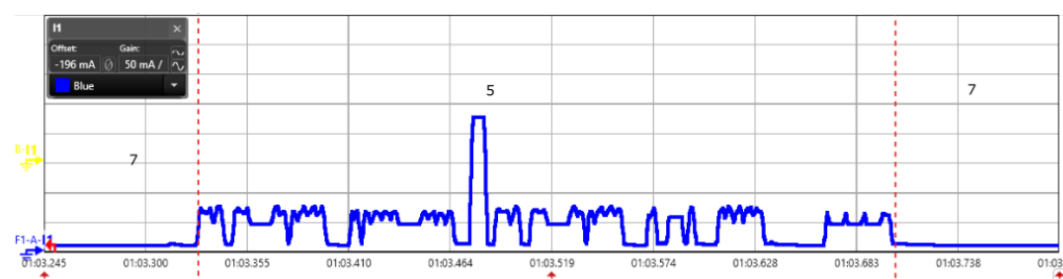
do dispositivo, no estado 2 o dispositivo realiza a ativação junto ao provedor de serviço, no estado 3 é aberto um *socket* para comunicação, os estados 4 e 6 dizem respeito ao modo de operação *Extended Discontinuous Reception Mode* (eDRX), no estado 5 é realizada a transmissão de dados e no estado 7 o dispositivo entra em hibernação. O modo de operação eDRX é um modo de hibernação, mas no qual o dispositivo abre algumas janelas de recepção para sinais de controle que ele pode receber.

Figura 21 – Perfil de consumo energético NB-IoT - Estados 1 a 6



Fonte: Singh et al. (2020)

Figura 22 – Perfil de consumo energético NB-IoT - Estados 5 e 7



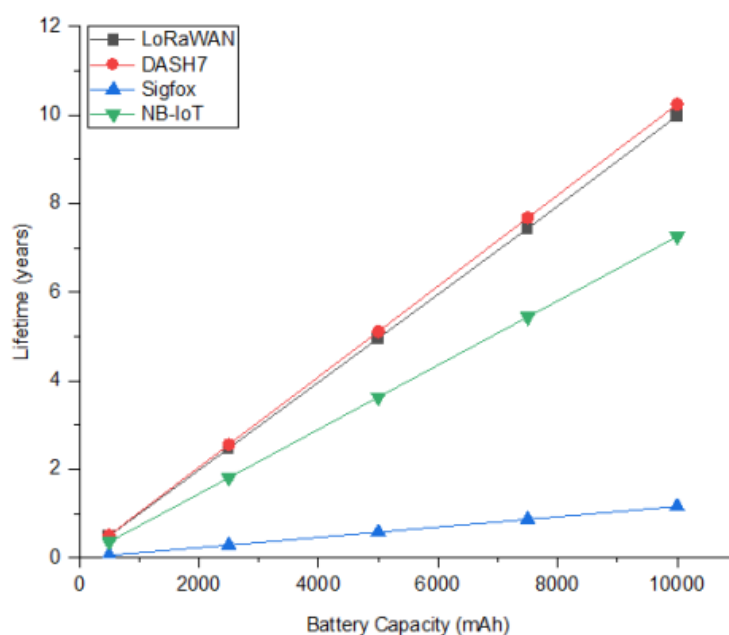
Fonte: Singh et al. (2020)

Por fim, foi estipulada a vida útil da bateria em função da sua capacidade, levando em consideração os dados adquiridos ao longo dos experimentos laboratoriais. A Figura 23 mostra o gráfico da vida útil estimada.

Estado	Duração (ms)	Corrente Média (mA)	Energia Consumida (mJ)
1	5390	8,46	167,52
2	11,03	57,63	2326,22
3	6930	28,07	717,94
4 e 6	31,0	9,58	1089,65
5	373	46,12	63,48
7	variável	0,1	variável

Tabela 6 – Dados medidos para NB-IoT - Adaptado de Singh et al. (2020)

Figura 23 – Vida útil de bateria por capacidade



Fonte: Singh et al. (2020)

No uso real de uma aplicação LoRaWAN para uma estufa, utilizando SF 9 e uma bateria de íon de Lítio de 1500 mAh, foi observado que a vida útil da bateria foi de 7 meses, sendo suficiente para transmitir 60840 mensagens. Na Tabela 7, os autores realizaram um levantamento do comportamento do dispositivo e a corrente média por operação.

Fase de Operação	Duração	Corrente Média (mA)
Leitura do sensor	82,28 ms	13,24
Transmissão de dados	249,8 ms	46,08
Modo inativo	5 min	6,01
Tempo integral para envio de uma mensagem	2,3 s	10,92

Tabela 7 – Dados medidos para o cenário real LoRaWAN - Adaptado de Singh et al. (2020)

## 3.2 Comparação Entre Tecnologias LPWAN: Baixo Consumo Energético com NB-IoT, LoRaWAN e Sigfox - (OELERS; NAUMANN, 2021)

### 3.2.1 Objetivos e motivação

Em Oelers e Naumann (2021), é indicado que muitos estudos realizados na área de LPWAN costumam mostrar o tempo de duração de baterias com valores pouco precisos, como 10 a 15 anos. Isso levou os autores a questionar o quão real é essa expectativa de tempo, uma vez que, na maioria dos casos, essas declarações não são pautadas em argumentos com dados. Isso serviu de inspiração para que o estudo comparando o consumo energético entre tecnologias LPWAN fosse realizado. Dada a importância atribuída ao LoRaWAN, SigFox e NB-IoT, essas foram as tecnologias escolhidas para o estudo dentre as demais opções LPWAN.

### 3.2.2 Metodologia empregada

Com a finalidade de garantir uma visão mais ampla, os autores realizaram diversas considerações em relação aos fatores que podem influenciar no consumo energético das tecnologias LPWAN, sendo destacado: o *link budget* do sinal transmitido, o tamanho máximo que um pacote de dados pode ter e o máximo número de mensagens diárias que cada uma das três tecnologias elencadas para estudo pode suportar.

