



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE INFORMATICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIENCIAS DA COMPUTAÇÃO

ESAU BERMUDEZ SANCHEZ

UM ESTUDO DE CONSUMO DE ENERGIA DE LoRaWAN

Recife
2021

ESAU BERMUDEZ SANCHEZ

UM ESTUDO DE CONSUMO DE ENERGIA DE LoRaWAN

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Área de Concentração: Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos

Orientador (a): Djamel Fawzi Hadj Sadok

Recife
2021

Catálogo na fonte
Bibliotecária Monick Raquel Silvestre da S. Portes, CRB4-1217

B516e Bermudez Sanchez, Esau
Um estudo de consumo de energia de LoRaWAN / Esau Bermudez Sanchez. – 2021.
106 f.: il., fig., tab.

Orientador: Djamel Fawzi Hadj Sadok.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CIn, Ciência da Computação, Recife, 2021.
Inclui referências e apêndices.

1. Redes de computadores. 2. Energia - consumo. I. Sadok, Djamel Fawzi Hadj (orientador). II. Título.

004.6 CDD (23. ed.) UFPE - CCEN 2021 – 166

Esau Bermudez Sanchez

“UM ESTUDO DE CONSUMO DE ENERGIA DE LoRaWAN”

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação. Área de concentração: Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos.

Aprovado em: 10/06/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Nelson Souto Rosa
Centro de Informática / UFPE

Prof. Dr. Glauco Estácio Gonçalves
Departamento de Estatística e Informática / UFRPE

Prof. Dr. Djamel Fawzi Hadj Sadok
Centro de Informática/ UFPE
(Orientador)

Dedicado a quem possui tudo o que existe, o visível e o invisível, e quem antes de o mundo existir tinha este momento reservado para mim. Ao Todo-Poderoso, que é, e sempre será por todos os séculos ... Deus!

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus pelos dons recebidos e sua graça especial em minha vida ao longo dessa jornada.

Agradeço à meus pais Esau e Demetria por seu amor incondicional, e também em especial à minha esposa Johanna Castellanos porque contigo tenho muito mais do que eu mereço, contigo tenho muito mais do que eu sempre sonhei, já que contigo posso dar tudo e nunca perder. E meus filhos Esau Jr. e Nathan.

Aos meus colegas do laboratório e estudo, pela parceria, paciência e compreensão por todas as vezes que deixarão de fazer qualquer outra coisa para ajudar-me, vocês são uns “Calidosos”. Ao meu orientador, Djamel Fawzi Hadj Sadok, pela parceria e paciência ao longo dessa jornada, e a todos os professores que de uma forma ou de outra contribuíram com seus conhecimentos nas aulas para que hoje chegasse a esta instância, em especial para o professor Paulo Romero Martins Maciel o “Patrão” pelos incentivos e por acreditar em minhas capacidades.

RESUMO

No universo da Internet das Coisas (UIoT), LoRa e seu protocolo LoRaWAN tornaram tecnologias representativas em Redes de baixa potência e longa distância (LPWAN). Neste dissertação se discute o protocolo LoRaWAN, que funciona no espectro que está abaixo de um Giga Hertz. A análise começa com uma visão geral de seu alcance, desempenho, tempo útil para carga e comparações de alguns de seus processos e desempenho. Por outro lado, o conceito de consumo de energia em LPWANs é abordado também, já que é um dos tópicos mais comentados e ganhou interesse especial neste tipo de tecnologia. O consumo de energia em LPWANs, como em LoRaWAN, desempenha um papel importante na determinação da vida útil em redes de sensores sem fio. A dissertação, examina o uso de diferentes tecnologias de baterias e o impacto das camadas de controle de acesso ao meio (MAC) e física (PHY). Examinamos o impacto de parâmetros como fator de propagação, detecção de atividade de canal, Taxa de código e frequências de canal no consumo de energia. Entre as métricas que monitoramos neste cenário, a eficiência energética e seu impacto na vida útil da bateria para um melhor desempenho. Nós descobrimos que ambas as tecnologias descarregam de maneiras semelhantes, enquanto as baterias de lítio duram mais tempo e são mais econômicas. A análise é realizada com a plataforma CupCarbon, uma vez que possui um ambiente gráfico muito amigável e seu resultado final está de acordo com o que é necessário para este tipo de tecnologia.

Palavras-chaves: IoT; LoRaWAN; consumo de energia; CupCarbon; LPWAN; UIoT.

ABSTRACT

In the Internet of Things Universe (UIoT), LoRa and its LoRaWAN protocol have become a representative technology in Low Power and Long Distance Networks (LPWANs). This dissertation discusses the LoRaWAN protocol, which works in the spectrum that is below a Giga Hertz. The analysis starts with an overview of its range, performance, load time, sensor analysis, airtime and comparisons of some of its processes and performance. In addition, the concept of energy consumption in LPWANs is also addressed. Energy consumption in LPWANs, as in LoRaWAN, plays an important role in determining the useful life of wireless sensor networks. In this dissertation, we examine the use of different battery technologies and the impact of the media layer of access control (MAC) and layers of the physical layer (PHY) on energy consumption. Among the metrics we monitor in this scenario there are energy efficiency and its impact on battery life for better performance. We examined the impact of the physical layer and MAC LoRa parameters like propagation factor, channel activity detection, code rate and channel frequencies on energy consumption. We found that both technologies discharge in similar ways, while Lithium batteries last longer and are more economical. The analysis is performed with the CupCarbon platform, since it has a very friendly graphic environment and its final result is in accordance with what is necessary for this type of technology.

Keywords: IoT; LoRaWAN; energy consumption; CupCarbon; LPWAN; UIoT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas dos processos	23
Figura 2 – LoRa Alliance Parameters	30
Figura 3 – Universe Internet of Things (UloT)	34
Figura 4 – Bluetooth vs WiFi	36
Figura 5 – Arquitetura LoRa	40
Figura 6 – Parametros da camada fisica do dispositivo	43
Figura 7 – Formato de quadro	44
Figura 8 – Acesso a um canal LoRa	44
Figura 9 – Camadas 802	47
Figura 10 – Channel occupation	48
Figura 11 – Channel occupation	48
Figura 12 – Carga-Descarga	57
Figura 13 – Sensor	57
Figura 14 – Sensors Network	59
Figura 15 – Bite Rate1	63
Figura 16 – Rb coding	63
Figura 17 – Tpreamble	64
Figura 18 – Symbol duration	64
Figura 19 – Foward Error Correction	64
Figura 20 – ToA with different CR vs SF	65
Figura 21 – Time On Air vs SF	65
Figura 22 – Jarvis algorithm	66
Figura 23 – Graham Algorithm	66
Figura 24 – Spreading	68
Figura 25 – Battery level	68
Figura 26 – Consumption Percentage	68
Figura 27 – Sent Messages	70
Figura 28 – Lost Messages	70
Figura 29 – ToA vs Bandwidth	72
Figura 30 – CAD vs Sleep	73
Figura 31 – ToA vs Duty Cycle	73
Figura 32 – Estimation of Batteries life	74
Figura 33 – Energy per Day vs Duty Cycle	74
Figura 34 – Transmitter vs Receiver	75
Figura 35 – Node Consumption	75
Figura 36 – Total Charge vs Mean Current	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Description Parameters	22
Tabela 2 – Bluetooth Potência e alcance	35
Tabela 3 – Bluetooth Bitrate	35
Tabela 4 – características da versão	36
Tabela 5 – Tecnologias de rede para IoT	37
Tabela 6 – WSN Network Simulators	50
Tabela 7 – Nodes parameters	62
Tabela 8 – Simulation Results	69
Tabela 9 – Sensor Parameters	71
Tabela 10 – Nodes parameters Energy	71
Tabela 11 – Type Styles Batteries	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABP	Activation by Personalization
AES	Advanced Encryption Standard
CAD	Channel Activity Detection
CR	code rate
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSS	Chirp Spread Spectrum
DSSS	Direct sequence spread spectrum
ED	End Device
FEC	Forward Error Correction
FHSS	Frequency-Hopping Spread Spectrum
FOTA	Firmware Over-The-Air
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IR	Infravermelho
ISM	Industrial, scientific and medical networks
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
LPWAN	Low Power Wide Area Network
MAC	Médium Access
MDS	sinal minimo detectável
MTP	maximo de transmissao de poder
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OSI	Organization for Standardization International
OTAA	Over-The-Air Activation
PCM	Modulação por Código de Pulso
PHY	Physical layer
PPM	modulacao por Posição de Pulso
RFDI	Rádio Etiquetas de Identificação de Frequência
SF	Spreading Factor
SNR	Relação Sinal-Ruído
TIC	Tecnologia da Informação e Comunicação
ToA	Time on Air

UHF	Ultra High Frequency
UIoT	Internet of Things Universe
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Entropia sujeita à condição de desvio do padrão
μ	Ponto máxima de entropia $H(x)$
λ	(Distribuição exponencial) distribuição de entropia
α	Coeficiente de atenuação com distância
κ	Constante que representa a potência mínima com sucesso
ρ	Distância da origem ao destino
ι	Representa os saltos entre os nós

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	16
1.2	MOTIVAÇÃO	17
1.3	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	18
1.4	OBJETIVOS	19
1.4.1	Objetivo Geral	19
1.4.2	Objetivos Específicos	19
1.5	CONTRIBUIÇÕES	19
1.6	PUBLICAÇÕES	20
2	METODOLOGIA	21
2.1	ESCOLHA DE MODELO	21
2.2	OTIMIZAÇÃO	22
2.3	ETAPAS DOS PROCESSOS	23
2.4	OBTENÇÃO DE RESULTADOS NUMÉRICOS	23
2.5	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	23
2.6	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	24
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
3.1	REVISÃO LORAWAN	25
3.1.1	Ortogonalidade	25
3.1.2	Code Rate	26
3.1.3	Modulação LoRa: Modulação de longo alcance	27
3.1.4	Teorema de Shannon	27
3.1.5	Link Budget	28
3.1.6	Aloha em LoRaWAN	29
3.1.7	Modelos de Propagação de sinal	30
3.2	GEOMETRIA COMPUTACIONAL	30
3.2.1	Algoritmo de Graham	30
3.2.1.1	<i>Descrição do Algoritmo</i>	31
3.2.1.2	<i>Teorema 1. Algoritmo de varredura de Graham é executado no tempo $O(n \log n)$.</i>	32
3.2.2	Algoritmo de Jarvis	32
3.2.2.1	<i>Descrição do Algoritmo</i>	32
3.2.2.2	<i>Teorema 2. Algoritmo de Jarvis.</i>	33
3.3	CONCEITO DO UNIVERSO DA INTERNET DAS COISAS (UIOT)	33
3.4	REDES SEM FIO	34
3.4.1	Bluetooth	34
3.4.2	Wi-fi	35

3.4.3	Redes celulares (2G / 3G / 4G/ next 5G)	36
3.5	REDES LPWAN	37
3.5.1	Bandas ISM	37
3.5.2	Sigfox	38
3.5.3	LoRa	38
3.6	LORAWAN	39
3.6.1	Topologia	40
3.6.2	Classificação de dispositivos	40
3.6.3	Data Rate	41
3.6.4	Segurança	42
3.6.5	Especificação	42
3.6.6	Camada física	42
3.6.7	Camada de enlace	43
3.6.8	Exemplos práticos	44
3.7	COMUNICAÇÃO EM REDES SEM FIO E DE SENSORES	46
3.7.1	Camada Física (PHY)	46
3.7.2	Camada MAC	47
3.7.3	Limitações do Duty cycle	47
3.7.4	Ciclo de Trabalho Máximo	48
3.8	TRABALHOS RELACIONADOS	48
3.9	FERRAMENTAS DE SOFTWARE	50
3.10	CONCLUSÃO	52
4	CONSUMO DE ENERGIA	53
4.1	MARCO CONCEITUAL	53
4.1.1	Sensores e Consumo	53
4.1.2	Abordagem do Consumo de Energia	55
4.1.3	Bateria – Carga e descarrega	56
4.1.4	Sensor e Nós	56
4.2	SIMULAÇÃO	58
4.2.1	Sensor	58
4.2.2	Baterias	59
4.2.2.1	<i>Baterias de lítio</i>	59
4.2.2.2	<i>Baterias de níquel</i>	59
4.2.3	Análise da bateria	60
4.3	CONCLUSÃO	61
5	RESULTADOS	62
5.1	TRANSMISSÃO DE PACOTES	62
5.1.1	Resultados do análises de LoRa e LoRaWAN	62
5.1.2	Simulação 1: algoritmo de Jarvis	65

5.1.3	Simulação 2: Algoritmo de Graham	66
5.1.4	Consumo de energia	66
5.1.5	Resultados de transmissão de pacotes	67
5.2	CONSUMO ENERGÉTICO	70
5.2.1	Simulação	70
5.2.1.1	<i>Sensor</i>	71
5.2.1.2	<i>Baterias</i>	72
5.2.2	Resultados de Consumo Energia	72
6	CONCLUSÕES GERAIS	77
6.1	CONCLUSÕES GERAIS	77
6.2	TRABALHOS FUTUROS	78
	REFERÊNCIAS	79
	APÊNDICE A – CODE JARVIS ALGORITHM	86
	APÊNDICE B – CODE GRAHAM ALGORITHM	88
	APÊNDICE C – STAR SIMULATION CUPCARBON	92
	APÊNDICE D – CONFIGURATION SENSORS SENSSCRIPT	106

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por finalidade introduzir o presente trabalho no contexto da importância de analisar o papel das tecnologias LoRa e o protocolo LoRaWAN na minimização do consumo energético dos dispositivos que constituem redes de sensores sem fio (SX1272-73 Semtech Corporation) (SEMTECH, 2020) através da manipulação de parâmetros das camadas física e de enlace. Por outro lado se apresentada a motivação contextualizada do trabalho, incluindo a avaliação de LoRa e seu protocolo LoRaWAN e o problema do consumo de energia nessas redes. Serão apresentados trabalhos relacionados com o tópico de pesquisa, os objetivos e as contribuições desse trabalho. Por fim, apresentar-se-á a estrutura de distribuição dos capítulos desta dissertação.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Quando falamos sobre IoT, mais conhecida como *Internet Of Things* (ADELANTADO et al., 2017), nós estão se referindo ao cenário em que a conectividade na rede e o poder de computação estão entrelaçados com objetos cotidianos, sensores e artigos que geralmente não são considerados computadores (BAKKALI et al., 2017). Assim, esses dispositivos podem gerar, trocar e consumir dados com o mínimo de intervenção humana (POP et al., 2017). No entanto, não há definição única. Podemos dizer que LoRa (GSMA, 2018), (LORA Alliance®, 2020) é uma tecnologia com um longo alcance e baixa potência, que operando na banda ISM de 868 - 915 MHz que permite taxas de bits entre 0,37 kbps e 46,9 kbps e um alcance promissor de até 25 km (HASSAN, 2018). Por outro lado, LoRaWAN, é o protocolo MAC para redes de longa distância, é baseado no protocolo ALOHA, o qual torna-se o padrão para portadoras de acesso múltiplo por detecção (GEUN; SOOK, 1995). Além disso Ideal para aplicações com requisitos de comunicação esporádicos e baixo tráfego. A eficiência energética torna o LoRa atraente para comunicação up-link enquanto alcança um longo alcance (DAN; LANGENDOEN, 2003). Em LoRaWAN, distribuído alimentado por bateria os nós sensores enviam dados diretamente para um gateway sempre ativo. Também é realizado um detalhado análise do espectro de Radio frequência usando equações e a ferramenta Cupcarbon o qual é um software especializado. (MOCS, 2019),(PATHLOSS, 2020).

Uma parte significativa da pesquisa de modelagem e simulação do LoRaWAN tem se dedicado a trabalhar em recursos como colisões, cobertura, escalabilidade, atraso e consumo de energia (BOR et al., 2016), (CAPUZZO; MAGRIN; ZANELLA, 2018), (HAXHIBEQIRI et al., 2017), (MAGRIN; CENTENARO; VANGELISTA, 2017). No entanto, ao fazer análises com algoritmos de *fechado convexo* (CIRIPOI et al., 2018), (KALANTARI, 2018), (MOUNT, 2002) em uma rede quase linear em LoRaWAN, e assim ter contribuições significativas. Em (MAI; KIM, 2020) um módulo LoRaWAN é executado usando o simulador ns-3, onde uma rede IoT baseada em LoRa

foi modelada para um cenário de rede LoRa. As taxas de entrega de pacotes alcançaram mais de 90 %. Uma avaliação de vulnerabilidades foi realizada a nível do MAC e nas camadas superiores (BUTUN; PEREIRA; GIDLUND, 2019), (TOMASIN; ZULIAN; VANGELISTA, 2017). Os autores também analisaram métricas de desempenho relacionadas ao uso de algoritmos criptográficos.

Por outro lado, a modelagem de colisão em redes LoRaWAN representa diferentes pontos de vista expostos na literatura (RAHMADHANI; KUIPERS, 2018). Um desses considera que as colisões no LoRaWAN ocorrem principalmente quando as transmissões simultâneas são realizadas no mesmo SF. Sistemas de detecção em uma rede LoRaWAN (LOUNIS; MEHDI; BOUNCEUR, 2014) também foram simulados usando o emulador de redes IoT CupCarbon mostrando diagramas de energia, os quais estão relacionados com os sensores utilizados nesta pesquisa.

Esta dissertação fornece uma análise de LoRa e seu protocolo LoRaWAN que emprega algoritmos de *convex hull fechado convexo* em uma rede quase linear usando o simulador de rede de sensores sem fio de eventos discretos, multiagente CupCarbon. O objetivo desta análise é compreender o comportamento do protocolo LoRaWAN, para uma melhor otimização na sua utilização em redes de comunicação utilizando um software especializado fornecido pela CupCarbon.

Os algoritmos de Graham e Jarvis são executados em uma pequena rede WSN. De forma quase linear, ficou evidente que se geram saltos os quais são comparados uns com os outros. Assim, no algoritmo de Jarvis, dois saltos para a frente e um para trás são evidenciados, formando uma triangulação na comunicação, enquanto o uso do algoritmo de Graham mostra dois saltos até chegar ao nó de destino. A partir dessas evidências, diferentes configurações do protocolo LoRaWAN foram analisadas e foram obtidos resultados que são mostrados na seção de resultados. Estes resultados levaram à conclusão sobre o uso desses tipos de algoritmos baseados em envelope convexo em redes WSN quase lineares.

1.2 MOTIVAÇÃO

O baixo custo que seus dispositivos proporcionam na criação de uma rede sem fio, foi um dos motivos pelos quais se tomou a iniciativa de trabalhar com este tipo de redes e sensores e sua influência em qualquer tipo de ambiente. Também motivados pela importância deste tipo de tecnologia e seu constante crescimento e aplicação em cidades inteligentes, redes industriais, monitoramento do ambiente, etc., considerou-se fazer uma análise de LoRa e seu protocolo LoRaWAN. Focamos em monitorar o consumo de energia, e avaliar o impacto de parâmetros das camadas física e de enlace. Este trabalho, também, busca analisar o comportamento do consumo de energia considerando duas tecnologias de baterias em função do tamanho do pacote e da taxa de transmissão de dados.

1.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Redes LPWAN como LoRa e sua arquitetura LoRaWAN suportam comunicação de longo alcance, baixa taxa e tem custo baixo (QUERALTA et al., 2019). Os dispositivos LoRa geralmente operam na base de baterias, especialmente no caso dos dispositivos LoRa classes A e B. Os dispositivos LoRa classe C deverão se conectar à rede pública de energia. Consequentemente, o projeto de uma rede de sensores sem fio (RSSF) deve explorar todas os meios possíveis para a redução do consumo de energia (NOLAN; GUIBENE; KELLY, 2016).

Neste contexto, é necessário levar em consideração alguns preocupações importantes. Os protocolos adotados no controle de acesso ao meio de (MAC) e camada física devem ser cuidadosamente projetados e configurados para economizar energia. Por exemplo, o protocolo MAC deve evitar o projeto complexo de seu algoritmo de acesso ao canal e deve reduzir as colisões de pacotes. É compreensível como ambos os critérios levam a um desperdício de energia se não forem projetados de maneira adequada. Por exemplo, colisões de pacotes levam a novas retransmissões e, portanto, consumo de energia adicional (SORENSEN et al., 2017). Outro caso onde a energia é perdida devido ao projeto de protocolo incorreto, seria durante o modo de escuta inativo, no qual o nó permanece ouvindo, possivelmente, sem receber tráfego. Ou seja, o nó não sabe se vai receber novos pacotes ou não, e por isso fica na forma de escuta ociosa (MARAIS; ABU-MAHFOUZ; HANCKE, 2020). LoRa lida com este problema permitindo apenas a recepção de downlink depois que um nó transmitiu algo. Em outras palavras, o nó da classe A só acorda, para transmitir um pacote quando exigido por sua aplicação e permanecerá com seu canal de recebimento aberto apenas durante uma pequena janela de tempo.

Os nós LoRa Classe B são diferentes, pois programam suas transmissões periodicamente ao longo do tempo, enquanto os dispositivos de classe C são atendidos pela rede pública de energia e, portanto, não são preocupados com a economia de energia. No entanto, nós de todas as classes devem sempre ouvir a interface de rádio para determinar se uma determinada informação é destinada a eles. Assim, os pacotes de controle LoRa também consomem energia e os pontos de recepção e transmissão desses pacotes adicionam ao consumo de energia (HE et al., 2020).

Outro ponto a se levar em consideração é a adaptabilidade, que resulta da dinâmica da rede. A ideia básica é colocar um nó para dormir se não houver atividade programada para esse nó. No entanto, é necessário coordenar os nós juntamente quando vão dormir para que adquiram um certo sincronismo, evitando assim o desperdício de energia (SU; QIN; NI, 2020).

Portanto, uma boa análise dos recursos em redes sem fio (RSSF) continua sendo uma questão essencial para o seu bom planejamento. Aspectos relacionados ao escalonamento da transmissão de dados e o monitoramento do consumo de energia podem comprometer o funcionamento da rede, ou até torná-la inoperante (PAUL, 2020). Neste contexto, o impacto energético e a qualidade do enlace tem uma contribuição importante para garantir que a uma rede sem fio cumpra as garantias mínimas de comunicação de acordo as necessidades da

camada física (NURGALIYEV et al., 2020).

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar a eficiência do consumo de energia em uma rede LoRaWAN usando algoritmos de geometria computacional, levando em consideração dois tipos de baterias.

1.4.2 Objetivos Específicos

Pretende-se analisar o desempenho da camada física (PHY) através de diferentes ensaios. A pesquisa também avalia o impacto de vários parâmetros de nível de enlace no LoRa e LoRaWAN. De maneira específica, observamos o efeito destes fatores no consumo energético. Consideramos uma rede cujos nós estão dispostos de maneira quase linear, equidistantes e uniformemente distribuídos. O objetivo dos experimentos é alcançar taxas de transmissão de pacotes de dados, aceitáveis dentro dos limites do hardware estabelecido o SX1272-73 de Semtech Corporation, assim como minimizar os impactos de descarga da bateria durante o processo de comunicação entre os nós.

Quanto aos tipos de bateria adotados nos nós, pretende-se fazer a comparação entre baterias de tecnologia Li-Ion e NiCd de acordo ao o gasto energético e durabilidade durante as transmissões de dados. Para alcançar o anterior objetivo, as tecnologias das baterias serão utilizadas na LoRa e seu protocolo LoRaWAN como base para o análise e desenvolvimento da pesquisa do presente trabalho (BONCEUR et al., 2018),(DENG, 2015), (KASIM; ABDULLAH; SELAMAT, 2016) (G.; I.; XIAO, 2010).

1.5 CONTRIBUIÇÕES

As contribuições deste trabalho são enquadradas no análise de LoRa e seu protocolo LoRaWAN na busca de reduzir o consumo energético em redes LPWAN e de sensores sem fio. Precisamos fazer uma boa escolha de tecnologia da bateria para prover maior longevidade de operação das redes sem fio. Portanto, têm-se por contribuições:

- Uma comparação acerca do desempenho do consumo de energia nos nós é feita, de acordo a taxa de transmissão dos dados para analisar o ToA (*Time on Air*). É assim, que tendo em conta o tempo no ar, o qual afeita o consumo energético na rede em função ao número de pacotes enviados entre os nós durante o processo de comunicação;

- Condução de uma estimativa de durabilidade no transcurso do tempo, em uma rede LoRa conseguindo assim identificar uma taxa que assegura o consumo energético mínimo para a transmissão dos dados com sucesso;
- Uma melhoria de desempenho no tempo de descarga da bateria durante o uso dos sensores, em função da taxa de transmissão de dados (R) e do tamanho do pacote de dados (Nb), ToA, CAD (Channel Adaptivity Detection);
- Chamando a internet das coisas (IoT) como um universo que envolve as três dimensões conhecidas, considerando-a UIoT (Universo da internet das Coisas).

1.6 PUBLICAÇÕES

As publicações desenvolvidas durante o processo de pesquisa foram dois artigos em conferências internacionais e um journal.

- LoRa and LoRaWAN Protocol Analysis using CupCarbon, que permitiu uma publicação em conferência CCIS series conference proceedings on Springer, book: Communications in Computer and Information Science. Bermudez, Sanchez, Esau; Sadok, Djamel, F.H. “LoRa and LoRaWAN Protocol Analysis using CupCarbon” 9th International Congress of Telematics and Computing Conference WITCOM 2020. Puerto Vallarta, Jalisco, Mexico Nov. 2020.
- Energy Consumption of a LoRaWAN Network using Jarvis Algorithm. O referido trabalho gerou o artigo abaixo aceito e apresentado na IEEE ICITST 2020. Bermudez, Esau.; Sadok, F.H. Djamel “Energy Consumption of a LoRaWAN Network using Jarvis Algorithm” IEEE ICITST 15th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions (ICITST-2020). December 2020, London, UK.
- Application of a Computational Geometry Algorithm to Improve the Energy Consumption in a LoRaWAN Network. Esau Bermudez, Djamel F. H. Sadok; International Journal for Digital Society (IJDS) volumen 12, Issue 1, DOI: 10.20533/ijds.2040.2570.2021.0209 London, UK, 2021. <https://infonomics-society.org/ijds/published-papers/volume-12-2021/>

2 METODOLOGIA

2.1 ESCOLHA DE MODELO

A metodologia deste projeto consistiu, em primeiro lugar, em analisar a tecnologia Long Range (LoRa) e seu protocolo Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) para entender sua operação e comportamento em redes Low Power Wide Area Network (LPWAN) de baixa potência. Para isso, foram utilizadas as equações de ortogonalidade que nos ajudariam a entender o uso de largura de banda escalonável entre 125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz, a técnica de correção de erros usada pelo protocolo LoRaWAN, o teorema de Shannon-Hartley define o máximo de informação possível da taxa para um canal com ruído em uma dada largura de banda, o *Link Budget* onde é medida a quantidade de energia que será dissipada quando o link for estabelecido entre os dispositivos terminais; por outro lado, foi usado o tempo de preâmbulo que ocorre antes de um sinal sem fio acessar um dispositivo de rede. Também foi levado em consideração que os protocolos de rede definem um limite máximo para o comprimento da carga útil, para finalmente selecionar um desses algoritmos (*algoritmo Jarvis*) para trabalhar a parte do consumo de energia, tendo em conta o tipo de rede LoRa. (SANCHEZ; SADOK, 2020) Neste contexto, foi desconsiderada a proposta dos autores de encontrar um raio ótimo de transmissão que minimizasse o consumo energético pois, para o caso de redes ad-hoc e de sensores móveis, a distância é um parâmetro não controlável.

