ALDO RUSSO

A ampliação do tempo de vida útil de dispositivos IoT por meio de captação de energia do ambiente em redes LoRa®/LoRaWAN™

São Paulo
2022

ALDO RUSSO

A ampliação do tempo de vida útil de dispositivos IoT remotos por meio de captação de energia do ambiente em redes LoRa®/LoRaWAN™

Versão Original

Monografia apresentada ao PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a conclusão do curso de MBA em *Internet of Things*.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Cugnasca

São Paulo
2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

FICHA CATALOGRÁFICA

Russo, Aldo
A ampliação do tempo de vida útil de dispositivos IoT remotos por meio de captação de energia do ambiente em redes LoRa®/LoRaWAN™ / A. Russo -- São Paulo, 2022.
82 p.

Monografia (MBA em Internet das Coisas) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.CE610.7.2.1 - Internet das Coisas 2.CE625.3.1.1.3.1.1 - Eficiência Energética I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

Nome: RUSSO, ALDO

Título: A ampliação do tempo de vida útil de dispositivos IoT remotos por meio de captação de energia do ambiente em redes LoRa®/LoRaWAN™

Monografia apresentada ao PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a conclusão do curso de MBA em *Internet das Coisas*.

Aprovado em: **09/02/2022**

Banca Examinadora

Prof(a). Dr(a). **Carlos Eduardo Cugnasca**

Instituição: PCS/EPUSP

Julgamento: Aprovado

Prof(a). Dr(a). **Rogério Rossi**

Instituição: USP-PECE

Julgamento: Aprovado

Prof(a). Dr(a). **Tereza Cristina Melo de Brito Carvalho**

Instituição: PCS/EPUSP

Julgamento: Aprovado

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus filhos, meus pais e minha irmã que são a essência da minha vida. Dedico aos meus caros Professores do PECE que enfrentaram tempos turbulentos para compartilhar seu conhecimento e me inspiraram nessa jornada e em especial a meu orientador.

AGRADECIMENTOS

À Universidade de São Paulo – USP pela visão de se integrar à sociedade, abrindo as suas portas para auxiliar a capacitar a população para a contínua evolução tecnológica.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP que mantém a tradição de ser um polo formador de importantes profissionais técnicos.

Ao PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia pela grade de cursos ampla e diversificada, que possibilita o encontro entre demanda e vocação.

RESUMO

Russo, Aldo. **A ampliação do tempo de vida útil de dispositivos IoT remotos por meio de captação de energia do ambiente em redes LoRa®/LoRaWAN™**. 2022. p. 82. Monografia (MBA em *Internet of Things*). Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2022.

Até o ano de 2026, estima-se que haverão cerca de 26 bilhões de dispositivos de Internet das Coisas ativos e conectados. Esses dispositivos requerem uma fonte de energia elétrica para seu funcionamento contínuo. Em aplicações dentro de ambientes fechados, prover essa energia, bem como a sua manutenção é uma tarefa passível de planejamento e execução controláveis. Contudo, quando o ambiente é externo e o objeto ao qual o dispositivo está ingtegrado possui algum grau de movimentação, prover e manter fontes de energia passa a ser uma questão que envolve custos, logística e tem como consequência a limitação da vida útil do dispositivo. Neste trabalho do tipo Solução de Problema, são avaliados trabalhos que consideram aplicações com restrições de fornecimento de energia, baixo volume de dados a serem trafegados e alcance elevado para a comunicação. Como estudo de caso foi escolhida a pecuária, setor produtivo significativo no Brasil, que conta com mais de 218 milhões de cabeças de gado, em números de 2020. A premissa é a utilização de dispositivos embarcados nos animais para colher dados de sua posição e condição de saúde para o consumo desses dados em aplicações de gestão de rebanho. Foram pesquisados trabalhos acadêmicos, livros, artigos e vídeos com o objetivo de avaliar o consumo de energia elétrica de dispositivos quando em operação padrão, e considerando diferentes cenários de configuração dos parâmetros do transceptor. O levantamento desse perfil de consumo permitiu estimar o tempo de vida útil da fonte primária de energia, tipicamente uma bateria. O próximo passo foi avaliar fontes secundárias baseadas na coleta de energia do ambiente do entorno do dispositivo, alavancado pelo uso das grandezas físicas disponíveis, notadamente energia solar, térmica e mecânica. Foi avaliado o potencial dessas fontes alternativas em suprir a recarga da fonte primária ou até mesmo substitui-la por completo. A conclusão é que é viável a utilização de fontes alternativas para a recarga da fonte primária, e até mesmo a sua substituição por completo do ponto de vista de densidade de energia

elétrica gerada. Contudo, o armazenamento dessa energia é uma restrição a ser vencida para a substituição plena da fonte primária. Nesse estudo não foi abordada a questão da viabilidade econômica da solução de captação de energia do ambiente, configurando-se como objeto de estudo futuro.

Palavras-chave: Captura de Energia. Internet das Coisas. LoRa®. LoRaWAN™. Energia Solar, Energia Térmica, Energia Mecânica.

ABSTRACT

Russo, Aldo. **Extending the lifespan of remote IoT devices by capturing ambient energy in LoRa®/LoRaWAN™ networks**. 2022.p. 82 Monograph (Internet of Things MBA). Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2022.

By the year of 2026, it is estimated that there will be around 26 billion active and connected Internet of Things devices. These devices require a source of electrical power for their continued operation. In applications inside closed environments, providing this energy, as well as its maintenance, is a task that can be planned and executed. However, when the environment is external and the object to which the device is integrated has some degree of movement, providing and maintaining energy sources becomes an issue that involves costs, logistics and has the consequence of limiting the useful life of the device. In this Problem-Solving work, works that consider applications with energy supply restrictions, low volume of data to be transmitted and high communication range are evaluated. As a case study, livestock was chosen, a significant productive sector in Brazil, which has more than 218 million head of cattle, in 2020 numbers. The premise is the use of devices embedded in animals to collect data on their position and condition for the consumption of this data in herd management applications. Academic works, books, articles, and videos were searched with the objective of evaluating the electrical energy consumption of devices when in standard operation and considering different configuration scenarios of the transceiver parameters. The survey of this consumption profile made it possible to estimate the lifetime of the primary energy source, typically a battery. The next step was to evaluate secondary sources based on the collection of energy from the environment around the device, leveraged using available physical quantities, notably solar, thermal, and mechanical energy. The potential of these alternative sources to supply the recharge of the primary source or even to replace it completely was evaluated. The conclusion is that it is feasible to use alternative sources for the recharge of the primary source, and even its complete replacement from the point of view of density of electricity generated. However, the storage of this energy is a constraint to be overcome for the full replacement of the primary source. In this study, the question of the economic

viability of the solution to capture energy from the environment was not addressed, constituting itself as an object of future study.

Keywords: Energy Capture. Internet of Things. LoRa®. LoRaWAN™. Solar Energy, Thermal Energy, Mechanical Energy

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Visão geral da motivação 15
Figura 2 – Distribuição do rebanho de bovinos no Brasil 21
Figura 3 - Lógica da revisão de literatura.....25
Figura 4 - Categorias de aplicações IoT 26
Figura 5 - Diagrama de uma aplicação IoT típica 27
Figura 6 – Arquitetura de um dispositivo IoT 31
Figura 7 – Dados de consumo de energia de dispositivo IoT 32
Figura 8 – Perfil de Consumo de Energia Elétrica de Dispositivo IoT 36
Figura 9 - Potência de transmissão em função da distância.....37
Figura 10 – Tempo de vida de dispositivo IoT 38
Figura 11 - Potencial de geração de energia elétrica 40
Figura 12 - Configuração de células fotovoltaicas. 41
Figura 13 - Gerador Termoelétrico.....42
Figura 14 - Estrutura de um TEG 42
Figura 15 - Gradiente de temperatura em bovinos 43
Figura 16 - TEG DX2625 saída de potência 43
Figura 17 - Exemplo de Coletores.....45
Figura 18 - Arquitetura genérica de uma PMU 46
Figura 19 - Comparação entre diferentes tecnologias de armazenamento de energia 49
Figura 20 – Topologia de Rede LoRaWAN™ 63
Figura 21 - Pilha de tecnologia LoRaWAN™.....64
Figura 22 – Diagrama de Blocos do SX1272/73 66
Figura 23 – *Chirp* e *Up-Chirp*.....67
Figura 24 – Codificação dos dados 67
Figura 25 - Modulação do sinal para transmissão 68
Figura 26 – Formatos do pacote da mensagem LoRa® nível físico 71
Figura 27 –Comparativo de consumo energético de soluções de geolocalização 77

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1 - Comparação de tipos de baterias.....49
Tabela 2 - Características de Supercapacitores.....50
Tabela 3 - Perfil de blocos consumidores.....51
Tabela 4 - Perfis de fornecedores de energia.....52
Tabela 5 - Tempos de recarga por coleta de energia mecânica.....53
Tabela 6 – Taxas de Transmissão em função da variação de parâmetros de configuração de modulação LoRa® – Calculado a partir da equação 71

Quadro 1 - Aplicações IoT classificadas por categoria 26
Quadro 2 - Comparação dos padrões para comunicação IoT.....33
Quadro 3 – Mapa de Calor para Seleção de Tecnologias LPWAN.....34
Quadro 4 - Tecnologias de coleta pelo efeito piezoelétrico 44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CPU – **C**entral **P**rocessing **U**nit

EC-GSM – **E**xtented **C**overage **G**lobal **S**ystem for **M**obile Communications

FUOTA – **F**irmware **U**pdate **O**ver **T**he **A**ir

IBGE – **I**nstituto **B**rasileiro de **G**eografia e **E**statística

IoT – **I**nternet **o**f **T**hings

LPWAN - **L**ow **P**ower **W**ide **A**rea **N**etwork

LoRa – **L**ong **R**ange

LoRaWAN – **Lo**ng **Ra**nge **W**ide **A**rea **N**etwork

LTE-M – **L**ong **T**erm **E**volution for **M**achines

MCU - **M**icro**p**rocessing **U**nit

MPPT - **M**aximum **P**ower **P**oint **T**racker

NB-IoT – **N**arrow **B**and **IoT**

ONU – **O**rganização das **N**ações **U**nidas

PMU - **P**ower **M**anagement **U**nit

RPMA - **R**andom **P**hase **M**ultiple **A**ccess

TEG - **T**hermoelectric **G**enerator

ToA - **T**ime on **A**ir

Wi-Fi – **Wi**reless **Fi**delity

WSN - **W**ireless **S**ensor **N**ode

Sumário

Sumário *14*

1. INTRODUÇÃO *15*

1.1 Motivações 15

1.2 Objetivo 17

1.3 Justificativa 17

1.4 Método de Pesquisa 22

1.5 Estrutura do Trabalho 23

2. REVISÃO DA LITERATURA *25*

2.1 IoT e Aplicações em Ambiente Externo 25

2.2 Tecnologias de Comunicação 28

2.3 Tecnologias de Captação de Energia 29

2.4 Considerações sobre o Capítulo 30

3. Perfil de Consumo de Energia em Dispositivos IoT para Aplicações Externas e Fontes Alternativas de Energia *30*

3.1 Perfil de Consumo de um Dispositivo IoT 31

3.2 A Questão da Comunicação 32

3.3 O Consumo de Energia 35

3.4 Fontes alternativas de energia 39

3.4.1 Energia Solar 40

3.4.2 Energia Térmica 41

3.4.3 Energia Mecânica 44

3.4.4 Gestão de Potência 46

3.4.5 Armazenamento e Predição de Energia 48

3.5 Considerações sobre o Capítulo 50

4. AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE *51*

4.1 Perfis de consumo e fornecimento de energia 51

4.2 Técnicas de otimização do consumo de energia 53

4.3 Considerações do Capítulo 54

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS *55*

5.1 Conclusões 55

5.2 Contribuições do Trabalho 55

5.3 Trabalhos Futuros 56

REFERÊNCIAS *58*

APÊNDICE A – Introdução às Tecnologias LoRa® e LoRaWAN™ *62*

APÊNDICE B – Consumo de Energia em LoRa® e LoRaWAN™ *79*

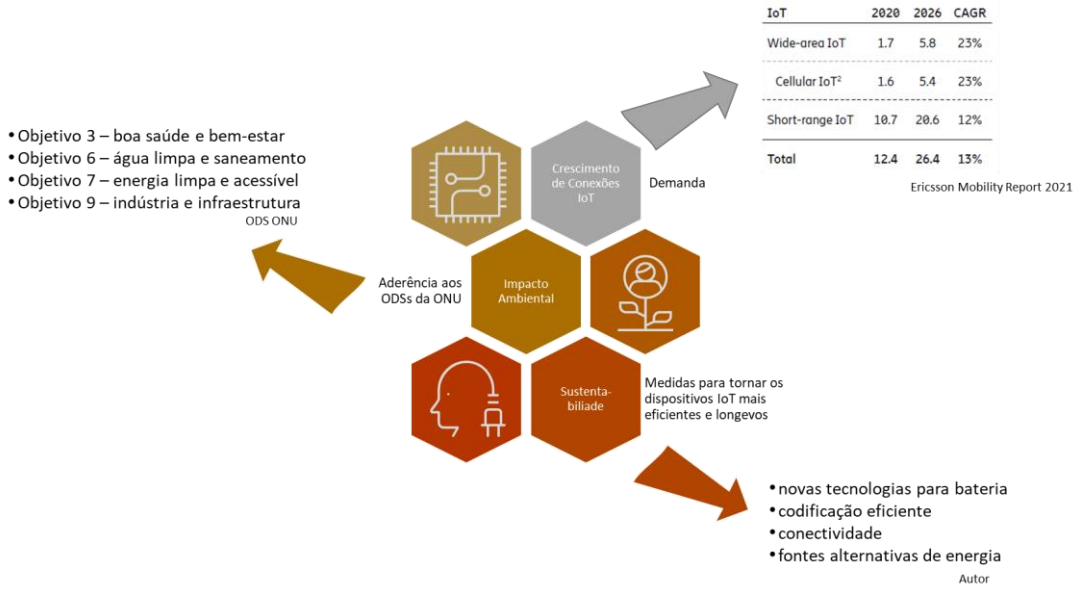
1. INTRODUÇÃO

Este estudo do tipo solução de problema investiga a ampliação do tempo de vida útil de dispositivos desenvolvidos segundo o paradigma da Internet das Coisas (Internet of Things) – IoT, para aplicações em ambiente externo, nos quais suas baterias tenham a duração estendida através do uso de coletores de energia do ambiente.

1.1 Motivações

A Figura 1 representa esquematicamente as motivações par aa realização deste trabalho. Na sequência foi feito o detalhamento.

Figura 1 - Visão geral da motivação



Fonte: O Autor

Desde que foi cunhado em 1999, por Kevin Ashton, o termo IoT vem se tornando mais e mais presente na vida das pessoas e empresas. De uma aplicação focada em identificação de ativos para rastreamento, o leque de possibilidades não para de se expandir à medida que a compreensão do impacto do modelo inicial se torna mais madura, e novas tecnologias e conceitos se somam à ideia original, conferindo novas funcionalidades e adequando seu uso a diferentes setores da economia, como logística e medicina.

De acordo com o Ericsson *Mobility Report,* Patrik Cerwall (2021), em 2026 estima-se que existirão cerca de 26,4 bilhões de conexões IoT, considerando longa distância,

curto alcance e conexões baseadas em tecnologias celulares e outras da categoria *Low Power Wide Area Network* (LPWAN).

Com a popularização das aplicações IoT a demanda pelo uso desta tecnologia tem aumentado e impõem as questões de se interagir com o planeta de forma mais sustentável, não só para evitar a exaustão de determinados recursos, mas principalmente para assegurar condições de vida para as gerações futuras.
IoT é um aliado importante para que sejam alcançados os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável acordados com a ONU[1], por exemplo:

- Objetivo 3 – boa saúde e bem-estar;
- Objetivo 6 – água limpa e saneamento;
- Objetivo 7 – energia limpa e acessível;
- Objetivo 9 – indústria e infraestrutura.

Contudo, é importante que o aliado não se torne também um inimigo. O emprego de IoT, implica na aquisição de dados do objeto com o qual se deseja interagir. Isso significa instalar alguma infraestrutura que habilite essa coleta de dados, como o dispositivo IoT, que ligado ao objeto e através de seus sensores pode executar essa função.