Para determinar o *link budget* dos sinais, utilizou-se uma expressão conforme ilustra a Figura 24, que permite calcular a potência de recepção do sinal ( $P_{RX}$ ) em função da potência transmitida do sinal ( $P_{TX}$ ), do ganho da antena transmissora ( $G_{TX}$ ), das perdas em conectores no dispositivo transmissor ( $L_{TX}$ ), das perdas plásticas para o ambiente ( $L_{EN}$ ), das perdas relativas à propagação do sinal no meio ( $L_{PL}$ ), do ganho da antena receptora ( $G_{RX}$ ) e das perdas relativas aos conectores no dispositivo receptor ( $L_{RX}$ ). A Equação 3.2 permite, então, determinar o cálculo do *link budget* esperado.

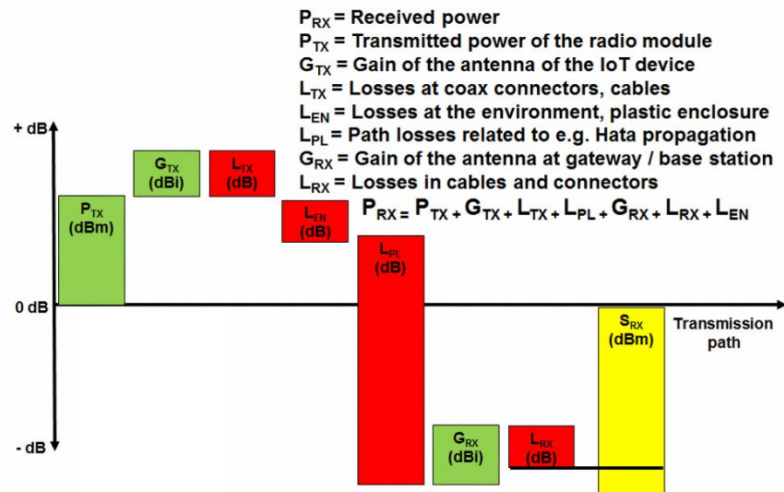
$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + L_{TX} + L_{EN} + L_{PL} + G_{RX} + L_{RX} \quad (3.2)$$

Dessa maneira, foi possível calcular o valor do *link budget* máximo para o LoRaWAN, SigFox e NB-IoT, sendo esses valores iguais a, respectivamente, 146 dB, 158 dB e 164 dB. Contudo, dado que o consumo energético para um enlace de 164 dB para o NB-IoT é



dez vezes maior que para um enlace de 154 dB, o segundo valor foi adotado para a fase experimental.

Figura 24 – Ilustração do cálculo do *Link Budget*



Fonte: Oelers e Naumann (2021)

O número máximo de bytes por pacote de dados para SigFox é conhecido e tem valor de 12 bytes para UL e 8 bytes para DL. No caso do LoRaWAN, é necessário conhecer as características da implementação, uma vez que o tempo de uso das bandas ISM é limitado, e fatores como SF e o tamanho do *payload* influenciam na duração do tempo de propagação do sinal. Com isso em mente, foi estipulado um pacote de dados com tamanho máximo de 11 bytes para LoRaWAN para os propósitos do estudo em voga. O NB-IoT possui valor distinto de *payload* quando se trata de um sinal de UL ou DL. Para o NB-IoT NB1 os valores são de 125 e 85, respectivamente, para UL e DL. Já para o NB-IoT NB2 esse valor passa a ser de 317 bytes para ambos os modos de transmissão.

O limite para o número máximo de mensagens SigFox em um dia é 140 para UL e 4 para DL. Para LoRaWAN, é discutido que o número máximo de mensagens diárias não é em nenhum momento expressamente limitado, contudo, há as restrições do uso dos canais ISM, o que levou os autores a considerar que uma implementação LoRaWAN utilizando SF 12 e *payload* limitado a 12 bytes iria possibilitar apenas um número de 8 mensagens por hora, levando em consideração ainda as retransmissões necessárias para casos de colisão de pacotes. Em transmissões NB-IoT não há um limite para o volume de dados enviados, uma vez que ele opera em bandas licenciadas, sendo esse uso normalmente limitado pelas operadoras.

Para o experimento foram desenvolvidas placas de circuito impresso específicas para o estudo, com dimensão de 55 por 85 mm e com módulos referentes as tecnologias LoRaWAN,

SigFox e NB-IoT. Para a medição foram utilizados alguns multímetros digitais da Keithley, um modelo da série 2100 e outro modelo DMM6500, um osciloscópio digital Tektronix 2004 e uma caixa de isolamento Willtek.

As medidas para LoRaWAN foram realizadas levando em consideração uma tensão de operação de 3,3 V e com *payload* de 12 bytes. O valor do *link budget* foi alternado entre 134 e 144 dB para os testes, além de terem sido considerados transmissões repetidas uma ou duas vezes para compensar uma suposta falta de sinal de *acknowledge* vindo da estação base. Os testes foram realizados para 12 bytes, mas os resultados para 24, 64 e 512 bytes de pacote de dados foram derivados matematicamente.

Para o SigFox a tensão de operação definida também foi de 3,3 V e valor padrão de pacote de dados de 12 bytes foi utilizado. Os testes foram executados considerando valores de *link budget* 134, 144 e 154 dB. Os valores para transmissões de pacote de dados de 24, 64, 72 e 512 bytes foram derivados matematicamente.

Por fim, para NB-IoT, as mesmas considerações podem ser feitas em relação aos casos anteriores, em especial em comparação ao SigFox, já que os valores para o *link budget* também foram de 134, 144, 154 dB.