Este trabalho é baseado na modelagem proposta por (BOUGUERA et al., 2018) para estudo do consumo energético baseados em redes LoRa e LoRaWAN de sensores sem fio. Integraremos os parâmetros que compõem a camada física aqui estudados, permitindo as alterações necessárias nos protocolos Médium Access (MAC) e sua modelagem para redes de LPWAN. É assim que, neste contexto, em termos de consumo energético dois modelos de baterias foram considerados, tendo em conta o melhor desempenho delas para o prolongamento da vida útil da rede e portanto do sistema de comunicações. A primeira delas foi a tecnologia de bateria Li-ION com uma capacidade relativa de 3,7 V, acima de 1200 ciclos de vida e uma temperatura de operação -10°C a 50°C. Como proposto por (CALLAWAY; CHEN; O'DEA, 2002), fizemos uso de uma topologia linear e dispomos os nós de maneira equidistante uns dos outros. Um segunda tecnologia abordada, foi NiCd com uma capacidade relativa de 1,4 V, apresentando acima de 500 a 1000 ciclos de vida e uma temperatura de operação -20°C a 50°C. Para sua modelagem seguimos o trabalho em (PANDYA, 2013). Assumindo que ambas as tecnologias sofrem uma descarga contínua por um certo tempo se poderia estabelecer os parâmetros Time on Air (ToA), Channel Activity Detection (CAD), Duty cycle e Status da bateria, durante a transmissão de um pacote. Por outro lado podemos escolher a estratégia de roteamento utilizada para a comunicação a múltiplos saltos ou único salto, que conecta o nó origem ao nó destino. Por outro lado, para analisar todos estes conceitos, foi necessário utilizar o simulador Cupcarbon, o qual, conforme ao explicado na Tabela 6 (WSN Network

Simulators), seus benefícios neste tipo de redes são analisados em relação às demais.

2.2 OTIMIZAÇÃO

Nesta fase, foi importante estabelecer os parâmetros relevantes para a otimização do ToA, CAD, Duty cycle, Status da bateria e Rs, SF, Tpacket, Tpreamble, Ts, Tpayload, potência de transmissão em função do tamanho do pacote de dados e da taxa de transmissão, a fim de analisar o consumo da bateria, como é descrita na Tabela 1

Tabela 1 – Description Parameters

Acronimos	Descrição	Acronimos	Descrição
ToA	Time on Air (Quando um sinal é enviado de um emissor, leva um certo tempo até que o receptor receba esse sinal. Esse tempo é chamado de Tempo no Ar (ToA).	Tpacket	Tempo do pacote, é o tempo em que um pacote é transmitido de um lugar para outro, isso também tem a ver com seu tamanho.
CAD	(Channel Activity Detection) O modo de detecção de atividade do canal é projetado para detectar um preâmbulo LoRa no canal de rádio com o melhor possível eficiência energética.	Tpreamble	Tempo de preambolo: Preâmbulos são pausas que ocorrem antes de um sinal sem fio acessar um dispositivo de rede. Esta pausa varia em comprimento, a duração é o que a define como um preâmbulo longo ou curto.
Duty cycle	O Ciclo de trabalho é a proporção de tempo durante o qual um componente, dispositivo ou sistema é operado. Pode ser expresso como uma proporção ou como uma porcentagem.	Ts	(Time Symbol) Para gerar símbolos / sinais sonoros, o modem modula a fase de um oscilador. O número de vezes por segundo que o modem ajusta a fase é chamado de taxa do chip e define a largura de banda da modulação.
Battery status	O estado de carga é o 100% que a bateria armazenou ou a capacidade em amperes-hora (Ah) fornecida por uma bateria durante a sua descarga e a capacidade nominal da mesma. É um parâmetro alternativo ao SOC para saber o estado de carga de uma bateria.	Tpayload	É o conjunto de dados transmitidos que é realmente a mensagem enviada. A carga útil exclui cabeçalhos ou metadados, que são enviados simplesmente para facilitar a entrega da mensagem.
Rs	Taxa de simbolo es el número de bits transferidos o recibidos por unidad de tiempo (Unidades: bps o bit/s)	PTx	Potência de transmissão em função do tamanho do pacote de dados e da taxa de transmissão.
SF	Spreading Factor (SF): define o número de bits que podem ser codificados por um símbolo.	LinkBudget	Um Link Budget é a soma de todos os ganhos e perdas do transmissor, através do meio, até o receptor em um sistema de telecomunicações.

Fonte: Acervo do autor (2021)

2.3 ETAPAS DOS PROCESSOS

A fomentação do Analise tem varias etapas como é mostrada na Figura 1. As etapas, e os parâmetros da camada física MAC foram ajustados, para obtenção dos resultados da proposta deste trabalho.

Figura 1 – Etapas dos processos



Fonte: Acervo do autor (2021)

2.4 OBTENÇÃO DE RESULTADOS NUMÉRICOS

Foram gerados resultados numéricos a partir da modelagem proposta com o auxílio do software CupCarbon.

2.5 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Por fim, realizou-se a avaliação dos resultados encontrados com base nos cenários implementados. Consideram-se os seguintes parâmetros das baterias testadas de acordo com a rede. Bateria de Lítio (Li-Ion): capacidade relativa de 3,7 V, acima de 1200 ciclos de vida e Bateria de Níquel (NiCd): capacidade relativa de 1,4 V, acima de 500 a 1000 ciclos de vida, esta consideração de teste das baterias se faz com o fim de analisar e avaliar os conceitos como: ToA, CAD, Duty cycle, Rs, SF, Tpacket, Tpreamble, Ts, Tpayload, respectivamente.

2.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Por outro lado, essa dissertação está estruturada em mais 4 capítulos tal como descrito a seguir.

- Capítulo 2 - A Metodologia empregada na escolha de modelos, otimização, a fomentação do análise, a obtenção de resultados numéricos entre outros.
- Capítulo 3 - Fundamentação teórica (Paper WITCOM) - Apresenta os principais conceitos que baseiam e dão suporte a este trabalho, bem como os trabalhos que fundamentaram o estado da arte e que serviu como base para o desenvolvimento desse trabalho.
- Capítulo 4 – Consumo de energia (Paper IEEE ICITST) - Apresenta as modelagens que serviram como base para a construção da pesquisa dessa dissertação (BONCEUR et al., 2018), (DENG, 2015), (KASIM; ABDULLAH; SELAMAT, 2016), (TRIWIDYASTUTI et al., 2020) (G.; I.; XIAO, 2010), também contribuíram com o desenvolvimento da modelagem do consumo de energia que é fruto do estudo dessa dissertação.
- Capítulo 5 - Resultados - Este capítulo apresenta os resultados obtidos e as respectivas análises realizadas em função do consumo energético em redes ad hoc e de sensores sem fio, e as simulações conduzidas.
- Capítulo 6 - Conclusões - Este capítulo apresenta as conclusões gerais, incluindo as principais contribuições, limitações encontradas e trabalhos futuros.
- As referências utilizadas para construir a dissertação e apêndices encontram-se no final deste documento.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma revisão dos estudos relacionados e os conceitos principais que fundamentam este trabalho.

3.1 REVISÃO LORAWAN

3.1.1 Ortogonalidade

A técnica de espalhamento de espectro usada no LoRaWAN garante uma gama mais ampla de links, bem como melhor imunidade a interferências. LoRaWAN usa 125 kHz para transmitir o sinal, mas também permite o uso de largura de banda escalonável entre 125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz (REYNDERS; MEERT; POLLIN, 2016). O uso de uma banda mais larga torna LoRaWAN resistente a ruído, efeitos Doppler, variações de longo prazo dos osciladores e desvanecimento. Contudo, o uso de um sinal de banda estreita em uma banda muito mais ampla significa que o espectro é usado com menos eficiência, a menos que uma geração de sinal perfeitamente ortogonal seja alcançada entre os diferentes transmissores (NOREEN; BOUNCEUR; CLAVIER, 2017).

Assim, com o recurso de multiplexação ortogonal de portadoras como no caso de (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)), torna-se muito robusto contra multi-precursor (multipath). Este problema é muito comum em canais de transmissão. A ortogonalidade atua contra atenuações seletivas de frequência e contra interferência de RF, podendo recuperar a informação entre os diferentes sinais com diferentes atrasos e amplitudes que atingem o receptor (NOREEN; BAIG, 2013). Uma maneira de entender a ortogonalidade de forma matemática é descrita abaixo nas equações (3.1, 3.2, 3.3 e 3.4):

$$A * B \rightarrow \int_{t_1}^{t_2} f_a(t) * f_b(t) dt = 0 \quad (3.1)$$

$f_a(t)$ é ortogonal com $f_b(t)$ se $f_a(t) = \cos(nwt)$ e $f_b(t) = \cos(mwt)$. como $\cos\alpha * \cos\beta = \frac{1}{2}[\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)]$ Então

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} [\cos(n + m)wt + \cos(n - m)wt] \\ & \frac{1}{2} \int_0^T \cos(n + m)wt dt + \int_0^T \cos(n - m)wt dt \\ & \frac{1}{2} \left[\frac{1}{(n + m)w} \sin(n + m)wt \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{1}{(n - m)w} \sin(n - m)wt \right] \end{aligned}$$

Como $\sin(0) = 0, \sin(2\pi) = 0$ and $w = 2\pi/T$ então

$$\frac{1}{2} \left[\frac{T}{(n + m)2\pi} \sin(n + m)2\pi \right] + \frac{1}{2} \left[\frac{T}{(n - m)2\pi} \sin(n - m)2\pi \right] \quad (3.2)$$

$$\frac{1}{2} [\phi_1 \sin(n + m)2\pi] + \frac{1}{2} [\phi_2 \sin(n - m)2\pi] \quad (3.3)$$

$$\sin(n + m)2\pi = 0 \rightarrow k = 0, 1, 3, \dots \forall k(2\pi) \quad (3.4)$$

Quando a relação entre duas frequências é um número inteiro, elas são ditas para ser Harmônica e Ortogonal. Portanto, o transmissor forma sinais por alterando sua frequência ao longo do tempo e protegendo constantemente a fase entre símbolos adjacentes. O sinal transmitido é um sinal semelhante a ruído que é resistente para multi-percurso e desvanecimento Doppler e é robusto contra interferências. O receptor pode decodificar até mesmo um sinal muito atenuado de 20 dB abaixo do nível de ruído (SEMTECH CORPORATION, 2013).

3.1.2 Code Rate

Considerando a técnica de correção de erros usada pelo protocolo LoRaWAN, deve-se saber que para aumentar ainda mais a sensibilidade do receptor, é o tipo de correção de erro antecipado Forward Error Correction (FEC), deve ser feito usando um código de Hamming de Comprimento ajustável, o code rate (CR). Este define a quantidade de FEC e os quatro valores de CR utilizados no LoRaWAN. LoRaWAN usa taxas de código, taxa de codificação = $4 = (4 + CR)$ ou $4/5$, $4/6$, $4/7$ e $4/8$. Se a taxa de código é denotada como $k = n$, onde k representa informações úteis e o codificador gera n número de bits de saída, então $n-k$ serão os bits redundantes. A redundância permite ao receptor detectar e corrigir erros na mensagem ao custo de diminuir a taxa de dados efetiva (NOREEN; BOUNCEUR; CLAVIER, 2017).

Deve ficar claro que no protocolo LoRaWAN, um fator de propagação variável, o fator de espalhamento (Spreading Factor), Spreading Factor (SF) é tomado como uma função da qualidade do sinal Relação Sinal-Ruído (SNR) recebido (LORA Alliance®, 2020). Além de adaptar o comprimento do símbolo, ele também detalha o número de bits por símbolo. É por isso que alterar o fator de espalhamento gera uma taxa de bits variável conforme mostrado abaixo nas equações (3.5, e 3.6).

$$R_b = \frac{BW}{2^{SF}} * SF [bits/seg] \quad (3.5)$$

with coding:

$$R_b = \frac{4}{\frac{4+CR}{2^{SF}}} * SF [bits/seg] \quad (3.6)$$

Spreading Factor

$$SF = \log_2 \frac{R_c}{R_s} \quad (3.7)$$

3.1.3 Modulação LoRa: Modulação de longo alcance

LoRa, que significa “Modulação de longo alcance”, é uma modulação de espectro espalhado que se origina da modulação do tipo Chirp. Foi desenhado com o objetivo de ter uma baixa transferência de dados mantendo baixo consumo e alta cobertura. LoRa é uma modulação por espalhamento espectral que utiliza a técnica chirp, que consiste em modular a mensagem por meio de um sinal que varia continuamente em frequência. LoRa surge e se torna popular porque é forte em todas as áreas onde o Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) ou Espectro de propagação de sequência direta é fraco. No LoRa, a cada tempo de símbolo (T_s) a frequência salta para um valor fixo e começa a crescer a partir daí, o valor para o qual salta representa o símbolo da mensagem enviada. A quantidade de bits que podem ser codificados por símbolo é dada por um parâmetro ajustável chamado Spreading Factor (SF), portanto, se tiver um valor de N , o símbolo representa N bits e pode ter 2^N elevados aos N valores possíveis de frequência para a qual você pode pular.

3.1.4 Teorema de Shannon

Por sua vez, o teorema de Shannon-Hartley define a taxa máxima de informação possível para um canal com ruído em uma largura de banda dada (PROAKIS, 2000). O recente desenvolvimento de vários métodos de modulação, como a Modulação por Código de Pulso (PCM) e modulação por Posição de Pulso (PPM) que trocam largura de banda por a relação sinal-ruído intensificou o interesse por uma teoria geral da comunicação. Uma base para tal teoria está contida no importante artigo de Nyquist e Hartley (O. AFTAB et al., 2001) sobre este assunto. No presente artigo, a teoria para incluir um número de novos fatores é estendido, em particular o efeito do ruído no canal, e a economia possível devido à estrutura estatística da mensagem original e devido à natureza da designação final da informação.

Conforme indicado acima, Shannon (SHANNON, 1948) estuda o caso geral de um sistema de comunicação, que consiste em um transmissor, um receptor, um canal de transmissão e uma fonte de ruído. Um exemplo desses cálculos será mostrado a seguir. Seja $p(x)$ uma distribuição unidimensional. A forma de $p(x)$ dando um máximo entropia sujeita à condição de que o desvio padrão de x seja corrigido em é gaussiano. Para mostrar isso, devemos maximizar a equação 3.8.

$$H(x) = - \int p(x) \log p(x) dx \quad (3.8)$$

Com $\sigma^2 = \int p(x) x^2 dx$ e $\int p(x) dx = 1$ como restrições. Para maximizar a equação 3.9, a condição em 3.10 é necessária.

$$\int \left[-p(x) \log p(x) + \lambda p(x) x^2 + \mu p(x) \right] dx \quad (3.9)$$

$$-1 - \log p(x) + \lambda x^2 + \mu = 0 \quad (3.10)$$

Consequentemente, o ajuste dos parâmetros para satisfazer as limitações da equação em 3.11,

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(x^2/2\sigma^2)} \quad (3.11)$$

onde

$$C = B * \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \left[\frac{bits}{seg} \right]$$

Consideramos C é a capacidade do canal, B é a largura de banda do canal, S a força média do sinal no receptor, N a potência média do ruído no receptor, S/N a relação sinal ruído no receptor. Portanto, se esta relação logarítmica de base 2 para a base natural é convertida e também é assumido que para uma base expandida para aplicação do espectro, a pequena relação sinal-ruído e a intensidade do sinal serão muito mais baixo do que o ruído, então $S/N \ll 1$ e a equação anterior pode ser reescrita como a equação 3.12.

$$\frac{C}{B} = 1.43 * \frac{S}{N} \quad (3.12)$$

Assim, podemos deduzir que, a fim de transmitir informações livres de erros em um determinado relação sinal-ruído ou para transmitir mais informações, só precisamos aumentar a largura de banda do canal (SEMTECH CORPORATION, 2015).

3.1.5 Link Budget

O budget do link (orçamento do enlace) ajuda em determinar a potencia mínima necessária a ser aplicada no transmissor para garantir uma recepção do sinal. A expressão geralmente mostra o que é gasto ou ganho em cada etapa da vida do sinal desde sua transmissão. O budget do link é determinado pela equação 3.13,

$$LinkBudget = MDS - MTP[db], \quad (3.13)$$

onde a sinal minimo detectável (MDS) e maximo de transmissao de poder (MTP). Sam e Miller garantem que o intervalo máximo é dado pelo link budget levando em consideração a atenuação do sinal no espaço livre (FSPL) (LEE; MILLER, 1998) usando as equações 3.14 e 3.15.

$$FSLP = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right) [dB] \quad (3.14)$$

Considerando $f = 900$ MHz, Então

$$FSLP = 32.45 + 20 \log(d) + 20 \log(f) [dB] \quad (3.15)$$

LoRaWAN cria um formato de pacote, que mostra que quanto maior o requisito para correção de erros, mais longo será o pacote para uma determinada carga útil (SEMTECH CORPORATION, 2013). O tempo de um pacote LoRaWAN é dado pela equação 3.16:

$$T_{packet} = T_{preamble} - T_{payload} \quad [Sec] \quad (3.16)$$

Onde $T_{preamble}$ é o preâmbulo do pacote LoRaWAN dado por 3.17, $T_{payload}$ é o tempo total da carga dado por 3.18.

$$T_{preamble} = (n_{preamble} + 4.25) T_s \quad [sec] \quad (3.17)$$

$$T_s = \frac{1}{R_s} [sec], \quad R_s = \frac{BW}{2^{SF}}$$

O tempo de um símbolo LoRaWAN é representado por T_s . Este é relacionado a velocidade do símbolo e a taxa dos símbolos R_s que depende da banda do canal e do espalhamento aplicado SF.

$$T_{payload} = PL_{Symb} * T_s \quad (3.18)$$

O tempo total de um pacote LoRaWAN dado por 3.19 é obtido através da formula em 3.19. Este parâmetro depende da banda disponibilizada pelo canal e do código SF.

$$T_{packet} = (n_{preamble} + 4.25 + PL_{Symb}) * \frac{2^{SF}}{BW} \quad (3.19)$$

3.1.6 Aloha em LoRaWAN

O MAC de LoRaWAN é baseado em P-ALOHA ou seja um acesso randômico e probabilístico (GEUN; SOOK, 1995). Portanto, as seguintes variáveis são, S é o número médio de pacotes gerados por intervalo; A fonte de tráfego que consiste no número de usuários segue uma distribuição de Poisson, que é independente, com uma taxa de pacote agregada de $X = s$. O tempo e o comprimento do pacote são fixados num período de T segundos. Um nó atrasa a transmissão de um pacote anteriormente colidido com um tempo aleatório. Assim, a soma total do tráfego não é apenas de novos pacotes, mas inclui a retransmissão de pacotes colididos.

$$S = \lambda T$$

$$G \geq S$$

$$G(n) = \lambda(n) T$$

$$S = G(n) P_{SUC} = \lambda(n) T * e^{-\lambda(n) 2T}$$

A probabilidade de que um pacote escolhido não sofra uma colisão é a probabilidade que uma variável aleatória de Poisson com média $2(\lambda + \lambda_r)$ pacotes assume o valor 0, que

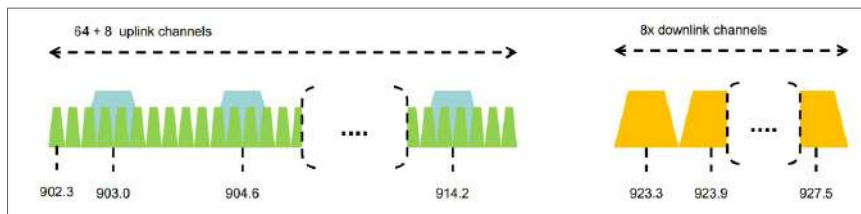
é $(e^{-2(\lambda+\lambda_r)})$. Porque os pacotes são transmitidos no canal em um total taxa de $((\lambda + \lambda_r)pacotes/slot)$, segue-se que o pacote é recebido corretamente em um taxa de $S = (\lambda + \lambda_r)e^{-2(\lambda+\lambda_r)}$ pacotes / slot, que é a equação 3.20 de rendimento para ALOHA puro em equilíbrio estatístico. A diferenciação à direita mostra que o rendimento S é maximizado pela taxa de transmissão total $((\lambda + \lambda_r) = 1/2pacotes/slot)$. O rendimento máximo resultante é de fato,

$$S_{max} = \frac{1}{2e} \approx 0.184 \frac{packets}{slot} \quad (3.20)$$

3.1.7 Modelos de Propagação de sinal

Entre os modelos de propagação de sinal Ultra High Frequency (UHF), encontramos alguns na faixa de frequência UHF. Entre os mais conhecidos está o modelo OkumuraHata (HATA, 1980). Este modelo determina o valor da perda de caminho em uma dada distância entre uma estação base e um usuário móvel. O modelo considera vários fatores como frequência, altura da antena e outros (OKUMURA, 1968), (PARSONS, 2001). Levando em consideração o espectro para os 915 MHz, a banda Industrial, scientific and medical networks (ISM) será dividida nos planos de canais mostrados na figura 2 (LORA Alliance®, 2020).

Figura 2 – LoRa Alliance Parameters



Fonte: LoRa Alliance (2020)

3.2 GEOMETRIA COMPUTACIONAL

Geometria computacional representa o estudo sistemático de algoritmos e estruturas de dados para objetos geométricos, incluindo computação gráfica, visão computacional entre outros (MOUNT, 2002).

3.2.1 Algoritmo de Graham

A varredura de Graham é um método de encontrar a casca convexa de um conjunto finito de pontos no plano com complexidade de tempo $O(n \log n)$. É nomeado após Ronald Graham, que publicou o algoritmo original em 1972. O algoritmo encontra todos os vértices

do casco convexo ordenados ao longo de seu limite. Ele usa uma pilha para detectar e remover concavidades no limite com eficiência. No Algoritmo de Jarvis para Casco Convexo. O pior caso de complexidade de tempo do Algoritmo de Jarvis é $O(n^2)$. Usando o algoritmo de varredura de Graham, podemos encontrar Convex Hull no tempo $O(n \log n)$. A seguir está o algoritmo de Graham:

3.2.1.1 Descrição do Algoritmo

Sejam os pontos $[0..n - 1]$ a matriz de entrada.

1. Encontre o ponto mais inferior comparando a coordenada y de todos os pontos. Se houver dois pontos com o mesmo valor de y , o ponto com o menor valor de coordenada x será considerado. Seja o ponto mais inferior $P0$. Coloque $P0$ na primeira posição no casco de saída;
2. Considere os $n - 1$ pontos restantes e classifique-os pelo ângulo polar no sentido anti-horário em torno dos pontos $[0]$. Se o ângulo de polar de dois pontos for o mesmo, coloque o ponto mais próximo primeiro;
3. Após a classificação, verifique se dois ou mais pontos têm o mesmo ângulo. Se mais dois pontos tiverem o mesmo ângulo, remova todos os pontos do mesmo ângulo, exceto o ponto mais distante de $P0$. Seja o tamanho do novo array m ;
4. Se m for menor que 3, retornar (casco convexo não é possível);
5. Crie uma pilha vazia ' S ' e empurre os pontos $[0]$, os pontos $[1]$ e os pontos $[2]$ para S ;
6. Processe os $m - 3$ pontos restantes, um por um. Faça o seguinte para cada ponto 'pontos $[i]$ ';
7. Continue removendo pontos da pilha enquanto a orientação dos 3 pontos seguintes não é no sentido anti-horário (ou eles não fazem uma curva à esquerda);
 - Ponto próximo ao topo da pilha;
 - Aponte para o topo da pilha;
 - pontos $[i]$.
8. Empurre os pontos $[i]$ para S ;
9. Imprimir conteúdo de S .

3.2.1.2 Teorema 1. Algoritmo de varredura de Graham é executado no tempo $O(n \log n)$.

De acordo ao trabalho realizado poderíamos representar a rede, fazendo uma simbolização dos pontos (sensores) de acordo com as coordenadas x fornecido nestes cenários com o protocolo LoRaWAN deste trabalho, pode ser feito usando qualquer algoritmo de classificação eficiente $O(n \log n)$. D_i denota o número de pontos mostrados (removidos) no processamento de P_i . Considerando que cada orientação do teste leva $O(1)$ tempo, a quantidade de tempo gasto no processamento p_i é $O(D_i + 1)$. $O + 1$ extra é para o último ponto testado, que não é removido. (MOUNT, 2002) Portanto, o tempo total de execução é proporcional a 3.21:

$$\sum_{i=1}^n (D_i + 1) = n + \sum_{i=1}^n D_i \quad (3.21)$$

Para ligar $\sum_i D_i$, observe que cada um dos n pontos é colocado na pilha. Uma vez depois que um ponto é excluído, o ponto nunca mais será contado de novo. Uma vez que cada um dos n pontos pode ser excluído no máximo uma vez, $\sum_i D_i \leq n$. Assim, após a classificação, o tempo total de execução é $O(n)$. Como isso também é verdadeiro para o casco inferior, o tempo total é $O(2n) = O(n)$. (DE BERG et al., 2008).

3.2.2 Algoritmo de Jarvis

A ideia intuitiva do algoritmo é imaginar uma linha que se move de menos infinito para cima até tocar um ponto no conjunto de pontos. Em seguida, essa linha contorna a nuvem de pontos em sentido positivo, girando em cada vértice até tocar no próximo, de modo que no final a circunda completamente.

3.2.2.1 Descrição do Algoritmo

Dado o conjunto de pontos S , tomamos o ponto P que possui a ordenada mais baixa e a abscissa mais alta. e traçamos uma reta r que passa por P e é paralela ao eixo das abcissas.

Para cada ponto de S , desenhe linhas que os unem a P . O próximo vértice do fechamento convexo será o ponto Q que forma o ângulo mínimo em relação à linha anterior r .

Se Q não for o ponto de partida, repita 2 tomando $P = Q$ e r como a linha formada por P e Q .

É assim que a complexidade do algoritmo de Jarvis, encontre ou ordene o ponto mais baixo: $O(N)$ e encontrei o menor ângulo: $O(N^2)$

3.2.2.2 Teorema 2. Algoritmo de Jarvis.

Na técnica da marcha de Jarvis, a ideia é enrolar um fio em torno dos pontos firmemente para descobrir todos as bordas do casco convexo.