Essas conexões ligam dispositivos de diversas naturezas que captam dados do estado operacional de um objeto a que estão vinculados, de pessoas ou do ambiente e os enviam para que sejam tratados por sistemas computacionais. Um grupo específico desses dispositivos são alimentados por baterias, que quando se exaure, impedem o funcionamento do dispositivo, exigindo a sua substituição ou troca do dispositivo. Com isso, é necessário considerar toda a logística para o provimento de peças sobressalentes, mão de obra para reposição, além dos custos associados. Vários são os estudos que tem buscado otimizar a vida útil das baterias através de técnicas de desenvolvimento de códigos mais eficientes e parametrização de componentes do dispositivo, para que este opere consumindo menos energia. Lykov *et al.* (2021); Sherazi *et al.* (2021); Singh *et al.* (2020).

[1] Para uma visão completa dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: https://sdgs.un.org/goals

A busca por formas mais eficientes de para estender a vida útil do dispositivo IoT, também se desenvolveu por caminhos que buscam diminuir o impacto ambiental resultante do resíduo tóxico do descarte de baterias em todo o mundo. A tecnologia de fabricação de baterias vem evoluindo, com o desenvolvimento de novas tecnologias envolvendo novas composições, como o cloreto de tionil de lítio (LiSOCl2), que segundo o fabriante Tadiran Batteries, pode durar até 40 anos, atuando em conjunto com coletores de energia e em condições ambientais extremas O'Shea (2017).

A captação de energia do ambiente, é uma técnica antiga, mas que, com a necessidade de ampliar o uso de equipamenos eletrônicos que operam sem a intervenção humana, associado com o contínuo desenvolvimento de novos materiais, faz com que o aproveitamento de fontes de energia, como cinética, térmica e luminosa, ganhem uma nova dimensão, com fontes de energia alternativas renováveis e limpas. No trabalho de Shirvanimoghaddam *et al.* (2019) são apresentadas algumas dessas alternativas e suas caracterísiticas básicas, para se avaliar a sua compatbilidade com os dispositivos a que se pretende aplicar.
A motivação desse trabalho se concentra em avaliar o uso de dispositivos IoT, que coletam dados e permitem os benefícios da digitalização e da interação remota com os ambientes, porém de uma forma sustentável, com o próprio ambiente fornecendo a energia necessária à operação do dispositivo, de forma sustentável.

1.2 Objetivo

Este trabalho visa apresentar alternativas de fornecimento de energia para atenter a necessidade de dispositivos IoT destinados a aplicações em ambiente externo, com longo alcance, baixo volume de dados trafegados e com elevada vida útil.

1.3 Justificativa

A crescente utilização de aplicações IoT nos mais diversos setores da economia, tem evidenciado os desafios para a sua adoção de forma operacionalmente eficiente e economicamente viável.

Dentre os fatores que são considerados em projetos, o fornecimento de energia é um dos mais impactantes, pois limita a vida útil do dispositivo IoT e aumenta o custo da aplicação, que necessita contabilizar visitas em campo para troca de baterias ou mesmo a substituição do dispositivo. Nesse contexto, diversos autores têm estudado o tema da eficiência energética de dispositivos IoT, passando pela avaliação da tecnologia de bateria, estudo de componentes de hardware de menor consumo, eficiência do código embarcado no dispositivo, tecnologia de comunicação e coleta de energia do ambiente do entorno do dispositivo para sua alimentação e recarga da bateria.

Neste trabalho, o enfoque foi dado na tecnologia de comunicação e na captação de energia do ambiente. O primeiro por ser o principal consumidor de energia de um dispositivo IoT e o segundo por possibilitar ampliar a vida útil do dispositivo.

O trabalho de Finnegan; Brown (2018) contribui pela comparação do consumo de energia de diferentes tecnologias LPWAN e seu impacto para a vida útil da bateria do dispositivo, através de sua modelagem que leva em consideração diferentes parâmetros de cada tecnologia comparada, como *Long Range Wide Area* (LoRaWAN™), Sigfox, *Narrow Band IoT* (NB-IoT), entre outras. O trabalho evidencia a complexidade em se obter o ponto ótimo de operação em que se equilibre a taxa diária de dados transmitidos e o tempo de vida do dispositivo.

O trabalho de Casals *et al.* (2017) é focado na tecnologia LoRaWAN™ e busca desenvolver um modelo analítico para o consumo de energia baseado em experimentação. Através da avaliação de hardware de mercado, os autores criam o ambiente de prova do qual extraem parâmetros para validar seu modelo matemático e estimar consumo e tempo de vida útil do dispositivo IoT em diferentes combinações de parametrização das condições de transmissão de dados, desafio real enfrentado no projeto e implementação de aplicações IoT.

Da mesma forma, o trabalho de Bouguera *et al.* (2018) concentra seus estudos na tecnologia LoRaWAN. Inicialmente o perfil de operação típico do dispositivo IoT é traçado e através de um experimento, diferentes cenários de operação são testados

para levantar dados referentes a confiabilidade da transmissão de dados e seu respectivo impacto no consumo de energia e posteriormente como isso impacta o tempo de vida útil do dispositivo.

Para complementar essa visão da relevância do tema, o trabalho de Ismail et al. (2021) traz uma contribuição importante no cenário de aplicações de ambiente externo em que se empregam tecnologias de rastreabilidade. O trabalho faz uma completa revisão de tecnologias de comunicação e as apresenta de forma comparativa, em especial quanto ao seu alcance e consumo de energia. Também apresenta uma visão das tecnologias de localização e finalmente uma revisão importante das tecnologias de coleta de energia do ambiente e seu potencial uso para suprir dispositivos *Wireless Sensor Node* (WSN).

Aplicações em ambientes externos nos quais o acesso ao dipositivo é difícil ou o volume de dispositivos empregados torna inviável economicamente a sua manutenção, requerem um projeto cuidadoso, para escolha do conjunto de tecnologias que não apenas a viabilize, mas também a tornem sustentável, conferindo-lhes elevada autonomia e vida útil. Esse é o desafio que a comunidade científica tem buscado solucionar.

Para atender a essa categoria de aplicações, algumas em ambiente urbano, outras em ambiente rural, para efeito deste trabalho, a avalição vai se deter a aplicações que possuem as seguintes características Shirvanimoghaddam *et al.* (2019):

- necessidade de movimentar baixo volume de dados ao longo da execução da operação da aplicação;
- fonte de energia limitada;
- baixa capacidade de processamento e armazenamento;
- elevado alcance da comunicação – entre 1.000 m e 5.000 m.

Para exemplificar, será usado o caso do controle de rebanho na pecuária. Nessa aplicação, os objetos são os animais que estão soltos na propriedade e necessitam ser monitorados por diversos motivos:

- furto;
- doença do animal, que altera o seu comportamento;
- evasão da propriedade;
- acidentes, como cair em valas, ou outros perigos tipicamente encontrados nas propriedades rurais.

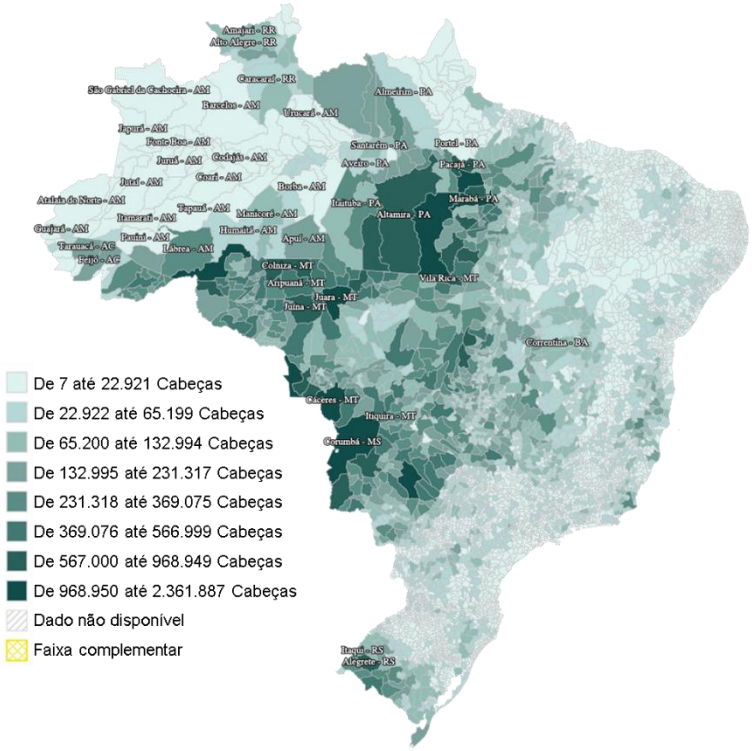
Além disso, existem as atividades de manejo, que consistem em direcionar os animais do rebanho para procriação, receber nutrientes específicos, movimentar para a troca de pasto, administrar vacinas e medicamentos, entre outros.

O que se pretende nesse estudo é avaliar parte dos desafios enfrentados pelos pecuaristas e seus provedores de produtos e serviços para oferecer tecnologia que atinja os seguintes requisitos:

- alcance elevado para baixo volume de dados de 3 km a 5 km, em boas condições de transmissão;
- fonte de energia alternativa para as baterias convencionais, o que reduziria o custo total de propriedade, dada a redução de manutenção dos dispositivos terminais embarcados nos animais.

A análise faz sentido, uma vez que a pecuária é uma atividade importante para o Brasil, que possui um dos maiores rebanhos de bovinos do mundo. O mapa da Figura 2 e a Tabela 1, extraídos da Pesquisa Pecuária Municipal – 2020 realizada pelo IBGE (IBGE, 2020) ilustram a dimensão desse setor produtivo.

Figura 2 – Distribuição do rebanho de bovinos no Brasil



Fonte: adaptado de (IBGE, 2020)[2].

Tabela 1 – Rebanho por tipo de animal no Brasil

Ano	Número de Cabeças
2015	215.220.508
2016	218.190.768
2017	215.003.578
2018	213.809.445
2019	215.008.958
2020	218.150.298

Fonte: adaptado de (IBGE, 2020).

Até o momento da publicação da pesquisa do IBGE, o Brasil contava com um rebanho de cerca de 218 milhões de cabeças de bovinos. Pelo mapa, percebe-se que existe uma concentração forte no centro do país incluindo as regiões oeste da Bahia e Minas Gerais e expandindo-se rumo ao norte.

[2] Mapa gerado pelo autor a partir de ferramenta disponível no site do IBGE.

Com um rebanho dessas dimensões e tão disperso, fica demonstrado, o potencial para o uso de tecnologia IoT para o monitoramento e gestão desse rebanho.

1.4 Método de Pesquisa

O método de pesquisa empregado no presente trabalho é o de Solução de Problema, em que se busca extender a vida útil de um dispositivo e reduzir o impacto ambiental característico do uso de baterias. Foi realizada pesquisa em diferentes fontes de conteúdo, a saber:

- artigos científicos;
- livros;

Foram investigados os elementos principais para a solução do problema e artigos nos quais os autores propõem alternativas.

A sequência seguida incluiu a compreensão do perfil de consumo típico de um dispositivo IoT, o que permitiriu conhecer a energia consumida por esse dispositivo quando em operação normal. Posteriormente, a identificação de metodologias de coleta de energia do ambiente do entorno em que o dispositivo se insere, para ser empregada como fonte alternativa limpa e capaz de estender a vida útil do dispositivo.

1.5 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho possui cinco capítulos, a relação de referências consultadas e dois apêndices.

O Capítulo 1, INTRODUÇÃO, apresenta as motivações, o objetivo, as justificativas, o método de pesquisa e a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2, REVISÃO DA LITERATURA, apresenta os casos de aplicações em ambientes externos, seus requitos e foca um caso de uso real na pecuária. Este capítulo contém ainda as seções de Tecnologias de Comunicação e Tecnologias de captação de energia.

O Capítulo 3, PERFIL DE CONSUMO DE ENERGIA EM DISPOSITIVOS IOT PARA APLICAÇÕES EXTERNAS E FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA, apresenta uma visão de um dispositivo IoT e um perfil de consumo de energia, que serve de parâmetro para justificar o foco da análise no transceptor, como o principal consumidor de energia elétrica. A Seção 3.1 apresenta a arquitetura genérica de um dispositivo IoT e o seu perfil de consumo de energia. Na Seção 3.2 apresenta o perfil de consumo de energia do dispositivo IoT na condição operacional típica. A Seção 3.3 apresenta as tecnologias de coleta de energia do ambiente baseada em transdutores fotovoltaicos, térmicos e piezoelétricos, ressaltando a sua capacidade de geração de energia elétrica.

O Capítulo 4, AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE apresenta a comparação entre os perfis de consumo e geração de energia, e discorre sobre a viabiliade da utilização da tecnologia de coleta de energia, explora as características adicionais do dispositivo IoT equipado com captação de energia e apresenta os pontos de atenção trazidos pela literatura analisada.

O Capítulo 5, CONSIDERAÇÕES FINAIS, descreve as conclusões do trabalho e apresenta sugestões de trabalhos futuros.

O Apêndice A – INTRODUÇÃO ÀS TECNOLOGIAS LoRa® E LoRaWAN™, apresenta as respectivas tecnologias. Explora seu funcionamento e identifica parâmetros de configuração que impactam o consumo de energia.

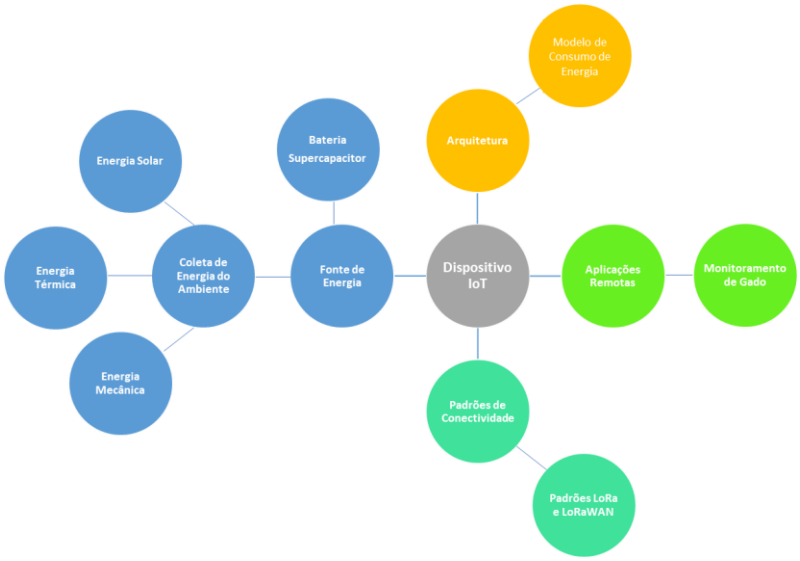
O Apêndice B – CONSUMO DE ENERGIA EM LoRa® E LoRaWAN™, apresenta a modelagem matemática para estimar o consumo de energia de um dispositivo típico.

Após os capítulos são apresentadas as REFERÊNCIAS consultadas para a elaboração deste trabalho.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste Capítulo, na Seção 2.1 é feito um breve histórico de aplicações IoT, focando-se nas aplicações em ambientes externos, que demandam características específicas dos dispositivos IoT para suportá-las. Na Seção 2.2 é apresentada a revisão de literatura referente a tecnologias LPWAN e a escolha da tecnologia *Long Range* (LoRa®) para o estudo, devido às suas características. Já na Seção 2.3 trata do tema de energia, principiando com o perfil de consumo de dispositivos equipados com transceptores LoRa® e seguindo com a revisão de alguns trabalhos referentes à coleta de energia. O Capítulo finaliza com a Seção 2.4 em que são resumidos os principais pontos. A Figura 3 apresenta um esquema da lógica empregada para a revisão de literatura.