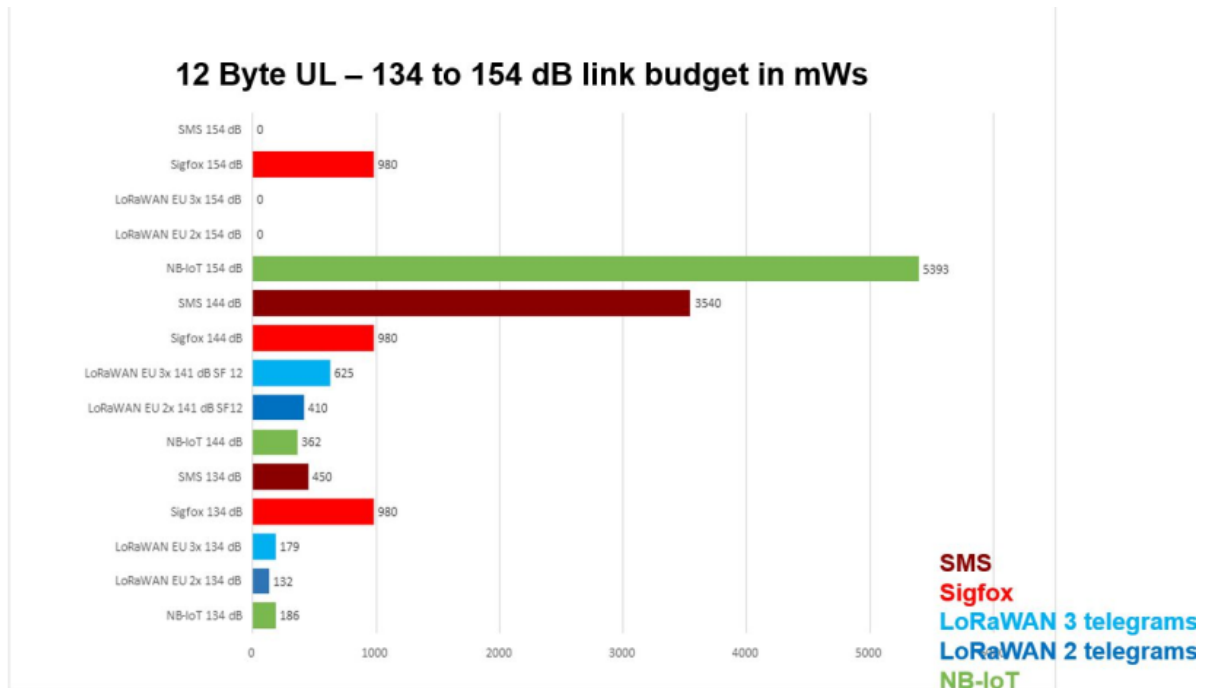
### 3.2.3 Resultados alcançados

Utilizando a caixa de isolamento, as placas impressas foram isoladas para serem realizadas as medições. Além de ser aferido os valores para LoRaWAN, SigFox e NB-IoT, foi também foi aferido para o envio de pacotes de dados SMS para efeito de comparação em relação as demais tecnologias LPWAN. Os resultados na Figura 25 mostra o resultado para um *payload* de 12 bytes e com diversos valores de *link budget*.

Já na etapa de experimentação relacionada aos resultados expostos na Figura 26, ocorre a transmissão de um pacote de dados de 24 bytes. É possível notar um crescimento linear para o SigFox, enquanto que o LoRaWAN, NB-IoT e, inclusive, SMS, não apresentam esse comportamento.

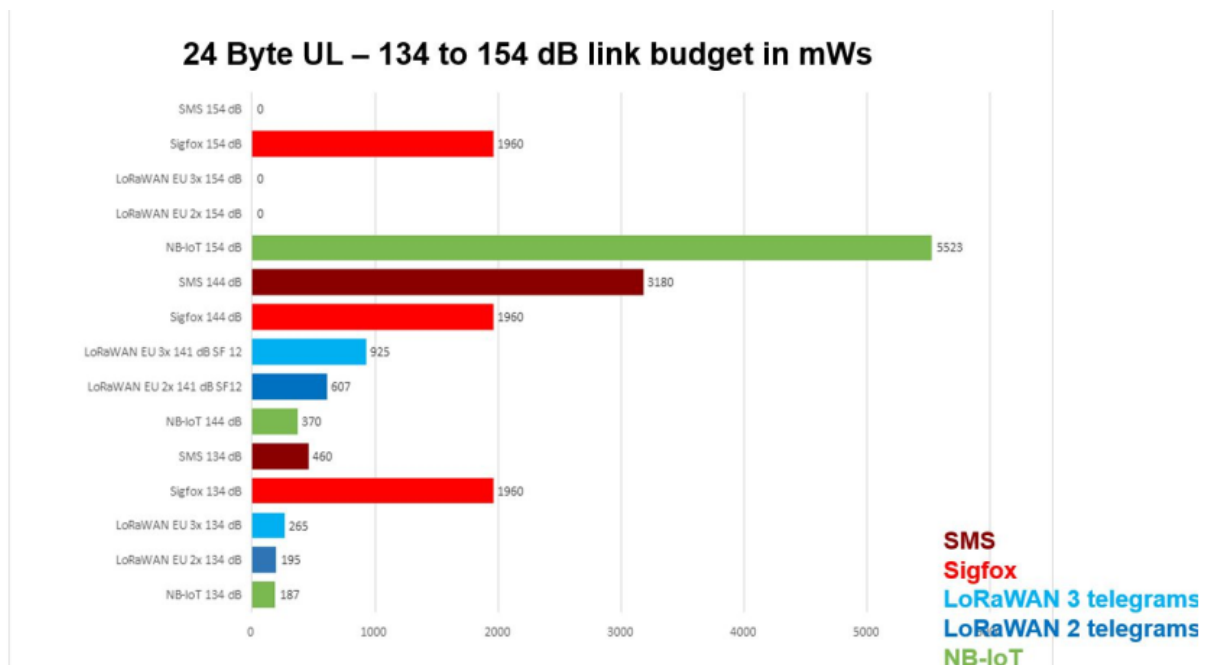
A Figura 27 indica que, para 64 bytes de *payload*, o comportamento verificado anteriormente para SigFox se mantém, enquanto que a energia necessária para o transporte de dados LoRaWAN começa a crescer comparativamente mais do que a transmissão NB-IoT. Um perfil de consumo contínuo fica cada vez mais claro para o NB-IoT, mostrando que a diferença em consumo energético é mais influenciada pelo *link budget* do que pelo pacote

Figura 25 – Resultados experimentais para *payload* de 12 bytes



Fonte: Oelers e Naumann (2021)