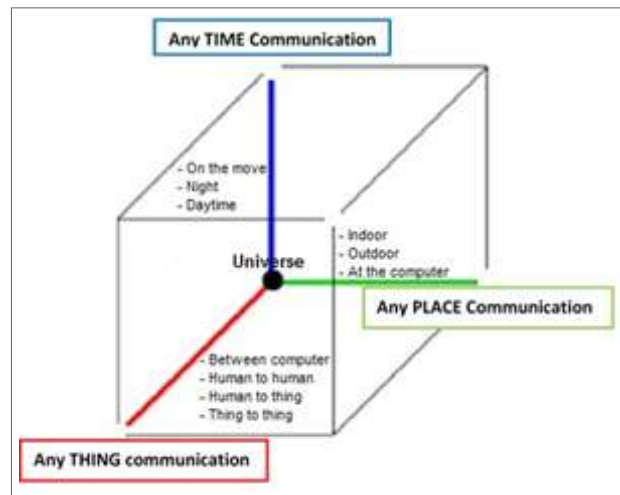
A marcha de Jarvis calcula o CH (Q) por uma técnica conhecida como embrulho para presente ou embrulho de pacote. Primeiro, um ponto base $P(S1Detection)$ é selecionado. Este é o ponto com a coordenada y mínima fornecida nesses cenários com o protocolo LoRaWAN. Selecione o ponto mais à esquerda em caso de empate. O próximo convexo os vértices do casco P1 têm o menor ângulo polar *w.r.t.* o raio horizontal positivo de P00. O proximo passo é medir no sentido anti-horário. Se empatar, tem que escolher o ponto mais distante. Vértices P2; P3; :::; Pk são escolhidos de forma semelhante até $Yk = Y.Pi + 1$ tem o ângulo polar mínimo *w.r.t.* raio positivo de P0max. Se empatar, escolhemos o ponto mais distante. Na prática, A marcha de Jarvis é normalmente mais rápida do que a varredura de Graham na maioria dos aplicativos. O pior caso ocorre quando $O(n)$ pontos se encontram no casco convexo, ou seja, todos os pontos se encontram no círculo (DE BERG et al., 2008).

3.3 CONCEITO DO UNIVERSO DA INTERNET DAS COISAS (UIOT)

Ashton (GRIJPINK et al., 2020) cunhou este termo para ilustrar o poder de conectar Rádio Etiquetas de Identificação de Frequência (RFID) que são usadas em cadeias de suprimentos corporativas para contar e rastrear mercadorias sem a necessidade de intervenção humana (ASHTON, 2009). Hoje, o termo internet das coisas se tornou popular para descrever cenários em qual a conectividade da Internet e seu poder de computação são estendidos a uma variedade de objetos, dispositivos, sensores e itens do cotidiano consolidado o conceito Internet of Things Universe (UIoT) (SANCHEZ; SADOK, 2020) capaz de convergir em um ponto chamado universo das comunicações e afetá-lo de forma positiva, conforme mostrado na figura 3

O desenvolvimento de tecnologia sem fio de longa distância e de baixo consumo tornou-se um tópico de grande interesse na tecnologia da IoT, uma vez que esta é uma parte fundamental do desenvolvimento de novas aplicações emergentes (PARKASH; KUNDU; KAUR, 2012). LPWAN é um termo amplo onde se encaixa uma variedade de tecnologias de comunicação sem fio usadas para conectar sensores e controladores a Internet. Surgiram padrões para redes de longa distância de baixa potência (CENTENARO et al., 2016), aquelas baseadas em telefonia celular, como por exemplo, NB-IoT ou LTE-M (GSMA, 2018). Outras foram desenvolvidas nativamente para uso de IoT como LoRaWAN e SigFox (PATEL; WON, 2017). As considerações de design predominantes são o baixo consumo de energia (geralmente até mais de dez anos de autonomia no uso da bateria), forte penetração, a conexão de um grande número de sensores e dispositivos (escalabilidade) com a ocupação de uma baixa largura de banda (HASSAN, 2018).

Figura 3 – Universe Internet of Things (UIoT)



Fonte: (SANCHEZ; SADOK) (2020)

3.4 REDES SEM FIO

Nesta sessão é feita uma análise preliminar das tecnologias mais difundidas, sua especificação e suas implementações de acordo com o uso e as soluções comerciais em que estão sendo utilizadas. Pretende-se então fazer uma breve análise preliminar dessas tecnologias e de suas características.

3.4.1 Bluetooth

Bluetooth (BLE) é um padrão proposto recentemente para comunicação sem fio de baixa potência. É uma forma de conectar e trocar informações e dados entre telefones celulares, laptops, câmeras digitais, sensores e videogames. Na versão tradicional de Bluetooth, a comunicação sem fio tem o alcance de até 10 metros (ASHTON, 2009). Baixo custo e baixo consumo de energia o tornam uma solução interessante tipicamente para os dispositivos móveis (BAKKALI et al., 2017). Bluetooth é uma especificação para redes de área pessoal sem fio (Wireless Personal Area Network (WPAN)), que permite a transmissão de dados entre diferentes dispositivos através de um link de radiofrequência na banda ISM de 2,4 GHz. Existem várias versões e evoluções com diferentes características de velocidade e consumo de energia, entre outros aspectos. Os dispositivos que usam essa tecnologia com mais frequência são telefones celulares, computadores e acessórios relacionados. O alcance dessa tecnologia é da ordem de alguns metros, ver Tabela 2. O escopo e a taxa de bits transmitidos variam de acordo com a versão, ver Tabela 3.

Tabela 2 – Bluetooth Potência e alcance

Clase	Alcance
1	100 m.
2	5 - 10 m.
3	1m.

Fonte: (O; YOUSIF; AL-BALUSHI) (2017)

Tabela 3 – Bluetooth Bitrate

versão	Bitrate
1.2	1 Mbps.
2.0 + EDR	3 Mbps.
3.0 + HS	24 Mbps.
4.0	32 Mbps.

Fonte: (O; YOUSIF; AL-BALUSHI) (2017)

3.4.2 Wi-fi

Wireless Fidelity (Wi-Fi) é uma Tecnologia de rede de área local sem fio (Wireless Local Area Network (WLAN)). Cada vez mais pessoas estão se conectando a esta tecnologia devido ao seu rápido desenvolvimento, alto desempenho e segurança. O Wi-Fi é baseado no padrão do Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (IEEE 802.11) que usa o espectro aberto localizado em 2.4 Mhz ou 5 GHz. O alcance do Wi-Fi é de cerca de 100 metros e o a velocidade é de cerca de 100 Mbps (GSMA, 2018) embora tem versões como o 802.11n que superam estas taxas usando tecnologia de antenas Multiple Input Multiple Output (MIMO).

Wi-Fi (LOUNIS; MEHDI; BOUNCEUR, 2014) é uma família de tecnologias que permite a interconexão sem fio de dispositivos eletrônicos, ver Tabela 4. A Wi-Fi Alliance (MAGRIN; CENTENARO; VANGELISTA, 2017), uma organização sem para fins lucrativos que adota, testa e certifica se o equipamento atende aos padrões IEEE 802.11 relacionados a redes locais sem fio WLAN. As diferentes versões de Wi-Fi (802.11 B / G / N / AC, entre outros) permitem diferentes velocidades de transmissão (por exemplo, 11 Mbps, 54 Mbps, 300 Mbps, 1,3 Gbps). As diferentes versões usam as bandas ISM de 2,4 GHz e 5 GHz (IEEE, 2017).

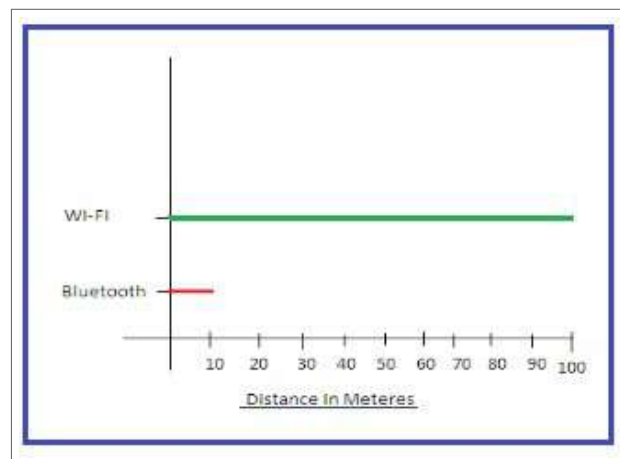
Embora os raios de cobertura teóricos sejam da ordem de algumas centenas de metros de acordo com a versão, na prática (em ambientes urbanos, com interferência, usando canais que são saturado devido às bandas livres que usam e com obstáculos como paredes, veículos ou outros elementos de vias públicas) este raio de cobertura geralmente não excede 100 metros, ver Figura 4. Há documentação abundante, variedade de dispositivos e oferta de produtos comerciais no mercado, por ser considerada uma tecnologia robusta e madura.

Tabela 4 – características da versão

características da versão	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n	802.11ac
Frequência de operação	5GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 e 5 GHz	5 GHz.
Técnica de modulação	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM, OFDM	QPSK, DBSPK, DQPSK, CCK, DSSS	BPSK QPSK, 16-QAM, 64-QAM OFDM	64-QAM, OFDM, CCK, DSSS	256 QAM .
Bitrate máximo	54 Mbps	11 Mbps	54 Mbps	150 Mbps	1300 Mbps.
Espaço ao ar livre	120 m	140 m	140 m	Windows, 250 m	250 m.
Largura de banda do canal	20 MHz	20 MHz e 25 MHz	20 MHz	20 MHz e 40 MHz	80 MHz e 160 MHz.
Ano de lançamento	1999	1999	2003	2009	2014.

Fonte: (IEEE Standards®) (2020)

Figura 4 – Bluetooth vs WiFi



Fonte: (GUJARE et al.) (2018)

3.4.3 Redes celulares (2G / 3G / 4G/ next 5G)

As redes celulares (GSMA, 2018) são implantadas e gerenciadas por empresas de telecomunicações. Essas empresas cobram pelo uso de sua infraestrutura. Essas tecnologias usam bandas licenciadas, portanto, se você quiser implementar um projeto que os utilize, o serviço deve ser contratado. A área de cobertura depende do provedor selecionado, e a taxa de bits depende do serviço e da geração de tecnologia usados, variando de alguns Kbps a algumas centenas de Mbps. O dispositivo que se conecta à rede celular deve ter a capacidade de im-

plementar a pilha de protocolos IP. Tudo isso se traduz em um aumento na capacidade do hardware, elevando o consumo e custo de energia. Por esta razão, existem desenvolvimentos de padrões (MOCS, 2019) buscando otimizar o consumo de energia dos nós a serem usados nas aplicações IoT.

3.5 REDES LPWAN

As tecnologias avaliadas no ponto anterior apresentam dificuldades consideráveis para a aplicação específica deste projeto, optou-se por avaliar alternativas. O cenário é de uma rede de nós alimentados por bateria. A partir disso, o conceito de LPWAN (Low Power Wide Area Network) é de uma rede de longa distância de baixa potência. (VONDROUŠ et al., 2016)

As redes LPWAN são redes sem fio projetadas para permitir comunicações de longo alcance a uma taxa de bits reduzida entre objetos conectados e alimentados por bateria, ver Tabela 5. LPWAN é diferente de uma WAN, já que o último refere-se a conectar usuários e empresas, e transportar uma maior quantidade de dados, sem grandes restrições de consumo de energia. A taxa de bits das diferentes tecnologias LPWAN geralmente é da ordem de alguns kbps (ELKHODR; SHAHRESTANI; CHEUNG, 2016).

Uma rede LPWAN pode ser privada ou pública, o que, no último caso, permite aos usuários implementar sistemas de tecnologia ou infraestrutura econômicos (para exemplo, o caso de Sigfox, que é mencionado mais tarde). Existem atualmente vários padrões e fornecedores competindo no espaço LPWAN para IoT.

Tabela 5 – Tecnologias de rede para IoT

Tecnologia	Sigfox	LoRa	NB LTE-M	LTE-M	EC-GSM	5G
Alcance distância	<13 Km	< 11 Km	< 15 Km	< 11 Km	< 15 Km	< 15 Km.
Banda	Não licenciado	Não licenciado	Não licenciado	Não licenciado	Não licenciado	Não licenciado .
Bitrate	<100bps	<50 kbps	150 Mbps	1 Mbps	10 kbps	1 Mbps.

Fonte: (ELKHODR; SHAHRESTANI; CHEUNG) (2016)

3.5.1 Bandas ISM

As bandas ISM (industriais, científicas e médicas), são bandas do espectro de rádio internacionalmente reservado para uso não comercial nas áreas industrial, científica e médico. Estas bandas são definidas pela união internacional de telecomunicações (ITU) no grupo Radio Regulations (RR) (GOURSAUD; GORCE, 2015). O uso dessas bandas de frequência está aberto a todos, sem a necessidade de licença, respeitando os regulamentos que limitam os níveis de potência transmitida e ciclos de trabalho (VONDROUŠ et al., 2016). Esse fato força esse tipo

de comunicação a ter uma certa tolerância a erros e usar mecanismos para proteger contra interferências, por exemplo, através de técnicas de difusão de espectro.

3.5.2 Sigfox

Sigfox (SIGFOX, 2009-2020) é uma empresa francesa fundada em 2009. Esta empresa desenvolve tecnologia ISM orientada para soluções de IoT.

O modelo de negócios da Sigfox tem suas peculiaridades que a diferenciam do resto tecnologias e operadores. A Sigfox Company cumpre as funções de controlador de tecnologia e provedor de serviços, e realiza a certificação de compatibilidade dos nós para que eles possam se conectar à rede (que é gerenciada exclusivamente, também pela Sigfox). Isso é análogo à operadora de rede celular, porque uma taxa é paga pelo uso da infraestrutura, com a diferença que toda a rede é projetada exclusivamente para dispositivos IoT. Isso significa que no caso da Sigfox as redes já estão criadas, não sendo necessário gerenciar Gateways (nós retransmissores) ou dispositivos de qualquer tipo. É necessário apenas adquirir os nós aprovados por Sigfox para uso em redes (implantado e operado pela Sigfox). Como no caso de redes celulares, uma assinatura deve ser contratada para cada dispositivo (nó). Existem já implantações no Brasil e Argentina (COLLET, 2016).

Características principais:

- A topologia de rede utilizada é do tipo “estrela de um salto”, ou seja, cada nó envia informações para um gateway, que as envia para um servidor de aplicativos.
- Os nós podem enviar até 140 mensagens por dia e cada mensagem pode ter um Payload de 12 bytes (1680 bytes por dia).
- Cada nó pode receber no máximo 4 mensagens por dia e estas podem conter uma Carga útil de 8 bytes (32 bytes por dia).
- Usa bandas ISM.
- Usa infraestrutura instalada, a implantação é simplificada, mas depende de um terceiro.
- Variedade de fabricantes de IC: Texas Instruments, Silicon Labs, ON Semiconductor.
- Tem um custo de assinatura.

3.5.3 LoRa

LoRa (LORA Alliance®, 2020), (PARKASH; KUNDU; KAUR, 2012) é uma marca proprietária de tecnologia de comunicação wireless desenvolvido pela empresa francesa Cycleo, que foi adquirida pela Semtech no ano 2012. A Semtech é a única fabricante de circuitos integrados com

tecnologia LoRa. Esta tecnologia usa bandas ISM. Os circuitos integrados são comercializados por região (PARSONS, 2001), (HAXHIBEQIRI et al., 2017) de acordo com a regulamentação específica de cada país. A tecnologia LoRa se refere à camada 1 (camada física do modelo de referência estabelecido pela Organization for Standardization International (OSI)), ou seja, a técnica de modulação usada na transmissão e recepção. Por outro lado, deve ser definido (a critério do operador de rede LoRa) o que usar na camada 2 (Controle de acesso ao meio MAC). A alternativa que atualmente tem mais impulso e suporte para parte de vários fabricantes é LoRaWAN (padrão aberto, Camada 2 definida por LoRa Alliance (PATEL; WON, 2017)). No entanto, existem alternativas por exemplo, Symphony Link (PATHLOSS, 2020). Adicionalmente, existe a possibilidade de fazer o seu próprio desenvolvimento de acordo com as necessidades particulares de cada caso.

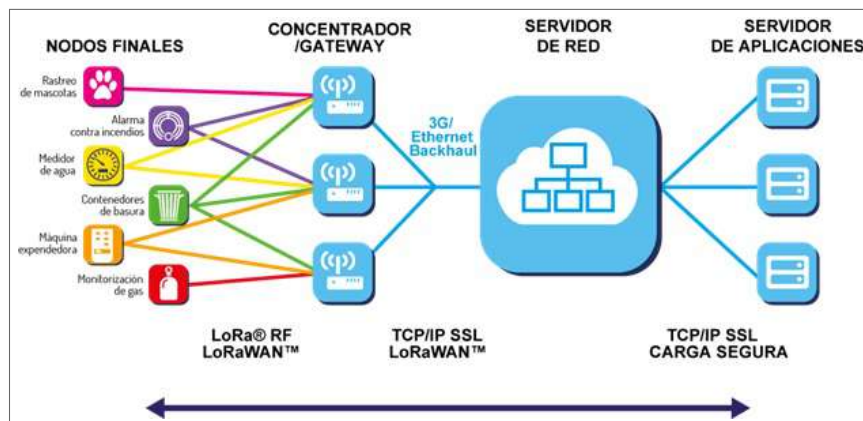
Principais características do LoRa:

- Usa bandas ISM.
- A arquitetura de rede utilizada é “topologia estrela de um salto”, ou seja, a partir dos nós as informações são enviadas para um Gateway e em seguida enviadas para um servidor de aplicativos. É possível obter arquiteturas de malha que contam com protocolos que as implementam nas camadas 2 e superior (LIU et al., 2017).
- A taxa de bits é configurável, podendo atingir no máximo 37,5 kbps.
- Não há restrições quanto à quantidade de informações a enviar e receber.
- Alcance da ordem de alguns km.
- É possível manipular características de modulação, que variam a taxa de bits, o consumo de energia e alcance obtido, entre outros parâmetros.
- Liberdade para construir sistemas personalizados.
- Baixo custo.
- Circuitos integrados fabricados exclusivamente pela Semtech

3.6 LORAWAN

A especificação LoRaWAN® é um protocolo de rede de baixa potência, área ampla (LPWA) projetado para conectar 'coisas' operadas por bateria sem fio à internet em redes regionais, nacionais ou globais. LoRaWAN tem como alvo os principais requisitos da Internet das coisas (IoT), como serviços de comunicação direcional, segurança ponta a ponta, mobilidade e localização.

Figura 5 – Arquitetura LoRa



Fonte: (SEMTECH) (2020)

3.6.1 Topologia

A arquitetura de rede LoRaWAN® de acordo a Figura 5, é implantada em uma topologia estrela-das-estrelas na qual os Gateways ou passarelas retransmitem mensagens entre os dispositivos finais e um servidor de rede central. Os Gateways são conectados ao servidor de rede por meio de conexões IP padrão e atuam como uma ponte transparente, simplesmente convertendo pacotes RF em pacotes IP e vice-versa. A comunicação sem fio aproveita as características de longo alcance da camada física LoRa, permitindo um link de salto único entre o dispositivo final e um ou vários Gateways. Todos os modos são capazes de comunicação bidirecional e há suporte para grupos de endereçamento multicast para fazer uso eficiente do espectro durante tarefas como atualizações de Firmware Over-The-Air (FOTA) ou outras mensagens de distribuição em massa (SEMTECH, 2020).

A especificação define os parâmetros da camada física do dispositivo para a infraestrutura (LoRa®) e o protocolo (LoRaWAN®) e, portanto, fornece interoperabilidade perfeita entre os fabricantes, conforme demonstrado por meio do programa de certificação do dispositivo. Embora a especificação defina a implementação técnica, ela não define nenhum modelo comercial ou tipo de implantação (pública, compartilhada, privada, empresarial) e, portanto, oferece à indústria a liberdade de inovar e diferenciar a forma como é utilizada. A especificação LoRaWAN® é desenvolvida e mantida pela LoRa Alliance®: uma associação aberta de membros colaboradores (LORA Alliance®, 2020).

3.6.2 Classificação de dispositivos

LoRaWAN (LORA Alliance®, 2020) tem três classes diferentes de dispositivos de ponto final para atender às diferentes necessidades refletidas na ampla gama de aplicações:

Classe A - menor potência, dispositivos finais bidirecionais: apresenta a classe padrão que

deve ser suportada por todos os dispositivos finais LoRaWAN, a comunicação de classe A é sempre iniciada pelo dispositivo final e é totalmente assíncrona. Cada transmissão de uplink pode ser enviada a qualquer momento e é seguida por duas janelas curtas de downlink, dando a oportunidade de comunicação bidirecional ou comandos de controle de rede, se necessário. Este é um tipo de protocolo ALOHA. O dispositivo final é capaz de entrar no modo de suspensão de baixo consumo de energia pelo tempo definido por seu próprio aplicativo: não há requisitos de rede para ativações periódicas. Isso torna a classe A o modo de operação de menor energia, permitindo ainda a comunicação de uplink a qualquer momento. Como a comunicação de downlink deve sempre seguir uma transmissão de uplink com uma programação definida pelo aplicativo do dispositivo final, a comunicação de downlink deve ser armazenada em buffer no servidor de rede até o próximo evento de uplink (LORA Alliance®, 2020), (SEMTECH CORPORATION, 2015).

Classe B - Dispositivos finais bidirecionais com latência de downlink determinística: Além das janelas de recebimento iniciadas pela classe A, os dispositivos da classe B são sincronizados com a rede usando beacons ou faróis periódicos e abrem "slots de ping" no downlink em horários programados. Isso fornece à rede a capacidade de enviar comunicações de downlink com uma latência determinística, mas às custas de algum consumo de energia adicional no dispositivo final. A latência é programável em até 128 segundos para se adequar a diferentes aplicativos, e o consumo de energia adicional é baixo o suficiente para ser válido para aplicativos alimentados por bateria (LORA Alliance®, 2020), (SEMTECH CORPORATION, 2015).

Classe C - menor latência, dispositivos finais bidirecionais: Além da estrutura de uplink classe A seguida por duas janelas de downlink, a classe C reduz ainda mais a latência no downlink, mantendo o receptor do dispositivo final aberto em todos os momentos em que o dispositivo não está transmitindo (half duplex). Com base nisso, o servidor de rede pode iniciar uma transmissão de downlink a qualquer momento, supondo que o receptor do dispositivo final esteja aberto, portanto, sem latência. O compromisso é o consumo de energia do receptor (até 50mW) e, portanto, a classe C é adequada para aplicações onde a energia contínua está disponível. Para dispositivos alimentados por bateria, a alternância de modo temporário entre as classes A e C é possível e é útil para tarefas intermitentes, como atualizações de firmware sem fio (SEMTECH CORPORATION, 2015).

3.6.3 Data Rate

Além de salto de frequência, todos os pacotes de comunicação entre dispositivos finais e Gateways também incluem uma configuração variável de 'Taxa de dados' (DR). A seleção do DR permite um equilíbrio dinâmico entre o alcance da comunicação e a duração da mensagem. Além disso, devido à tecnologia de espalhamento espectral, as comunicações com diferentes DRs não interferem entre si e criam um conjunto de canais de 'código' virtuais aumentando a capacidade do Gateway. Para maximizar a vida útil da bateria dos dispositivos finais e a

capacidade geral da rede, o servidor de rede LoRaWAN® (LORA Alliance®, 2020) gerencia a configuração de DR e a potência de saída de RF para cada dispositivo final individualmente por meio de um esquema Adaptive Data Rate (ADR). As taxas de transmissão LoRaWAN® variam de 0,3 kbps a 50 kbps.

3.6.4 Segurança

A segurança é a principal preocupação para qualquer implantação de IoT em massa e a especificação LoRaWAN® define duas camadas de criptografia: uma chave de sessão de rede exclusiva de 128 bits compartilhada entre o dispositivo final e o servidor de rede e uma outra chave de sessão de aplicativo (AppSKey) exclusiva de 128 bits compartilhada de ponta a ponta no nível do aplicativo. Os algoritmos de encriptação também conhecidos como Advanced Encryption Standard (AES), são usados para fornecer autenticação e integridade de pacotes para o servidor de rede e criptografia ponto a ponto para o servidor de aplicativos. Ao fornecer esses dois níveis, torna-se possível implementar redes compartilhadas "multi-locatário"(multi-home) sem que a operadora de rede tenha visibilidade dos dados de carga útil dos usuários (LORA Alliance®, 2020).

As chaves podem ser ativadas por personalização (ABP), (Activation by Personalization (ABP)) na linha de produção ou durante o comissionamento, ou podem ser ativadas pelo ar (Over-The-Air Activation (OTAA)) em campo. O OTAA permite que os dispositivos sejam redigitados, se necessário.

3.6.5 Especificação

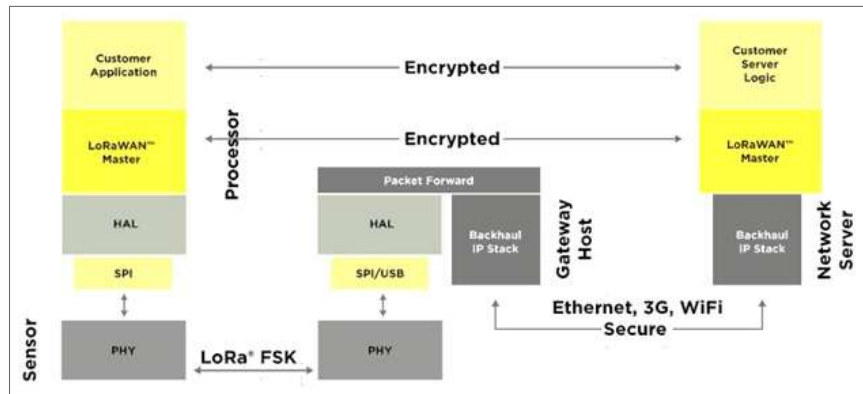
Neste caso, a especificação é mostrada na Figura 6, onde são definidos os parâmetros da camada física do dispositivo da (LoRa®) e seu protocolo (LoRaWAN®), fornecendo assim interoperabilidade entre os fabricantes.

Também se considerar que a especificação defina a implementação técnica como neste pesquisa, já que ela, não define nenhum modelo ou tipo de implantação (pública, compartilhada, privada, empresarial) é, assim, que oferece à indústria a liberdade para inovar na forma como ela é utilizada. Por outro lado, LoRaWAN® é desenvolvida e mantida pela LoRa Alliance®: que é uma associação aberta de membros colaboradores.

3.6.6 Camada física

A camada física do LoRa faz uso de um esquema de modulação baseado em Chirp Spread Spectrum (CSS), amplamente utilizado no campo militar e em comunicações seguras devido à sua robustez e baixo consumo de energia. Cada símbolo é representado por um sinal sinusoidal

Figura 6 – Parametros da camada fisica do dispositivo



Fonte: (LORA Alliance®) (2020)

cuja frequência muda ciclicamente dentro de uma largura de banda limitada, B , em torno de uma frequência central (f_c). A partir de um valor inicial, a frequência aumenta até atingir um máximo de $(f_c + B/2)$, momento em que salta para o nível mínimo $(f_c - B/2)$ para continuar aumentando até repetir o ciclo novamente.