Figura 3 - Lógica da revisão de literatura

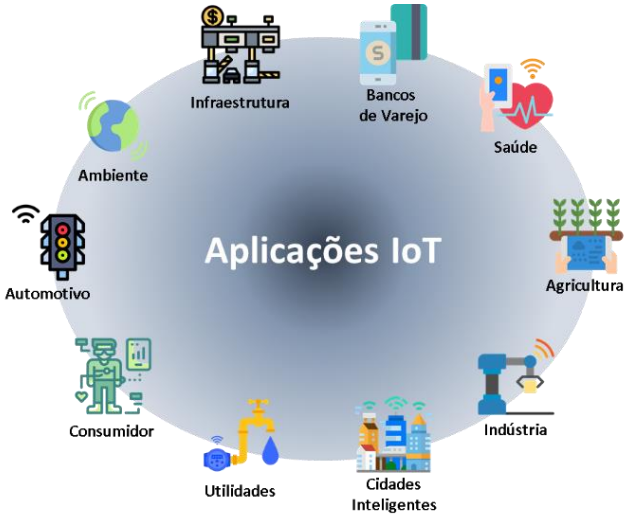


Fonte: O Autor

2.1 IoT e Aplicações em Ambiente Externo

Buscar uma lista finita de aplicações para IoT é uma tarefa infrutífera, uma vez que a todo momento surge uma nova. Dessa forma, optou-se por considerar um conjunto de aplicações típicas para auxiliar no direcionamento do enfoque dado a este trabalho. A Figura 4 exemplifica as principais categorias de aplicações IoT Tsiatsis *et al.* (2019).

Figura 4 - Categorias de aplicações IoT



Fonte: adaptado de Tsiatsis et al. (2019).

A partir dessas categorias, é possível avaliar algumas das possíveis aplicações como mostrado no Quadro 1.

Quadro 1 - Aplicações IoT classificadas por categoria

Categoria	Aplicação	Categoria	Aplicação
Automotivo	• Veículos autônomos • Transporte multimodal • Logística • Gestão de tráfego	**Agricultura**	• Agricultura • Pecuária • Piscicultura • Silvicultura • Agricultura Urbana
Ambiente	• Poluição • Ar, Água, Solo • Clima • Ruído • Erosão • Incêndio	**Indústria**	• Robótica • Manufatura • Recursos Naturais • Operações Remotas • Automação • Maquinário Pesado
Infraestrutura	• Prédios • Casas • Aeroportos • Rodovias • Ferrovias • Portos • Pontes	**Cidades Inteligentes**	• Ambientes Integrados • Operações Integradas • Conveniência • Sócio economia • Sustentabilidade • Inclusão
Bancos de Varejo	• Micro pagamentos • Logística do Comércio • Informação de Ciclo de Vida de Produto • Assistência a Compras	**Utilidades**	• Rede de Distribuição Inteligente • Gestão de Água • Gás, Petróleo, Fontes Renováveis • Gestão do Lixo • Aquecimento ou resfriamento

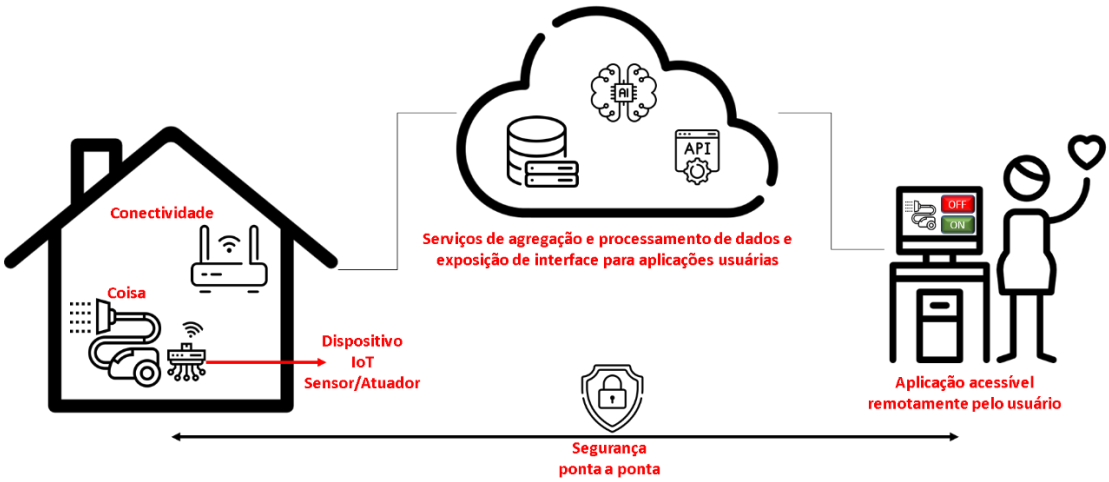
Saúde	• Monitoramento Remoto • Vida Assistida • Mudança comportamental • Observância de Tratamento • Esportes • Ginástica	**Consumidor**	• Aparelhos conectados • Eletrodomésticos • Vestíveis • Sensoriamento Participativo[3] Freitas (2015) • Rede Social das Coisas

Fonte: adaptado de Tsiatsis et al. (2019).

Todas estas aplicações seguem uma lógica básica para sua implementação, que parte do princípio de colher dados do mundo físico real e, a partir da representatividade desses dados, tomar decisões e até mesmo ações que interagem com esse mundo físico.

Assim, as aplicações IoT fazem uso de diversas tecnologias, cujo propósito é implementar as diversas etapas que viabilizam essa interação entre o mundo físico e o cibernético. A Figura 5, ilustra uma aplicação genérica, apresenta as etapas da interação e as tecnologias que as suportam.

Figura 5 - Diagrama de uma aplicação IoT típica



Fonte: o Autor.

No exemplo, o aspirador de pó é a “coisa” que passa a ser monitorada por um dispositivo IoT que coleta dados de seu estado operacional e através de uma conexão Wi-Fi, envia-os, através da Internet, para um provedor de serviços que os recepciona,

[3] **Sensoriamento Participativo:** sensoriamento realizado através dos dispositivos móveis, como *smartphones*, portados pelas pessoas.

armazena, consolida e processa, seguindo uma lógica pré-programada para isso. Na outra ponta, está o usuário, que remotamente se conecta ao serviço e tem a possibilidade de visualizar o estado operacional do objeto sendo monitorado. No exemplo apresentado, provoca alteração nesse estado, desligando ou ligando o aparelho, sendo que essa atividade pode ser programada para ser autônoma.

Toda essa atividade, requer a disponibilização de uma série de tecnologias que habilitam essas funcionalidades e provocam o efeito final para o usuário do serviço.

Examinando o Quadro 1, nota-se que algumas categorias têm o objeto monitorado em ambientes externos e em movimento. Essas aplicações, devido às características de dispersão geográfica e restrições no fornecimento de energia, tem o tempo de vida útil dos dispositivos IoT como uma preocupação. Desta forma, a busca por alternativas tecnológicas são um tema de estudo científico importante.
Neste trabalho serão avaliadas duas linhas de estudo:

- comunicação
- fontes de energia.

2.2 Tecnologias de Comunicação

Diversas tecnologias estão disponíveis para implementação de projetos IoT. A principal categorização para essas tecnologias principia com o tipo de espectro de frequência em que se baseiam, livre ou licenciado. Outro ponto importante é com relação ao alcance de sua cobertura dadas as condições em que são projetados. Estudos como os efetuados por Shah *et al.* (2021) e Shirvanimoghaddam *et al.* (2019), procuram relacionar os principais parâmetros de projeto com o consumo de energia e com o desempenho obtido pelo arranjo, considerando um dispositivo equipado com tecnologia de conectividade LoRa® e LoRaWAN™. O propósito de tais estudos é avaliar, para as tecnologias disponíveis, quais características são relevantes para apresentar o desempenho desejado e minimizar o consumo de energia.

2.3 Tecnologias de Captação de Energia

O consumo de energia de dispositivos IoT equipados com tecnologia de comunicação pode ser calculado pela lista de seus componentes constitutivos e pelo perfil de consumo desses componentes em cenários de utilização padrão. Como visto, com a perspectiva de bilhões de dispositivos entrarem em operação até 2026 e esse número seguir crescendo, a questão de como prover uma fonte de energia elétrica que seja durável, limpa e não gere resíduos poluentes torna-se uma questão primordial, para que o avanço dessa tecnologia seja sustentável. De acordo com o site Li-Cycle[4], em 2020 cerca de 460.000 toneladas de baterias de íon de lítio atingiram o fim de vida útil, representando um total acumulado de cerca de 1,7 milhão de toneladas e com previsão de atingir cerca de 15 milhões de toneladas acumuladas até 2030. O uso em larga escala de baterias requer uma ação para que esses números sejam contidos. Assim, a seção 3.2 tem por objetivo apresentar fontes de energia que se não as substituam, ao menos ampliem a vida útil de fontes de energia tradicionais contribuindo, assim, para diminuir o volume de baterias que requeiram atividades de reciclagem.

O trabalho de Bouguera *et al.* (2018) apresenta um estudo realizado com um circuito utilizando o *chip* SX1272 da empresa Semtech em diferentes cenários de transmissão de dados. Os cenários estão baseados em um perfil de atividade como demonstrado na Figura 6. Durante o experimento, os dados foram levantados de modo a obtê-los para as diferentes etapas do perfil e permitir o cálculo de consumo para diferentes perfis de configuração dos parâmetros do transceptor. Com os resultados, os autores calcularam o impacto na vida útil da bateria especificada no experimento. Já Casals *et al.* (2017), elabora um estudo minucioso e preciso para a criação de um modelo matemático que descreve o comportamento de um circuito de teste também baseado no *chip* SX1272. Nesse caso, foram simuladas duas condições de testes: uma para transmissões sem confirmação de recebimento e outra com confirmação. Igualmente ao estudo anterior, foram feitas medições do consumo de energia em ambos os casos, de forma a validar o modelo, e a calcular o tempo de duração da bateria e também o custo energético por bit entregue na outra ponta.

---

[4] https://li-cycle.com/?gclid=CjwKCAjw5c6LBhBdEiwAP9ejG6BPzB4xlLTdLQOfe_TXmMzfHkVdViM-isgyvH4cU6jYCL-Hu9RXHhoCk54QAvD_BwE

Com alguns pefis de consumo em mente, o objetivo passa a ser a avaliação de fontes alternativas de energia. Para isso é avaliado o método de captação de energia do ambiente em que o dispositivo IoT se insere (*energy harvesting*). O trabalho de Shirvanimoghaddam *et al.* (2019) apresenta de forma didática e elucidativa. a relação entre as diferentes tecnologias de transmissão de dados em IoT, como alcance, consumo de energia e depois faz a relação com tecnologias de coleta de energia disponíveis. Desta forma espera-se que um panorama seja apresentado e que daí surjam pontos de interesse para o desenvolvimeto de trabalhos futuros de investigação acadêmica.

2.4 Considerações sobre o Capítulo

Aplicações em ambiente externo apresentam requisitos específicos no que se refere a vida útil dos dispositivos IoT. A minimização do consumo de energia é um fator chave para elevar a vida útil dos dispositivos. A escolha da tecnologia de comunicação e a abordagem de avaliar o perfil de consumo de energia, aliado ao uso de fontes alternativas para coleta de energia do ambiente, tem demonstrado potencial para atingir esse propósito. Esses temas serão explorados detalhadamente no Capítulo 3.

3. Perfil de Consumo de Energia em Dispositivos IoT para Aplicações Externas e Fontes Alternativas de Energia

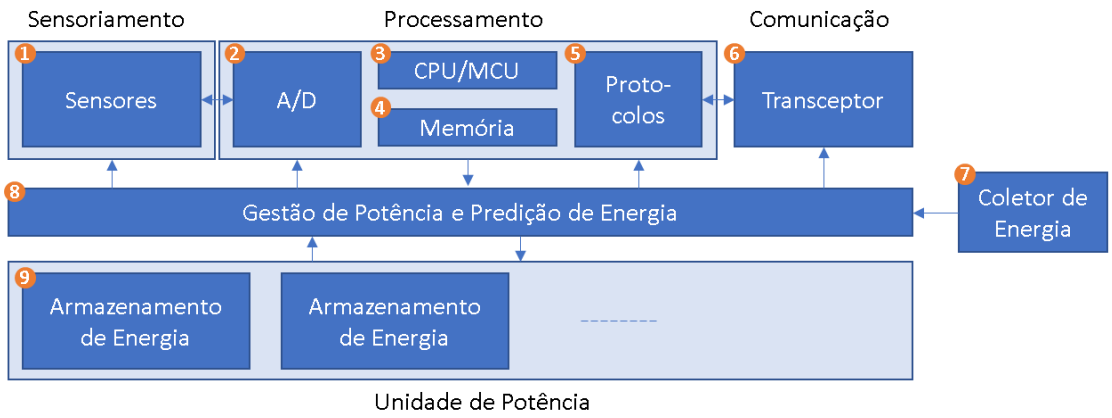
Neste Capítulo serão discutidos os elementos com potencial de endereçar o uso eficiente de energia no dispositivo IoT usado para aplicações externas. O perfil de consumo típico será avaliado para determinar o principal elemento consumidor de energia. A seguir serão avaliadas duas linhas de ação:

- alternativas de comunicação e otimização de consumo de energia;
- fonte de energia alternativa adicional e durável.

3.1 Perfil de Consumo de um Dispositivo IoT

Observa-se, na Figura 6, a arquitetura de um dispositivo IoT, genérico, adaptado para operar com o conceito de coleta de energia do ambiente (*energy harvesting*).

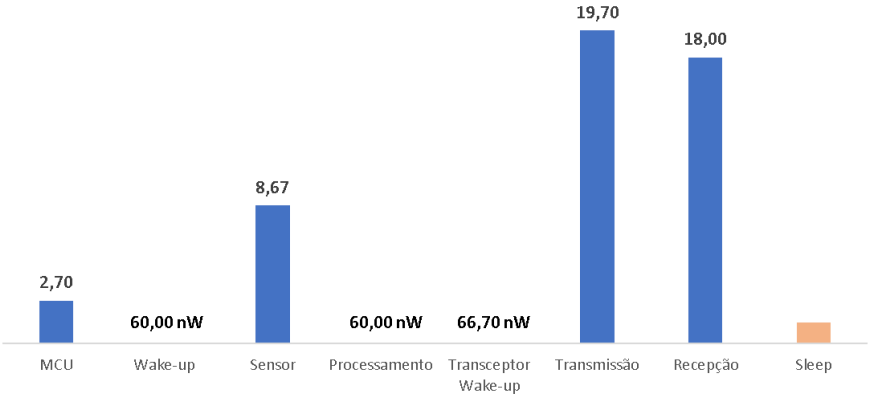
Figura 6 – Arquitetura de um dispositivo IoT



Fonte: adaptado de Shirvanimoghaddam et al. (2019).

Todos os elementos apresentados na arquitetura genérica da Figura 6 se envolvem na equação de energia do dispositivo e, portanto, são de interesse para esse trabalho. No experimento de Bouguera *et al.* (2018), foram testados os consumos dos Blocos funcionais de 1 a 6 da arquitetura apresentada. Já os Blocos de 7 a 9, não foram testados, uma vez que o experimento não incluía o coletor de energia. A Figura 7 apresenta os dados obtidos para o Cenário 3, que é o mais demandante do experimento em termos de energia, para uma configuração de dispositivo operando com rede LoRa®/LoRaWAN™.

Figura 7 – Dados de consumo de energia de dispositivo IoT
Dados em microwatt a menos que especificado diferentemente



Fonte: adaptado de Bouguera *et al.* (2018)[5].

Nota-se que transmissão e recepção, os principais consumidores de energia nesse experimento, correspondem a funções do Bloco 6, Transceptor, da Figura 6.

Em destaque na Figura 7, tem-se uma porção de energia dispendida durante o período de total inatividade do dispositivo, em que opera em baixíssima energia. Este estado, chamado de *sleep*, não está incluído no estudo citado, mas é mencionado em Srbinovska; Dimcev; Gavrovski (2017) e Valente *et al.* (2020).

3.2 A Questão da Comunicação

A categoria LPWAN vem de encontro à necessidade de dispositivos equipados com capacidade de comunicação com elevado alcance associado ao baixo consumo de energia, conforme exposto pelo Quadro 2, que apresenta uma comparação entre várias tecnologias, destacando os diferentes desempenhos. Para este trabalho, o foco está nos atributos de alcance, taxa de dados e consumo de energia.

Sob a ótica da aplicação, é importante considerar também a necessidade eventual da geolocalização, por se tratar de ambientes externos, embora com mobilidade limitada.

[5] Os dados do gráfico da Figura 7 estão originalmente em mJ (milijoule) e foram convertidos para W (watt) através do site: http://chuck-wright.com/calculators/watts.html.

Todas as tecnologias mencionadas estão disponíveis no Brasil, sendo LoRa®/LoRaWAN™, Sigfox, NB-IoT e LTE-M as mais populares. As operadoras de telecomunicações celulares oferecem NB-IoT e *Long Term Evolution for Machines* (LTE-M) e operadoras de valor adicionado ou integradores oferecem Sigfox e LoRa®/LoRaWAN™, sendo que esta última pode ser implementada em redes privativas.