Figura 26 – Resultados experimentais para *payload* de 24 bytes

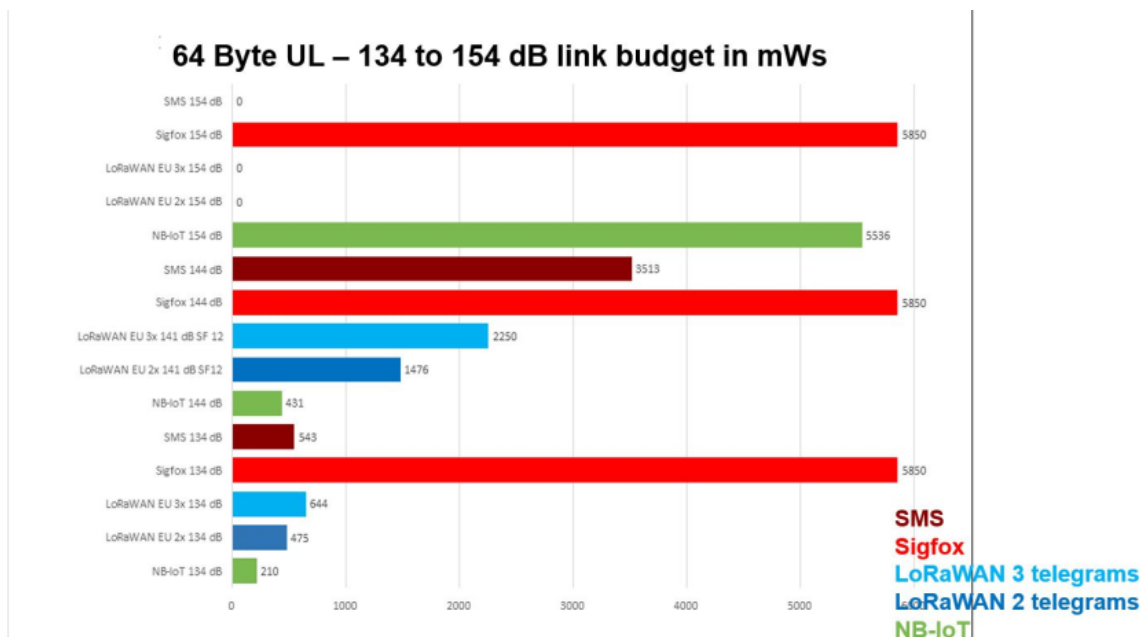


Fonte: Oelers e Naumann (2021)

de dados.

Na última etapa experimental, conforme demonstra a Figura 28, o comportamento do

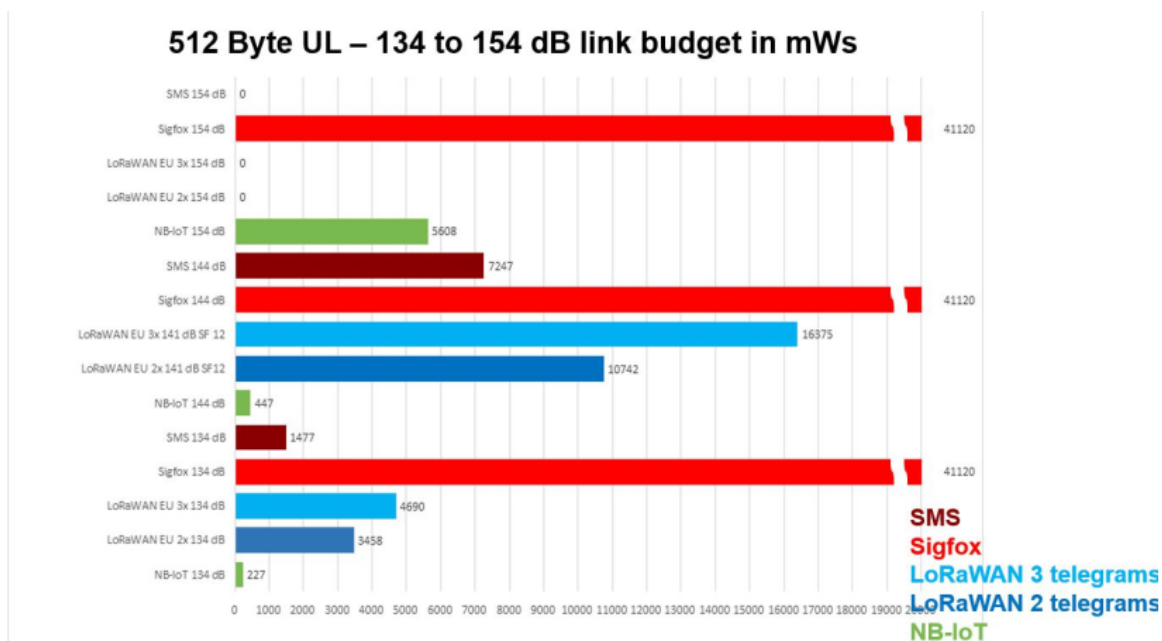
Figura 27 – Resultados experimentais para *payload* de 64 bytes



Fonte: Oelers e Naumann (2021)

NB-IoT quanto ao custo energético dos dados fica nítido: o consumo de fato não sofre influenciam suficiente do tamanho do pacote de dados transmitidos. Esse perfil é ainda mais notório se comparado as transmissões LoRaWAN e SigFox, que apresentaram um crescimento considerável dado o aumento do *payload*.

Figura 28 – Resultados experimentais para *payload* de 512 bytes



Fonte: Oelers e Naumann (2021)

### 3.3 NB-IoT Versus LoRaWAN: Uma Avaliação Experimental para Aplicações Industriais - (BALLERINI et al., 2020)

#### 3.3.1 Objetivos e motivação

Com o crescimento da chamada Indústria 4.0, a necessidade de dispositivos sem fios, autônomos, capazes de permitir a conexão de máquinas, faz surgir questões quanto as tecnologias que possam vir a gerar a resposta para tal demanda. Em Ballerini et al. (2020) esse problema é primordialmente solucionado por meio do emprego do LoRaWAN e do NB-IoT, contudo, os autores ressaltam que há grandes divergências entre tais tecnologias e suas aplicações usuais. Sendo assim, a falta de um estudo que abordasse a comparação entre tais ferramentas LPWAN para casos específicos levou ao desenvolvimento da pesquisa, visando contemplar aspectos comparáveis entre LoRaWAN e NB-IoT: qualidade de serviço, custo de implementação e consumo energético. Assim, os autores visam em seu trabalho contribuir com o enriquecimento dos estudos que permeiam tecnologias IoT, utilizando-se de dados vindouros de aplicações reais com ampla variação de configurações, como tamanho do pacote de dados e nível do sinal.