O número de valores iniciais de frequência é dado por $2SF$, onde SF (Spread Factor) é o número de bits do símbolo transmitidos, que pode variar entre os valores (7-12). Por sua vez, LoRa, implementa um mecanismo de correção de erro aplicando diferentes valores de CR (Taxa de Código) entre (4/5, 4/6, 4/7, 4/8) para ajustar o valor de FEC (Correção de Erro para frente) procurado. Os valores de B , CR , SF definem a taxa de bits LoRa R_b em um link ponto a ponto.

O quadro (frame) da camada física LoRa Figura 7, é composto por um preâmbulo, que facilita a sincronização e define o esquema de modulação pela definição de um SF específico, cuja duração é geralmente de $12,25 T_s$, seguido pelo cabeçalho PHY e pelo cabeçalho cíclico de verificação de erros CRC que formam um total de 20 bits codificados com um código 4/8. O resto do quadro é codificado de acordo com a proporção específica do cabeçalho PHY, que por sua vez contém informações como o comprimento dos dados úteis (payload) e se ele se aplica ou não a um mecanismo CRC de 16 bits no uplink (HACKMD®, 2017)

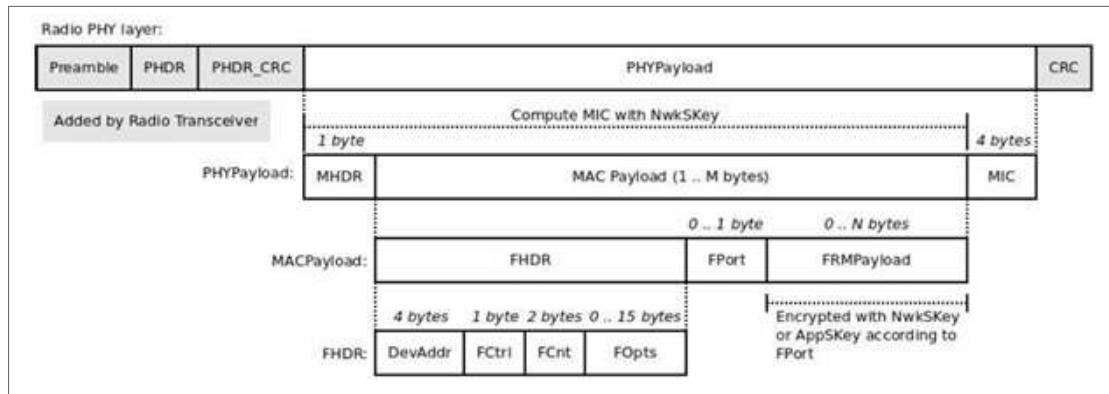
O número de símbolos n necessários para transmitir o cabeçalho e os dados úteis da camada física podem ser obtidos através da equação (3.16), e o gráfico através da equação: (3.19).

3.6.7 Camada de enlace

A atribuição dos canais depende das restrições de acordo com a área geográfica atribuída, bem como das opções de rede, (LEE, 2014) portanto, os canais primários são reservados para transmissão de dados e, por outro lado, o canal downlink é reservado para o Gateway, como mostra a Figura 8.

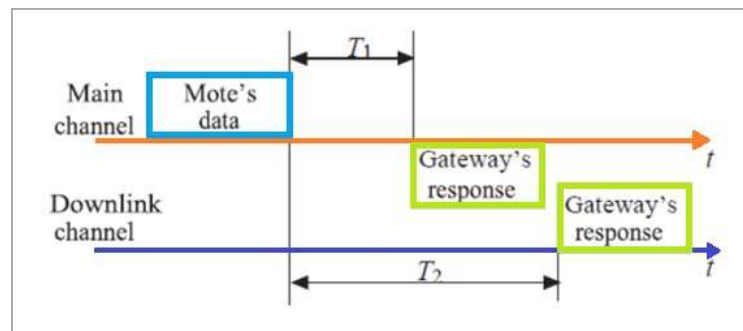
Quando um dispositivo (End Device (ED)), assumindo que é de classe A, tem informa-

Figura 7 – Formato de quadro



Fonte: (HACKMD®) (2017)

Figura 8 – Acesso a um canal LoRa



Fonte: (LEE) (2014) Modificação: Acervo do autor

ções a serem transmitidas, ele seleciona aleatoriamente um dos principais canais atribuídos, transmitindo os dados seguindo o protocolo de acesso ao meio ALOHA, não levando em consideração a sincronização da portadora. No final da transmissão da informação, o dispositivo abre duas janelas de recepção de dados, uma para transmitir na direção uplink e outra para receber downlink, caso tenha sido exigido no cabeçalho MAC. Conforme mostrado na Figura 8, a janela de recepção permanece aberta por T_1 segundos e T_2 segundos depois (SEMTECH CORPORATION, 2015).

Os dispositivos de Classe B são sincronizados com o servidor da rede, por meio de beacons transmitidos pelo Gateway. por sua vez, os dispositivos finais podem receber informações em janelas de durações específicas, independentemente do fluxo de tráfego (uplink). Os dispositivos de classe C, por sua vez, não têm limitações de tempo nas janelas de recepção e podem continuar ouvindo continuamente (LORA Alliance®, 2020).

3.6.8 Exemplos práticos

LoRa, traz consigo vários benefícios para todo tipo de necessidade, por isso o artigo (SANCHEZ; SADOK, 2020) fala do Universo da Internet das coisas (UIoT), veja a Fig. 3.

Com a tecnologia LoRaWAN®, cujos sensores sem fio de longo alcance e baixa potência podem enviar dados da fazenda para a nuvem, por meio de redes privadas ou públicas, os agricultores têm fácil acesso a uma série de informações para melhorar seus negócios, com uma vantagem distinta sobre o uso de satélites e drones. Esses dados de alto valor podem ser transmitidos a distâncias de até 15 km de sensores com baterias que duram até 10 anos, resultando em menores custos de manutenção e operação, juntamente com maior visibilidade operacional, o que, por sua vez, capacita os agricultores a escalar seus negócios (LORA Alliance®, 2020).

Os agricultores podem monitorar melhor as condições dos animais, como temperatura corporal, doenças, produtividade, localização, bem como prevenir melhor a perda ou roubo de gado. Por outro lado podem registrar com precisão as chuvas e outras condições climáticas, definir alarmes de risco de enchentes e outros alertas de mudanças na qualidade da água ou uso excessivo de produtos fitossanitários (LORA Alliance®, 2020).

LoRaWAN®, também pode ser utilizada para edifícios inteligentes, fornecendo conectividade de longo alcance e baixo consumo de energia em implementações comerciais em grande escala. LoRaWAN® como tecnologia, poderia chegar a permite a gestão de construção como uma alternativa que ajude a garantir melhoras nas construções e funcionem em harmonia com o meio ambiente (LORA Alliance®, 2020).

Os dados LoRaWAN podem ser incorporados aos sistemas existentes da cidade que enviam notificações, criam relatórios, ativam processos, alertam pessoas ou acionam outras ações automatizadas.

O LoRaWAN adiciona uma rede dedicada especificamente desenvolvida para os aplicativos da Internet das Coisas, liberando outras infraestruturas de comunicação da cidade para serem utilizadas de forma mais econômica, empregada com mais eficiência e para obter maiores retornos sobre o investimento (ROI) (LORA Alliance®, 2020).

Uma rede de sensores que fornece aos trabalhadores dados em tempo real por meio da nuvem é uma ferramenta poderosa que pode afetar todos os aspectos do processo de fabricação. Aqui estão alguns benefícios das soluções de tecnologia LoRaWAN sendo implementadas nas fábricas:

- Detecção de fumaça, vazamentos, incêndios e controle geral da qualidade do ar e da temperatura.
- Monitoramento da presença e vazão de líquidos em tubulações e tanques.
- Monitoramento das condições de equipamentos, máquinas e infraestrutura das instalações.
- Monitorar a segurança e proteção do pessoal e ativos.
- Monitoramento dos níveis de energia da bateria e consumo de energia da máquina.

LoRaWAN® (LORA Alliance®, 2020) oferece maior mobilidade em logística. É bem conhecido que na indústria os recursos de baixo consumo e longo alcance da tecnologia LoRaWAN tornam tudo isso possível. Nenhuma outra solução oferece visibilidade dinâmica e em tempo real e recursos de gerenciamento de transporte em grandes distâncias por terra, mar e ar. Dispositivos e sensores de rastreamento movidos a LoRa podem ser montados em contêineres, veículos e ativos retornáveis, enviando dados continuamente sobre as condições e localização por meses ou mesmo anos sem trocar as baterias (LORA Alliance®, 2020).

As empresas de serviços públicos de água, eletricidade, gás e aquecimento enfrentam o desafio de atender à maior demanda pública, aumentar a eficiência e fornecer serviços de alta qualidade em áreas urbanas densas ou áreas rurais remotas. Portanto, as concessionárias estão na vanguarda da transformação digital e de uma estratégia global de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) de adotar a IoT para construir a nova rede inteligente de amanhã e lucrar com soluções baseadas na Internet (SIGFOX, 2009-2020; SEMTECH, 2020; LORA Alliance®, 2020).

Hoje, com a oferta de consumo de baixo consumo de energia e conectividade de longo alcance com a tecnologia de rede LoRaWAN®, as concessionárias podem se beneficiar da mesma rede de medidores inteligentes para coleta automatizada de dados de medidores e outros dispositivos IoT para melhorar a eficiência operacional e gerar receitas mais eficientes streams com monitoramento sem fio do uso de energia, gás, calor e água quase em tempo real. (LORA Alliance®, 2020).

Esses exemplos e muitos mais podem ser alcançados com LoRa, por isso foi escolhido nesta dissertação para trabalhar com este tipo de tecnologia que oferece um amplo leque de possibilidades de utilização.

3.7 COMUNICAÇÃO EM REDES SEM FIO E DE SENSORES

As diferenças das redes sem fio, está principalmente na camada física e de enlace de dados, de acordo ao modelo de referência OSI, A Camada Física ou Physical layer (PHY), indica como os bits são enviados de uma estação para outra, a camada de enlace de dados conhecido como MAC, é responsável por descrever como os bits são embalados e verificados para que não haja erros, as outras camadas cuidam de protocolos, pontes, roteadores ou Gateways que são usados para conectar (GOURSAUD; GORCE, 2015).

3.7.1 Camada Física (PHY)

O IEEE 802.11 oferece várias opções em sua camada física (PHY). Essas tecnologias denominado "Espectro de propagação de sequência direta, amplo espectro através Sequência direta ou Direct sequence spread spectrum (DSSS)", "Espectro de propagação com salto de

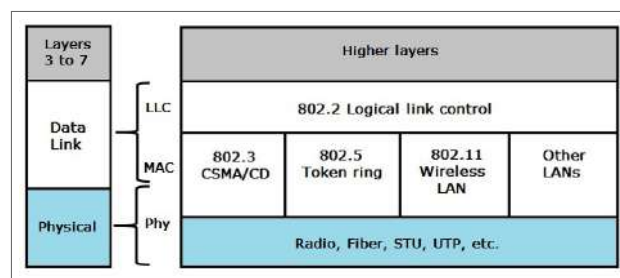
frequência, também conhecido como Frequency-Hopping Spread Spectrum (FHSS).", "Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM" ou multiplexação por divisão ortogonal de frequência e "Infravermelho (IR)", foram projetados para operação de comunicações sem fio nas bandas de frequência de 2,4 e 5 GHz não licenciadas do ISM (GOURSAUD; GORCE, 2015).

3.7.2 Camada MAC

A cobertura MAC tem a responsabilidade de associar um cliente sem fio a um ponto de acesso (AP). Quando um cliente entra na cobertura de um ou mais pontos de acesso, se algum deles estiver vinculado a um link, com base na força do sinal recebido poderá acessar ao ponto de enlace. Uma vez conectado a um ponto de acesso, o cliente sintoniza uma estação de rádio onde o ponto de acesso está configurado (DAN; LANGENDOEN, 2003).

A camada de link 802.11 é subdividida em sub-camadas: camada do link lógico (LLC) e MAC, como que vemos na Figura 9.

Figura 9 – Camadas 802



Fonte: Acervo do autor (2021)

Devido a impossibilidade de implementação da técnica de detecção de colisão do 802.3 CSMA/CD, dada a impossibilidade para "ouvir" uma colisão, 802.11 envolve uma modificação de protocolo chamada CSMA/CA. Este protocolo evita colisões, enviando um pacote reconhecimento (ACK) para confirmar a chegada do pacote enviado ao receptor. Finalmente, a camada MAC oferece duas características que melhoram a robustez padrão: verificação de soma CRC ou Cyclic Redundancy Check (CRC) e fragmentação de pacotes. Cada pacote está associado a um CRC para garantir que o pacote não foi corrompido na transmissão. Esta é uma diferença com as redes com fio, uma vez que isso deixou tais verificações para os protocolos de níveis superiores (GSMA, 2018).

3.7.3 Limitações do Duty cycle

O Duty cycle é a fração de tempo em que o recurso está ocupado. Quando um único dispositivo transmite em um canal por duas unidades de tempo a cada 10 unidades de tempo, esse dispositivo tem um ciclo de trabalho de 20% como no exemplo na Figura 10.

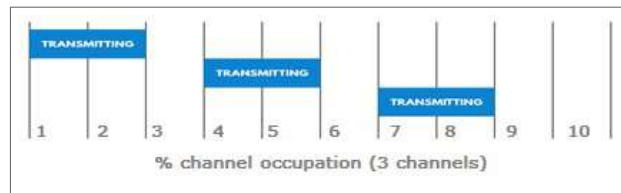
Figura 10 – Channel occupation



Fonte: Acervo do autor (2020)

No entanto, se também considerarmos os canais, as coisas ficam um pouco mais complicadas. Quando temos um dispositivo que transmite em 3 canais em vez de um, cada canal individual ainda está ocupado por 2 unidades de tempo a cada 10 unidades de tempo (portanto, 20%). No entanto, o dispositivo agora está transmitindo por 6 unidades de tempo a cada 10 unidades de tempo, dando a ele um ciclo de trabalho de 60% Figura 11.

Figura 11 – Channel occupation



Fonte: Acervo do autor (2020)

3.7.4 Ciclo de Trabalho Máximo

O ciclo de trabalho dos dispositivos de rádio é regulamentado por regulamentações governamentais. Normalmente 1% não deve ser excedido.

Além disso, a especificação LoRaWAN determina que a ligação de frequência seja usada para redes compatíveis com LoRaWAN em ativações de dispositivo over-the-air activations (OTAA). Na maioria das regiões, esse Duty cycle é de 1%.

3.8 TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta seção, serão apresentados alguns trabalhos relacionados que têm por foco otimizações energéticas a nível de camada física e MAC, ou seja, modelos de consumo de energia que buscam modelar e minimizar o consumo energético em redes ad hoc e de sensores sem fio.

Nos diferentes trabalhos relacionados com a tecnologia LPWAN da qual LoRa faz parte, foram analisados diferentes artigos, como (ADELANTADO et al., 2017), (ASHTON, 2009), (BOR et al., 2016), (BUTUN; PEREIRA; GIDLUND, 2019), (CHEN et al., 2009). A partir destes artigos é feita uma análise da tecnologia LoRa e LoRaWAN, de acordo com os conceitos fundamentais deste tipo de tecnologia.

Em (ASHTON, 2009) é realizada uma revisão onde são corroborando as tendências utilizadas em pesquisas e aplicações de LoRa e LoRaWAN, daí a apresentação dos diferentes trabalhos de pesquisa levando em consideração suas categorias com este tipo de tecnologia, a partir de o que pode ser dito que, atualmente, o aumento do número de pesquisas sobre a avaliação técnica e a real implantação do LoRa, tornou-se uma tendência de pesquisa com grande interesse nos últimos anos, desenvolvendo avanços significativos no campo das telecomunicações.

Por outro lado, em (BOR et al., 2016) é apresentada uma análise de comparações entre as diferentes tecnologias emergentes para ambientes IoT. Consequentemente para (CAPUZZO; MAGRIN; ZANELLA, 2018), o desempenho, análise, sustentabilidade e custo da tecnologia LoRa são avaliados, levando em consideração o caso de uma rede de grande escala em uma grande área com centenas de nós, e verificando se o número de As colisões podem aumentar, afetando negativamente a capacidade do canal de comunicação, visto que este é um recurso de grande importância nas comunicações.

Assim, (CIRIPOI et al., 2018) analisa os limites técnicos do LoRaWAN e as congruências que oferece do ponto de vista de um nível de enlace, concentrando-se nos ambientes rurais. De acordo com uma avaliação empírica, seguida de uma simulação. Por isso, estipula-se que, ao se utilizar um único Gateway em uma área superior a 40 km, devem ser utilizados valores maiores de Spreading Factors para cobrir os nós distantes, o que leva a uma menor eficiência no uso do espectro.

Por outro lado, ao usar 4 Gateways na mesma área, é perceptível que a capacidade da rede aumenta. Em (CUPCARBON, 2019), é realizado um estudo onde se utiliza um Gateway, apresentando um desempenho aceitável em grande parte da área selecionada, detectando sinais deficientes, sendo essas deficiências causadas pela presença de edifícios altos que interferem na qualidade do transmissão de dados; são algumas das conclusões deste trabalho (CUPCARBON, 2020). Em (CUPCARBON, 2019) testes foram realizados no interior dos edifícios, e medidas com ótimo desempenho foram obtidas.

Consequentemente, em (GEUN; SOOK, 1995) a capacidade do LoRaWAN foi avaliada, em termos de lidar com grandes quantidades de tráfego gerado pelos sensores, dispersos em um ambiente urbano denso. Desta forma, foi estabelecido para demonstrar que ao implementar LoRa, em escala real, os dados podem ser transmitidos com segurança acima de 89 %. Também em (FALL; VARADHAN, 2011) simulações e coberturas são evidenciadas em diferentes cidades, nas quais a cobertura de radiofrequência para uma rede LoRaWAN foi levada em consideração. E finalmente, em (GRIJPINK et al., 2020),(HASSAN, 2018), (HAXHIBEQIRI et al., 2017) foram avaliadas as tecnologias correspondentes ao LoRaWAN, ou seja, dispositivos LoRaWAN que podem ser aplicados em diferentes ambientes de acordo com as necessidades.

3.9 FERRAMENTAS DE SOFTWARE

O objetivo desta subseção é apresentar e comparar algumas ferramentas de software para simular redes LoRaWAN com suas principais características e funcionalidades. Além disso, os motivos da seleção do simulador de rede CupCarbon para este estudo são expostos. A comparação dos simuladores de rede WSN é mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 – WSN Network Simulators

Parameters	NS-2	NS-3	OMNET ++	TOSSIM	CupCarbon
User rese-arch activi-ties	High	Medium	High	Medium	Low.
Sort of li-cence	GNU GPL	Free	Academic Pu-blic Licence	BSD	GNU .
Curve of le-arning	High	High	High	High	Medium.
Platforms	Free BSD,Linux	Linux, OS-X	Windows, Unix	Windows, Linux, Cywing	Windows, Linux, MAC .
Graphical in-terface	Low	Medium	High	High	High.
Result through graphs	Not ava-liab.	Acceptable	Acceptable	Acceptable	Acceptable.
Supported technolo-gies and layers 2-3 protocols	TCP/IP, UDP,FTP, RTP, GPRS, Mobile-IPv6, MPLS	IPv6/IPv4, 802.11a, 802.11b, 802.11g, OLSR	802.11, (ad-hoc ting)	fair rou- (CSMA)	Low.
Traffic mo-deled	High	Medium	Medium	High	-.
Energy mo-delng	Yes	-	No	No	Yes.
Programming language	C/C++, Otcl	-	Ned	Python, C++	Java, SenS-cript.

Fonte: (CUPCARBON) (2020)

NS-2 é uma ferramenta de simulação de eventos discretos e uma das mais utilizadas (FALL; VARADHAN, 2011). Começou como um simulador de rede geral e, posteriormente, o NS-2 adicionou suporte para RSSF. Seu grande sucesso se deve às suas possibilidades de uso, sua disponibilização ao público e suas características que permitem aos usuários executar e

testar vários tipos de rede. Uma desvantagem do NS-2 é que o suporte gráfico através da ferramenta chamada Nam (AniMator) é muito pobre (RAJARAM et al., 2016). Finalmente, a versão mais recente é mais adequada para redes de sensores, uma vez que inclui modelagem de energia (KORKALAINEN et al., 2009).

NS-3 é um simulador de eventos de rede discreto que surge após a descoberta de um conjunto de falhas importantes em NS-2. NS-3 não é uma atualização do NS-2. As simulações são baseado somente em C++ e também é compatível com Python (NS-3, 2011-2020). NS-3 fornece uma maneira fácil e rápida de criar a topologia por meio de uma interface intuitiva, que permite adicionar nós (HENDERSON et al., 2006).

OMNeT++ é outra ferramenta popular de simulação de eventos discretos que deve seu sucesso à sua extensibilidade e a ser de código aberto (open source) (OMNET, 2001-2019). OMNET++ oferece um interface gráfica muito poderosa. Uma desvantagem é a falta de protocolos e modelagem de energia em sua biblioteca em comparação com outros simuladores (CHEN et al., 2009). Os módulos que compõem a ferramenta não estão totalmente desenvolvidos. Isso implica que os programadores deve modificar o código existente, para que a curva de aprendizado seja alta.

TOSSIM é um simulador de eventos discretos para TinyOS WSNs (TINYOS, 2013). Seu objetivo principal é fornecer alta fidelidade para a simulação de aplicativos TinyOS. Este simulador pode ser usado para avaliar o comportamento em casos reais. As principais desvantagens da TOSSIM são os seguintes: é baseado na suposição de que todos os nós execute exatamente o mesmo código, o que o torna menos flexível e não modela o consumo de energia. No entanto, nas últimas versões de PowerTOSSIMz foi adicionado o qual resolve este problema (PERLA et al., 2008).

CupCarbon é um simulador especialmente desenvolvido para redes RSSF (MOCS, 2019), (CUPCARBON, 2020). Seu objetivo é o desenho e visualização deste tipo de redes, possui algoritmos para monitoramento ambiental, coleta de dados, entre outras características. CupCarbon Oferece dois ambientes de simulação. O primeiro permite o desenho de cenários com mobilidade e geração de eventos naturais e o segundo, a simulação de eventos discretos em RSSF.

Uma simulação de rede pode ser projetada por meio de sua forma gráfica, intuitiva e interface amigável, que usa OpenStreetMap (OSM), onde o usuário pode pesquisar cenários específicos. Uma de suas características é que os sensores podem ser configurados individualmente por meio de suas linhas de comando, em uma linguagem especialmente projetada chamada SenScript. CupCarbon não implementa todas as camadas de protocolos, mas conta como uma ferramenta com as principais características dos sensores LoRa, seu consumo de energia, entre outras. É aí que está sua verdadeira funcionalidade excepcional, dando opções para observar o consumo de recursos naturais e o efeito de edifícios e ruas nas redes urbanas e suburbanas. CupCarbon pode simular os protocolos ZigBee, LoRa e WiFi.

Outra característica importante do CupCarbon é o consumo de energia, que pode ser

calculado e exibido graficamente com base no tempo de simulação. Além do que, permite observar a visibilidade dos modelos de propagação e interferência. Por outro lado, embora não se destaque por ter uma ampla variedade de protocolos integrados, mas como foi implementado usando Java, isso permite a criação de diferentes algoritmos.

Depois de estudar alguns simuladores de rede, o CupCarbon tornou-se muito interessante com parâmetros que o tornam uma ferramenta de vanguarda em seu uso hoje, como seu poder de modelagem, sua interface gráfica, que são aspectos muito importantes na análise uma rede de sensores, além de ter tecnologias como Zigbee, WiFi, LoRa e outros. Os outros simuladores diferentes do CupCarbon não incluem ferramentas para o design de sensor com uma interface intuitiva, adaptabilidade de design, programação Java e modelagem de energia. Além disso, é importante ter um conhecimento em RSSF para entender como funcionam esses simuladores. É por isso CupCarbon está se mostrando uma boa opção para trabalhar na análise de RSSF.

3.10 CONCLUSÃO

A tecnologia Bluetooth tem um alcance insuficiente, da ordem de alguns metros, o que o torna inadequada para este projeto. Embora o Wi-Fi permita maiores distâncias do que o Bluetooth, para este projeto exigiria um número muito grande de pontos de acesso, da ordem de alguns em cada bloco, o que dificultaria a sua implementação e gestão, e aumentaria consideravelmente custos da solução. Usar uma rede celular parece ser a melhor escolha devido à sua gama de cobertura e infraestrutura implantada. No entanto, as versões atualmente disponíveis nas operadoras, não são as versões recomendadas pelo 3GPP (MOCS, 2019), (VONDROUŠ et al., 2016) para a IoT.

Devido às desvantagens apresentadas pelas tecnologias analisadas, optou-se por buscar alternativas. Nos últimos anos, tecnologias e protocolos específicos foram desenvolvidos para o cenário proposto por nosso projeto. Essas tecnologias são descritas a seguir.

Neste capítulo foi realizada uma revisão da literatura dos tópicos relevantes abordados nesta dissertação. Foi feita uma análise a nível de comparação no que se refere à temática de redes sem fio ad hoc e de sensores. Com base nesse estudo, foi possível inferir que os dispositivos que compõem essas redes possuem recursos energéticos limitados.

Por este motivo, a utilização de estratégias que minimizem o consumo energético nos dispositivos é de extrema importância para garantir a longevidade de operação dessas redes. E, uma vez que o maior consumo energético se dá durante o processo de comunicação entre os nós. Foram apresentados ainda neste capítulo os trabalhos relacionados ao estado da arte que buscam minimizar o consumo energético a nível de camada física e de camada MAC.

Verificou-se ainda que não há muitas abordagens que apresentem, com riqueza de parâmetros, uma avaliação conjunta de fatores dessas camadas que otimizem o consumo energético.

4 CONSUMO DE ENERGIA

Este capítulo tem por finalidade discutir o consumo energético e os trabalhos relacionados, considerando a rede LoRa, e utilizando sua arquitetura LoRaWAN.

4.1 MARCO CONCEITUAL

4.1.1 Sensores e Consumo

Como já foi discutido nas seções anteriores, LPWAN, LoRa e sua arquitetura LoRaWAN, atraiu a atenção devido ao seu suporte para comunicação longa distância de baixo custo (QUERALTA et al., 2019). Os dispositivos LoRa geralmente operam com baterias, especialmente no caso do dois dispositivos LoRa classes A e B. Dispositivos LoRa classe C deverão se conectar à rede pública de energia. Consequentemente, o projeto de RSSF deve explorar todas as estratégias possíveis para a redução do consumo de energia (NOLAN; GUIBENE; KELLY, 2016).