Quadro 2 - Comparação dos padrões para comunicação IoT

Tecnologia	LoRa®/LoRaWAN™	Sigfox	RPMA	NB-IoT	EC-GSM	LTE-M
Òrgão Regulador	LoRa Alliance	Sigfox	Ingenico	3GPP	3GPP	3GPP
Espectro	<1 GHz Não licenciado	<1 GHz Não licenciado	2,4 GHz Não licenciado	Licenciado 1 – SA na banda GSM 2 – Banda de Guarda LTE 3 – Banda LTE	Licenciado Banda GSM	Licenciado Banda LTE
Taxa de dados – Pico UL/DL	50 Kbps/290 bps	100 bps/600 bps	624 Kbps/156 Kbps	204,8 Kbps Multitom 20 Kbps tom simples /234,7 Kbps	240 Kbps/240 Kbps	<1 Mbps/<1 Mbps
Corrente de Pico	32mA	11mA	30mA	120mA – 320mA	120mA – 320mA	320mA
Corrent modo sleep	1µA	1µA	1µA	5µA	4µA	4µA
Potência de Transmissão	2 dBm-20 dBm	14 dBm (compatível com restrições locais)	22 dBm	23 dBm	23 dbm – 22 dBm	23 dBm – Classe 3 UE 20 dBm – Classe 5 UE
Economia de Energia	LoRaWAN	Mecaninsmo de sleep profundo	Mecaninsmo de sleep profundo	PSM + eDRx	PSM + eDRx	PSM + eDRx +C-DRx
Eficiência de Potência	Alta	Muito Alta	Alta	Moderada	Moderada	Moderada
Protocolos camada MAC	Un-slotted Aloha	Un-slotted Aloha	CDMA-like	SC-FDMA CDMA	TDMA FDMA	SC-FDMA TDMA, FSA
Alcance (Km)	Rural: 15 Urbano: 2-5	Rural: 20-50 Urbano: 3-10	Rural: 30-50 Urbano: 1-5	Rural: 10-15 Urbano: 1-2	<25	7-10
Estágio de Implantação	Comercialmente Implantado	Comercialmente Implantado	Comercialmente Implantado	Comercialmente Implantado	Comercialmente Implantado	Comercialmente Implantado
Latência	Insensível a latência	Até 6s	2s – 4s	1,6s – 10s	700ms – 2s	10ms – 15ms
Tempo de Vida da Bateria	10 anos	20 anos (2,5Ah) 3 mensagens/dia	21,8 anos (2,5Ah) 200KB de dados/dia	19 anos (2,5Ah) 1 mensagem/dia	10 anos (5Ah)	19 anos (2,5Ah) 1 mensagem/dia
Link Budget/Cobertura	157 dB	149 dB	177 dB	164 dB	164 dB	155 dB

Fonte: adaptado de Shah *et al.* (2021).

As tecnologias *Long Range* (LoRa®) e *Long Range Wide Area Network* (LoRaWAN™) reúnem um conjunto de características que a habilita a ser uma solução de baixo custo, elevado desempenho, segura e escalável, o que a posiciona favoravelmente para aplicações urbanas e rurais Augustin *et al.* (2016).

De acordo com o trabalho de Del Campo *et al.* (2020), diferentes fatores podem ser levados em consideração na escolha da tecnologia de comunicação. No Quadro 3, é apresentada a estrutura de seleção empregada pelos autores.

Quadro 3 – Mapa de Calor para Seleção de Tecnologias LPWAN

Categoria	Fatores Analisados	LoRa®/LoRaWAN™	SigFox	RPMA	NB-IoT	EC-GSM	LTE-M
Tecnológico	Máxima taxa de dados	2	1	3	4	4	5
	Alcance	4	5	3	3	2	3
	Tamanho do Pacote	2	1	2	3	2	4
	Latência	2	1	1	5	3	5
	Ciclo de Trabalho	5	3	3	2	1	1
	Escalabilidade	3	3	4	5	4	5
Pontuação - Tecnológico		3	2,33	2,67	3,67	2,67	3,83
Implementação	Custo médio	5	5	3	3	1	2
	Kits de Ferramentas	5	5	3	4	3	4
	Documentação	5	5	4	3	2	3
	Comunidades	5	5	4	3	2	3
	Dispositivos Comerciais	5	5	1	4	2	4
Pontuação - Implementação		5	5	3	3,4	2	3,2
Funcional	Atualização de Firmware Remotamente	2	3	4	3	1	5
	Serviços de Localização	3	5	2	3	3	3
	Suporte a Protocolo IP	3	2	5	3	1	4
	Roaming	3	5	1	4	4	4
Pontuação - Funcional		2,75	3,75	3	3,25	2,25	4
Pontuação Geral		3,58	3,69	2,89	3,44	2,31	3,68

Fonte: Adaptado de Del Campo *et al.* (2020).

LoRa®/LoRaWAN™ apresenta uma pontuação geral de 3,58 o que a coloca atras das tecnologias LTE-M e Sigfox.

Neste estudo, será utilizada a tecnologia LoRa®/LoRaWAN™ pelos seguintes motivos:

- não existe limite de transmissão de mensagens, como é o caso de Sigfox;
- existe ao menos um operador atuando no Brasil – American Tower;
- abundante oferta de componentes para implementações;
- o LoRaWAN™ é governado por uma aliança de empresas e é um protocolo aberto;
- a tecnologia opera em espectro de frequências não licenciado, o que o torna acessível a um grande número de entidades.

Ainda em relação ao Quadro 3, cabe relacionar os seguintes fatores analisados com o consumo de energia:

- taxa máxima de dados;
- alcance;
- tamanho do pacote;
- ciclo de trabalho;
- atualização de *firmware* remotamente;
- serviços de localização.

A Atualização de *firmware*, conhecido como processo *Firmware Update Over The Air* (FUOTA) (apresentado no Apêndice A), embora seja um fator Funcional, é extremamente importante e desejável para aplicações em ambiente externo, pois viabiliza manutenções remotas de código.
O serviço de localização, também um fator funcional, se faz relevante para a gestão dos dispositivos e como parte integrante da própria aplicação do usuário. O Apêndice A apresenta uma relação de algumas tecnologias e seus respectivos consumos de energia. Nesse caso, avaliar a lógica incorporada na aplicação para assegurar que o acesso a esse serviço seja bem controlado é uma prática desejável, uma vez que são tipicamente grandes consumidores de energia.

Os quatro primeiros estão ligados entre si e influenciarão a parametrização da rede, do dispositivo e do código da aplicação para que o consumo de energia seja minimizado. A máxima taxa de dados é influenciada pelo alcance, ou distância entre o dispositivo e o concentrador de rede com quem ele trocará mensagens. Quanto maior a distância entre eles, existe um compromisso entre a qualidade do sinal recebido, a taxa de dados utilizada e por consequência o tempo que o dispositivo leva para transmitir a mensagem. Quanto mais tempo o transceptor ficar ativo maior será o consumo de energia.

O Apêndice A, apresenta um resumo das tecnologias LoRa® e LoRaWAN™, no qual explora os detalhes relevantes, tanto da camada física, como da camada de enlace que, devidamente parametrizados, propiciam uma operação eficiente e com alto desempenho.

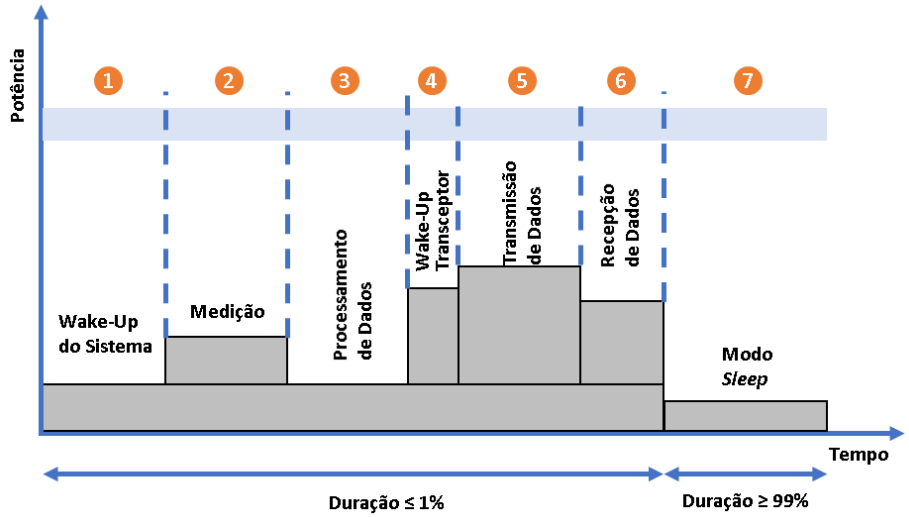
3.3 O Consumo de Energia

No início deste capítulo, foi apresentado o diagrama em blocos genérico de um dispositivo IoT, equipado com coletor de energia do ambiente. Nesta Seção, será explorado o perfil de consumo de energia típico de um dispositivo IoT em condições operacionais normais, e para uma aplicação em ambiente externo. Para efeito de materializar um exemplo, será considerada uma aplicação em pecuária. Considera-se

que o dispositivo IoT estará embarcado no animal, bovino, que estará solto no pasto da propriedade do pecuarista.

A Figura 8 apresenta o perfil de consumo em que se baseou o estudo de Bouguera *et al.* (2018). São apresentadas as tarefas desempenhadas pelo dispositivo, a relação de potência entre elas, bem como a relação dos tempos de duração entre essas atividades.

Figura 8 – Perfil de Consumo de Energia Elétrica de Dispositivo IoT

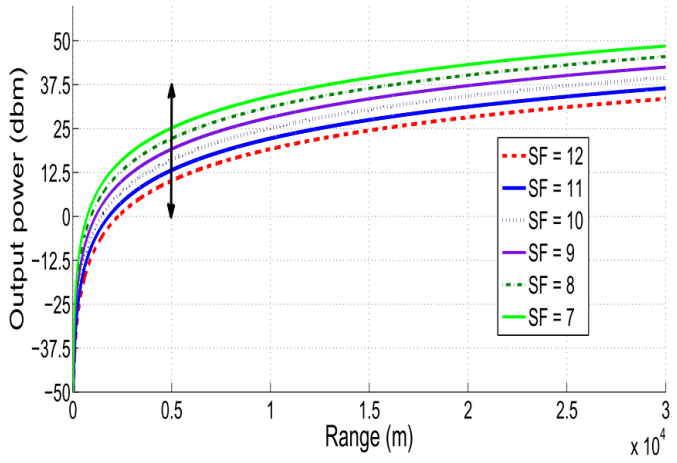


Fonte: adaptado de Bouguera *et al.* (2018).

Pela análise da Figura 8, as tarefas de 4 a 6 representam o consumo com o uso de transceptor. Os Apêndices A e B apresentam, de forma mais detalhada, as formulações matemáticas que manipulam os parâmetros de configuração que foram realizados para estimar consumo em diferentes cenários, em que se variaram o fator de espalhamento, distância da comunicação, tamanho da carga útil, entre os demais parâmetros relevantes que afetam a vida útil da bateria que alimenta o dispositivo.

A Figura 9 apresenta as curvas de potência de transmissão em função dos parâmetros de distância e fator de espalhamento. O consumo mais elevado se dá na condição de fator de espalhamento igual a sete, que representa a mais alta taxa de transmissão de dados. Para uma distância média de 1 km, gira em torno de 35 dBm ou uma potência de aproximadamente 3,16 W.

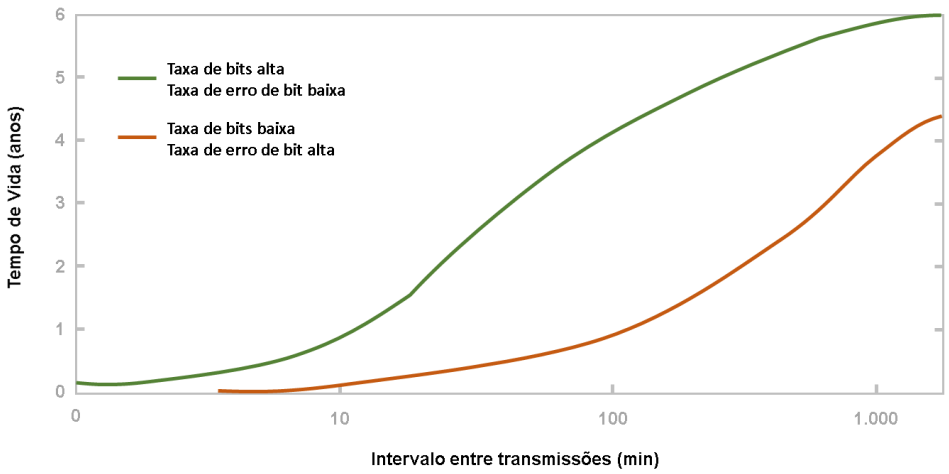
Figura 9 - Potência de transmissão em função da distância



Fonte: Extraído de Bouguera *et al.* (2018).

De forma complementar, o estudo de Casals *et al.* (2017) cria um modelo analítico e experimental do consumo de energia de um dispositivo IoT, porém focado nos elementos 4 a 6 da Figura 8, ou seja, constroi um modelo bem detalhado especificamente da etapa de transmissão e recepção de mensagens, explorando a influência das configurações do transceptor LoRa e do protocolo LoRaWAN™, no tempo de vida útil da bateria. O objetivo não é comparar os modelos de ambos os artigos, mas tão somente validar que ambos covergem na aborgadem de como obter os valores de consumo de energia e na identificação dos parâmetros de configuração do transceptor para obter a operação ótima sob a ótica energética. Assim, a Figura 10, apresenta o resultado do tempo de vida útil do dispositivo IoT, entenda-se aqui que o limitante é a capacidade de fornecimento de energia para manter o dispositivo operacional, dentro do planejado para suas funcionalidades.

Figura 10 – Tempo de vida de dispositivo IoT



Fonte: adaptado de Casals *et al.* (2017).

Interprentando o gráfico da Figura 10, as curvas representam os extremos de possíveis confgurações do transceptor do dispositivo IoT usado no teste. Os parâmetros testados configurados foram:

- carga útil máxima;
- transmissão com confirmação de chegada;
- sem colisão de pacotes;
- taxa de erros variável;
- taxa de bit variável;
- intervalo entre transmissão variável.

A curva verde, representa a mais alta taxa de bits e a menor taxa de erro de transmissão, ao passo que a curva laranja representa a mais baixa taxa de bits e a mais alta taxa de erros. Fica evidenciado que quando menor a velocidade de transmissão (taxa de bits), mais tempo o dispositivo levará para transmitir a mensagem o que leva a maior consumo de energia e diminuição da vida útil do dispositivo. O mesmo raciocínio se aplica para a taxa de erros. Quanto mais erros, maior a quantidade de retransmissões e maior o consumo.

Considerando a reflexão de ampliação do tempo de vida útil de um dispositivo IoT usado em aplicação remota, fica evidenciada a necessidade de um processo de

projeto que leve em cosideração as características da aplicação, que se refletem na operação do dispositivo IoT e como consequência o perfil de demanda de energia. Adicionalmente, ao se avaliar o ambiente em que o dispositivo interage e a que grandezas físicas está submetido, possibilita avaliar fontes alternativas de energia, que serão abordadas na sessão a seguir.

3.4 Fontes alternativas de energia

Nessa Seção, será apresentado o conceito de Coleta de Energia (*Energy Harvesting*), as possíveis fontes para a obtenção de energia e como aplicá-la a um dispositivo IoT. A arquitetura apresentada na Figura 5 ilustra, através de seus elementos 7 a 9, a estrutura de alimentação do dispositivo. Esse conjunto é responsável pela fontes de energia Shirvanimoghaddam *et al.* (2019) e sua operação integrada:

- Elemento 7 – Coletor de Energia;
- Elemento 8 – Gestão de potência e Predição de Energia;
- Elemento 9 – Armazenamento de Energia.

A seguir, será feito um detalhamento desses elementos.