#### 3.3.2 Metodologia empregada

Para a execução dos procedimentos experimentais, em Ballerini et al. (2020) foi utilizado um dispositivo desenvolvido para sensoriamento de falhas estruturais em estruturas de concreto. Tal dispositivo, utilizando o microcontrolador STM32F373, é capaz de realizar a transmissão de sinais LoRa, por meio do módulo SX1276 da Semtech, ou NB-IoT, por meio do módulo SARA-N211 da U-Blox. Foi utilizada uma bateria de lítio  $Li-MnO_2$ , com tensão nominal de 4,2 V e capacidade de 1000 mAh. Durante os momentos de operação, o sensor do dispositivo demanda uma corrente de 23 mA para uma tensão de operação de 3 V. Com isso, a energia utilizada pelo sensor para aferir, filtrar e criptografar os dados adquiridos foi calculada em 70 mJ. Os dados adquiridos são encapsulados em um pacote de 12 bytes.

Para a aplicação LoRaWAN em estudo, o *Coding Rate* (CR), a proporção de redundância de dados do sinal, é de 4/5, o número de símbolos utilizados para o preâmbulo é 8 e a largura de banda de 125 kHz. As medidas foram realizadas para o que foi considerado um ciclo de operação: geração do pacote de dados, criptografia, transmissão, tempo de espera para abrir a primeira janela de recepção e a janela de recepção para receber o sinal de *acknowledge*. As medidas foram realizadas levando em conta pacotes com 12, 24 e 36 bytes

de dados, o que é equivalente ao envio de, respectivamente, 1, 2 e 3 medidas realizadas pelo sensor. Outro ponto importante para a análise LoRaWAN diz respeito quanto ao *Datarate* - DR (tradução livre, Taxa de Transferência de Dados), uma propriedade que indica a velocidade com a qual os bits do pacote de dados são transmitidos, possuindo relação direta com o TOA do sinal e sendo afetado pelo CR, SF e BW, cujo valor estimado (DRE) está demonstrado pela Equação 3.3 (FABER et al., 2020).

$$DRE = SF \cdot \left( \frac{BW}{2^{SF}} \right) \cdot \left( \frac{4}{4 + CR} \right) \quad (3.3)$$

Em condições semelhantes ao LoRaWAN, os testes para NB-IoT foram realizados nas mesmas condições físicas de implementação, sendo variado o tamanho do *payload* e o valor de *Received Signal Strength Indication* - RSSI (tradução livre, Indicador de Nível do Sinal Recebido), já que tal indicador possui relação direta com o consumo de energia do módulo NB-IoT. Para efeitos de comparação, foi estimado que um valor aproximado de -80 dBm de RSSI seria considerado bom (G), -110 dBm mediano (M) e -130 dBm como ruim (B), e para cada nível de RSSI foram realizadas transmissões com 10, 50, 100 e 400 bytes. Para uniformidade dos dados, cada teste foi mensurado 50 vezes, tendo o valor médio das amostras calculado ao final. Todas as aferições foram realizadas por meio de um resistor *shunt* de 10 mΩ e tensão nominal de 3,6 V com um osciloscópio Tektronix modelo MDO3014.

### 3.3.3 Resultados alcançados

A etapa de experimentação em relação ao LoRaWAN permitiu averiguar que o módulo SX1276 requer uma corrente de 87 mA para transmissão de um sinal de 17 dBm de potência e 11,5 mA quando opera como receptor, sendo ambos os casos para uma tensão de operação de 3 V. Sendo assim, por meio da Equação 3.1 é possível determinar a energia necessária para um ciclo de operação LoRaWAN com transmissão e recepção de um sinal de *acknowledge* da estação base, sendo necessário conhecer a mais apenas o tempo gasto para tal operação. Para determinar o tempo de operação para a transmissão de um pacote ( $T_{Packet}$ ), que é formado pelo tempo de transmissão ( $T_{tx}$ ) dos dados, pelo tempo de espera para a abertura da primeira janela de recepção ( $T_{rx1}$ ) e pelo tempo de duração da janela de recepção ( $T_{rxw}$ ), é utilizada a Equação 3.4. O tempo de transmissão  $T_{tx}$  por sua vez é determinado pelo tempo de transmissão de cada símbolo do preâmbulo ( $N_{pre}$ ), dos 13 bytes fixos que formam o *overhead* LoRaWAN e dos símbolos que formam o pacote de dados da mensagem transmitidas ( $N_{PHY}$ ), conforme mostra a Equação 3.5. O número de símbolos que formam o pacote de dados  $N_{PHY}$  é determinado pela Equação 3.6, no qual

$PL$  equivale ao tamanho do *payload*. Por fim, foi mensurada a energia necessária para ser estabelecida a primeira conexão e autenticação com o servidor LoRaWAN para realizar a troca entre os dispositivos das chaves de criptografia. Para essa etapa foi considerado a operação com três DRs diferentes: DR0, DR2 e DR5. Para DR0 a energia necessária para essa primeira conexão foi de 581,29 mJ, enquanto que para DR2 foi de 172,25 mJ e DR5 62,03 mJ.

$$T_{Packet} = T_{tx} + T_{rx1} + T_{rxw} \quad (3.4)$$

$$T_{tx} = \frac{2^{SF}}{BW} \cdot (N_{pre} + 4,25 + N_{PHY}) \quad (3.5)$$

$$N_{PHY} = 8 + \max \left[ \text{ceil} \left[ \frac{28 + 8 \cdot PL - 4 \cdot SF}{4 \cdot SF} \right] \cdot (CR + 4), 0 \right] \quad (3.6)$$

Com isso em mente, os autores conseguiram determinar os valores estimados para a transmissão com pacote de dados de tamanho variado e com diferentes DR. A Tabela 8 indica os valores de energia por bit (EPB) utilizados para a transmissão dos dados durante as etapas de experimentação LoRaWAN 1, 2 e 3, que dizem respeito aos testes com *payload* de 12, 24 e 36 bytes, respectivamente. Semelhantemente, a Tabela 9 indica a energia por pacote (EPP) necessária para a transmissão dos dados durante as mesmas etapas 1, 2 e 3.