Neste contexto, é necessário levar em consideração algumas preocupações importantes. Os protocolos adotados no protocolo de acesso ao meio (MAC) e camadas físicas devem ser cuidadosamente projetados para economizar energia. Por exemplo, o protocolo MAC deve evitar o projeto complexo de seu algoritmo de acesso ao canal e deve reduzir as colisões de pacotes. Isso é compreensível como ambos os critérios levam a um desperdício de energia se não forem projetados de maneira adequada.

Por exemplo, colisões de pacotes levam a novas retransmissões e, portanto, consumo de energia adicional (SORENSEN et al., 2017). Outro caso onde a energia é perdida devido ao projeto de protocolo incorreto, seria durante o modo de escuta inativo, no qual o nó permanece ouvindo, possivelmente, sem receber tráfego. Ou seja, uma vez que o nó não sabe se vai receber um pacote ou não, e por isso fica na forma de escuta ociosa (MARAIS; ABU-MAHFOUZ; HANCKE, 2020). LoRa lida com este problema permitindo apenas a recepção de downlink depois que um nó transmitiu algo. Em outras palavras, uma classe de nó A, só acorda para transmitir um pacote quando exigido por sua aplicação e permanecerá com seu canal de recebimento aberto apenas por uma pequena janela de tempo.

Com base na importância dos LPWANs para diferentes cenários de IoT, os autores em (SONG et al., 2017) mostram que cumprem com os requisitos estritos de confiabilidade e eficiência energética impostos por Redes IoT. O estudo examina tecnologias de curto alcance para soluções industriais e tecnologias de comunicação de longo alcance e compará-los em termos de escalabilidade, cobertura de rádio e eficiência energética.

De acordo com (TUNC; AKAR, 2017) LPWANs são dominados por duas soluções amplamente adotadas; estes são, a tecnologia de banda ultra estreita da Sigfox e da tecnologia Chirp Spread Spectrum (CSS) da Semtech Corporation (SEMTECH CORPORATION, 2015). Ambas as

soluções são avaliadas em termos de cobertura e consumo de energia. LoRaWAN está sendo amplamente implantado devido à sua competitividade em vários casos de uso e aplicações (BOUGUERA et al., 2018).

Na ausência de comunicações de máquina para máquina 5G (MMC), muitos trabalhos vão além e argumentam que LoRaWAN é atualmente a melhor alternativa em termos de custo, duração da bateria e eficiência energética. O 4G NB-IoT atual é excelente no que diz respeito à qualidade de serviço (QoS), latência e confiabilidade (CASALS et al., 2017).

Para equilibrar o consumo de energia e o desempenho da rede, os autores em (DENG; ZHU; NIE, 2017) propõem um protocolo de controle de acesso ao meio de ciclo de trabalho adaptativo (ADC-MAC). A ideia básica do protocolo é que cada nó sensor mantém três indicadores incluindo a energia residual, a carga do nó e a taxa de congestionamento da rede. O nó sensor seleciona um ciclo de trabalho diferente para controlar o intervalo mínimo dos uplinks. O esquema assíncrono é mais fácil de implementar, pois a sincronização de tempo não é necessária. Os resultados, adquiridos pela OPNET, demonstram que o protocolo ADC-MAC proposto tem vantagens óbvias em estender a vida útil da bateria e melhorar a taxa de entrega de pacotes.

Esta tecnologia é conhecida por oferecer maior cobertura de rádio (LAVRIC; PETRARIU; POPA, 2019), (JARADAT et al., 2019). O trabalho conclui que uma grande área de cobertura e uma vida mais longa da bateria dos dispositivos finais podem ser garantidas. Similarmente ao nosso trabalho, o impacto da tecnologia de baterias ou produtos químicos composição na otimização de desempenho LoRaWAN foi avaliado em (LORA Alliance®, 2020), (ELSHABRAWY; ROBERT, 2018).

Nesta pesquisa, uma rede LoRa de quatro nós é apresentada, e o desempenho do consumo de energia nos nós é comparado. O software de simulação utilizado foi CupCarbon (CUPCARBON, 2020) e o sensor simulado usado nesta rede é o dispositivo SX1272 / 73 da Semtech Corporation (SEMTECH, 2020). A comparação leva em consideração dois tipos de baterias, uma de lítio e outra de níquel, com o objetivo de obter o melhor desempenho no tempo de descarga da bateria durante o uso dos sensores executando o algoritmo de Jarvis March.

Uma das principais diferenças trabalhadas nesta pesquisa foi o comportamento do consumo de energia por meio do algoritmo de geometria computacional, o que resultou em um melhor arranjo de energia de acordo com os resultados obtidos, é assim que Optou-se por trabalhar com algoritmos de geometria computacional, pois proporcionam melhor desempenho em cascos convexos, em comparação com outros algoritmos de roteamento para otimizar o consumo de energia, uma ideia inovadora para desempenho de consumo de energia em pequenas redes sem fio.

4.1.2 Abordagem do Consumo de Energia

Neste documento, uma rede sem fio LoRa de quatro nós é apresentada, com o fim de melhorar o desempenho do consumo de energia. O protocolo LoRaWAN e o software de simulação CupCarbon e o sensor simulado usado nesta rede é o dispositivo SX1272 / 73 da Semtech Corporation. A comparação leva em consideração dois tipos de baterias, uma de lítio e outra de níquel, com o objetivo de obter o melhor desempenho em o tempo de descarga da bateria durante o uso dos sensores.

Além disso, é importante considerar o tempo durante o qual o canal não está disponível para transmissão que é conhecido como tempo livre (T_{off}) e sua representação matemática é mostrada em (4.1). Se o canal não estiver disponível no momento da transmissão, o nó final deve esperar um intervalo de T_{off} antes de agendar a transmissão subsequente.

$$T_{off} = \frac{TimeOnAir}{DutyCycle_{subband}} - TimeOnAir \quad (4.1)$$

Igualmente importante é o conceito de Detecção de Atividade do Canal, que é projetado para detectar um preâmbulo LoRa no canal de rádio com a melhor eficiência energética possível; os dispositivos LoRa são equipados com bateria, é por este motivo que sua operação de ciclo de trabalho deve ser analisada para alcançar melhor duração da bateria. Durante as medições, os nós na rede permanecem em um estado de espera ou stand by periodicamente antes do próximo ciclo de transmissão. Portanto, o intervalo de detecção (I_{Dect}) é definido como a tempo de pausa entre os nós e é expresso em (4.2) (SANCHEZ-IBORRA; CANO, 2016).

$$I_{Dect} = I_s + 2I_{SW} \quad (4.2)$$

Onde (I_s) é a quantidade de tempo durante o qual os nós permanecem em modo de espera e (I_{SW}) é o tempo que os nós levam para mudar entre o modo ativo e o modo de espera. O curto intervalo de detecção ajuda a detectar a anomalia nas fases iniciais, mas também causa uma redução da vida útil da bateria. Por esta razão, podemos analisá-lo a partir do custo econômico e funcional e o tempo de vida da rede. Portanto, a eficiência do sistema estaria em jogo.

Em aplicações reais, muitos tipos de baterias podem ser considerados, onde suas vidas úteis dependem das variações climáticas e o tipo de nó sensor considerado. Em uma simulação de um sensor sem fio, a vida útil da rede é condicionada pelo status da bateria de cada nó. É por isso que modelar corretamente a bateria se torna importante para obter resultados de sucesso em uma RSSF (SANCHEZ-IBORRA; CANO, 2016).

A carga média (A) no estado de transmissão, hibernação e switch (mudança de estado) pode ser estimada levando em consideração o presente plotado em diferentes modos de monitoramento e o período de tempo que um dispositivo permanece em um determinado estado.

Pode ser expressa como em (4.3), onde T_{tx} é o momento em que um nó está transmitindo e C_{tx} é a corrente média consumida no modo de transmissão (DENG; ZHU; NIE, 2017).

$$\bar{A} = \bar{C}_{tx} T_{tx} \quad (4.3)$$

4.1.3 Bateria – Carga e descarrega

Uma bateria é um dispositivo que tem a capacidade de converter a energia química armazenada em energia elétrica (IEEE, 2017). Se a reação de redução de óxido for um processo reversível, é uma bateria recarregável ou secundária, e se a reação não for, é uma bateria não recarregável ou primária.

Existem baterias de lítio primárias e secundárias; No entanto, é esse tipo de bateria que costuma ser encontrado alimentando equipamentos eletrônicos usados no dia a dia de nossas vidas, como smart watch, câmeras, smart phone, telefones sem fio e tablet ou iPad. No desenvolvimento de sistemas eletrônicos que requerem baixo consumo de energia, é comum o uso de circuitos alimentados por baterias de 3,3 V. Nestes casos, a utilização de uma bateria de íons de lítio 3,7 V é uma opção que proporciona uma melhor densidade volumétrica e gravimétrica de energia, em comparação com outras tecnologias, como Ni-MH ou Ni-Cd (ERTÜRK et al., 2019). Uma informação útil para avaliar o desempenho de uma bateria recarregável é sua curva de carga-descarga. Esta consiste em medir a tensão em seus terminais durante o processo de carga ou descarga.

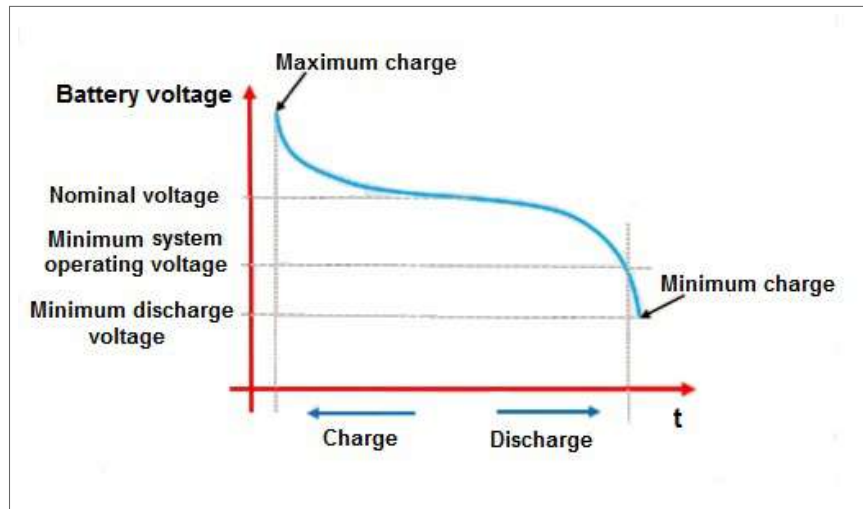
Na ficha de especificações da bateria, podemos encontrar as informações de carga e descarga para este tipo de dispositivo, dando-nos informações úteis na implementação desses dispositivos. Com essas informações podemos determinar a capacidade de descarga e curva de carga de sua bateria, de forma a saber a capacidade que estará disponível ao sistema desde o momento em que a bateria é carregada até a tensão máxima que o sistema de carga permite, até que seja descarregada. com uma tensão mínima de operação do sistema, ele irá ligar, ver a Figura 12. Para determinar a curva de descarga de uma bateria, uma carga pode ser aplicada.

4.1.4 Sensor e Nós

Um nó tem a capacidade de transmitir dados para um ponto de acesso usando o módulo de rádio LoRa / LoRaWAN. Mas para que isso aconteça, o sensor precisa de uma alimentação de fonte integrada (RAZA; KULKARNI; SOORIYABANDARA, 2017). Essa fonte que fornece essa energia, pode ser interno ou ambiental.

O hardware de um nó sensor pode ser dividido em cinco partes principais: o processador, o sensor, o módulo de armazenamento, o transmissor e a fonte de alimentação. Como pode ser visto na Figura 13, todos os elementos do sensor estão utilizando o fonte de alimentação

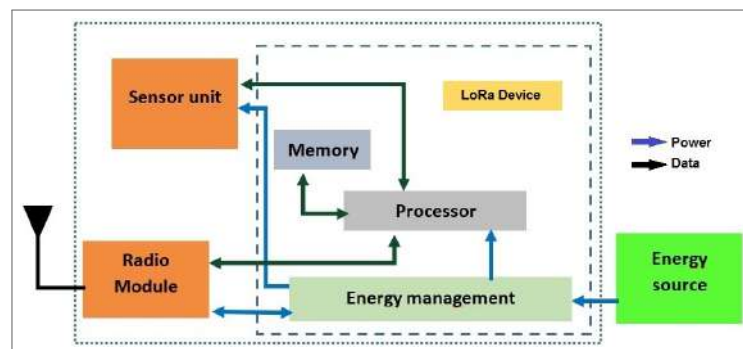
Figura 12 – Carga-Descarga



Fonte: (BANUELOS) (2019), Modificação: Acervo do autor

simultaneamente.

Figura 13 – Sensor



Fonte: (SANCHEZ; SADOK) (2020)

LoRa opera em diferentes modos de um sensor de comunicação (LORA Alliance®, 2020). Esses modos LoRaWAN têm como características principais sua banda, seu fator de dispersão e seu CR, a fim de encontrar diferenças na distância, na taxa de transmissão, e nos intervalos de dados mínimo e máximos enviados e recebidos entre outras diferenças, para assim atingir uma relação benéfica para a bateria.

A energia consumida pelo sensor de comunicação durante um ciclo é representada pela equação ($E_T = E_S + E_A$), onde E_S e E_A caracterizam o nó no modo inativo e o consumo total de energia durante o modo ativo do microcontrolador, respectivamente. E_S é expresso como ($E_S = P_S + T_S$). Enquanto P_S e T_S caracterizam o consumo de energia e o tempo de permanência no modo de espera.

4.2 SIMULAÇÃO

A Simulação foi feita com uma rede sem fio LoRa com topologia em malha, composta por quatro nós, com o fim de melhorar o desempenho do consumo de energia é executado o algoritmo de Jarvis. O protocolo LoRaWAN é utilizado para ligar os nós o software de simulação foi CupCarbon e o sensor simulado usado nesta rede é o dispositivo SX1272 / 73 da Semtech Corporation. A comparação leva em consideração dois tipos de baterias, uma de lítio e outra de níquel, com o objetivo de obter o melhor desempenho em o tempo de descarga da bateria durante o uso dos sensores.

A rede tem coordenadas específicas, fonte de nó e longitude de destino do nó: (-3.494.926.929.473.870 Latitude: 8.051.549.216.211.980). E longitude: (-3.495.118.975.639.340 latitude: 8.054.959.209.124.860) e do nó destino, respectivamente. A localização e os parâmetros dos nós são mostrados na Tabela 7.

4.2.1 Sensor

Tendo em conta as partes principais do sensor: o processador, o sensor, o módulo de armazenamento, o transmissor e a fonte de alimentação, todos os elementos do sensor estão usando a fonte de alimentação simultaneamente. O transceptores SX1272, apresentam o modem LoRa que fornece comunicação de longo alcance e amplo espectro e alta imunidade à interferência, minimizando o consumo atual.

A Rede utilizada nesta pesquisa foi uma Mesh, ou rede de malha, a qual é uma alternativa do protocolo padrão 802.11 para diretrizes de tráfego de dados e voz. Uma rede Mesh é uma rede em malha (Wireless Mesh Networking – WMN), a qual são redes que tem por objetivo interligar os dispositivos sem fio já existentes. Para isso, essa rede deve ser formada por dois tipos de nós, os denominados roteadores mesh e os clientes mesh. Os primeiros forneceriam toda a infra-estrutura básica de conexão, ou seja, um backbone, se comunicando através de redes adhoc de maneira a estender o alcance, ou seja, cada nó se comunica diretamente com o outro e caso não tenha alcance direto, usa um protocolo de roteamento para a comunicação. Por possuir um backbone com diversos nós, a rede em malha possui características de ser quase estática e auto reconfigurável. Os segundos são os clientes que podem ou não atuar como roteadores (SCHILLER, 2006).

O cenário considera a rede de sensores na figura 14 com os nós S1, S2, S3 e S4 que tem um consumo de recepção de energia denominado (P_{RX}) e um consumo de transmissão expresso em equação 4.4 onde (P_{elec}) é o consumo de energia no nó circuito, K é a constante que representa a potência mínima com sucesso, α é o coeficiente de atenuação com distância e r é a distância da origem ao destino (LORA Alliance®, 2020). A fim de estabelecer o total de consumo de energia pela transmissão e recepção com um salto (TRIWIDYASTUTI et al., 2020),e

Figura 14 – Sensors Network



Fonte: (SANCHEZ; SADOK) (2020)

(SILVA; MORAES, 2018) a equação (4.5) é aplicada,

$$P_{Tx} = P_{elec} + Kr^\alpha, \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} P_{T1} &= P_{Tx1} + P_{Rx1}, \\ &= P_{elec} + Kr^\alpha + P_{elec}, \\ &= 2P_{elec} + Kr^\alpha. \end{aligned} \tag{4.5}$$

4.2.2 Baterias

4.2.2.1 Baterias de lítio

As baterias de lítio, (DENG, 2015) também conhecidas por nomes como íon de lítio e Li-ION, são compostas por diversos elementos químicos, portanto, são mais desenvolvidas do que as baterias de níquel. Dentre suas características, podemos destacar o fato de não necessitar de ciclos completos de carga devido ao seu grande potencial energético. A maior vantagem oferecida pela bateria de lítio é sua imunidade ao vício. Se uma bateria de lítio estiver com baixo desempenho, o problema pode estar relacionado a outros fatores, como a forma como o dispositivo é usado, a frequência de uso do carregador portátil e a temperatura a que a bateria está sujeita (DENG; ZHU; NIE, 2017).

4.2.2.2 Baterias de níquel

É quase impossível falar em bateria de níquel (KASIM; ABDULLAH; SELAMAT, 2016) sem entrar no contexto histórico, afinal, o material níquel-cádmio (NiCd) foi utilizado nos primeiros modelos de telefones celulares, tendo predominado por vários anos. Posteriormente, chegou

ao mercado a bateria de níquel hidreto metálico (NiMH), mais sofisticada que sua antecessora e muito mais resistente em termos de memória. A capacidade de memória sempre foi um dos pontos fracos do níquel. Os casos notórios de dependência de bateria, que ainda são comuns hoje, eram frequentes. Isso acontecia porque a bateria precisava de ciclos completos de carga / descarga para funcionar bem - algo que muitos usuários obviamente não faziam.

A grande variedade de aplicações de baterias (KASIM; ABDULLAH; SELAMAT, 2016) e seus requisitos específicos requerem que os projetistas conheçam as características técnicas desses produtos para tomar as decisões corretas para as especificações de seus projetos. Os parâmetros básicos das baterias são: Voltagem (V), Corrente (A) e Capacidade de descarga (C-Rate). A Tabela 11 lista as tensões típicas para cada tipo de célula mencionado acima.

4.2.3 Análise da bateria

Qualquer que seja a composição, cada bateria tem restrições de temperatura, as baterias de lítio não são diferentes (DENG, 2015). Células mais antigas tinham temperaturas de operação muito restritas, células mais novas de uso geral podem operar entre -20 e 60 °C, outras, para uso específico, podem ter uma faixa diferente. É saudável que a célula não gere ou gere pouco calor durante a recarga e que a temperatura ambiente não seja muito alta.

Assumindo bateria de íon de lítio (DENG; ZHU; NIE, 2017). Aqui, a carga total média e o consumo de energia refere-se à média de seis leituras diferentes para todos os os níveis de SF LoRa (7 a 12) com 30 repetições cada para ponto único. Ao testar a viabilidade de uma ampla gama de intervalos de detecção para LoRa, uma gama razoável de intervalos de detecção (isto é, de 60 a 300s, mas para este caso, de 100 a 700s foram trabalhados) é considerada para estudar o impacto, a variação do tempo de tensão na leitura do consumo dos nós LoRa.

O estado da bateria é dado por meio da equação (4.6). Nesta fase, é possível avaliar o estado da bateria (SANCHEZ-IBORRA; CANO, 2016) (a Vida útil da bateria é igual à capacidade da bateria em mAh dividida pela corrente de carga em mA), assumindo a capacidade total da bateria, CB, de 1000 mAh (ou seja, 11880J @ 3,3 V) em CupCarbon como sendo 19610J:

$$Battery\ Life\ [h] = \frac{Battery\ Capacity\ [mAh]}{Charging\ Current\ [mA]} \quad (4.6)$$

Em consideração aos dispositivos LoRa da Semtech Corporation (SEMTECH, 2020), presume-se que seja um transmissor periódico (SX1272/73), onde o consumo de corrente para hibernar (C_{sleep}) e modos de comutação (T_{switch} ,) são (100 nA) e 21,9 (mA), respectivamente. Já a carga média, ($\bar{A}$), em cada estado, ou seja, transmissão, hibernação e troca de estado, pode ser estimada levando em consideração a corrente traçada nos diferentes modos de monitoramento e o tempo que um dispositivo permanece em determinado estado.

Isso pode ser expresso na equação (4.7) como:

$$\bar{A} = \bar{C}_{tx} T_{tx} \quad (4.7)$$

Onde, (T_{tx}) é o tempo em que um nó está transmitindo e (C_{tx}) é a corrente média consumida no modo de transmissão. Os módulos da Semtech Corporation (SEMTECH, 2020) são assumidos com o consumo atual de 44 mA para uma potência de transmissão de 14 a 17 dBm.

4.3 CONCLUSÃO

Neste capítulo, foram apresentadas as modelagens que deram origem aos resultados obtidos neste trabalho. Partindo do modelo proposto por (BONCEUR et al., 2018) para uma rede de nós, escolhido por sua simples modelagem e riqueza de parâmetros, foi possível realizar as devidas adaptações para considerar uma rede quasi linear contendo vários nós e inserir protocolos de controle de acesso ao meio da camada física (PHY). como ponto da inicio nesta pesquisa, fomos inspirados pelas modelagens propostas por (BONCEUR et al., 2018), (G.; I.; XIAO, 2010) as quais também foram consideradas para uma rede composta por nós distribuídos de maneira quase linear.

5 RESULTADOS

Neste capítulo, a abordagem em LoRa e seu protocolo LoRaWAN foi feita de acordo aos parâmetros fornecidos nos capítulos anteriores, para apresentar os resultados obtidos. Por outro lado se apresentaram dois tipos de resultados, o primeiro faz referência a análise de LoRaWAN e o segundo sobre o consumo energético fazendo comparação de dois tipos de baterias.

Os resultados estão divididos em duas sessões, a primeira que corresponde à transmissão de pacotes e a segunda que tem a ver com o consumo de energia.

Os resultados expostos neste capítulo foram obtidos por meio dos softwares CupCarbon e a ferramenta LoRaCalculator, que é uma ferramenta da companhia The Things Network, na qual o programador pode fornecer parâmetros como: Bytes de entrada, Fator de Espalhamento, Largura de banda entre outros.

5.1 TRANSMISSÃO DE PACOTES

5.1.1 Resultados do análises de LoRa e LoRaWAN

A rede possui coordenadas específicas. Longitude: -3 .495 .020 .270. 347. 595 e Latitude: 8 .054 .035 .008 .159 .962 são as coordenadas que enquadram todos os nós. A localização e os parâmetros dos nós são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Nodes parameters

Node	Latitude / Longitude	Dist. [Km]	FSL [dB]
1	8.051.549.216.211.980/-3.494.926.929.473.870	0.149	75,036.
2	8.052.760.244.966.250/ -3.494.880.838.394.100	0.149	75,036.
3	8.054.035.008.159.960/-3.495.019. 197. 463. 980	0,146	74,860.
4	8.054.959.209.124.860/-3.495.118.975.639.340	0.151	75,152.

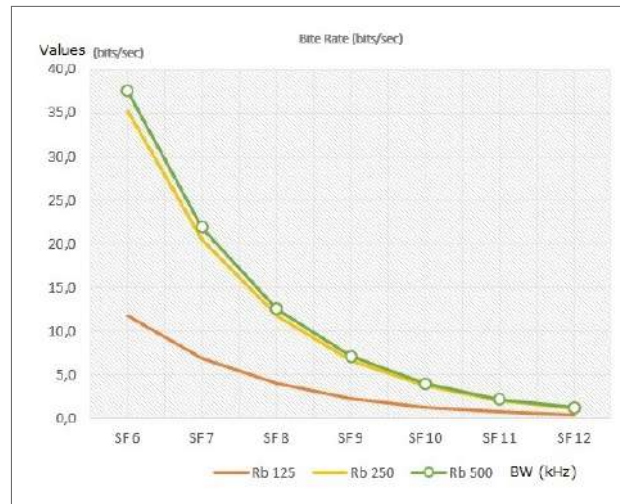
Fonte: (SANCHEZ; SADOK) (2020)

Para avaliar o impacto de CR e SF em relação ao consumo de energia levando em consideração as equações já mencionadas acima faremos sua implementação. A taxa de bits foi encontrada usando as equações (3.5) e (3.6) e são apresentadas no gráfico de bandas diferentes nas Figuras 15 e 16.

No uso da equação (3.14), FSL (Free Space Loss) leva em consideração os parâmetros da Tabela 7 de acordo com o que é estabelecido pelos nós simulados. O objetivo é manter em consideração o orçamento do link da equação (3.13).

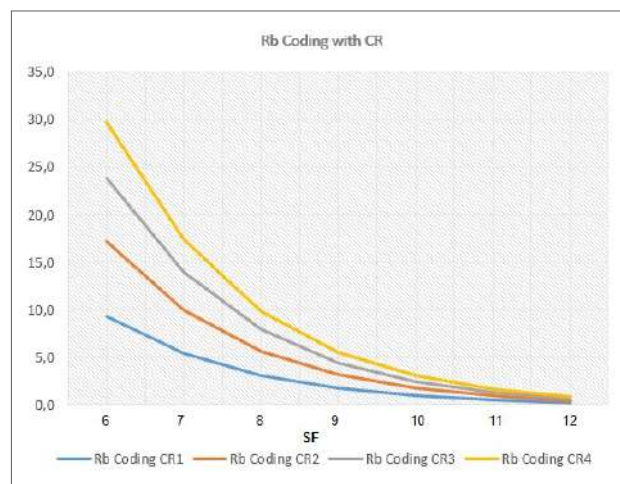
É importante para LoRa e seu protocolo LoRaWAN estimar o tempo de antena de um pacote, pois desta forma podemos saber o quão eficaz o link está nas primeiras camadas de

Figura 15 – Bite Rate1



Fonte: (SANCHEZ; SADOK) (2020)

Figura 16 – Rb coding



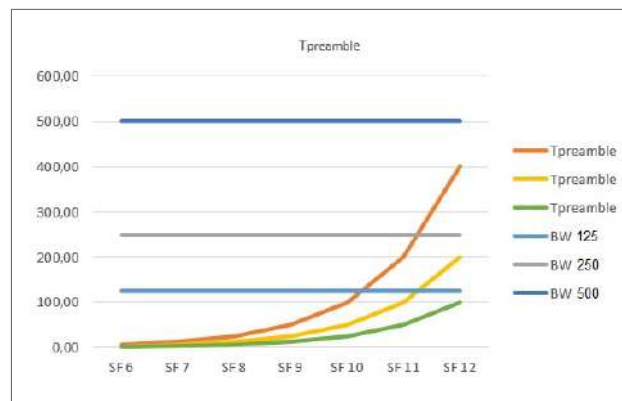
Fonte: (SANCHEZ; SADOK) (2020)

acesso. Por este motivo, o cálculo das equações (3.16), (3.17), (3.18) e (3.19) é realizado e sua representação gráfica é apresentada nas Figuras 17, 18 e 19.