Coletor de energia

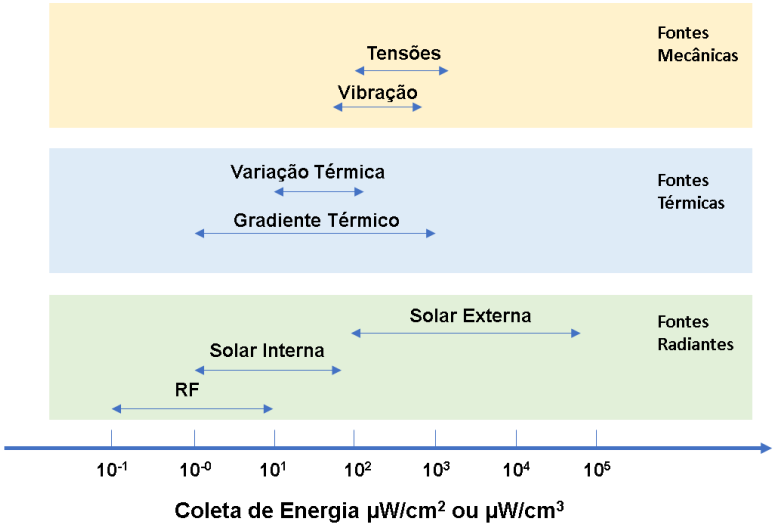
De acordo com Dhadwal; Rastegar (2017), a geração de energia elétrica pode ser realizada empregando-se alguma das seguintes formas de conversão de energia de diversos fenômenos físicos para energia elétrica:

- Solar;
- Térmica;
- Mecânica.

Segundo os autores, uma definição atual de coleta de energia, é a geração, não química, de pequenas quantidades de energia em escala local, empregrando-se alguma das formas de conversão citadas.
No trabalho de Shirvanimoghaddam *et al.* (2019), o desempenho de conversão para algumas formas são estudadas para avaliar a sua capacidade de geração de energia

elétrica. A Figura 11 apresenta essas categorias e suas respectivas faixas de geração de energia elétrica.

Figura 11 - Potencial de geração de energia elétrica



Fonte: adaptado de Shirvanimoghaddam *et al.* (2019).

Nota-se que a conversão de energia solar é a que possibilita a melhor taxa de conversão. A cada aplicação deve-se avaliar qual a melhor alternativa para ser empregada, uma vez que o dispositivo deverá atender aos requisitos específicos. Tipicamente são:

- ciclo de serviço (*duty cicle*): pequeno;
- demanda de energia da aplicação: otimizado pelo software que a controla;
- consumo em estado de hibernação (*sleep*): baixo;
- fator de forma do dispositivo: pequeno.

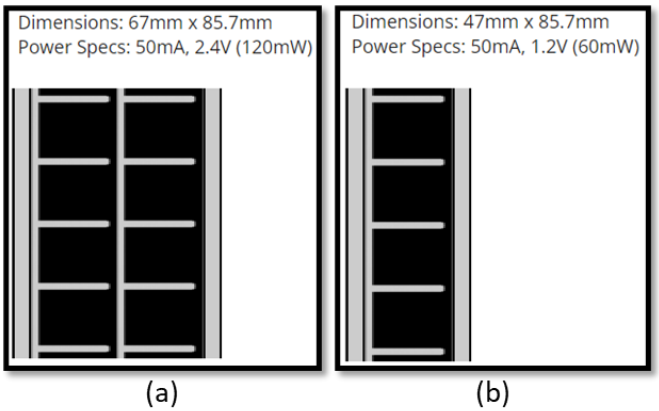
A seguir são apresentadas as característivas de três grandezas das quais se pode obter energia.

3.4.1 Energia Solar

De acordo com a Figura 11, essa é a modalidade que tem melhor desempenho. O uso de painéis fotovoltáicos é bastante comum em aplicações de grande porte e também quando aplicados em dispositivos eletrônicos, tais como relógios.

A Figura 12 apresenta duas configurações de painéis solares da empresa PowerFilm Solar. Elas foram criadas diretamente na ferramenta de projeto da empresa com a itrodução de parâmetros simples, em que se buscou um equilíbrio entra dimensões e potência fornecida. Nesse caso, foi usada como referência a aplicação de monitoramento de gado em pasto aberto, sendo que o painel obtido pode ser ajustado ao encapsulamento do dispositivo IoT embarcado no bovino.

Figura 12 - Configuração de células fotovoltaicas.



Painéis solares com características personalizadas, ligação tanden:
(a) 2 células
(b) 1 célula
As dimensões incluem proteção para exposição ao tempo.

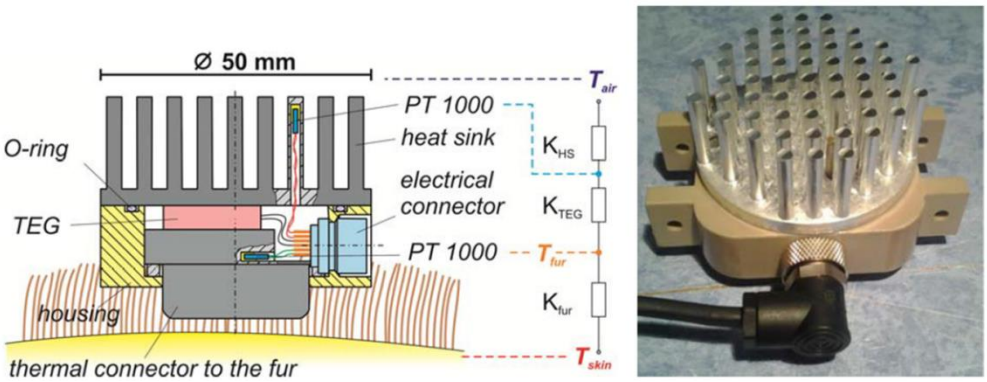
Fonte: Extraído do *website* do fabricante (POWERFILM SOLAR, 2022).

No exemplo, os painéis obtidos podem oferecer 120mW (a) e 60mW (b), essa capacidades podem ser ajustadas em função da estratégia de utilização da energia coletada, seja para alimentar diretamente o dispositivo IoT ou para fazer a recarga da bateria.

3.4.2 Energia Térmica

Em aplicações de ambiente aberto, a coleta de energia térmica se dá pela variação de temperatura entre o objeto monitorado e o ambiente. O gradiente de temperatura é capturado por um Gerador Termoelétrico (*thermoelectric generator*) – TEG. A Figura 13 apresenta um TEG empregado no experimento de Woias *et al.* (2014), que foi conduzido junto a cabras.

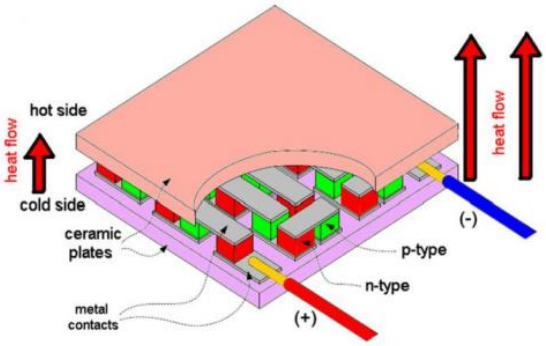
Figura 13 - Gerador Termoelétrico



Fonte: Extraído de Woias *et al.* (2014)

O dispositivo consiste em um TEG acoplado a duas interfaces térmicas, sendo um trocador de calor com o ambiente e um conector térmico em contato com a superfície do objeto monitorado. A diferença de temperatura a que o TEG é submetido irá gerar energia elétrica. A Figura 14 ilustra a estrutura de um TEG.

Figura 14 - Estrutura de um TEG



Fonte: Extraído de Md Yusop; Mohamed; Ayob (2013)

O desempenho de um TEG dependerá de alguns fatores:

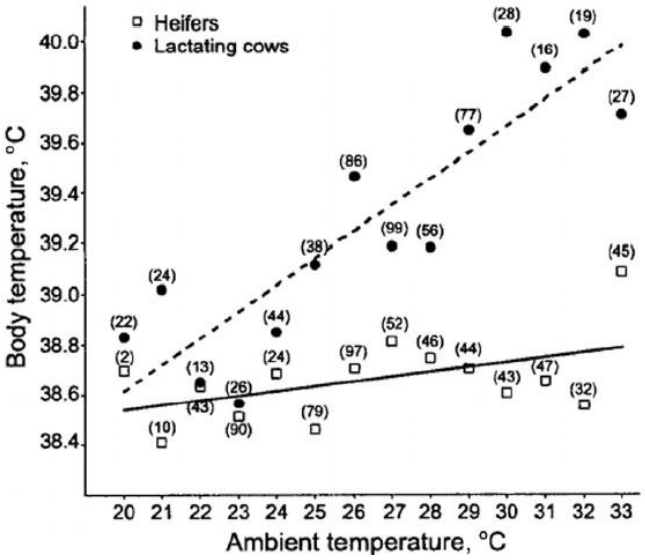
- amplitude do gradiente de temperatura do contexto de medição;
- contato com a superfície do objeto monitorado;
- posição do trocador de calor em relação ao ambiente.

A Figura 15 apresenta a curva de gradiente térmico entre temperatura ambiente e temperatura corporal de um bovino. Usando como referência a aplicação de

monitoramento de gado em pasto aberto, as interfaces térmicas seriam de um lado a pelo do animal e de outro o ar ambiente.

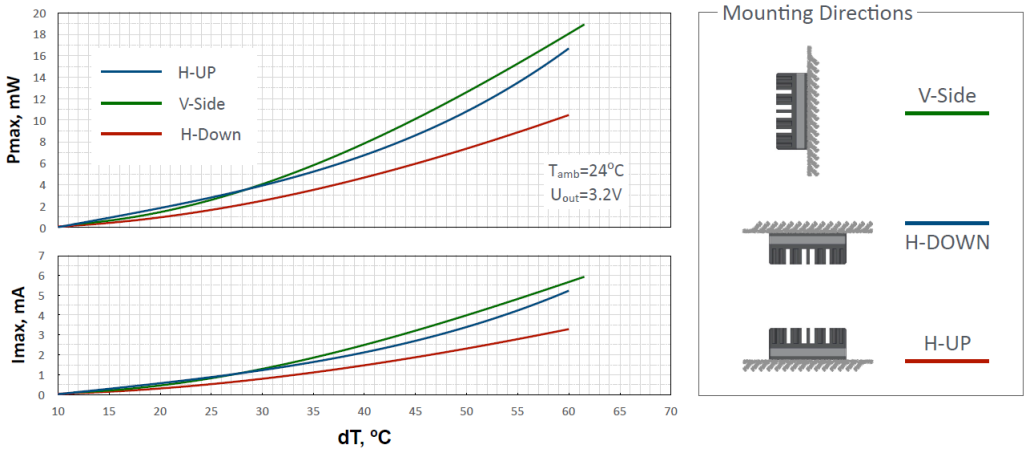
Para uma avaliação de sensibilidade, o trabalho de Wang *et al.* (2020) faz um levantamento da temperatura corporal do animal e a compara com a temperatura ambiente para avaliar o seu potencial estresse térmico. Na Figura 16 é possivel avaliar, por exemplo, que a uma temperatura ambiente de 25 ºC, o gradiente térmico fica em torno de 13 ºC a 14 ºC e o TEG pode fornecer uma corrente elétrica de saída de aproximadamente 0,5 mA e uma potência de aproximadamente 1mW.

Figura 15 - Gradiente de temperatura em bovinos



Fonte: Extraído de Wang *et al.* (2020)

Figura 16 - TEG DX2625 saída de potência



Fonte: Extraído do fabricante TEC Microsystems GmbH (TE GENERATOR DX2625, 2021)

3.4.3 Energia Mecânica

A Energia Mecânica disponível para captura está disponível através das interações mecânicas do objeto a ser monitorado, sejam elas próprias ou com o ambiente. Neste trabalho, o enfoque será dado a movimentos que possam estimular um dispositivo piezoelétrico, para que este gere energia para o sistema.

Neste trabalho, dentre as diversas tecnologias disponíveis, algumas foram selecionadas e são apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 - Tecnologias de coleta pelo efeito piezoelétrico

Tecnologia	Faixa de potência fornecida
Vestível	De 7 µW a 45 mW
Vibração do ambiente	De 3 µW a 27 mW
Moinho de vento	De 363 µW a 8,5 mW
Implantável (corpo)	De 30 nW a 114 mW
Múltiplas fontes	Combinação de um dos acima e outra fonte como solar ou térmica

Fonte: adaptado de Safaei; Sodano; Anton (2019)

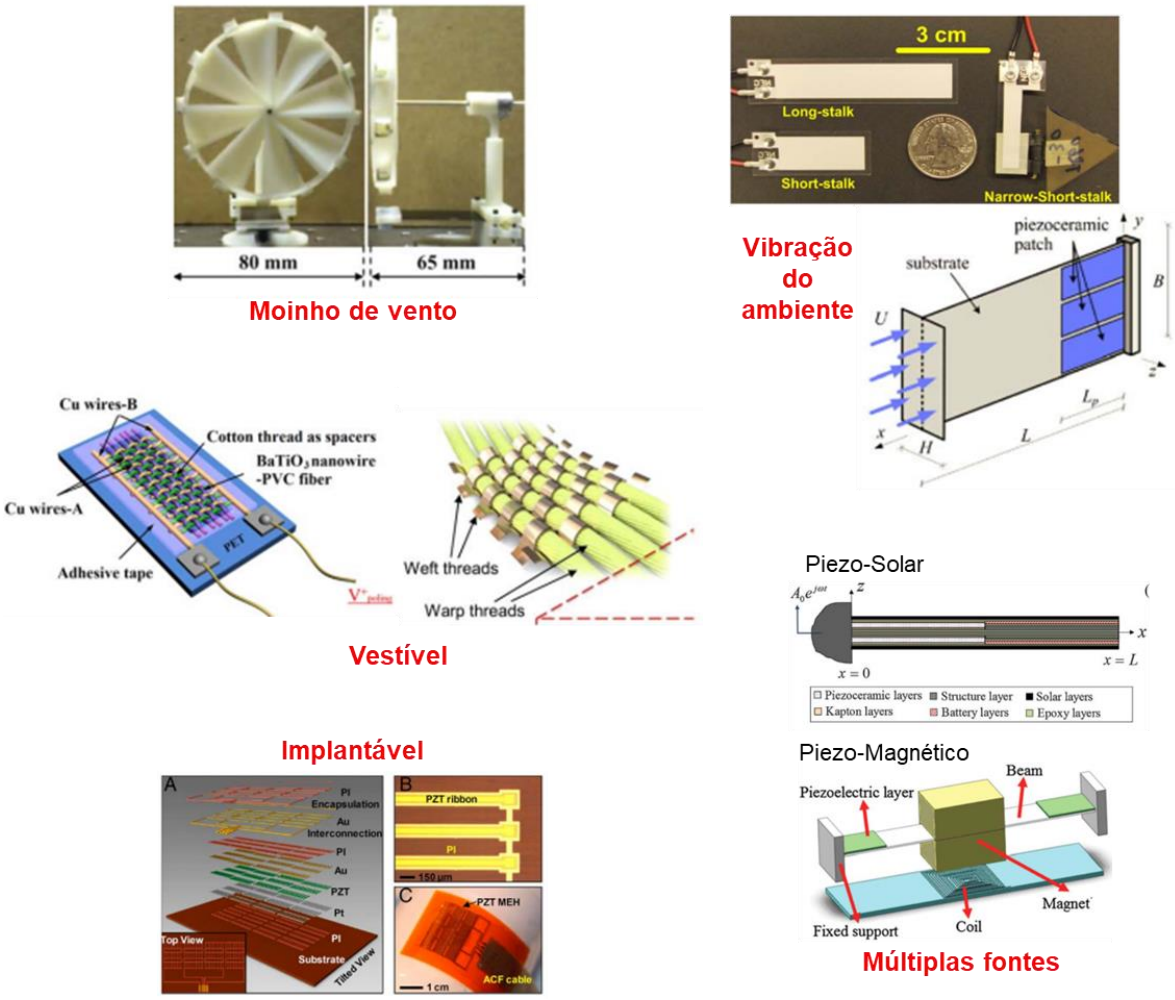
Uma breve explanação sobre as tecnologias é apresentada a seguir:

- **Vestível**: refere-se à categoria de dispositivos que atuam interagindo com o objeto monitorado. Por exemplo o corpo humano, obtendo energia de batidas do coração e movimentação de membros;
- **Vibração do ambiente**: nesse caso, o dispositivo é instalado no objeto monitorado e obtem energia das interações deste com o ambiente;
- **Moinho de vento**: são dispositivos projetados para assumir uma forma que propicia o aproveitamento de deslocamento de ar ao redor do objeto monitorado;
- **Implantável**: esses dispositivos são prejetados para serem implantados dentro do organismo do objeto monitorado, como humanos e animais;

- **Múltiplas fontes**: nessa categoria estão os dispositivos que coletam energia de mais de uma fonte. Por exemplo, energia mecânica e solar.