DR	SF	DRE (bps)	EPB1 (mJ)	EPB2 (mJ)	EPB3 (mJ)
DR0	12	293	6,69	5,31	4,00
DR2	10	977	1,68	1,30	1,01
DR5	7	5469	0,30	0,23	0,16

Tabela 8 – Valores de EPB para os testes com LoRaWAN - Adaptado de Ballerini et al. (2020)

DR	SF	DRE (bps)	EPP1 (mJ)	EPP2 (mJ)	EPP3 (mJ)
DR0	12	293	641,28	1017,60	1152,01
DR2	10	977	161,28	249,59	290,88
DR5	7	5469	28,32	43,2	46,08

Tabela 9 – Valores de EPP para os testes com LoRaWAN - Adaptado de Ballerini et al. (2020)

Para determinar o valor do consumo energético para o experimento com NB-IoT, foi utilizada a Equação 3.7 na qual a energia média de operação ( $E_{med}$ ) é determinada pela média aritmética do produto entre a tensão de operação ( $V_{op}$ ), a corrente de operação mensurada a cada amostragem ( $I_t^{op}$ ) e o tempo de operação por amostragem ( $T_t^{op}$ ). A tensão

de operação para o módulo SARA-N211 é de 3,6 V, assim a Tabela 10 demonstra os valores encontrados durante o período experimental, indicando, para cada etapa, um identificador (ID), a categoria do sinal (C) de acordo com os valores definidos - G, M e B, o tempo de operação do módulo para a transmissão do sinal ( $T_{op}$ ), a corrente máxima registrada ( $I_{max}$ ), a energia média determinada ( $E_{med}$ ) e o valor real de RSSI da transmissão. O valor da energia necessária para estabelecer a conexão com a estação base também foi estipulado para as três categorias de sinal, sendo de 15843 mJ para uma sinal tipo G, 17182 mJ para M e 19124 mJ para B.

$$E_{med} = \frac{1}{50} \sum_{k=0}^{49} \left[ \sum_t (V_{op} \cdot I_t^{op} \cdot T_t^{op}) \right]_k \quad (3.7)$$

ID	C	PL (bytes)	$T_{op}$ (s)	$I_{max}$ (mA)	$E_{med}$ (mJ)	RSSI (dBm)
a	G	10	11,9	138	2063	-83
b	G	50	11,9	146	1858	-81
c	G	100	12,0	135	1856	-75
d	G	400	12,2	138	2067	-75
e	M	10	13,7	245	2677	-112
f	M	50	12,8	232	2453	-109
g	M	100	12,6	219	2379	-110
h	M	400	12,8	225	2386	-107
i	B	10	46,6	151	9047	-130
l	B	50	41,1	175	7641	-136
m	B	100	37,2	169	6818	-135
n	B	400	40,5	185	7552	-134

Tabela 10 – Valores determinados para NB-IoT - Adaptado de Ballerini et al. (2020)

O valor da energia por bit está indicado na Tabela 11. Para tanto foram transmitidos pacotes de 12 bytes referentes as amostragens do sensor, sendo que foram enviados conjuntos contendo 1, 2, 3, 8 e 33 amostras, que equivalem a pacotes de 12, 24, 36, 96 e 396 bytes, respectivamente.

C	EPB1 (mJ)	EPB2 (mJ)	EPB3 (mJ)	EPB8 (mJ)	EPB33 (mJ)
G	29,4	14,8	9,8	3,6	0,9
M	34,5	17,2	11,5	4,2	1,0
B	89,6	44,9	29,9	11,2	2,7

Tabela 11 – Energia por bit para transmissões NB-IoT - Adaptado de Ballerini et al. (2020)



## 4 DISCUSSÃO

Ao se levar em consideração os resultados dos estudos analisados no capítulo anterior, começa a ser possível entender como ocorre o consumo de energia para operação dos dispositivos LoRaWAN, NB-IoT e SigFox.

A análise dos resultados encontrados em Singh et al. (2020) demonstra que, ao analisar o consumo energético em uma etapa laboratorial, a energia para transmissão de um pacote com 5 bytes é consideravelmente maior para um dispositivo SigFox. A Tabela 12 demonstra claramente isso, com um valor médio por etapa de transmissão de aproximadamente 326 mJ, muito superior ao necessário para a transmissão de dados LoRaWAN, 37 mJ, e NB-IoT, 63,48 mJ, de acordo com a Tabela 12. Interessante notar que a Tabela 6 também apresenta valores para conexão e autenticação do dispositivo a rede NB-IoT, contudo, tais etapas não são repetidas a cada transmissão e, por isso, seu valor acaba sendo diluído ao longo do tempo de operação do dispositivo, isso justifica o fato da Figura 23 indicar um tempo de vida-útil de bateria maior para dispositivos NB-IoT do que SigFox. No geral, as etapas laboratoriais desse estudo favorecem o uso da tecnologia LoRaWAN, a apontando como aquela que pode proporcionar maior eficiência energética.

	Energia Consumida (mJ)
LoRaWAN	37,05
NB-IoT	63,48
SigFox	327

Tabela 12 – Valores de energia de transmissão para LoRaWAN, NB-IoT e SigFox - Adaptado de Singh et al. (2020)

Os resultados obtidos em Oelers e Naumann (2021) trazem um aprofundamento quanto ao consumo energético ao se levar em conta ambos *payload* e *link budget*. O que se pode perceber, por meio das Figuras 25 a 28, é que a medida que o tamanho do pacote de dados aumenta, o uso de um dispositivo LoRaWAN passa a ser preterido em relação ao NB-IoT. Comparativamente, o sinal NB-IoT também aparenta demonstrar um crescimento menor quando o *link budget* é variado de 134 para 144 dB do que o sinal LoRaWAN. É importante destacar, no entanto, que os resultados levam em consideração retransmissões do sinal LoRaWAN para compensar a perda de pacotes, sem que isso ocorra necessariamente. O comportamento do dispositivo SigFox não demonstra ser alterado por conta das variações de *link budget*, sendo ele preferível em relação ao NB-IoT para valores de 154 dB. Isso muda quando o pacote de dados passa a ser maior do que 24 bytes, caso no qual o dispositivo NB-IoT demonstra ter melhor eficiência energética a 154 dB. Os dados apresentados em Oelers e Naumann (2021), começam a indicar que uma implementação LoRaWAN pode nem sempre ser a ideal, como foi sugerido pelos dados em Singh et al. (2020), sendo que

em alguns casos o uso de uma rede NB-IoT se mostra mais interessante e viável em relação ao nível de consumo de energia, contudo, uma vez mais o uso da tecnologia SigFox se mostra uma opção com pior eficiência energética do que LoRaWAN e NB-IoT, salvas poucas exceções.