O tempo no ar é mostrado nas Figuras 20 e 21 em função do tamanho da carga útil em diferentes valores de SF e CR. O canal de largura de banda é definido como sendo 125 MHz, 250 MHz e 500 kHz. É visto que quando o SF está alto, o tempo no ar aumenta, o que significa que o nó sensor consome mais energia para transmitir. Analisando CR sobre o tempo no ar, observa-se no gráfico que o aumento do número de bits de codificação, provoca um aumento na transmissão de pacotes, o que permite ao módulo de rádio consumir mais energia neste estado.

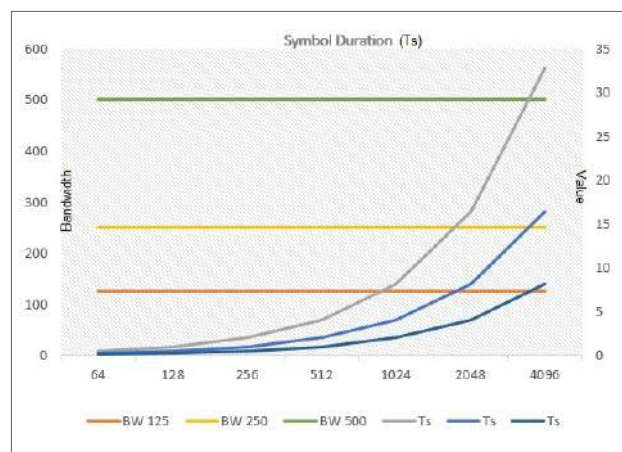
Nos resultados de consumo de energia do sensor de comunicação LoRa / LoRaWAN, trocamos certos aspectos relevantes deste tipo de tecnologia que faz parte de muitos focos de pesquisa, mas não em pesquisas exaustivas. Note que a questão de energia e consumo de

Figura 17 – Tpreamble



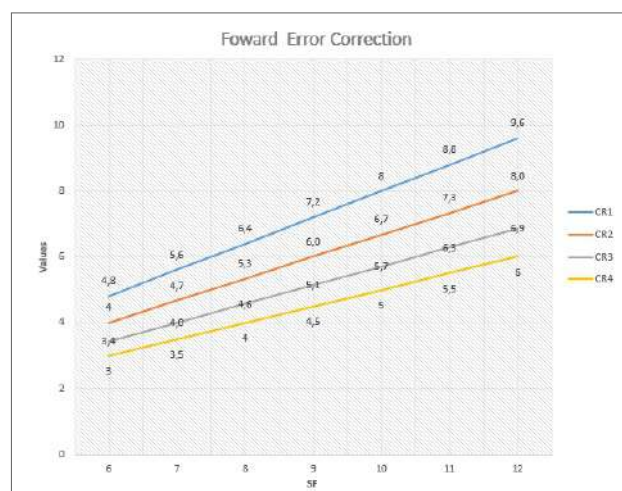
Fonte: (SANCHEZ; SADOK) (2020)

Figura 18 – Symbol duration



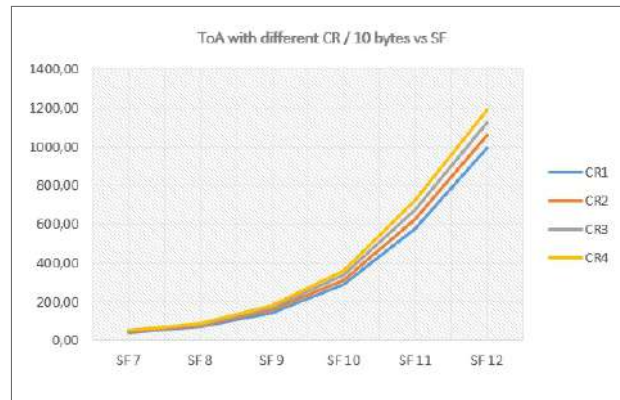
Fonte: (SANCHEZ; SADOK) (2020)

Figura 19 – Foward Error Correction



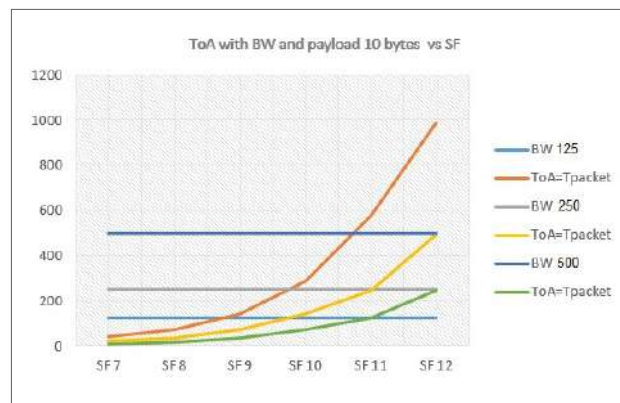
Fonte: (SANCHEZ; SADOK) (2020)

Figura 20 – ToA with different CR vs SF



Fonte: (SANCHEZ; SADOK) (2020)

Figura 21 – Time On Air vs SF



Fonte: (SANCHEZ; SADOK) (2020)

redes de sensores é interessante e profunda consequentemente a pesquisa se concentrou mais em parte na análise da operação de redes de sensores.

5.1.2 Simulação 1: algoritmo de Jarvis

Nesta simulação, o algoritmo de Jarvis foi utilizado, que, apesar de ser um dos mais simples, possui uma complexidade computacional de $O(nh)$. A triangulação obtida é apresentada na Figura 22. Ao usar O algoritmo de Jarvis nesta rede de sensores, apesar de sua simplicidade, observa-se que a distância percorrida do sensor *S2SinkGateway* para o *S1Detection* sensor tem uma passagem através do *S4Router2* e quando atinge *S1Detecção* faz a mesma jornada. Esta rota torna-se num tempo de execução: $[O(nh)]$, onde h é o número de pontos do envelope. Obtendo assim um saída do algoritmo sensível.

Figura 22 – Jarvis algorithm



Fonte: (SANCHEZ; SADOK) (2020)

5.1.3 Simulação 2: Algoritmo de Graham

Levando em consideração que ao usar o algoritmo de Graham, constata-se que ele calcula o envelope convexo em tempo $[O(n \log n)]$ que é o tempo ideal. A triangulação obtida neste a simulação é mostrada na Figura 23. Executando este algoritmo, é notável que a distância percorrida do sensor *S2SinkGateway* para o sensor *S1Detection* tem um passo no *S4Router2* e ao chegar em *S1Detection* faz a mesma rota. Mas ao passar pela lista ordenada dos pontos (sensores), não é o ponto de fechamento, isso devido à forma como esses pontos (sensores) estão distribuídos. Contudo, foi analisado que o algoritmo ordena a melhor rota através do protocolo LoRaWAN para enviar e receber pacotes com a notificação do ACK, apesar disso, a confiabilidade do transporte de informações através do protocolo LoRa é confiável em 99% durante o tempo em que estava sendo executado nos pontos.

Figura 23 – Graham Algorithm



Fonte: (SANCHEZ; SADOK) (2020)

5.1.4 Consumo de energia

Examinando o consumo da bateria nos pontos do sensor quando eles estão em uso, um pico ou salto é observado no início. Mas, com o tempo esse pico se estabiliza e somente quando é

feito um pedido e o ACK é recebido é que ele retorna a exibir esse pico. Ou seja, esse pico ou salto de energia é dado pelo momento em que é necessário o envio e recebimento dos sensores que intervêm. A é a corrente demanda em amperes. O consumo é igual ($Consumption = \frac{A}{h}$) o que significa a quantidade de Amperes por hora consumidos.

É importante lembrar que o tempo de resposta é dado pela capacidade do sistema. Por isso, apesar de ser uma rede pequena, observa-se que a ciência do protocolo LoRaWAN com este tipo de algoritmo (Jarvis), na tentativa de enviar e receber pacotes, mantém uma alta porcentagem (99%) de ACK, durante uma execução prolongada de seu uso. Isso torna o protocolo confiável para este tipo de comunicação nesta simulação de acordo com a Tabela 8. É por isso que é observado no início um salto de consumo de energia, ou seja, um pico ou salto de energia, o qual é dado no momento em que é necessário para o envio e recebimento de pacotes pelos sensores que intervêm nesse momento da comunicação. Podemos também discutir as seguintes variáveis para ter uma ideia do comportamento do consumo de energia nos sensores desta rede da seguinte forma: A é igual ao Amperagem ou demanda atual. Consumo é igual a $Consumption = \frac{A}{h}$ (uma quantidade de x Amperes por hora). Por outro lado, podemos dizer que a Utilização é igual a ($Utilization = Request/Responsetime$), $\rho = \frac{\lambda}{m\mu}$, este valor sendo inferior a 1% no consumo ($19160J - 19157,50J = 2,5J$), Figura 25.

5.1.5 Resultados de transmissão de pacotes

Os algoritmos Jarvis e Graham são executados na plataforma Cupcarbon, gerando um salto entre os sensores S1 e S3. Como visto nas Figuras 22 e 23, um único salto entre os sensores S4 e S1 de volta. Isso faz que o nó S2 permaneça sem uso, e não gere potência de consumo energético conforme mostrado na Figura 25, enquanto aos outros nós têm descarga e troca de pacotes o nó S2 permanece em estado de espera. Isso não indica que o nó S2 permanece ativo se uma falha for gerada entre os outros nós quando é solicitado o envio de um pacote. Embora este processo de salto entre os nós é explicado de forma conceptual detalhada, uma vez que a pesquisa foca em mostrar uma análise do LoRaWAN.

A execução dos algoritmos, mostra as rotas possíveis, ajudando assim a ter uma melhor clareza de como a rede pode ser configurada. O nível do espectro de cada nó torna-se visível e as distâncias podem ser configuradas no OSM, para um melhor ajuste, como pode ser visto na Figura 24 com um tom avermelhado.

Por outro lado, ao executar os algoritmos de Graham e Jarvis, é observado que um salto é gerado na rede entre os nós S1 a S4 para alcançar o destino (S2), conforme pode ser mostrado nas Figuras 22 e 23. Isso otimiza a comunicação, uma vez que o tempo de resposta diminui. Os dois algoritmos se comportam da mesma forma em relação ao consumo, recepção e envio de pacotes, o que se evidencia nas Figuras 25 e 26, onde são apresentados os valores das percentagens de consumo ao longo do tempo.

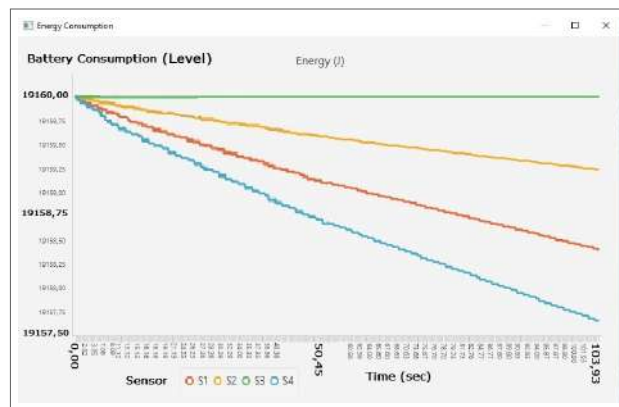
Os pontos amarelos no centro de cada nó indicam que a informação é recebida e também

Figura 24 – Spreading



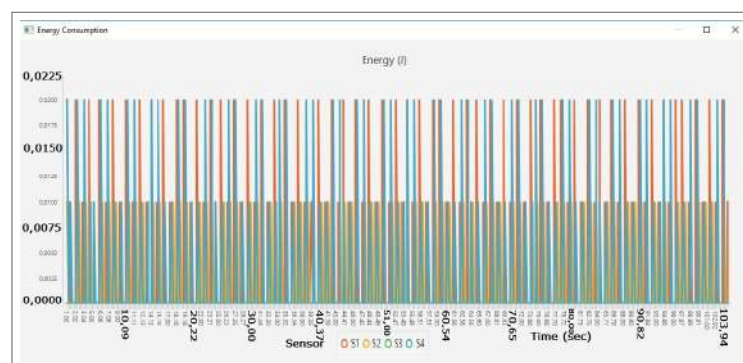
Fonte: (SANCHEZ; SADOK) (2020)

Figura 25 – Battery level



Fonte: (SANCHEZ; SADOK) (2020)

Figura 26 – Consumption Percentage



Fonte: (SANCHEZ; SADOK) (2020)

nos mostra a rota pela qual a informação viaja, ou seja, os nós que participam desta rede, para enviar e receber as informações conforme evidenciado nas Figuras 22 e 23. O tempo de relacionamento, mensagens enviadas e mensagens recebidas em ambos os algoritmos é mínimo. Nenhum algoritmo mostrou perda de pacotes durante o período de execução.

O CupCarbon permite que ao usuário visualizar o que acontece quando este tipo de al-

goritmo é executado em uma rede quase linear, permitindo assim que você tenha um melhor controle dos eventos que ele deseja gerar para otimização.

Durante a execução das duas rotas selecionadas, as rota 1 e rota 2 foram estabelecidas pelos algoritmos de Graham e Jarvis respectivamente. Os valores da Tabela 8 mostram os resultados obtidos.

Tabela 8 – Simulation Results

	Execut Time[s]	Msg Sent	Msg Rec.	ACK	Msg Lost	TOTAL(Sen+Rec)
Route 1	100	210	209	209	1	419.
Route 2	100	209	208	208	1	417.
Route 1	300	596	596	596	0	1192.
Route 2	300	598	597	597	1	1195.
Route 1	700	1380	1380	1380	0	2760.
Route 2	700	1388	1388	1388	0	2776.

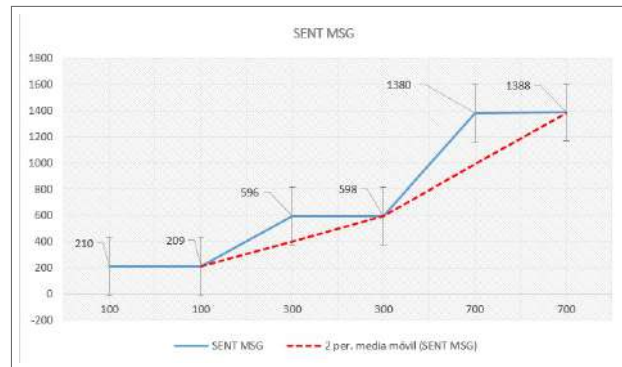
Fonte: (SANCHEZ; SADOK) (2020)

Observa-se as rotas conforme o tempo de execução aumenta. O desempenho de cada um também começa a ser evidente. Isso é capaz de mostrar a melhor opção ao construir a rede sem fio. Ao comparar os ACKs com o mensagens recebidas, era evidente que a diferença entre esta relação também mostrou uma vantagem entre as rotas 2 no intervalo de execução de 300 segundos e 700 segundos. Além disso, durante a execução dos tempos, o número de mensagens enviadas e a recepção começou a dobrar, mostrando boa recepção do sinal. Além disso, o ACK aumentou exponencialmente em cada uma das rotas, mas na rota 2 um aumento no ACK ficou evidente durante a linha do tempo em cada rota. No envio de mensagens no primeiro intervalo de tempo de execução, a rota 2 diminui seu envio, mas no segundo e terceiro intervalos ela aumentou em relação à rota 1, como é mostrado na Figura 27.

Considerando as mensagens perdidas, os percentuais são baixos. Ficou evidente que nos primeiros intervalos de tempo de execução tem evidências de perdas de pacotes, mas que no segundo intervalo, apenas a rota dois perde um pacote e no terceiro intervalo de tempo, nenhuma das duas rotas sofre perda de pacotes. Isso pode ser visto na Figura 28.

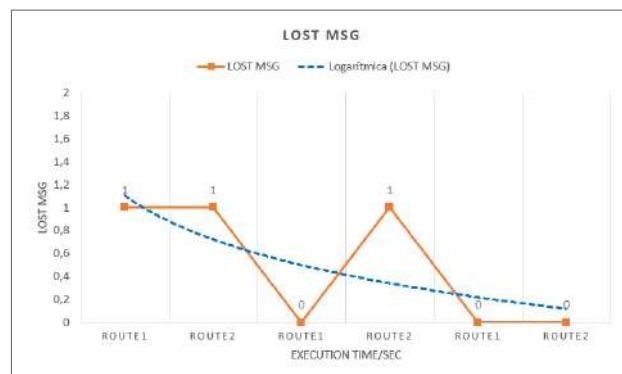
Observou-se que entre as rotas 1 e 2, a rota 2 apresenta um melhor desempenho de envio e recebimento de pacotes ao longo do tempo do que a rota 1. Durante o primeiro intervalo de tempo de execução, a rota 1 mostrou melhor desempenho do que a rota 2, mas com o passar do tempo, ela foi perdendo desempenho de entrega de pacotes. Nos dois primeiros intervalos de execução, a rota 2 apresentou mais perdas de pacotes do que a rota 1. Embora a rota 2 perdeu mais pacotes do que a rota 1, a sua capacidade de enviar pacotes era melhor do que aquele na rota 1. Por outro lado, a curva logarítmica da Figura 28 apresentada, mostra a proporção da diminuição na perda de pacotes ao longo do tempo.

Figura 27 – Sent Messages



Fonte: (SANCHEZ; SADOK) (2020)

Figura 28 – Lost Messages



Fonte: (SANCHEZ; SADOK) (2020)

5.2 CONSUMO ENERGÉTICO

5.2.1 Simulação

Esta seção fornece uma análise dos resultados e análises de LoRaWAN em CupCarbon e seu desempenho em redes de baixo consumo de energia. Uma rede LoRaWAN composta por quatro sensores em um arranjo quase linear é proposta. A rede estava localizada entre o NIATE (Núcleos Integrados das Atividades de Ensino) e do CIn (Centro de Informática) da Universidade UFPE em Recife, Brasil.

A localização e os parâmetros dos nós são mostrados na Tabela 10. Os parâmetros do sensor Cupcarbon usados com LoRa são apresentados na Tabela 9.

Neste estudo, as características dos nós são representadas com um transceptor definido usando CupCarbon. Todos os periféricos são alimentados no mesmo nível de tensão igual a 3,30 V Li-ION e 1,4 V para baterias do tipo NiCd.

Tabela 9 – Sensor Parameters

Parameters	Value
Radius	20% .
Energy Max	19160 J .
Data Rate UART	9600 bits.
Drift (Sigma) Clock Freq	3.0E5 .
Node Radius	130.0.
PL (Power Transmission)	100.0.
Sending Energy consumption (ETx)	5,92E-5.
ERx: Receiver Energy consumption	2.86E5.
Sleeping energy	1.0E7s.
Listening Energy	1.0E6.
Data Rate (sending/receiving)	250 bits/s.
Spreading Factor	7 to 12.
Channel	0.

Fonte: (SANCHEZ; SADOK) (2020)

Tabela 10 – Nodes parameters Energy

Node	Latitude	Longitude	Distance/mts	LFS (dB)
1	8.051.549.216.211.980	-3.494.926.929.473.870	168	75,726.
2	8.052.760.244.966.250	-3.494.988.083.839.410	168	75,726.
3	8.054.035.008.159.960	-3.495.019. 197. 463. 980	162	75.41.
4	8.054.959.209.124.860	-3.495.118.975.639.340	151	74,799.

Fonte: (SANCHEZ; SADOK) (2020)

5.2.1.1 Sensor

Levando em consideração os esclarecimentos sobre o comportamento de um sensor e sua descrição nos capítulos anteriores, todos os elementos do sensor estão usando a fonte de alimentação simultaneamente. O sensor SX1272 apresentam o modem de longo alcance LoRa beneficiando de um amplo espectro, alta interferência imunidade e minimizando o consumo atual.

São considerados os sensores na Figura 22 com a rede, os nós S1, S2, S3 e S4 que tem um consumo de recepção de energia denominado PRx e um consumo de transmissão expresso na equação (4.4), onde $Pelec$ é o consumo de energia no nó circuito, K é a constante que representa a potência mínima com sucesso, α é o coeficiente de atenuação com distância e r é a distância da origem ao destino, e i representa os saltos entre os nós. A fim de estabelecer o total consumo de transmissão e recepção com um salto, a equação (4.5) é aplicada.

5.2.1.2 Baterias

Dois tipos de baterias foram usados para calcular seu desempenho e, assim, buscamos estabelecer qual é o melhor para usar nesta simulação para um possível projeto. Este estudo considera dois tipos de baterias, nomeadamente baterias de lítio e níquel. os parâmetros das baterias são encontrados na Tabela 11.

Tabela 11 – Type Styles Batteries

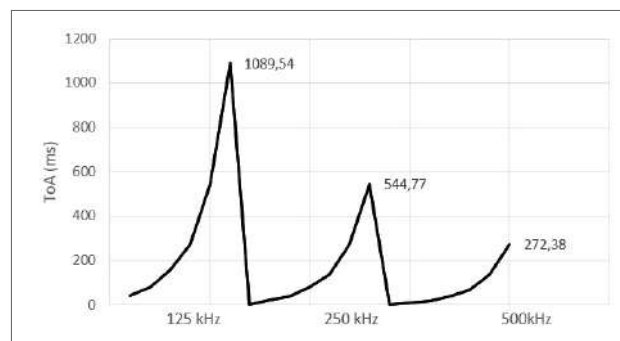
Parameters	NiCd	Li-Ion
Relative Capacity	1.4v	3.7v.
Cycle Life	500 - 1000 + cycles	1200 + cycles.
Operating Temperture	-20 to 50°C	-10 to 50°C.

Fonte: (KASIM; ABDULLAH; SELAMAT) (2016)

5.2.2 Resultados de Consumo Energia

Nesta seção, apresentamos os resultados obtidos a partir da simulação de acordo com os parâmetros estabelecidos ao longo do documento pelos modelos adotados e equações descritas acima. O comportamento do Tempo no ar (ToA) em relação a largura de banda usada é apresentado na Figura 29. Observamos que o tempo de antenna diminui conforme a largura de banda aumenta, o que é um resultado intuitivo. Com base nisso, foi decidido usar a largura de banda de 125 kHz. Esta largura de banda nos permitiu obter um melhor resultado na simulação e também focar nos resultados preliminares em relação ao uso da bateria nesta largura de banda.

Figura 29 – ToA vs Bandwidth

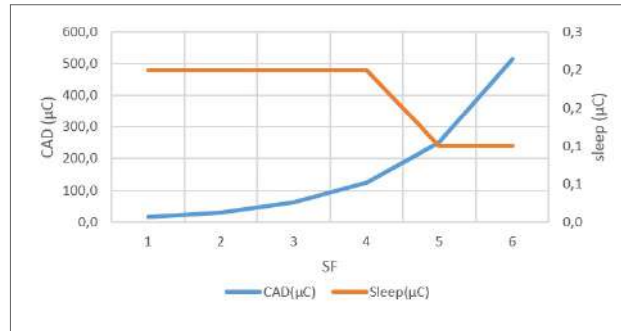


Fonte: (BERMUDEZ; SADOK) (2020)

No CAD (Channel Activity Detection), é evidente que no decorrer do consumo de carga, o I_s em um determinado ponto da curva é evidenciada uma diminuição da atividade do canal, ver Figura 30. O $IDect$ pode nos dar uma ideia de falha ou anomalias na rede causando uma

curta duração da bateria, nesta forma que podemos levar em consideração o custo econômico e a vida útil da bateria. Isso ocorreu com ambas as baterias apresentando a mesma tendência, acabando com o consumo da bateria conforme visto em (4.2).

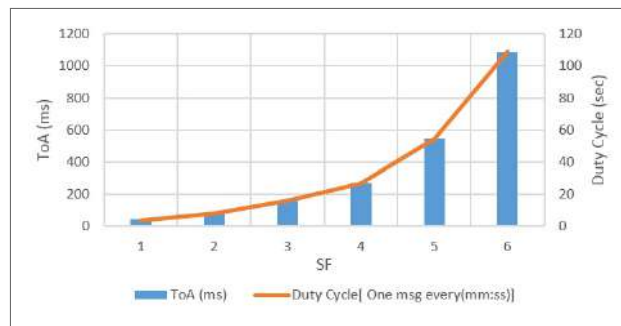
Figura 30 – CAD vs Sleep



Fonte: (BERMUDEZ; SADOK) (2020)

O ciclo de trabalho estabelecido durante o tempo de antena que cada pacote leva para ser transmitido é representado de acordo com a duração do ToA. Este permite uma entrega bem sucedida de acordo as equações (3.16), (3.17) e (3.18). A Figura 31 mostra como isso afetará o consumo da bateria.

Figura 31 – ToA vs Duty Cycle

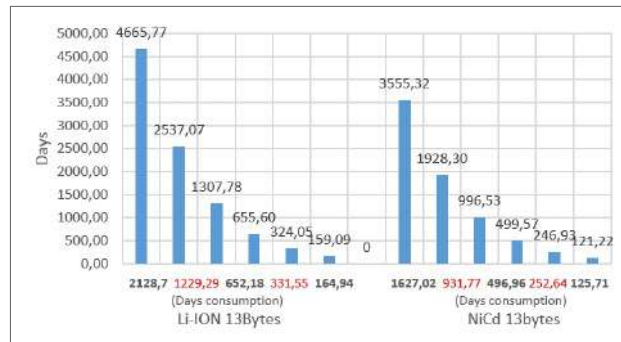


Fonte: (BERMUDEZ; SADOK) (2020)

Ao analisar a vida útil das baterias em (4.6), podemos observar que a bateria de lítio tem um melhor desempenho do que a bateria de níquel, de acordo com o tempo e o número de bytes transmitidos em cada uma delas. Observe também que em duração por dia da bateria de lítio em relação à bateria de níquel é maior durante a simulação, apresentando maior proporção de dias, a Figura 32 mostra que a diferença é significativa para o prolongamento da vida para este tipo de sensores (SX1272 / 73) e, portanto, a rede.

Quando a energia por dia das baterias e o ciclo de trabalho são analisados, deduziu-se que quanto maior é o ciclo de trabalho, mais energia as baterias requerem para atender às necessidades e demandas do ciclo de trabalho. Isso fez com que as baterias incorressem em um maior dreno de energia para manter os parâmetros exigidos na transmissão de pacotes do nó de origem ao nó destino, de acordo com (4.4), já que os nós devem permanecer por mais

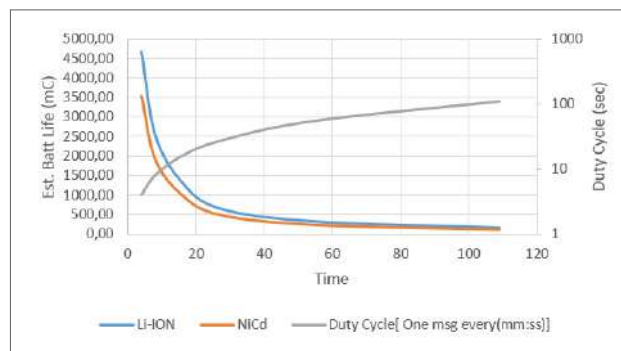
Figura 32 – Estimation of Batteries life



Fonte: (BERMUDEZ; SADOK) (2020)

tempo ligados no envio de informações que os fazia ficar acordados por períodos mais longos, conforme mostrado na Figura 33.