A Figura 17 apresenta uma coletânea de exemplos de cada tipo.

Figura 17 - Exemplo de Coletores



Fonte: Extraído e adaptado de Safaei; Sodano; Anton (2019)

O desempenho do gerador piezoelétrico dependerá de alguns fatores:

- material empregado no transdutor;
- geometria do transdutor;
- ponto de implantação do transdutor no objeto monitorado;
- frequência e variabilidade do movimento gerador de energia mecânica;

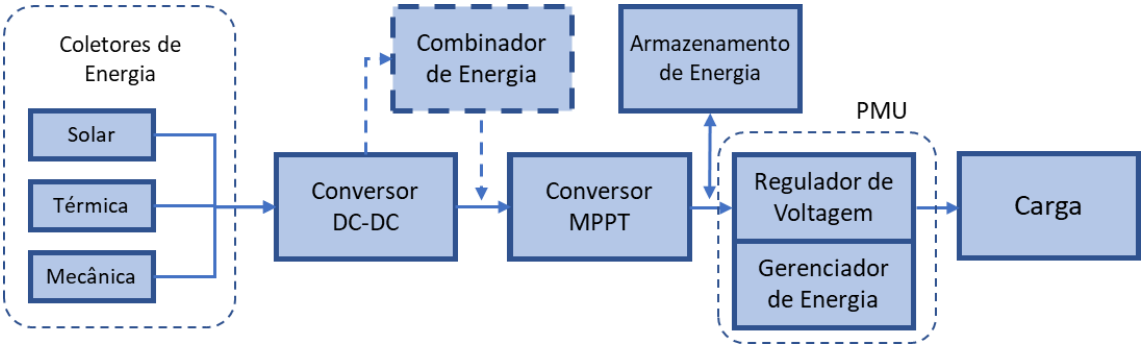
A coleta de energia mecânica apresenta uma ampla gama de alternativas para se ajustar às caracteristicas da aplicação a que se destinam.

3.4.4 Gestão de Potência

A coleta de energia do ambiente está sujeita às características da fonte utilizada. Periodicidade e regularidade dos eventos para coleta, tais como vibração, iluminação e variações de temperatura são importantes fatores que determinam o pefil da energia elétrica gerada. Essa energia pode servir a dois propósitos, o de carregar uma bateria ou alimentar diretamente a eletrônica do dispositivo IoT.

O uso de diferentes técnicas de Unidade de Gerenciamento de Potência (Power Management Unit – PMU), possibilitam que o dispositivo IoT seja capaz de fornecer energia estabilizada e dentro do limites da eletrônica alimentada. A Figura 18 apresenta uma arquitetura genérica em diagrama de blocos de uma PMU, baseada nos trabalhos de Alhawari *et al.*, 2016; Shao; Tsui; Ki (2010). O diagrama apresentado é uma combinação de blocos funcionais identificados para diferentes aplicações.

Figura 18 - Arquitetura genérica de uma PMU



Fonte: Adaptado de Alhawari et al., 2016; Shao; Tsui; Ki (2010)

Da Figura 18, são destacados os principais blocos funcionais de acordo com os trabalhos de Alhawari *et al.*, 2016; Shao; Tsui; Ki (2010).

Conversor DC-DC: considerando um cenário no qual o dispositivo IoT esteja equipado com um coletor de energia, o primeiro passo é adaptar essa energia em

termos de tensão característiva da energia gerada pelo coletor e casamento de impedâncias para obter o máximo desempenho na energia gerada.

Conversor Rastreador de Máximo Ponto de Potência – *Maximum Power Point Tracker-* (MPPT): esse dispositivo tem por objetivo obter o máximo desempenho da energia gerada, rastreando o ponto de máxima transferência de potência, ajustando tensão e corrente, para a carga da bateria.

PMU: é a combinação do Regulador de Voltagem e o Gerenciador de Energia. O Gerenciador de Energia controla o fluxo de energia desde a coleta de energia e a carga. Esse módulo funciona na modalidade “sempre ativo” uma vez pode gerar sinais de controle ao processador para desligar blocos funcionais ou controlar o funcionamento deses blocos em uma modalidade processa quando necessário. O módulo Regulador de Energia supervisiona o fluxo de energia e assegura que todos os níveis de voltagem sejam entregues de acordo com as suas especificações.

Combinador de Energia: caso seja utilizada mais de uma fonte de energia do ambiente, por exemplo vibração e solar, esse módulo deve ser incorporado no projeto para adaptar as energias de cada coletor e oferecer uma energia padronizada que mais a frente será maximizada e carregará a bateria.

A arquitetura genérica apresentada na Figura 18 é sempre adaptada para o tipo de coleta de energia e as características da aplicação para a qual fornecerá energia.

Fatores que impactam a Gestão de Potência, segundo Prasad; Chawda (2018):

- Precisão da Tensão – capacidade de fornecimento de energia tento a tensão ajustada dentro dos limites toleráveis pela eletrônica;
- Eficiência – controlar a temperatura e a otimização da conversão da fonte de energia coletada do ambiente e a efetivamente entregue à carga;
- Envelhecimento – o ciclo de trabalho do dispositivo, afeta a temperatura ambiente o que pode leva ao envelhecimento precoce do dispositivo. Deve-se também atentar ao invólucro que contém o dispositivo para protegê-lo das condições agressivas do ambiente e popiciar uma boa troca de calor;

- Modos de baixa potência e alta eficiência alimentando carga leve integrados – a gestão de energia deve ser capaz de ajustar os parâmetros energéticos levando em consideração os ciclos dos modos de operação ativo e em hibernação;
- Temporização e sequenciamento de inicialização – a resposta a mudanças de estado requer avaliar e ajustar o tempo de inicialização e controle da variação da tensão de alimentação da eletrônica. O sequenciamento é dependente da aplicação e se refere a sequência de energização em mudanças e estado operacional ou flutuações bruscas do fornecimento de energia dos coletores;

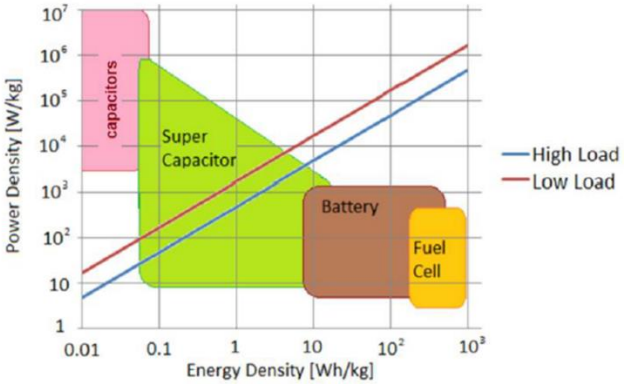
3.4.5 Armazenamento e Predição de Energia

Os dispositivos IoT aplicados em ambiente aberto contam com duas alternativas de armazenamento de energia.

- Baterias;
- Supercapacitores.

A Figura 19 apresenta o Gráfico de Ragone para diferentes tecnologias de armazenamento de energia. Nota-se que a bateria pode alcançar densidades de energia mais elevadas, o que as faz adequadas para descargas longas. Já o supercapacitor apresenta uma desidade de potência mais elevada do as baterias, o que lhes confere a habilidade de fornecer correntes elevadas por um curto espaço de tempo. Embora haja uma pequena sobreposição, ambas tecnologias podem ser usadas de forma complementar, como discutido no trabalho de Jalal; Ibrahim; Oudah (2021).

Figura 19 - Comparação entre diferentes tecnologias de armazenamento de energia



Fonte: extraído de Jalal; Ibrahim; Oudah (2021)

Esses componentes possuem características específicas. A Tabela 2 apresenta uma comparação entre os tipos mais comuns de baterias recarregáveis.

Tabela 1 - Comparação de tipos de baterias

Características	Chumbo-ácida	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion
Densidade de energia gravimétrica (Wh kg−1)	30-50	40-60	60-120	170-250
Densidade de energia volumétrica (Wh L−1)	60-110	150-190	140-300	350-700
Tensão Nominal (V)	2.0	1.2	1.2	3.7
Ciclo de vida (até 80% da capacidade inicial)	300	1500	1000	500-2000
Autodescarga por mês (%)	5	20	30	<10
Tempo de carregamento rápido (h)	8 a 16	1	1 a 4	= < 1
Em uso desde	Final 1800s	1950	1990	1991
Toxicidade	Alto	Alto	Baixo	Baixo
Tolerância de sobrecarga	Alto	Moderado	Baixo	Baixo
Faixa de temperatura operacional (ºC)	−20 a 60	−40 a 60	−20 a 60	−20 a 60

Fonte: Adaptado de Liang *et al.* (2019)

A Tabela 2 apresenta as características de alguns supercapacitores da fabricante Maxwell. De imediato pode-se perceber o quão distintas são as densidades de energia gravimétrica entre as duas tecnologias, corroborando com a Figura 19.

Tabela 2 - Características de Supercapacitores

Modelo		**BCAP 0001**	**BCAP 0003**	**BCAP 0005**	**BCAP 0010**	**BCAP 0022**	**BCAP 0025**
Tensão Nominal	(V)	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
Capacitância Nominal	(F)	1	3	5	10	22	25
Corrente de Fuga (µA)	72h, 25°C	6	5	8	23	55	49
Corrente Contínua Máxima (A_{RMS})	ΔT=15°C	0.4	1.8	2.3	3.4	2.6	3.7
	ΔT=40°C	0.7	2.9	3.8	5.6	4.2	6.1
Energia Armazenada (Wh)	para V_R	0.001	0.003	0.005	0.01	0.022	0.025
Densidade de energia (Wh/kg)	Gravimétrico	0.91	2.1	2.4	3.2	3.38	3.7
Dimensões (mm)	Diâmetro	8.0	8.0	10.0	10.0	12.5	16.0
	Comprimento	12.0	19.5	20.5	30.5	35.5	25.5
Massa	(g)	1.1	1.4	2.1	3.1	6.5	6.7

Fonte: Adaptado do Fabricante Maxwell (MAXWELL TECHNOLOGIES, 2018)

A coleta de energia do ambiente é considerada para recarga e manutenção de carga desses componentes, além de eventualmente complementar a demanda instantânea de energia do dispositivo IoT.

Desta forma, é relevante que seja possível predizer com algum grau de confiança a disponibilidade de energia a ser coletada. Dada a natureza dessas fontes de energia, temperatura, incidência de luz solar e eventos mecânicos, elas são dinâmicas e inconstantes. A energia é possível de ser prevista combinando diferentes variáveis climáticas, da característica do objeto monitorado e da análise dos eventos geradores da energia disponível no ambiente, como por exemplo a vibração. Adicionalmente, é possivel estimar o consumo de energia, dos diferentes blocos funcionais do dispositivo IoT e comparar com a previsão de geração, pode ainda ser aplicado um critério de seletividade para mudar seu estado operacional.

3.5 Considerações sobre o Capítulo

Este Capítulo 3 contribuiu para a caracterização dos diferentes blocos funcionais de um dispositivo IoT. Essa coleção de características irá permitir uma avaliação sobre a viabilidade da incorporação de coletores de energia e seu efeito na vida útil do dispositivo, o que será desenvolvido no Capítulo 4.

4. AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE

No capítulo 3 foram avaliados os potenciais de geração de energia elétrica através de coletores para diferentes tipos de energia do ambiente. Também foi apresentado o perfil de consumo dos principais blocos funcionais de um dispositivo IoT.
Ao longo deste Capítulo 4, será avaliada a viabilidade de estender a vida útil de um dispositivo IoT, através da incorporação da coleta de energia do ambiente como forma de recarregar a bateria.

Este Capítulo está organizado da seguinte forma:

- comparação dos perfis consumidores e fornecedores de energia;
- técnicas de otimização do consumo de energia;

4.1 Perfis de consumo e fornecimento de energia

Com base nas Figuras 6 e 7 foi elaborada a Tabela 3, na qual são apresentados os consumos medidos no experimento de Bouguera *et al.* (2018). Para efeito dessa análise não estão consideradas as alternativas de projeto, como escolha de componentes do Dispositivo IoT. Também será feita a análise tendo como referência a aplicação de monitoramento de gado.

Tabela 3 - Perfil de blocos consumidores

Blocos Consumidores	Perfil de Consumo
Sensores	8,67 µW
CPU/MCU	2,70 µW
Transceptor - TX	19,70 µW
Transceptor - RX	18,00 µW

Fonte: Adaptado de Bouguera et al. (2018).

O bloco que mais consome energia é o Transceptor operando em modo transmissão e dados.

A Tabela 4 apresenta um sumário da análise realizada na Sessão 3.3 à exceção das informações da bateria, que forma obtidas do fabricante Panasonic (PANASONIC, 2018).

Tabela 4 - Perfis de fornecedores de energia

Blocos Fornecedores	Perfil de Fornecimento
Coleta Solar	60 mW a 120 mW
Coleta Térmica	1 mW a dT de 25 ºC
Coleta Mecânica	30 nW a 114 mW
Bateria Li-ion Panasonic NCR18650BF	3,2 mW na tensão nominal
Supercapacitor Modelo BCAP 0001	400 mW a dT de 15ºC

Fonte: o autor.

Comparando as opções de fornecimento de energia, o método térmico é o que fornece o projetista da aplicação poderá fazer diversos arranjos, combinando métodos de fornecimento de energia para suprir a demanda. Usando como referência os trabalhos de Cheng *et al.* (2020); Sabovic *et al.* (2020), o conceito de dispositivos IoT sem bateria também vem sendo estudado. Especificamente no trabalho de Sabovic *et al.* (2020), o conceito é explorado em um dispositivo IoT equipado com conectividade LoRa® e LoRaWAN™, com resultados positivos.

Considerando a combinação de componente e métodos de coleta, uma aplicação pode utilizar coletores de energia do ambiente e uma bateria, ou um supercapacitor como recurso de armazenamento de energia.

O experimento de Sodano *et al.* (2003), testou a utilização de coletores piezoelétricos para gerar energia para a recarga de bateria. A justificativa foi que a energia gerada pelo coletor não é suficiente para alimentar diretamente a carga e, então optou-se em recarregar a bateria.

Analisando a Tabela 5, se considerado o pior caso, coleta através de estímulo aleatório, uma bateria de 750 mAh levaria cerca de 8,6 horas para recarregar.

Tabela 5 - Tempos de recarga por coleta de energia mecânica

Capacidade da Bateria (mAh)	Tempo de Recarga na Ressonância (h)	Tempo de Recarga Sinal Aleatório (h)
40	1,62	1,6
80	1,2	2
200	4	1,2
300	6	5,8
750	7	8,6
1000	22	32

Fonte: Adaptado de Sodano et al. (2003)

4.2 Técnicas de otimização do consumo de energia

Equacionar a questão de energia é uma atividade de análise ampla. Na sessão anterior, foram avaliadas de consumo e fornecimento de energia. Nesta Seção, o olhar se amplia para o dispositivo IoT como um todo e a função conectividade.

No projeto de dispositivos IoT podem ser levados em conta os seguintes aspectos para auxiliar na otimização do consumo de energia.

- Agendamento de tarefas – é importante uma análise detalhada do processo da aplicação para que seja possível estabelecer o intervalo de coleta de dados e a periodicidade da sua transmissão para o servidor da aplicação.
- No âmbito deste trabalho, a conectividade escolhida é a LoRa® e LoRaWAN™. Essa tecnologia faz uso de diversos parâmetros de configuração que precisam ser adequadamente configurados. Os Apêndices A e B expõe alguns desses parâmetros que configuram tanto a camada física, LoRa®, como a camada de enlace, LoRaWAN™. Exemplos desses parâmetros são a taxa de transmissão de dados, mecanismos de correção de erros de transmissão, tamanho de cada bloco de transmissão. Esse e outros parâmetros precisam ser configurados em harmonia com o provedor de serviço de conectividade, no caso de uma rede privada, o comissionamento da infraestrutura pode ser ajustado às peculiaridades da aplicação;

- A coleta de energia requer estudo cuidadoso das condições ambientais a que os objetos monitorados serão submetidos para que seja possível avaliar qual método de coleta é mais apropriado e estimar o potencial de energia gerada.
- Considerando o perfil de consumo e o potencial de geração de energia, é possível escolher qual o método de armazenamento mais apropriado bateria ou supercapacitor. Na opção de dispositivo IoT sem bateria, podem ser avaliados métodos alternativos de armazenamento, a depender da capacidade de geração da coleta de energia do ambiente e perfil de consumo;
- Métodos de coleta de energia põem ser combinados para que juntos forneçam a capacidade de energia necessária para a operação da aplicação dentro dos parâmetros desejados.