Em Ballerini et al. (2020) não há uma análise relacionada ao uso de um dispositivo SigFox, no entanto, dado o detrimento que tal tecnologia possui em relação ao LoRaWAN e NB-IoT quanto a eficiência energética, acreditasse que um aprofundamento entre estes dois seja mais interessante e, por isso, os resultados desse estudo foram levados em conta nesse trabalho. Analisando a Tabela 13 se conclui que LoRaWAN consome menos energia para operação de transmissão de poucos dados, sendo esse comportamento predominante até o momento que o tamanho do pacote de dados começa a aumentar, colocando então o NB-IoT numa posição mais favorável.

	EPB1 (mJ)	EPB2 (mJ)	EPB3 (mJ)	EPB8 (mJ)	EPB33 (mJ)
LoRaWAN	6,69	5,31	4,00	N/A	N/A
NB-IoT	89,6	44,9	29,9	11,2	2,7

Tabela 13 – Valores de EPB para os testes com LoRaWAN (DR5) e NB-IoT (B) - Adaptado de Ballerini et al. (2020)

A análise desses três estudos leva a conclusão esperada de que o tempo de transmissão do sinal é o fator de maior influência em relação ao custo energético dos dispositivos LPWAN. Contudo, apesar do tamanho do pacote de dados influenciar no TOA do sinal transmitido, a contribuição da taxa de transmissão dos dados acaba se sobressaindo. Isso pode ser notado pelas Tabelas 8 e 9, que demonstram como a taxa de transmissão no LoRaWAN influencia grandemente no consumo energético. Um detalhe importante a ser levado em conta é que um aumento do *Datarate* surge com uma redução no alcance total do sinal dado aumento do valor do SF, por isso, estudos como Oelers e Naumann (2021), que utilizam SF 12 para garantir uma maior cobertura do sinal, acabam apresentando valores piores de consumo de energia para LoRaWAN.

Nos dois estudos vistos, Singh et al. (2020) e Oelers e Naumann (2021), o SigFox acaba ficando sempre em último lugar, apresentando um consumo energético consideravelmente superior em relação as demais tecnologias envolvidas. Esse fato pode ser explicado dada a ocorrência de 3 transmissões em quaisquer casos, do fato da potência de transmissão ser a mesma independente do *link budget*, como as Figuras 25 a 28 deixam claro, pelo fato da modulação BPSK conseguir representar apenas um bit por símbolo, o que leva, juntamente com curta largura de banda, o sinal a ser transmitido a taxas muito baixas, fazendo com que o módulo transceptor opere por um período mais longo, como ilustra a Figura 20.

O NB-IoT se comporta de maneira distinta das demais tecnologias, permitindo que sejam enviado um grande número de dados por transmissão sem que haja um crescimento no custo energético, como visto na Tabela 6. Isso implica num benefício em realizar transmissões esporádicas de dados agrupados ao longo do tempo, tornando o NB-IoT mais vantajoso do que o LoRaWAN nesse cenário. Outro comportamento visto na Tabela 6 é que o aumento do consumo energético quando o sinal passa de um ponto de operação com boa cobertura para um com cobertura mediana é menor do que quando passa de um ponto com cobertura mediana para ruim, sendo que Ballerini et al. (2020) indica que esse comportamento é por conta do aumento da potência de transmissão do sinal para compensar a piora da cobertura para que, assim, o módulo evite a retransmissão de pacotes, o que é um grande agravante para o alto consumo quando a cobertura do sinal é considerada ruim.

Como é indicado em Barrachina-Muñoz et al. (2019), é possível determinar uma rede LPWA que possua menor custo energético de operação com a simples mudança de uma topologia de rede do tipo estrela para uma *mesh* que permita a retransmissão de pacotes. Essa proposta dos autores é corroborada pelos dados visto nas Tabelas 8 e 9, nas quais o custo para a transmissão de pacotes de dados com SF 7 é consideravelmente menor que utilizando SF 12. Isso indica que, ainda que o alcance com SF 7 seja reduzido, utilizando alguns saltos a mais na rede, por meio de repetição de pacotes, a cobertura da rede pode ser mantida, melhorando a sua eficiência energética, contanto que o número de saltos fique dentro de um número mínimo. Uma outra abordagem é proposta em Costa et al. (2022), no qual uma rede híbrida formada por LoRa e ZigBee foi elaborada para melhorar a alocação de recursos e qualidade de serviço da rede, demonstrando, uma vez mais, a possibilidade de se utilizar dispositivo LoRa com menor SF e melhor eficiência energética.

## 5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Esse trabalho realizou o estudo das tecnologias LoRaWAN, NB-IoT e SigFox, levando em consideração, dentre as principais características de implementações LPWAN, o consumo energético de cada uma delas. Para que isso fosse possível, foram revisados outros trabalhos realizados com mesma temática, por meio do emprego de revisão literária de artigos e estudos.

Conforme demonstrado ao longo da etapa de revisão de estudos correlacionados, os resultados são variáveis em relação a implementação dessas tecnologias. Por conta disso, o capítulo de aprofundamento das tecnologias se mostrou necessário, pois desta forma, permitiu que apesar das diferenças entre as metodologias dos trabalhos correlacionados, os resultados pudessem ser analisados e comparados.

Pela análise dos resultados dos trabalhos correlacionados foi possível constatar a grande influência que o tempo de transmissão do sinal possui no custo energético. Além disso, foi constatado que a utilização de uma rede com tecnologia SigFox apresenta pior eficiência energética na grande maioria dos casos quando comparada a uma rede implementada por meio das tecnologias LoRaWAN ou NB-IoT. Outro ponto alcançado por este trabalho foi a oportunidade de se utilizar NB-IoT em aplicações que possibilitem o envio de pacotes esporadicamente e cuja produção de dados seja considerável. Nos demais casos, LoRaWAN mostra-se uma tecnologia mais eficiente quanto ao custo de energia para transmissão de dados. Por fim, ainda foi possível observar como a variação das configurações de SF permite que instalações LoRaWAN melhorem a eficiência energética da rede.