Figura 33 – Energy per Day vs Duty Cycle



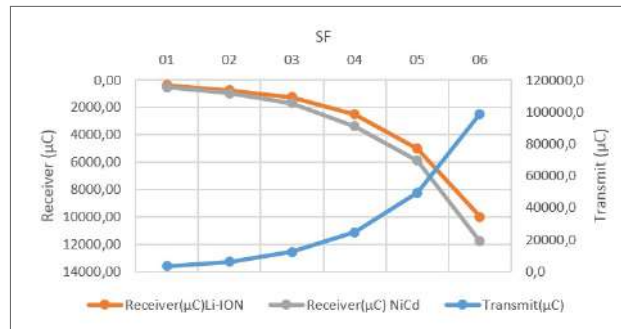
Fonte: (BERMUDEZ; SADOK) (2020)

Ao transmitir, observa-se que quanto mais longo o tempo de transmissão, maior será a descarga. A descarga de ambas as baterias são evidentes na Figura 34, mas a bateria de níquel sofre uma descarga maior durante o mesmo determinado tempo para ambas as baterias, ou seja, sua vida útil foi menor que a vida da bateria de lítio. Por outro lado, observamos na imagem que o desempenho da bateria de lítio era superior ao da bateria de níquel no momento da transmissão PTx e recepção de pacotes PRx através de um único salto de acordo com a equação (4.5).

No geral, isso torna a potência consumida fornecida pela $Pelec$ mais eficiente em ambas as baterias, em um certo tempo estabelecido pelo ToA para enviar e receber pacotes, refletindo o comportamento das equações (4.2) e (4.7).

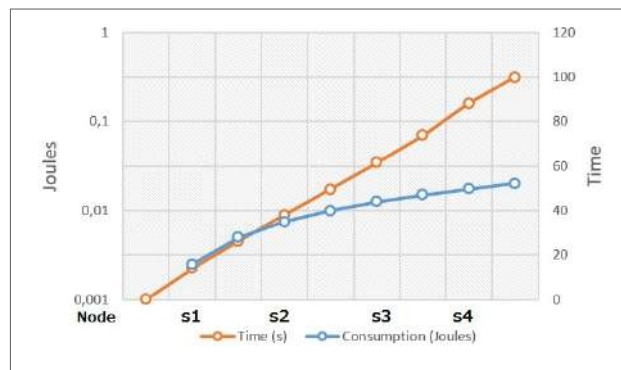
Os custos de consumo de energia para um salto entre os nós foram baixos de acordo com (4.5). Se observarmos a Figura 35, pode ser concluir que a corrente consumida pelas baterias no processo de envio e recebimento de pacotes em cada nó foi muito baixa, com uma média de 2,5Jules, o que implica um consumo de energia abaixo de 0,5% da energia disponível no nó sensor. Este resultado mostra que embora ambas as baterias têm o mesmo comportamento de descarga, ou seja, quando começam a descarga, sua vida útil é diferente, com a bateria de

Figura 34 – Transmitter vs Receiver



Fonte: (BERMUDEZ; SADOK) (2020)

Figura 35 – Node Consumption



Fonte: (BERMUDEZ; SADOK) (2020)

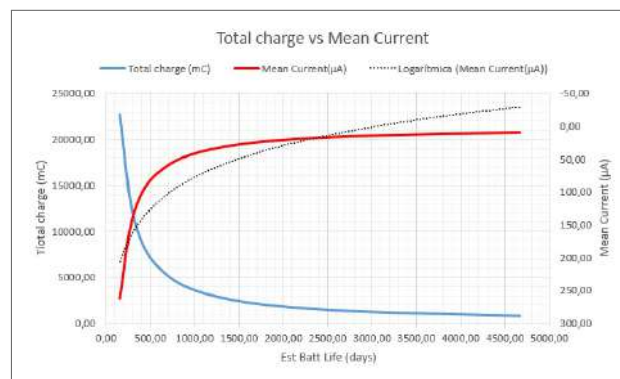
lítio tendo uma duração mais longa em comparação com a bateria de níquel como mostra a Figura 33.

A carga total da bateria e a corrente média são iguais para ambas as baterias e exibem uma diminuição no decurso dos dias em que são usadas. Isso faz com que o estado da bateria em termos de vida diminui conforme a corrente aumenta e a carga do bateria diminui em porcentagem igual para ambas as baterias.

Esta diminuição depende do ciclo de trabalho de cada um. Aqui é onde capacidade de armazenamento assume uma vantagem significativa entre os duas baterias. Enquanto a capacidade de armazenamento for maior, uma melhor resposta de desempenho ao longo do tempo pode ser obtida.

A bateria de lítio mostrou melhor desempenho ao longo do tempo do que a Bateria de níquel como pode ser visto na Figura 36. Este outro aspecto é levado em consideração em termos de durabilidade e vida útil de cada bateria.

Figura 36 – Total Charge vs Mean Current



Fonte: (BERMUDEZ; SADOK) (2020)

6 CONCLUSÕES GERAIS

6.1 CONCLUSÕES GERAIS

Para redes sem fio que não têm uma alta porcentagem ou com densidade de nós, esse tipo de algoritmo (Jarvis algoritmo) é útil para encontrar rotas mais eficazes na comunicação LPWAN. Por outro lado, analisa-se que algum nó como em nosso cenário o nó S3Router1, permanece inativo em ambos os cenários. Isso é devido ao tipo de algoritmos utilizados. Este nó poderia ser utilizado como backup e também para nova configuração de rede em um determinado cenário.

Conclui-se também que a IoT, LoRa e seu protocolo LoRaWAN convergem nesse novo universo denominado UIoT, onde as coisas se interconectam através da internet para se tornarem parte do universo que nos rodeia e, assim, se tornar o universo da internet das coisas.

Conclui-se que a rota 2 apresenta melhor desempenho que a rota 1, sendo adequada para ser utilizada no projeto, visto que na RSSF o desempenho tanto de envio quanto de recebimento de pacotes é importante. Isso faz com que a comunicação entre os nós seja ótima, tornando a vida útil de a rede prolongada. Também seu consumo de energia é favorecido pela baixa perda de energia que se apresentam; Isso também é considerado no fator econômico de longo, médio e curto prazo, que é outro fator exigido nas redes RSSF.

O aumento da potência de transmissão é mais interessante em termos da energia consumida por bit útil do que o aumento do fator de propagação, uma vez que o objetivo principal de uma rede de sensores é preservá-la por muito tempo de sua vida útil.

Para trabalhos futuros, como o algoritmo Jarvis apresenta uma triangulação, seria interessante verificar o quanto a economia de energia poderia ser comparado com o SX1273 da Semtech Corporation, versus o algoritmo de Graham, com objetivo de determinar o tipo de bateria ótimo a ser utilizado.

Os tipos de bateria usados nesta avaliação foram a bateria de lítio e uma bateria de níquel. A durabilidade devido ao estado de carga da bateria de Lítio supera a da bateria de Níquel, já que a bateria de Lítio tem uma tensão maior e melhor capacidade do que a bateria de Níquel. Isso auxilia na modelagem de uma rede de sensores sem fio (RSSF) e na disposição dos sensores para melhor eficiência energética. Por outro lado, observou-se que a descarga da bateria de Níquel ao longo do tempo consegue reduzir a diferença de dias em relação à do Lítio com o algoritmo de Jarvis.

A carga de consumo de ambas as baterias no momento da transmissão se comportou da mesma forma em ambos os casos. A carga de consumo do receptor na bateria de Lítio foi menor que na bateria de Níquel, pois isso gera um desgaste mais rápido por parte da bateria de Níquel. A carga total e a energia por dia das baterias comportaram-se da mesma forma em ambos os casos. Foi constatada variação no estado de vida da bateria, dada por sua tensão (V) e sua capacidade (mAh) respectivamente. Nesta caso a bateria de lítio apresentou maior

prolongamento da vida útil ao longo do tempo.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Em termos de trabalhos futuros, o efeito do esquema de negociação no LoRaWAN e a recepção de pacotes poderia ser analisado para melhorar o desempenho da rede, sua comunicação entre os nós, sua vida útil e, portanto, a vida útil da bateria. Além disso, pretende-se avaliar o impacto da temperatura no comportamento das baterias em diferentes condições.

REFERÊNCIAS

- DE BERG, M. et al. Algorithms and applications. In: *Computational Geometry*. [S.l.]: Springer, 2008. v. 3 edition, p. 1–388. ISSN 10.1007/978-3-540-77974-2.
- ADELANTADO, F.; VILAJOSANA, X.; TUSET-PEIRO, P.; MARTINEZ, B.; MELIA-SEGUI, J.; WATTEYNE, T. Understanding the limits of lorawan. *IEEE Communications Magazine*, v. 55, n. 9, p. 34–40, Sep. 2017. ISSN 1558-1896.
- ASHTON, K. That 'Internet of Things' Thing: in the real world, things matter more than ideas. *RFID Journal*, p. 4986, 2009. Disponível em: <<http://www.rfidjournal.com/articles/view?4986>>.
- BAKKALI, W.; KIEFFER, M.; LALAM, M.; LESTABLE, T. Kalman filter-based localization for internet of things lorawan™ end points. In: *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6. ISSN 2166-9589.
- BANUELOS, S. M. A. Generación de curvas de descarga de una batería de li-ion utilizando una plataforma de hardware libre. SOMI XXXIV Congreso de Instrumentación, Ciudad Universitaria, 04510, CdMx, México, 2019. ISSN 2395-8499. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/338435753_Generacion_de_curvas_de_descarga_de_una_bateria_de_Li-ion_utilizando_una_plataforma_de_hardware_libre>.
- BERMUDEZ, E.; SADOK, D. Energy consumption of a lorawan network using jarvis algorithm. In: . London, UK: IEEE, 2020. ISSN 2595-6167. Disponível em: <<https://icitst.org/>>.
- BONCEUR, A.; CLAVIER, L.; COMBEAU, P.; MARC, O.; VAUZELLE, R.; MASSERAM, A.; SOLER, J.; EULER, R.; ALWAJEEH, T.; DEVENDRA, V.; NOREEN, U.; SORET, E.; LOUNIS, M. Cupcarbon: A new platform for the design, simulation and 2d/3d visualization of radio propagation and interferences in iot networks. In: *2018 15th IEEE Annual Consumer Communications Networking Conference (CCNC)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–4.
- BOR, M. C.; ROEDIG, U.; VOIGT, T.; ALONSO, J. M. Do lora low-power wide-area networks scale? In: *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2016. (MSWiM '16), p. 59–67. ISBN 9781450345026. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/2988287.2989163>>.
- BOUGUERA, T.; DIOURIS, J.; CHAILLOUT, J.; JAOUADI, R.; ANDRIEUX, G. Energy consumption model for sensor nodes based on lora and lorawan. *Sensors (Basel)*, v. 18, n. 7, p. 2104, 2018.
- BUTUN, I.; PEREIRA, N.; GIDLUND, M. Security risk analysis of lorawan and future directions. *Future Internet*, v. 11, n. 1, 2019.
- CALLAWAY, E.; CHEN, P.; O'DEA, B. Using optimum transmission range to design energy efficient systems for the neurfon/spl trade/ netform. In: *Proceedings of The 8th International Conference on Communication Systems - Volume 02*. USA: IEEE Computer Society, 2002. (ICCS '02), p. 846–851. ISBN 0780375106.

- CAPUZZO, M.; MAGRIN, D.; ZANELLA, A. Confirmed traffic in lorawan: Pitfalls and countermeasures. In: *2018 17th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–7.
- CASALS, L.; MIR, B.; VIDAL, R.; GOMEZ, C. Modeling the energy performance of lorawan. *Sensors (Basel)*, v. 17, n. 10, p. 2364, 2017.
- CENTENARO, M.; VANGELISTA, L.; ZANELLA, A.; ZORZI, M. Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the iot and smart city scenarios. *IEEE Wireless Communications*, v. 23, n. 5, p. 60–67, October 2016. ISSN 1558-0687.
- CHEN, F.; DIETRICH, I.; GERMAN, R.; DRESSLER, F. An energy model for simulation studies of wireless sensor networks using omnet++. *PIK - Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation*, De Gruyter, Berlin, Boston, v. 32, n. 2, p. 133 – 138, 2009. Disponible en: <<https://www.degruyter.com/view/journals/piko/32/2/article-p133.xml>>.
- CIRIPOI, D.; KAIHNSA, N.; LOHNE, A.; STURMFELS, B. Computing convex hulls of trajectories. *arXiv: Dynamical Systems*, 2018.
- COLLET, L. *WND and SIGFOX To Extend Global Internet of Things Network to Brazil*. [S.l.]: SIGFOX, 2016. <<http://www.sigfox.com/en/press/wnd-and-sigfox-to-extend-global-internet-of-things-network-to-brazil>>.17>.
- CUPCARBON. *CupCarbon User Guide*. [S.l.]: French research agency ANR, 2019. <http://labsticc.univ-brest.fr/~bounceur/cupcarbon/doc/cupcarbon_user_guide.pdf>.
- CUPCARBON. *CupCarbon Simulator*. [S.l.]: French research agency ANR, 2020. <<http://www.cupcarbon.com>>.
- DAN, T. V.; LANGENDOEN, K. An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. In: *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*. [S.l.: s.n.], 2003. p. 171–180.
- DENG, D. Li- ion batteries: basics, progress, and challenges. In: . [S.l.]: The Society of Chemical Industry and John Wiley and Sons Ltd, 2015. v. 3, p. 385–418.
- DENG, T.; ZHU, J.; NIE, Z. An improved lorawan protocol based on adaptive duty cycle. In: *2017 IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1122–1125.
- ELKHODR, M.; SHAHRESTANI, S.; CHEUNG, H. Emerging wireless technologies in the internet of things: a comparative study. *Wireless and Mobile Networks*, International Journal of Wireless and Mobile Networks IJWMN, v. 8, p. 67–82, 2016.
- ELSHABRAWY, T.; ROBERT, J. The impact of ism interference on lora ber performance. In: *2018 IEEE Global Conference on Internet of Things (GCIoT)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–5.
- ERTÜRK, M.; AYDIN, M.; BÜYÜKAKKAŞLAR, M.; EVIRGEN, H. A survey on lorawan architecture, protocol and technologies. *Future Internet*, v. 11, n. 10, p. 216–250, 2019.
- FALL, K.; VARADHAN, K. *The ns Manual (formerly ns Notes and Documentation)*. [S.l.]: UC Berkeley, 2011. <<https://www.isi.edu/nsnam/ns/doc/>>.

G., B.; I., T.; XIAO, Y. Distributed coordination function modeling approaches. *Sensors, IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 59, n. 3, p. 1055–1067, 2010.

GEUN, J. D.; SOOK, J. W. Performance of an exponential backoff scheme for slotted-aloha protocol in local wireless environment. *IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vehicular Technology, IEEE Transactions on, IEEE Trans. Veh. Technol*, v. 44, n. 3, p. 470 – 479, 1995. ISSN 1939-9359.

GOURSAUD, C.; GORCE, J. M. Dedicated networks for iot: Phy / mac state of the art and challenges. *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*, EAI, v. 1, n. 1, 10 2015.

GRIJPINK, F.; KUTCHER, E.; MÉNARD, A.; RAMASWAMY, S.; SCHIAVOTTO, D.; MANYIKA, J.; CHUI, M.; HAMILL, R.; OKAN, E. *Connected world: An evolution in connectivity beyond the 5G revolution*. 2020. Disponível em: <<https://www.mckinsey.com/industries/technology-media-and-telecommunications/our-insights/connected-world-an-evolution-in-connectivity-beyond-the-5g-revolution>>.

GSMA. *Mobile IoT in the 5G future*. Walbrook, London: [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2018/05/GSMA-5G-Mobile-IoT.pdf><https://www.gsma.com/iot/resources/mobile-iot-5g-future/>>.

GUJARE, V.; SARDESHMUKH, M.; SONTAKKE, R.; OVALE, R. Simultaneous wifi and bluetooth connections. In: . [S.l.]: International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 2018. v. 05. ISSN 2395-0056.

HACKMD®. *HackMD - LoRaWAN 1.0.2*. 2017. Disponível em: <<https://hackmd.io/s/S1kg6Ymo->>.

HASSAN, Q. F. *Internet of Things A to Z*. New York: Wiley-IEEE Press, 2018. ISBN 9781119456773.

HATA, M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 29, n. 3, p. 317–325, Aug 1980. ISSN 1939-9359.

HAXHIBEQIRI, J.; ABEELE, F. V. den; MOERMAN, I.; HOEBEKE, J. LoRa scalability: A simulation model based on interference measurements. *Sensors*, MDPI AG, v. 17, n. 6, p. 1193, may 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s17061193>>.

HE, M.; CHENG, S.-s.; MA, T.-y.; LV, S. A bit error rate optimization method for wsn node energy consumption. In: _____. [S.l.: s.n.], 2020. p. 84–95. ISBN 978-981-15-6112-2.

HENDERSON, T. R.; ROY, S.; FLOYD, S.; RILEY, G. F. Ns-3 project goals. In: *Proceeding from the 2006 Workshop on Ns-2: The IP Network Simulator*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2006. (WNS2 '06), p. 13–es. ISBN 1595935088. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/1190455.1190468>>.

IEEE. Ieee standard for low-rate wireless networks - amendment 5: Enabling/updating the use of regional sub-ghz bands. *IEEE Std 802.15.4v-2017 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-2015, as amended by IEEE Std 802.15.4n-2016, IEEE Std 802.15.4q-2016, IEEE Std 802.15.4u-2016, and IEEE Std 802.15.4t-2017)*, p. 1–35, 2017.

IEEE Standards®. *IEEE 802.11 Standards*. 2020. Disponível em: <<https://www.ieee802.org/11/>>.

JARADAT, Y.; MASOUD, M.; JANNOD, I.; ZAIDAN, D. The impact of nodes distribution on energy consumption in wsn. In: *2019 IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering and Information Technology (JEEIT)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 590–595.

KALANTARI, B. An $o(1/\epsilon)$ -iteration triangle algorithm for a convex hull membership. *ArXiv*, abs/1810.07346, 2018.

KASIM, R.; ABDULLAH, A. R.; SELAMAT, N. A. Nickel-cadmium battery analysis using spectrogram. In: . [S.l.]: ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2016. v. 11, p. 385–418. ISSN 1819-6608.

KORKALAINEN, M.; SALLINEN, M.; KARKKAINEN, N.; TUKEVA, P. Survey of wireless sensor networks simulation tools for demanding applications. In: *2009 Fifth International Conference on Networking and Services*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 102–106.

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.

LEE, G. Chapter 5 - data center networking standards. In: LEE, G. (Ed.). *Cloud Networking*. Boston: Morgan Kaufmann, 2014. p. 87 – 102. ISBN 978-0-12-800728-0. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128007280000059>>.

LEE, J.; MILLER, L. *CDMA Systems Engineering Handbook*. [S.l.: s.n.], 1998. 1228 p. ISBN 0890069905.

LIU, Y.; TONG, K.-F.; QIU, X.; LIU, Y.; DING, X. Wireless mesh networks in iot networks. In: IEEE. *2017 International workshop on electromagnetics: applications and student innovation competition*. [S.l.], 2017. p. 183–185.

LORA Alliance®. *LoRa Alliance - LoRaWAN*. 2020. Disponível em: <<https://lora-alliance.org/>>.

LOUNIS, M.; MEHDI, K.; BOUNCEUR, A. A CupCarbon Tool for Simulating Destructive Insect Movements. In: *International Conference on Information and Communication Technologies for Disaster Management*. Algeria: [s.n.], 2014. p. usb. Disponível em: <<https://hal.univ-brest.fr/hal-00963927>>.

MAGRIN, D.; CENTENARO, M.; VANGELISTA, L. Performance evaluation of lora networks in a smart city scenario. In: *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–7.

MAI, D. L.; KIM, M. K. Multi-Hop LoRa Network Protocol with Minimized Latency. *Energies*, v. 13, n. 6, p. 1–15, March 2020. Disponível em: <<https://ideas.repec.org/a/gam/jeners/v13y2020i6p1368-d332870.html>>.

MARAIS, J. M.; ABU-MAHFOUZ, A. M.; HANCKE, G. P. A survey on the viability of confirmed traffic in a lorawan. *IEEE Access*, v. 8, p. 9296–9311, 2020.

MOCS, L.-S. U. *CupCarbon Examples & Tutorials*. 2019. Disponível em: <<http://labsticc.univ-brest.fr/~bounceur/cupcarbon/example>>.

- MOUNT, D. M. *CMSC 754 - Computational Geometry. Lecture Notes*. [S.l.]: University of Maryland - Department of Computer Science, 2002. <<http://www.cs.umd.edu/~mount/754/Lects/754lects.pdf>>.
- NOLAN, K. E.; GUIBENE, W.; KELLY, M. Y. An evaluation of low power wide area network technologies for the internet of things. In: *2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 439–444.
- NOREEN, U.; BAIG, S. Modified incremental bit allocation algorithm for powerline communication in smart grids. In: *2013 1st International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–6. ISSN null.
- NOREEN, U.; BOUNCEUR, A.; CLAVIER, L. A study of lora low power and wide area network technology. In: *2017 International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6. ISSN null.
- NS-3. *ns-3 Network Simulator*. [S.l.]: ns-3, 2011–2020. <<https://www.nsnam.org/>>.
- NURGALIYEV, M.; SAYMBETOV, A.; YASHCHYSHYN, Y.; KUTTYBAY, N.; TUKYMBEKOV, D. Prediction of energy consumption for lora based wireless sensors network. *Wireless Networks*, v. 26, 02 2020.
- O, A.-S. M.; YOUSIF, J. H.; AL-BALUSHI, I. A. Automatic attendance registration system based mobile cloud computing. *Computation and Applied Sciences*, International Journal of Computation and Applied Sciences IJOCAAS, v. 2, 2017. ISSN 2399-4509.
- O. AFTAB; P. CHEUNG; A. KIM; S. THAKKAR; N. YEDDANAPUDI. *Information Theory and the Digital Age*. Cambridge: The Structure of Engineering Revolutions, Massachusetts Institute of Technology, 2001. 1–27 p. Disponível em: <<http://web.mit.edu/6.933/www/Fall2001/Shannon2.pdf>>SNAPES@MIT.EDU>.
- OKUMURA, H. Field strength and its variability in the VHF and UHF land mobile radio service. *Review of the Electrical Communications Laboratories*, v. 16, n. July 1987, p. 825–73, 1968.
- OMNET. *OMNeT++ Discrete Event Simulator*. [S.l.]: OpenSim Ltd., 2001–2019. <<https://omnetpp.org/>>.
- PANDYA, P. Chapter e73 - transmission control protocol/internet protocol packet analysis. In: *Computer and Information Security Handbook (Third Edition)*. Third edition. Boston: Morgan Kaufmann, 2013. p. e205 – e218. ISBN 978-0-12-803843-7.
- PARKASH, D.; KUNDU, T.; KAUR, P. The RFID Technology and ITS Applications: A Review. *International Journal of Electronics, Communication & Instrumentation Engineering Research and Development (IJEIERD)*, v. 2, n. 3, p. 109–120, 2012.
- PARSONS, J. D. *The Mobile Radio Propagation Channel*. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2001. ISBN 9780470841525. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/0470841524.fmatter{_}ind>.
- PATEL, D.; WON, M. Experimental Study on Low Power Wide Area Networks (LPWAN) for Mobile Internet of Things. In: *IEEE Vehicular Technology Conference*. [s.n.], 2017. v. 2017-June. ISBN 9781509059324. ISSN 15502252. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1705.06926>><http://dx.doi.org/10.1109/VTCSpring.2017.8108501>>.

PATHLOSS. *Pathloss Version 5*. 2020. Disponível em: <www.pathloss.com/p5/docs/pl5{_}_white{_}_paper.pdf<http://www.pathloss.com>>.

PAUL, B. A novel energy-efficient routing scheme for lora networks. *IEEE Sensors Journal*, v. 20, n. 15, p. 8858–8866, 2020.

PERLA, E.; CATHÁIN, o. A.; CARBAJO, S. R.; HUGGARD, M.; GOLDRICK, M. C. Powertossim z: realistic energy modelling for wireless sensor network environments. *PM2HW2N*, p. 35–42, 2008.

POP, A.-I.; RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Does bidirectional traffic do more harm than good in lorawan based lpwa networks?. *GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications Conference*, p. 1 – 6, 2017. ISSN 978-1-5090-5019-2.

PROAKIS, J. G. *Digital communications*. 4th. ed. [S.l.]: Mc Graw Hill, 2000. ISBN 0072321113.

QUERALTA, J. P.; GIA, T.; ZOU, Z.; TENHUNEN, H.; WESTERLUND, T. Comparative study of lpwan technologies on unlicensed bands for m2m communication in the iot: beyond lora and lorawan. *Procedia Computer Science*, v. 155, p. 343 – 350, 2019. ISSN 1877-0509. The 16th International Conference on Mobile Systems and Pervasive Computing (MobiSPC 2019), The 14th International Conference on Future Networks and Communications (FNC-2019), The 9th International Conference on Sustainable Energy Information Technology. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050919309639>>.

RAHMADHANI, A.; KUIPERS, F. When lorawan frames collide. In: *Proceedings of the 12th International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation & Characterization*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2018. (WiNTECH '18), p. 89–97. ISBN 9781450359306. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/3267204.3267212>>.

RAJARAM, M. L.; KOUGIANOS, E.; MOHANTY, S. P.; CHOPPALI, U. Wireless sensor network simulation frameworks: A tutorial review: Matlab/simulink bests the rest. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, v. 5, n. 2, p. 63–69, 2016.

RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 19, n. 2, p. 855–873, Secondquarter 2017. ISSN 2373-745X.

REYNDERS, B.; MEERT, W.; POLLIN, S. Range and coexistence analysis of long range unlicensed communication. In: *2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. ISSN null.

SANCHEZ, E. B.; SADOK, D. F. H. Lora and lorawan protocol analysis using cupcarbon. In: MATA-RIVERA, M. F.; ZAGAL-FLORES, R.; BARRIA-HUIDOBRO, C. (Ed.). *Telematics and Computing*. Cham: Springer International Publishing, 2020. v. 1280, p. 352 to 376. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-62554-2_26>.

SANCHEZ-IBORRA, R.; CANO, M.-D. State of the art in lp-wan solutions for industrial iot services. *Sensors*, v. 16, p. 708, 05 2016.