4.3 Considerações do Capítulo

O Capítulo 4 permitiu uma avaliação crítica dos vários blocos funcionais de um dispositivo IoT. É possível estender a sua vida útil aplicando um conjunto de métodos, de modo que o conjunto funcine em harmonia e otimizado. Os estudos realizados na área de aplicação IoT e alernativas de energia, fornecem referência para o planejamento, projeto e operação da plicação.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

São apresentadas nas seções a seguir os resultados do trabalho, bem como são sugeridos pontos para futuros trabalhos nessa área.

5.1 Conclusões

As aplicações IoT em ambientes remotos estão sujeitas, dentre outras coisas, às limitações no fornecimento de energia, o que impõe uma vida útil associada à exaustão da bateria.

Foi possível avaliar a possibilidade de ampliar a vida útil de dispositivos IoT remotos. Estão disponíveis desenvolvimentos tecnológicos que oferecem os diversos componentes para criar projetos de dispositivos mais robustos e capazes de suportar um período de vida útil estendido. Alternativas disponíveis para o armazenamento de energia se apresentam como um recurso estratégico para se obter dispositivos que façam o uso mais eficiente de energia.

Através da revisão da literatura realizada, foi possível compreender o funcionamento dos componentes de um dispositivo IoT, como se relacionam e o impacto de planejamento que não leve em consideração a interoperabilidade desses componentes.

5.2 Contribuições do Trabalho

Esse trabalho contribuíu para consolidar o conhecimento sobre os elementos de configuração de dispositivos IoT e ressaltar as alternativas de projeto capazes de torná-los mais eficientes.

As diferentes abordagens contribuem para a expansão da visão dos diferentes aspectos que precisam ser orquestrados para o projeto de dispositivos orientando para tendências para os tornar mais eficientes.

O trabalho evidencia a relação entre aspectos tecnológicos e de impacto para a sustentabilidade do planeta.

A possibilidade de eliminar baterias é um grande avanço para apoiar o atingimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável acordados com a ONU, identificados para esse trabalho:

- Objetivo 3 – boa saúde e bem-estar;
- Objetivo 6 – água limpa e saneamento;
- Objetivo 7 – energia limpa e acessível;
- Objetivo 9 – indústria e infraestrutura.

5.3 Trabalhos Futuros

Esse trabalho não abordou diferentes aspectos relacionados à viabilidade de um projeto. Disponibilidade comercial de componentes no mercado brasileiro, custo e logística, mão de obra qualificada em *hardware* e *software* são necessários.

Questões tecnológicas mais profundas como a realização de um projeto prático em que todas as informações evidenciadas sejam efetivamente testadas, poderiam ser consideradas em novos trabalhos.

A ampliação do escopo do projeto, incluindo questões de segurança, também é importante de ser discutida em trabalhos futuros, pois ataques maliciosos podem esgotar prematuramente as fontes de energia tornando o dispositivo inoperante.

O estudo para aplicação de algoritmos relacionado ao consumo de energia é outra frente para estudar como aplicar as técnicas de predição de energia, vida útil remanescente, entre outros fatores é importante não só para otimizar ainda mais os dispositivos, como também para ampliar as capacidades da mão de obra local e fomentar o desenvolvimento de empresas no setor.

Trabalhar conjuntamente com outras especialidades da ciência como a economia, pode ajudar na compreensão de fatores de mercado como a demanda por dispositivos e fraquezas na cadeia de suprimento, o que pode estimular a formulação de políticas públicas para incorporar esses conhecimentos na cadeia produtiva e tornar o Brasil autossuficiente e tornar-se um polo regional de suprimento.

REFERÊNCIAS

ALHAWARI, M. *et al.* **Power management unit for multi-source energy harvesting in wearable electronics**. Midwest Symposium on Circuits and Systems, [*s. l.*], v. 0, n. October, p. 16–19, 2016. Available at: https://doi.org/10.1109/MWSCAS.2016.7870049

ALLIANCE, Lora. **LoRaWAN 1.1 Specification**. [*S. l.: s. n.*], 2017. Available at: https://lora-alliance.org/lorawan-for-developers/.

ALLIANCE, LoRa. **About the LoRaWAN Standards**. [*S. l.*], 2021. Available at: https://lora-alliance.org/lorawan-for-developers/.

ANATEL. **Ato 14448**. [*S. l.*]: ANATEL, 2018. Available at: https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-certificacao-de-produtos/2017/1139-ato-14448

AUGUSTIN, A. *et al.* **A study of Lora: Long range and low power networks for the internet of things**. Sensors (Switzerland), [*s. l.*], v. 16, n. 9, p. 1–18, 2016. Available at: https://doi.org/10.3390/s16091466

BOUGUERA, T. *et al.* **Energy consumption model for sensor nodes based on LoRa and LoRaWAN**. Sensors (Switzerland), [*s. l.*], v. 18, n. 7, p. 1–24, 2018. Available at: https://doi.org/10.3390/s18072104

CASALS, L. *et al.* **Modeling the energy performance of LoRaWAN**. Sensors (Switzerland), [*s. l.*], v. 17, n. 10, p. 1–30, 2017. Available at: https://doi.org/10.3390/s17102364

CHENG, H. C. *et al.* **A Redistributable Capacitive Power Converter for Indoor Light-Powered Batteryless IoT Devices**. IEEE Solid-State Circuits Letters, [*s. l.*], v. 3, p. 350–353, 2020. Available at: https://doi.org/10.1109/LSSC.2020.3019819

CROCE, D. *et al.* **Performance of LoRa technology: link-level and cell-level performance**. [*S. l.*]: INC, 2020. Available at: https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818880-4.00010-7

DEL CAMPO, G. *et al.* **Guidelines and criteria for selecting the optimal low-power wide-area network technology**. [*S. l.*]: INC, 2020. Available at: https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818880-4.00014-4

DHADWAL, H. S.; RASTEGAR, J. **Energy Harvesting for Low-Power Autonomous Devices and Systems**. [*S. l.: s. n.*], 2017. Available at: https://doi.org/10.1117/3.2256429

DSSS - Direct Sequence Spread Spectrum. Direção: Sunny. [*S. l.: s. n.*], 2018. Available at: https://youtu.be/-1mxYWvfVWQ

ERTÜRK, M. A. *et al.* **A Survey on LoRaWAN Architecture, Protocol and Technologies**. Future Internet, [*s. l.*], v. 11, n. 10, p. 216, 2019. Available at: https://doi.org/10.3390/fi11100216

FINNEGAN, J.; BROWN, S. **An Analysis of the Energy Consumption of LPWA-based IoT Devices**. 2018 International Symposium on Networks, Computers and Communications, ISNCC 2018, [*s. l.*], p. 0–5, 2018. Available at: https://doi.org/10.1109/ISNCC.2018.8531068

FREITAS, M. P. de. **Sensoriamento Participativo : conceito , desafios e oportunidades**. 17 f. 2015. - Faculdade Batista do Estado do Rio de Janeiro - FABERJ, [*s. l.*], 2015. Available at: faberj.edu.br

IBGE. Pesquisa Pecuária Municipal. [*S. l.*]: IBGE, 2020.

ISMAIL, M. I. M. *et al.* **A Review of Energy Harvesting in Localization for Wireless Sensor Node Tracking**. IEEE Access, [*s. l.*], v. 9, p. 60108–60122, 2021. Available at: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3072061

JALAL, N. I.; IBRAHIM, R. I.; OUDAH, M. K. **A review on Supercapacitors: Types and components**. Journal of Physics: Conference Series, [*s. l.*], v. 1973, n. 1, 2021. Available at: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012015

LIANG, Y. *et al.* **A review of rechargeable batteries for portable electronic devices**. InfoMat, [*s. l.*], v. 1, n. 1, p. 6–32, 2019. Available at: https://doi.org/10.1002/inf2.12000

LORA/LORAWAN **TUTORIAL 13: SYMBOL, SPREADING FACTOR AND CHIP**. Direção: Robert Lee. Nederlands: [*s. n.*], 2018. Available at: https://youtu.be/0FCrN-u-Vpw?list=PLmL13yqb6OxdeOi97EvI8QeO8o-PqeQ0g&t=33

LORA/LORAWAN **TUTORIAL 17: LORA PACKET FORMAT**, TIME ON AIR AND ADAPTIVE DATA RATE. Direção: Robert Lee. [*S. l.: s. n.*], 2018. Available at: https://youtu.be/C_Rh5GSENA4

LORA ALLIANCE. **FUOTA Process Summary Technical Recommendation** TR002 v1.0.0. [*s. l.*], p. 1–11, 2019. Available at: https://lora-alliance.org/sites/default/files/2019-04/tr002-fuota_process_summary-v1.0.0.pdf

LORA ALLIANCE. **RP002-1.0.3 LoRaWAN® Regional Parameters**. [*s. l.*], p. 1–94, 2021. Available at: https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2021/05/RP002-1.0.3-FINAL-1.pdf

LYKOV, Y. *et al.* **Energy Efficiency Comparison LPWANs: LoRaWAN vs Sigfox**. 2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2020 - Proceedings, [*s. l.*], p. 485–490, 2021. Available at: https://doi.org/10.1109/PICST51311.2020.9468026

MAXWELL TECHNOLOGIES. **Maxwell Ultracapacitor Cells**. [*S. l.*]: Maxwell, 2018. Available at: http://www.maxwell.com/images/documents/ProductMatrix.pdf

MD YUSOP, A.; MOHAMED, R.; AYOB, A. **Model building of thermoelectric generator exposed to dynamic transient sources**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, [*s. l.*], v. 53, n. 1, 2013. Available at: https://doi.org/10.1088/1757-899X/53/1/012015

O'SHEA, P. **A revolution alongside an evolution pushes battery technology forward**. [*S. l.*], 2017.

PANASONIC. **Specifications for NCR18650GA**. [*S. l.*]: Pansonic, 2018. Available at: https://na.industrial.panasonic.com/products/batteries/rechargeable-batteries

PATRIK CERWALL. Mobility Report. **Ericsson Mobility Report**, [*s. l.*], n. June, p. 11, 2021. Available at: https://www.ericsson.com/4a03c2/assets/local/mobility-report/documents/2021/june-2021-ericsson-mobility-report.pdf

POWERFILM SOLAR. **Custom Solar Panel Design Tool**. [*S. l.*], 2022. Available at: https://www.powerfilmsolar.com/custom-solutions/custom-solar-panel-design-tool/. Acesso em: 10 jan. 2022.

PRASAD, A.; CHAWDA, P. **Power management factors and techniques for IoT design devices**. Proceedings - International Symposium on Quality Electronic Design, ISQED, [*s. l.*], v. 2018-March, n. January, p. 364–369, 2018. Available at: https://doi.org/10.1109/ISQED.2018.8357314

SABOVIC, A. *et al.* **Energy-aware sensing on battery-less lorawan devices with energy**

harvesting. Electronics (Switzerland), [*s. l.*], v. 9, n. 6, p. 1–18, 2020. Available at: https://doi.org/10.3390/electronics9060904

SAFAEI, M.; SODANO, H. A.; ANTON, S. R. **A review of energy harvesting using piezoelectric materials: State-of-the-art a decade later (2008-2018)**. Smart Materials and Structures, [*s. l.*], v. 28, n. 11, 2019. Available at: https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab36e4

SEMTECH. **LoRa and LoRaWAN: Technical overview** | DEVELOPER PORTAL. [*S. l.: s. n.*], 2019. Available at: https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan%0Ahttps://lora-developers.semtech.com/library/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/

SEMTECH. **LoRa and LoRaWAN**. Semtech Technique Paper, [*s. l.*], n. December 2019, p. 1–17, 2020a. Available at: https://lora-developers.semtech.com/library/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/

SEMTECH. **LoRa Modulation Basics AN1200.22**. App Note, [*s. l.*], n. May, p. 1–26, 2015. Available at: http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf

SEMTECH. **Sx1276/77/78/79 Datasheet**. [*S. l.*]: Semtech, 2020b. Available at: https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-core/sx1276

SHAH, S. W. H. *et al.* **Energy-Efficient MAC for Cellular IoT: State-of-the-Art, Challenges, and Standardization**. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, [*s. l.*], v. 5, n. 2, p. 587–599, 2021. Available at: https://doi.org/10.1109/TGCN.2021.3062093

SHAO, H.; TSUI, C. Y.; KI, W. H. **Maximizing the harvested energy for micro-power applications through efficient MPPT and PMU design**. Proceedings of the Asia and South Pacific Design Automation Conference, ASP-DAC, [*s. l.*], p. 75–80, 2010. Available at: https://doi.org/10.1109/ASPDAC.2010.5419915

SHERAZI, H. H. R. *et al.* **Energy-Efficient LoRaWAN for Industry 4.0 Applications**. IEEE Transactions on Industrial Informatics, [*s. l.*], v. 17, n. 2, p. 891–902, 2021. Available at: https://doi.org/10.1109/TII.2020.2984549

SHIRVANIMOGHADDAM, M. *et al.* **Towards a Green and Self-Powered Internet of Things Using Piezoelectric Energy Harvesting**. IEEE Access, [*s. l.*], v. 7, p. 94533–94556, 2019. Available at: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2928523

SINGH, R. K. *et al.* **Energy consumption analysis of LPWAN technologies and lifetime estimation for IoT application**. Sensors (Switzerland), [*s. l.*], v. 20, n. 17, p. 1–22, 2020. Available at: https://doi.org/10.3390/s20174794

SODANO, H. A. *et al.* **Use of piezoelectric energy harvesting devices for charging batteries. Smart Structures and Materials 2003**: Smart Sensor Technology and Measurement Systems, [*s. l.*], v. 5050, n. May, p. 101, 2003. Available at: https://doi.org/10.1117/12.484247

SRBINOVSKA, M.; DIMCEV, V.; GAVROVSKI, C. **Energy consumption estimation of wireless sensor networks in greenhouse crop production**. 17th IEEE International Conference on Smart Technologies, EUROCON 2017 - Conference Proceedings, [*s. l.*], n. July, p. 871, 2017. Available at: https://doi.org/10.1109/EUROCON.2017.8011235

TE **GENERATOR DX2625 - MINI SOLID-TO-AIR ENERGY HARVESTER UP TO 20MW OUTPUT**. [*S. l.*]: TEC Microsystems GmbH, 2021. Available at: https://www.tec-

microsystems.com/products/thermoelectric-generators/index.html

THE THINGS NETWORK. [*S. l.*], 2021. Available at: https://www.thethingsnetwork.org/. Acesso em: 16 dez. 2021.