Por fim, esse trabalho pôde apresentar diversos resultados que podem ser encontrados na literatura sobre o tema de eficiência energética em dispositivos LPWAN, proporcionando uma análise ampla. Aceitasse que as conclusões e discussões geradas ao longo dessa monografia sirvam de base para melhor compreensão do comportamento do custo energético de redes LPWAN, em especial redes LoRaWAN, NB-IoT e SigFox, além de fomentar futuros projetos e pesquisas nessa área.

Concernente a trabalhos futuros, entende-se que há grande relevância em estudar a possibilidade de redes mistas para a melhora da performance e eficiência energética das redes LPWAN. Além disso, acreditasse haver também, por conta das conclusões a cerca da variação do SF em redes LoRaWAN para redução do custo de energia por transmissão, pertinência no estudo de redes LoRaWAN que possibilitem a retransmissão de pacotes por meio de dispositivos repetidores de sinal LoRa, garantido, assim, a ampla cobertura e lançando mão da economia energética provida pelo uso de valores baixos de SF.

## REFERÊNCIAS

- 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. Citado na página 15.
- BALLERINI, M.; POLONELLI, T.; BRUNELLI, D.; MAGNO, M.; BENINI, L. Nb-iot versus lorawan: An experimental evaluation for industrial applications. IEEE Transactions on Industrial Informatics, v. 16, n. 12, p. 7802–7811, 2020. Citado 9 vezes nas páginas 8, 13, 17, 32, 44, 46, 47, 49 e 50.
- BARRACHINA-MUÑOZ, S.; ADAME, T.; BEL, A.; BELLALTA, B. Towards energy efficient lpwans through learning-based multi-hop routing. In: 2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT). [S.l.: s.n.], 2019. p. 644–649. Citado na página 50.
- BEYENE, Y. D.; JANTTI, R.; TIRKKONEN, O.; RUTTIK, K.; IRAJI, S.; LARMO, A.; TIRRONEN, T.; TORSNER, J. Nb-iot technology overview and experience from cloud-ran implementation. IEEE Wireless Communications, v. 24, n. 3, p. 26–32, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 28.
- COSTA, W. d. S.; SANTOS, W. G. V. dos; CAMPOREZ, H. A. F.; FABER, M. J.; SILVA, J. A. L.; SEGATTO, M. E. V.; ROCHA, H. R. O. Planning and resources allocation of a hybrid iot network using artificial intelligence. Applied Sciences Education eJournal, 2022. Citado na página 50.
- FABER, M. J.; ZWAAG, K. M. van der; SANTOS, W. G. V. dos; ROCHA, H. R. d. 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. Citado na página 45.
- GMI. Low Power Wide Area Network (LPWAN) Market Size By Component. Global Market Insights, 2021. Disponível em: <<https://www.gminsights.com/industry-analysis/low-power-wide-area-network-lpwan-market>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.
- HERNANDEZ, D. M.; PERALTA, G.; MANERO, L.; GOMEZ, R.; BILBAO, J.; ZUBIA, C. Energy and coverage study of lpwan schemes for industry 4.0. In: 2017 IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics (ECMSM). [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6. Citado na página 17.
- IOT-ANALYTICS. 5 things to know about the LPWAN market in 2021. IoT Analytics, 2021. Disponível em: <<https://iot-analytics.com/5-things-to-know-lpwan-market/>>. Citado na página 15.
- KIM, D.-H.; LEE, E.-K.; KIM, J. Experiencing lora network establishment on a smart energy campus testbed. Sustainability, v. 11, n. 7, 2019. ISSN 2071-1050. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/11/7/1917>>. Citado na página 22.

LIANDO, J.; GAMAGE, A.; TENGOURTIUS, A.; LI, M. Known and unknown facts of lora: Experiences from a large-scale measurement study. ACM Transactions on Sensor Networks, v. 15, p. 1–35, 02 2019. Citado na página 23.

LORA-ALLIANCE. A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™. 2015. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/what-is-lorawan.pdf>>. Citado na página 24.

LYKOV, Y.; PANIOTOVA, A.; SHATALOVA, V.; LYKOVA, A. Energy efficiency comparison lpwans: Lorawan vs sigfox. In: 2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S T). [S.l.: s.n.], 2020. p. 485–490. Citado na página 17.

MEKKI, K.; BAJIC, E.; CHAXEL, F.; MEYER, F. Overview of cellular lpwan technologies for iot deployment: Sigfox, lorawan, and nb-iot. In: 2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops). [S.l.: s.n.], 2018. p. 197–202. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

MUTESCU, P.-M.; PETRARIU, A. I.; LAVRIC, A. Wireless communications for iot: Energy efficiency survey. In: 2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–4. Citado na página 17.

OELERS, W.; NAUMANN, H. LPWAN COMPARISON: Low Energy Consumption with NB-IoT, LoRaWAN and Sigfox. Triptec HL UG, 2021. Disponível em: <[https://www.akoriot.com/lpwan\\_comparison\\_study](https://www.akoriot.com/lpwan_comparison_study)>. Citado 9 vezes nas páginas 13, 17, 32, 39, 40, 42, 43, 48 e 49.

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. Citado 3 vezes nas páginas 16, 17 e 28.

SEMTECH. LoRa® and LoRaWAN®: A Technical Overview. 2019. Disponível em: <[https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa\\_and\\_LoRaWAN-A\\_Tech\\_Overview-Downloadable.pdf](https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf)>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 24.

SINGH, R. K.; PULUCKUL, P. P.; BERKVENNS, R.; WEYN, M. Energy consumption analysis of lpwan technologies and lifetime estimation for iot application. Sensors, v. 20, n. 17, 2020. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/20/17/4794>>. Citado 12 vezes nas páginas 8, 13, 17, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 48 e 49.

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>>. Citado na página 26.

TTN. Frequency Plans by Country. The Things Network, c2015. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/frequencies-by-country/>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 20.

XIONG, F. Digital Modulation Techniques. [S.l.]: Artech House, 2006. Citado 5 vezes nas páginas 8, 27, 28, 29 e 30.