SCHILLER, F. *Redes em Malha (Wireless Mesh Networking–WMN)*. 2006. <https://www.gta.ufrj.br/grad/06_2/felipe/index.htm>.

SEMTECH. *LoRa Ecosystem*. 2020. Disponível em: <<https://www.semtech.com/lora/ecosystem/lora-alliance>>.

SEMTECH CORPORATION. *LoRa Modem Designer's Guide*. [S.l.], 2013. 9 p. Disponível em: <https://www.semtech.com/uploads/documents/LoraDesignGuide{_}STD.>

SEMTECH CORPORATION. *LoRa Modulation Basics*. [S.l.], 2015. 1–26 p. Disponível em: <<http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf>>.

SHANNON, C. E. A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, v. 27, n. 4, p. 623–656, 1948. ISSN 15387305.

SIGFOX, T. *Sigfox Network Technology*. [S.l.]: SIGFOX, 2009–2020. <<https://www.sigfox.com/en/>>.

SILVA, B. A. D.; MORAES, R. M. de. Consumo de energia em função da taxa de transmissão e do tamanho do pacote em redes ad hoc aloha de um salto. In: *Anais do XVII Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2018. ISSN 2595-6167. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/wperformance/article/view/3321>>.

SONG, Y.; LIN, J.; TANG, M.; DONG, S. An internet of energy things based on wireless lpwan. *Engineering*, v. 3, n. 4, p. 460 – 466, 2017. ISSN 2095-8099. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809917306057>>.

SORENSEN, R. B.; KIM, D. M.; NIELSEN, J. J.; POPOVSKI, P. Analysis of latency and mac-layer performance for class a lorawan. *IEEE Wireless Communications Letters*, v. 6, n. 5, p. 566–569, 2017.

SU, B.; QIN, Z.; NI, Q. Energy efficient uplink transmissions in lora networks. *IEEE Transactions on Communications*, v. 68, n. 8, p. 4960–4972, 2020.

TINYOS. *TOSSIM*. [S.l.]: TinyOS, 2013. <<http://tinyos.stanford.edu/tinyos-wiki/index.php/TOSSIM>>.

TOMASIN, S.; ZULIAN, S.; VANGELISTA, L. Security analysis of lorawan join procedure for internet of things networks. In: *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.

TRIWIDYASTUTI, Y.; MUSAYYANAH; ERNAWATI, F.; AFFANDI, C. D. Multi hop communication between lora end devices. In: . [S.l.]: Scientific Journal of Informatics SJI, 2020. v. 7, n. 1. ISSN 2407-7658.

TUNC, C.; AKAR, N. Markov fluid queue model of an energy harvesting iot device with adaptive sensing. *Performance Evaluation*, v. 111, p. 1 – 16, 2017. ISSN 0166-5316. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166531616301079>>.

VONDROUŠ, O.; KOCUR, Z.; HÉGR, T.; SLAVÍČEK, O. Performance evaluation of iot mesh networking technology in ism frequency band. IEEE, 2016.

APÊNDICE A – CODE JARVIS ALGORITHM

```
// Esau Bermudez Sanchez
// https://portal.cin.ufpe.br/
// email: ebs2@cin.ufpe.br
// Gift Wrapping Algorithm
const points = [ ];
const hull = [ ];
    let leftMost;
    let currentVertex;
    let index;
    let nextIndex = -1;
    let nextVertex;
function setup() {
createCanvas(500, 500);
    let buffer = 20;
    for (let i = 0; i < 50; i++) {
        points.push(createVector(random(buffer, width - buffer), random(buffer, height -
buffer))); }
    points.sort((a, b) => a.x - b.x);
    leftMost = points[0];
    currentVertex = leftMost;
    hull.push(currentVertex);
    nextVertex = points[1];
    index = 2; }
function draw() {
    background(0);
    stroke(255);
    strokeWeight(8);
    for (let p of points) { point(p.x, p.y); }
    stroke(0, 0, 255);
    fill(0, 0, 255, 50);
    beginShape();
    for (let p of hull) { vertex(p.x, p.y); }
    endShape(CLOSE);
    stroke(0, 255, 0);
    strokeWeight(32);
    point(leftMost.x, leftMost.y);
    stroke(200, 0, 255);
```

```
        strokeWeight(32);
    point(currentVertex.x, currentVertex.y);
        stroke(0, 255, 0);
    strokeWeight(2);
    line(currentVertex.x, currentVertex.y, nextVertex.x, nextVertex.y);
        let checking = points[index];
    stroke(255);
    line(currentVertex.x, currentVertex.y, checking.x, checking.y);
    const a = p5.Vector.sub(nextVertex, currentVertex);
    const b = p5.Vector.sub(checking, currentVertex);
    const cross = a.cross(b);
        if (cross.z < 0) { nextVertex = checking;
    nextIndex = index; }
    index = index + 1;
        if (index == points.length) {
            if (nextVertex == leftMost) {
                console.log('done');
                noLoop(); }
        else { hull.push(nextVertex);
    currentVertex = nextVertex;
    index = 0;
    //points.splice(nextIndex, 1);
    nextVertex = leftMost;
        }
    }
}
```

APÊNDICE B – CODE GRAHAM ALGORITHM

```
// Esau Bermudez Sanchez
// https://portal.cin.ufpe.br/
// email: ebs2@cin.ufpe.br
// Graham Algorithm
points = [ ]
noOfPoints = 20
boundStack = [ ]
startPoint = null
currInd = null
isLoop = true
function setup() {
  createCanvas(400, 400);
  buffer = 20
  for(let i=0; i<noOfPoints; ++i) {
    points.push(createVector(random(buffer, width-buffer), random(buffer, height-buffer)))
  }
  getStart()
  points.sort(sortFunc)
  boundStack.push(0)
  boundStack.push(1)
  currInd = 2
  nopLabel = createP('No Of Points (20): ')
  nopLabel.position(80, 390)
  nopSlider = createSlider(10, 200, 20)
  nopSlider.position(200, 400)
  button = createButton('New Points')
  button.position(0, 430)
  button.mousePressed(newPoints);
  label = createP('FrameRate (2): ')
  label.position(100, 420)
  frameSlider = createSlider(1, 60, 2)
  frameSlider.position(200, 430)
  frameRate(2) }
function newPoints() {
  points = [ ]
  noOfPoints = nopSlider.value()
  boundStack = [ ] startPoint = null
```

```

isLoop = true
currInd = null
for(let i=0; i<noOfPoints; ++i) {
  points.push(createVector(random(buffer, width-buffer), random(buffer, height-buffer)))
}
getStart()
points.sort(sortFunc)
boundStack.push(0)
boundStack.push(1)
currInd = 2
}
function getStart() {
  let maxY = 0
  let minX = width
  let index = -1
  for(let i=0; i<noOfPoints; ++i) {
    if(maxY < points[i].y) {
      maxY = points[i].y
      index = i
    } else if (maxY == points[i].y & minX > points[i].x) {
      minX = points[i].x
      index = i
    }
  }
  startPoint = points[index]
}
function sortFunc(a, b) {
  if(a.equals(startPoint)) return -1*Infinity;
  if(b.equals(startPoint))
    return Infinity;
  distA = a.dist(startPoint)
  distB = b.dist(startPoint)
  cosA = (a.x - startPoint.x)/distA
  cosB = (b.x - startPoint.x)/distB
  return cosB-cosA
}
function checkTurn(ai, bi, ci){
  if(ci >= points.length) return 1
  // (x2-x1)(y3-y1) - (y2-y1)(x3-x1)

```

```

    a = points[ai]
    b = points[bi]
    c = points[ci]
    crossProd = ((b.x-a.x)*(c.y-a.y)) - ((b.y-a.y)*(c.x-a.x))
    if(crossProd<0) return 1;
    else return -1;
  }
  function draw() {
    background(220);
    frameRate(frameSlider.value())
    label.html('FrameRate (' + frameSlider.value() +'):')
    nopLabel.html('No Of Points (' + nopSlider.value() +'):')
    if(points.length != nopSlider.value()) {
      newPoints()
    }
    stroke(0)
    strokeWeight(8)
    point(startPoint.x, startPoint.y)
    strokeWeight(4)
    for(let i=0; i<noOfPoints; ++i) { point(points[i].x, points[i].y)
      }
    stroke(0, 255, 0)
    strokeWeight(2)
    let bl = boundStack.length
    for(let i=1; i<bl; ++i) {
      line(points[boundStack[i]].x, points[boundStack[i]].y, points[boundStack[i-1]].x,
        points[boundStack[i-1]].y)
    }
    if(currInd < points.length) { stroke(0, 0, 255)
      line(points[boundStack[bl-1]].x, points[boundStack[bl-1]].y,
        points[currInd].x, points[currInd].y)
    } else {
      stroke(0, 255, 0) line(points[boundStack[bl-1]].x, points[boundStack[bl-1]].y, startPoint.x,
startPoint.y)
      isLoop = false
    }
    if(isLoop) {
      if(bl>1) {
        if(checkTurn(boundStack[bl-2], boundStack[bl-1], currInd) == -1) { boundStack.pop()

```

```
}  
else {  
  if(currInd == points.length) currInd=0;  
  boundStack.push(currInd)  
  currInd++  
}  
}  
else {  
  if(currInd == points.length) currInd=0;  
  boundStack.push(currInd)  
  currInd++  
}  
}  
}
```

APÊNDICE C – STAR SIMULATION CUPCARBON

```

=====
Initialization
=====
START SIMULATION
=====
-----
Time : 0.0
Min (milliseconds) : 0.0
S1 Starts the loop section.
S1 READ SENSOR: 0
S1 is writing the message : "B" in its buffer.
S2 Starts the loop section.
S2 is waiting for data ...
S3 Starts the loop section.
S3 is waiting for data ...
S4 Starts the loop section.
S4 is waiting for data ...
-----
Time : 8.0E-21
Min (milliseconds) : 8.0E-21
S1 is listening to the channel
S1 the channel is free.
S1 starts sending the message : "B".
S1 has finished sending the message : "B" to the node:
S4 (radio: radio2) is receiving the message : "B" in its buffer.
-----
Time : 0.009025333333333333
Min (milliseconds) : 0.009025333333333333
S1 (radio: radio2) is receiving the message : in its buffer.
S1 starts delaying for 1000.0 milliseconds
S4 Buffer available, exit waiting.
S4 READ
S4 is reading from its buffer "B" and puts it in x
S4 is writing the message : "B" in its buffer.
-----
Time : 0.009025333333333333
Min (milliseconds) : 8.0E-21

```

S4 is listening to the channel
S4 the channel is free.
S4 starts sending the message : "B".
S4 has finished sending the message : "B"to the node:
S2 (radio: radio2) is receiving the message : "B"in its buffer.

Time : 0.018050666666666666
Min (milliseconds) : 0.009025333333333333
S4 (radio: radio2) is receiving the message : in its buffer.
S2 Buffer available, exit waiting.
S2 READ
S2 is reading from its buffer "B"and puts it in x
S2 UNMARK
S2 Starts the loop section.
S2 is waiting for data ...
S4 Starts the loop section.
S4 is waiting for data ...

Time : 1.0
Min (milliseconds) : 0.9819493333333333
M1 DEVICE MOVING

Time : 1.0090073824539016
Min (milliseconds) : 0.009007382453901647
S1 has finished the delay.
S1 Starts the loop section.
S1 READ SENSOR: 0
S1 is writing the message : "B"in its buffer.

Time : 1.0090073824539016
Min (milliseconds) : 8.0E-21
S1 starts sending the message : "B".
S1 has finished sending the message : "B"to the node:
S4 (radio: radio2) is receiving the message : "B"in its buffer.

Time : 1.018032715787235
Min (milliseconds) : 0.009025333333333333
S1 (radio: radio2) is receiving the message : in its buffer.
S1 starts delaying for 1000.0 milliseconds

S4 Buffer available, exit waiting.

S4 READ

S4 is reading from its buffer "B"and puts it in x

S4 is writing the message : "B"in its buffer.

Time : 1.018032715787235

Min (milliseconds) : 8.0E-21

S4 starts sending the message : "B".

S4 has finished sending the message : "B"to the node:

S2 (radio: radio2) is receiving the message : "B"in its buffer.

Time : 1.0270580491205685

Min (milliseconds) : 0.009025333333333333

S4 (radio: radio2) is receiving the message : in its buffer.

S2 Buffer available, exit waiting.

S2 READ

S2 is reading from its buffer "B"and puts it in x

S2 UNMARK

S2 Starts the loop section.

S2 is waiting for data ...

S4 Starts the loop section.

S4 is waiting for data ...

Time : 2.0

Min (milliseconds) : 0.9729419508794317

M1 DEVICE MOVING

Time : 2.0179929862575703

Min (milliseconds) : 0.01799298625757051

S1 has finished the delay.

S1 Starts the loop section.

S1 READ SENSOR: 0

S1 is writing the message : "B"in its buffer.

Time : 2.0179929862575703

Min (milliseconds) : 8.0E-21

S1 starts sending the message : "B".

S1 has finished sending the message : "B"to the node:

S4 (radio: radio2) is receiving the message : "B"in its buffer.

Time : 2.0270183195909035
Min (milliseconds) : 0.009025333333333333
S1 (radio: radio2) is receiving the message : in its buffer.
S1 starts delaying for 1000.0 milliseconds
S4 Buffer available, exit waiting.
S4 READ
S4 is reading from its buffer "B"and puts it in x
S4 is writing the message : "B"in its buffer.

Time : 2.0270183195909035
Min (milliseconds) : 8.0E-21
S4 starts sending the message : "B".
S4 has finished sending the message : "B"to the node:
S2 (radio: radio2) is receiving the message : "B"in its buffer.

Time : 2.0360436529242367
Min (milliseconds) : 0.009025333333333333
S4 (radio: radio2) is receiving the message : in its buffer.
S2 Buffer available, exit waiting.
S2 READ
S2 is reading from its buffer "B"and puts it in x
S2 UNMARK
S2 Starts the loop section.
S2 is waiting for data ...
S4 Starts the loop section.
S4 is waiting for data ...

Time : 2.9999999999999996
Min (milliseconds) : 0.9639563470757628
M1 DEVICE MOVING

Time : 3.0269785900612387
Min (milliseconds) : 0.02697859006123937
S1 has finished the delay.
S1 Starts the loop section.
S1 READ SENSOR: 0
S1 is writing the message : "B"in its buffer.

Time : 3.0269785900612387
Min (milliseconds) : 8.0E-21
S1 starts sending the message : "B".
S1 has finished sending the message : "B"to the node:
S4 (radio: radio2) is receiving the message : "B"in its buffer.

Time : 3.036003923394572
Min (milliseconds) : 0.009025333333333333
S1 (radio: radio2) is receiving the message : in its buffer.
S1 starts delaying for 1000.0 milliseconds
S4 Buffer available, exit waiting.
S4 READ
S4 is reading from its buffer "B"and puts it in x
S4 is writing the message : "B"in its buffer.

Time : 3.036003923394572
Min (milliseconds) : 8.0E-21
S4 starts sending the message : "B".
S4 has finished sending the message : "B"to the node:
S2 (radio: radio2) is receiving the message : "B"in its buffer.

Time : 3.045029256727905
Min (milliseconds) : 0.009025333333333333
S4 (radio: radio2) is receiving the message : in its buffer.
S2 Buffer available, exit waiting.
S2 READ
S2 is reading from its buffer "B"and puts it in x
S2 UNMARK
S2 Starts the loop section.
S2 is waiting for data ...
S4 Starts the loop section.
S4 is waiting for data ...

Time : 3.9999999999999999
Min (milliseconds) : 0.954970743272094
M1 DEVICE MOVING

Time : 4.035964193864907
Min (milliseconds) : 0.035964193864908234

S1 has finished the delay.
S1 Starts the loop section.
S1 READ SENSOR: 0
S1 is writing the message : "B" in its buffer.

Time : 4.035964193864907
Min (milliseconds) : 8.0E-21
S1 starts sending the message : "B".
S1 has finished sending the message : "B" to the node:
S4 (radio: radio2) is receiving the message : "B" in its buffer.

Time : 4.044989527198241
Min (milliseconds) : 0.009025333333333333
S1 (radio: radio2) is receiving the message : in its buffer.
S1 starts delaying for 1000.0 milliseconds
S4 Buffer available, exit waiting.
S4 READ
S4 is reading from its buffer "B" and puts it in x
S4 is writing the message : "B" in its buffer.

Time : 4.044989527198241
Min (milliseconds) : 8.0E-21
S4 starts sending the message : "B".
S4 has finished sending the message : "B" to the node:
S2 (radio: radio2) is receiving the message : "B" in its buffer.

Time : 4.0540148605315744
Min (milliseconds) : 0.009025333333333333
S4 (radio: radio2) is receiving the message : in its buffer.
S2 Buffer available, exit waiting.
S2 READ
S2 is reading from its buffer "B" and puts it in x
S2 UNMARK
S2 Starts the loop section.
S2 is waiting for data ...
S4 Starts the loop section.
S4 is waiting for data ...

Time : 5.0

Min (milliseconds) : 0.9459851394684251

M1 DEVICE MOVING

Time : 5.044949797668577

Min (milliseconds) : 0.044949797668577096

S1 has finished the delay.

S1 Starts the loop section.

S1 READ SENSOR: 0

S1 is writing the message : "B" in its buffer.

Time : 5.044949797668577

Min (milliseconds) : 8.0E-21

S1 starts sending the message : "B".

S1 has finished sending the message : "B" to the node:

S4 (radio: radio2) is receiving the message : "B" in its buffer.

Time : 5.053975131001911

Min (milliseconds) : 0.009025333333333333

S1 (radio: radio2) is receiving the message : in its buffer.

S1 starts delaying for 1000.0 milliseconds

S4 Buffer available, exit waiting.

S4 READ

S4 is reading from its buffer "B" and puts it in x

S4 is writing the message : "B" in its buffer.

Time : 5.053975131001911

Min (milliseconds) : 8.0E-21

S4 starts sending the message : "B".

S4 has finished sending the message : "B" to the node:

S2 (radio: radio2) is receiving the message : "B" in its buffer.

Time : 5.063000464335245

Min (milliseconds) : 0.009025333333333333

S4 (radio: radio2) is receiving the message : in its buffer.

S2 Buffer available, exit waiting.

S2 READ

S2 is reading from its buffer "B" and puts it in x

S2 UNMARK

S2 Starts the loop section.

S2 is waiting for data ...

S4 Starts the loop section.

S4 is waiting for data ...

Time : 6.0000000000000001

Min (milliseconds) : 0.9369995356647562

M1 DEVICE MOVING

Time : 6.053935401472247

Min (milliseconds) : 0.05393540147224596

S1 has finished the delay.

S1 Starts the loop section.

S1 READ SENSOR: 0

S1 is writing the message : "B" in its buffer.

Time : 6.053935401472247

Min (milliseconds) : 8.0E-21

S1 starts sending the message : "B".

S1 has finished sending the message : "B" to the node:

S4 (radio: radio2) is receiving the message : "B" in its buffer.

Time : 6.06296073480558

Min (milliseconds) : 0.009025333333333333

S1 (radio: radio2) is receiving the message : in its buffer.

S1 starts delaying for 1000.0 milliseconds

S4 Buffer available, exit waiting.

S4 READ

S4 is reading from its buffer "B" and puts it in x

S4 is writing the message : "B" in its buffer.

Time : 6.06296073480558

Min (milliseconds) : 8.0E-21

S4 starts sending the message : "B".

S4 has finished sending the message : "B" to the node:

S2 (radio: radio2) is receiving the message : "B" in its buffer.

Time : 6.071986068138914

Min (milliseconds) : 0.009025333333333333

S4 (radio: radio2) is receiving the message : in its buffer.

S2 Buffer available, exit waiting.
S2 READ
S2 is reading from its buffer "B"and puts it in x
S2 UNMARK
S2 Starts the loop section.
S2 is waiting for data ...
S4 Starts the loop section.
S4 is waiting for data ...

Time : 7.0000000000000002
Min (milliseconds) : 0.9280139318610874
M1 DEVICE MOVING

Time : 7.062921005275917
Min (milliseconds) : 0.06292100527591482
S1 has finished the delay.
S1 Starts the loop section.
S1 READ SENSOR: 0
S1 is writing the message : "B"in its buffer.

Time : 7.062921005275917
Min (milliseconds) : 8.0E-21
S1 starts sending the message : "B".
S1 has finished sending the message : "B"to the node:
S4 (radio: radio2) is receiving the message : "B"in its buffer.

Time : 7.0719463386092505
Min (milliseconds) : 0.009025333333333333
S1 (radio: radio2) is receiving the message : in its buffer.
S1 starts delaying for 1000.0 milliseconds
S4 Buffer available, exit waiting.
S4 READ
S4 is reading from its buffer "B"and puts it in x
S4 is writing the message : "B"in its buffer.

Time : 7.0719463386092505
Min (milliseconds) : 8.0E-21
S4 starts sending the message : "B".
S4 has finished sending the message : "B"to the node:

S2 (radio: radio2) is receiving the message : "B" in its buffer.

Time : 7.080971671942584

Min (milliseconds) : 0.009025333333333333

S4 (radio: radio2) is receiving the message : in its buffer.

S2 Buffer available, exit waiting.

S2 READ

S2 is reading from its buffer "B" and puts it in x

S2 UNMARK

S2 Starts the loop section.

S2 is waiting for data ...

S4 Starts the loop section.

S4 is waiting for data ...

Time : 8.0000000000000004

Min (milliseconds) : 0.9190283280574185

M1 DEVICE MOVING

Time : 8.071906609079587

Min (milliseconds) : 0.07190660907958368

S1 has finished the delay.

S1 Starts the loop section.

S1 READ SENSOR: 0

S1 is writing the message : "B" in its buffer.

Time : 8.071906609079587

Min (milliseconds) : 8.0E-21

S1 starts sending the message : "B".

S1 has finished sending the message : "B" to the node:

S4 (radio: radio2) is receiving the message : "B" in its buffer.

Time : 8.08093194241292

Min (milliseconds) : 0.009025333333333333

S1 (radio: radio2) is receiving the message : in its buffer.

S1 starts delaying for 1000.0 milliseconds

S4 Buffer available, exit waiting.

S4 READ

S4 is reading from its buffer "B" and puts it in x

S4 is writing the message : "B" in its buffer.

Time : 8.08093194241292
Min (milliseconds) : 8.0E-21
S4 starts sending the message : "B".
S4 has finished sending the message : "B"to the node:
S2 (radio: radio2) is receiving the message : "B"in its buffer.

Time : 8.089957275746254
Min (milliseconds) : 0.009025333333333333
S4 (radio: radio2) is receiving the message : in its buffer.
S2 Buffer available, exit waiting.
S2 READ
S2 is reading from its buffer "B"and puts it in x
S2 UNMARK
S2 Starts the loop section.
S2 is waiting for data ...
S4 Starts the loop section.
S4 is waiting for data ...

Time : 9.0000000000000004
Min (milliseconds) : 0.9100427242537497
M1 DEVICE MOVING

Time : 9.080892212883256
Min (milliseconds) : 0.08089221288325255
S1 has finished the delay.
S1 Starts the loop section.
S1 READ SENSOR: 0
S1 is writing the message : "B"in its buffer.

Time : 9.080892212883256
Min (milliseconds) : 8.0E-21
S1 starts sending the message : "B".
S1 has finished sending the message : "B"to the node:
S4 (radio: radio2) is receiving the message : "B"in its buffer.

Time : 9.08991754621659
Min (milliseconds) : 0.009025333333333333
S1 (radio: radio2) is receiving the message : in its buffer.

S1 starts delaying for 1000.0 milliseconds
S4 Buffer available, exit waiting.
S4 READ
S4 is reading from its buffer "B"and puts it in x
S4 is writing the message : "B"in its buffer.

Time : 9.08991754621659
Min (milliseconds) : 8.0E-21
S4 starts sending the message : "B".
S4 has finished sending the message : "B"to the node:
S2 (radio: radio2) is receiving the message : "B"in its buffer.

Time : 9.098942879549924
Min (milliseconds) : 0.009025333333333333
S4 (radio: radio2) is receiving the message : in its buffer.
S2 Buffer available, exit waiting.
S2 READ
S2 is reading from its buffer "B"and puts it in x
S2 UNMARK
S2 Starts the loop section.
S2 is waiting for data ...
S4 Starts the loop section.
S4 is waiting for data ...

Time : 10.000000000000004
Min (milliseconds) : 0.9010571204500808
M1 DEVICE MOVING

Time : 10.089877816686926
Min (milliseconds) : 0.08987781668692141
S1 has finished the delay.
S1 Starts the loop section.
S1 READ SENSOR: 0
S1 is writing the message : "B"in its buffer.

Time : 10.089877816686926
Min (milliseconds) : 8.0E-21
S1 starts sending the message : "B".
S1 has finished sending the message : "B"to the node:

S4 (radio: radio2) is receiving the message : "B" in its buffer.

.
.
.
.
.
.
.

Time : 100.000000000000004
Min (milliseconds) : 0.9010571204500808
M1 DEVICE MOVING

Time : 100.089877816686926
Min (milliseconds) : 0.08987781668692141
S1 has finished the delay.
S1 Starts the loop section.
S1 READ SENSOR: 0
S1 is writing the message : "B" in its buffer.

Time : 100.089877816686926
Min (milliseconds) : 8.0E-21
S1 starts sending the message : "B".
S1 has finished sending the message : "B" to the node:
S4 (radio: radio2) is receiving the message : "B" in its buffer.

.
.
.
.
.
.
.

Time : 300.000000000000004
Min (milliseconds) : 0.9010571204500808
M1 DEVICE MOVING

Time : 300.089877816686926
Min (milliseconds) : 0.08987781668692141
S1 has finished the delay.
S1 Starts the loop section.
S1 READ SENSOR: 0
S1 is writing the message : "B" in its buffer.

Time : 300.089877816686926
Min (milliseconds) : 8.0E-21
S1 starts sending the message : "B".
S1 has finished sending the message : "B" to the node:
S4 (radio: radio2) is receiving the message : "B" in its buffer.

.
.
.
.
.
.
.

Time : 700.0000000000000004
Min (milliseconds) : 0.9010571204500808
M1 DEVICE MOVING

Time : 700.089877816686926
Min (milliseconds) : 0.08987781668692141
S1 has finished the delay.
S1 Starts the loop section.
S1 READ SENSOR: 0
S1 is writing the message : "B" in its buffer.

Time : 700.089877816686926
Min (milliseconds) : 8.0E-21
S1 starts sending the message : "B".
S1 has finished sending the message : "B" to the node:
S4 (radio: radio2) is receiving the message : "B" in its buffer.

APÊNDICE D – CONFIGURATION SENSORS SENSSCRIPT

Sensor S1 (Detection)

```
loop
dreadsensor x
if($x==1)
    send A 4
else
    send B 4
end
delay 1000
```

Sink Gateway S4

```
loop
wait
read x
if($x==A)
    mark 1
else
    mark 0
end
```

Sensor S2

```
loop
wait
read x
send $x 5
```

Sensor S3

```
loop
wait
read x
send $x 2
```