TSIATSIS, V. *et al.* **Origins and IoT Landscape**. *In*: INTERNET OF THINGS. [*S. l.: s. n.*], 2019. v. Chapter 2, p. 9–30. Available at: https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814435-0.00013-4

VALENTE, A. *et al.* **Low-cost lorawan node for agro-intelligence iot**. Electronics (Switzerland), [*s. l.*], v. 9, n. 6, p. 1–17, 2020. Available at: https://doi.org/10.3390/electronics9060987

WANG, J. *et al.* **Heat stress on calves and heifers: A review**. Journal of Animal Science and Biotechnology, [*s. l.*], v. 11, n. 1, p. 1–8, 2020. Available at: https://doi.org/10.1186/s40104-020-00485-8

WOIAS, P. *et al.* **Thermal energy harvesting from wildlife**. Journal of Physics: Conference Series, [*s. l.*], v. 557, n. 1, 2014. Available at: https://doi.org/10.1088/1742-6596/557/1/012084

YEGIN, A. *et al.* **LoRaWAN protocol: specifications, security, and capabilities**. [*S. l.*]: INC, 2020. Available at: https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818880-4.00003-x

APÊNDICE A – Introdução às Tecnologias LoRa® e LoRaWAN™

Princípios Básicos do LoRa®

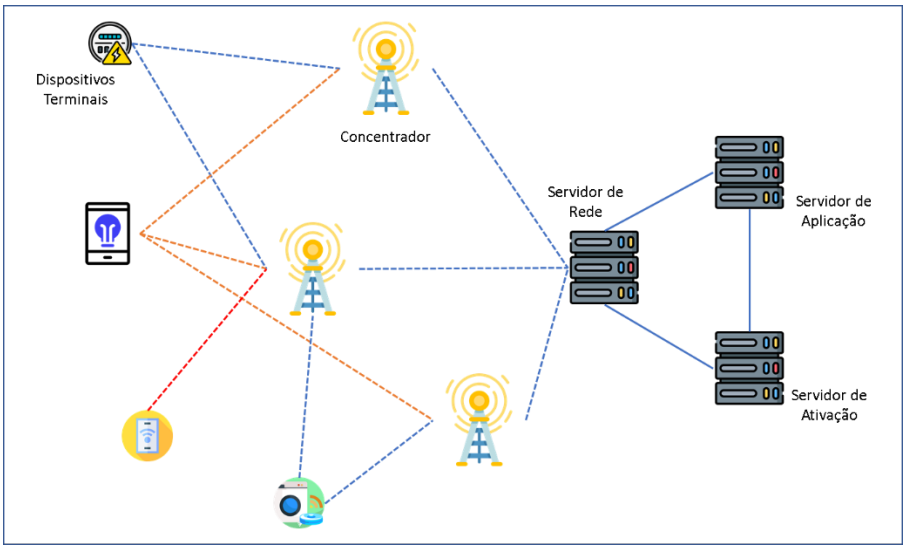
A topologia de uma rede baseada em LoRa se baseia na configuração estrela. A Figura 20 apresenta uma topologia típica de rede, cujos elementos são:

- **Dispositivos Terminais (DT)** (*End Nodes*): são os dispositivos IoT que serão empregados nas aplicações dos usuários. Eles serão estudados em maior detalhe no próximo capítulo desse trabalho;
- **Concentrador (C)** (*Gateway*): recebe mensagens dos dispositivos terminais no formato de radiofrequência e as encaminha para o Servidor de Rede através de pacotes IP, sendo que neste caso, a conexão pode ser feita pelo meio de comunicação disponível, sem fio ou cabeado. Uma característica importante é a não vinculação de um DT a um único C, ou seja, uma mensagem enviada por um DT será interceptada por todos os C que estiverem em alcance. Essa funcionalidade permite aumentar a chance de que a mensagem chegue íntegra no SR, o que diminui a necessidade de retransmissões e, como consequência, a operação é energeticamente mais eficiente. Adicionalmente, o uso de mais de um concentrador, permite a utilização da funcionalidade de geolocalização de DTs sem a necessidade de GPS, o que também contribui para um menor consumo de energia no DT, prolongando a vida útil da bateria. Os concentradores são relativamente robustos, suportando uma boa carga de mensagens. O seu dimensionamento não será objeto de estudo desse trabalho (SEMTECH, 2020a), Yegin *et al.* (2020);
- **Servidor de Rede (SR)** (*Network Server*): é responsável pelo controle dinâmico de todos os parâmetros que regulam o funcionamento da rede. Ele estabelece a conexão segura de ponta a ponta entre o DT e o usuário final da aplicação. É responsável por assegurar a integridade das mensagens e a autenticidade de cada DT conectado na rede Semtech, 2020a; Yegin *et al.* (2020);
- **Servidor de Ativação (SAT)** (*Join Server*): armazena as credenciais do DT para executar autenticação mútua antes que este seja admitido na rede. O procedimento que envolve um *handshake* criptográfico e a configuração do

dispositivo final com parâmetros de rede é chamado de procedimento de ativação ou associação. Ele informa ao SR a qual SAP o DT deve ter acesso. (Semtech, 2020a); Yegin *et al.* (2020)

- **Servidor de Aplicação (SAP)** (*Application Server*): é responsável por consumir a carga útil (payload) carregada pelos quadros recebidos provenientes dos DTs. Eles geram dados destinados a alcançarem os DTs (SEMTECH, 2020a).

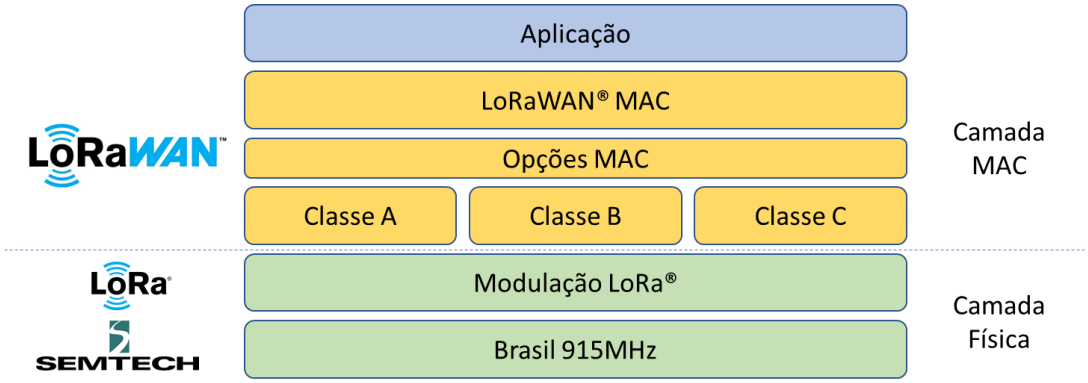
Figura 20 – Topologia de Rede LoRaWAN™



Fonte: adaptado de (SEMTECH, 2020a).

O LoRa® opera com a premissa de formação de redes em topologia estrela, na qual um determinado DT se comunica com todos os C que estejam em alcance. Essa conexão é estabelecida a partir de um arranjo de uma pilha de protocolos LoRaWAN™ na qual os dados provenientes do sensor são organizados em quadros para que sejam modulados na camada física LoRa® e transmitidos pelo rádio. A Figura 21 apresenta a pilha da tecnologia LoRaWAN™.

Figura 21 - Pilha de tecnologia LoRaWAN™



Fonte: adaptado de (SEMTECH, 2020a).

Normatização do LoRa®

O LoRa® e o LoRaWAN™, têm sido normatizados por esforços da própria Semtech, no que tange a divulgação do funcionamento de sua tecnologia de modulação. A camada de enlace *Media Access Control* (MAC), é um esforço coletivo da comunidade de fabricantes de soluções e usuários capitaneada pela *LoRa® Alliance*, fundada pela Semtech em 2015 e outras instituições como (THE THINGS NETWORK, 2021). As características das camadas de rede do protocolo são:

Camada Física

É de propriedade da Semtech que a licencia através do LoRa® Alliance para que fabricantes de chips possam empregá-la em suas implementações, que inclui o suporte à Camada de Enlace LoRaWAN™, além de sensores. A Semtech tem em seu website documentos explicativos do funcionamento e parametrização desta camada (SEMTECH, 2020a).

Camada de Enlace

É especificada pela LoRa® Alliance. A organização criou uma série de documentos que normatiza a especificação LoRaWAN™, bem como sua interoperabilidade com dispositivos e entre redes de diferentes operadores. Os documentos estão assim organizados:

- **Padrão de Camada de Enlace:** define os parâmetros da Camada Física LoRa® de dispositivo para rede e o protocolo de rede LoRaWAN™, incluindo

comandos de camada MAC, conteúdo de quadro, classes de comunicação, taxas de dados, segurança e gerenciamento flexível de frequência de rede (ALLIANCE, LoRa, 2021);

- **Padrão de interfaces de *back-end***: suporta a decomposição da rede em nós interoperáveis, conforme necessário para roaming e ativação de dispositivos entre fornecedores (ALLIANCE, LoRa, 2021).
- **Atualização de firmware padrão *Over-the-Air* (FUOTA):** esse processo, não faz parte da especificação da Camada de Enlace. Ele é executado na Camada de Aplicação. O sumário desse processo é apresentado na Recomendação Técnica – TR002 (LORA ALLIANCE, 2019).
- **Parâmetros Regionais:** documenta os planos de canal de frequência aprovados para várias regiões globais e segue as restrições regulamentares estabelecidas nessas regiões. Esses detalhes são gerenciados separadamente dos padrões principais LoRaWAN™ para permitir que a LoRa® Alliance atenda aos requisitos de suporte regulatório regional. Os parâmetros da Camada Física LoRa® abrangidos pelos Parâmetros Regionais incluem o formato de preâmbulo, as frequências de canal, as taxas de dados, a potência de saída Tx, e o tempo de permanência e controle de potência (LORA ALLIANCE, 2021).
- **Programa de Certificação:** objetiva certificar produtos para assegurar a adesão aos protocolos LoRaWAN™ e garantir interoperabilidade, o que dá credibilidade ao ecossistema (ALLIANCE, LoRa, 2021).

A seguir será exposto como operam as diferentes camadas da solução LoRa® e LoRaWAN™.

Camada Física - Modulação LoRa®

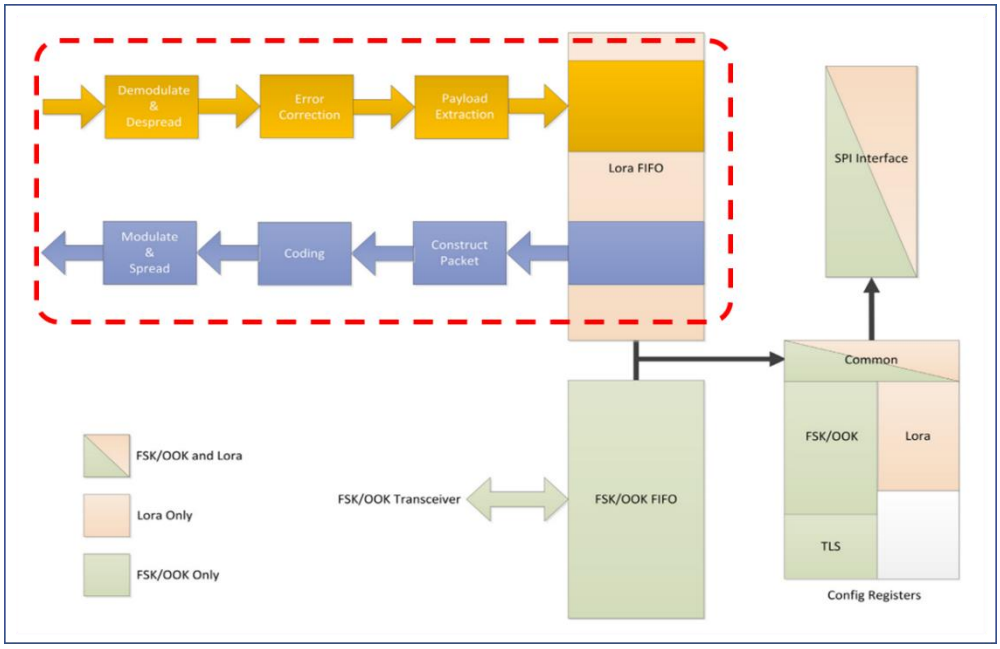
A modulação *Chirp Spread Spectrum* (CSS), é uma aplicação particular de modulação da técnica *Spread Spectrum*, que consiste em fazer o espalhamento de um sinal de uma determinada frequência em uma faixa mais ampla de frequências, com o objetivo de aumentar a probabilidade de detecção e recuperação do sinal na recepção.

O objetivo é obter um sinal *Chirp* modulado para ser transmitido. Para isso, o processo se inicia com os dados úteis do usuário (payload). Esses dados serão tratados ao

longo do processo de obtenção do sinal modulado final para transmissão pelo rádio LoRa®.

A Figura 22 apresenta um diagrama em blocos do transceptor LoRa® modelo SX1272/73 da Semtech. Na área em destaque, na cor vermelha, estão os blocos funcionais da modulação LoRa®. Em amarelo está representado o processo de recepção, e em violeta o de transmissão. Tomando a transmissão como referência, notam-se os blocos funcionais *Modulate and Spread*, *Coding* e *Construct Packet*. Ainda que os nomes sejam intuitivos, a documentação não é clara quanto à efetiva delimitação de funcionalidades de cada bloco, mas analisando o conjunto, é possível avaliar a metodologia que foi implementada.

Figura 22 – Diagrama de Blocos do SX1272/73



Fonte: extraído de (SEMTECH, 2020b).

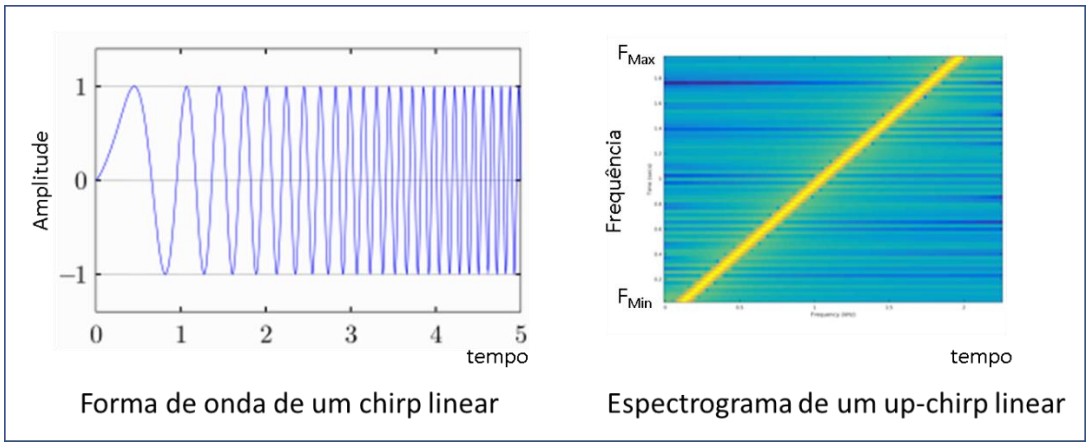
Para uma melhor compreensão, é importante notar que, em princípio, as duas pontas da comunicação conhecem os parâmetros que serão utilizados na modulação do sinal, embora seja possível alterá-los de forma dinâmica.

Na saída da transmissão o *Chirp* modulado, que é um sinal senoidal cuja frequência varia no tempo de acordo com uma regra pré-estabelecida para essa variação. No LoRa® essa frequência varia linearmente dentro de uma faixa de F_{min} até F_{max}.

Quando a variação vai de F_{min} até F_{max} o sinal resultante é chamado de *Up-Chirp* ou rampa ascendente. Já quando a variação parte de F_{max} até F_{min} o sinal resultante é

chamado de *Down-Chirp* ou rampa descendente. A Figura 23 ilustra o sinal *Chirp* no formato amplitude no tempo. O quadro da direita apresenta uma visão do sinal no formato frequência no tempo. Nota-se a rampa ascendente ou *Up-Chirp*.

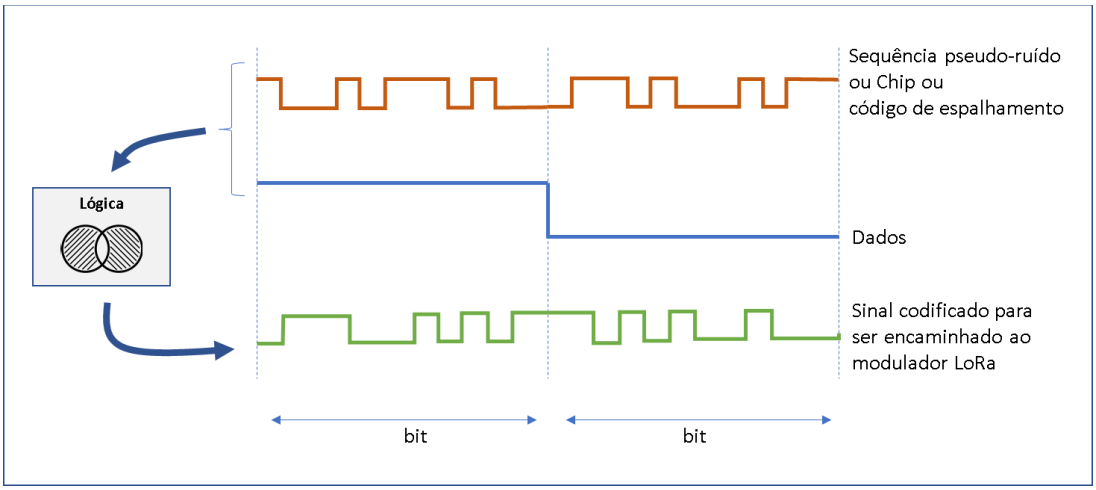
Figura 23 – *Chirp* e *Up-Chirp*



Fonte: adaptado de (SEMTECH, 2019)

O *Chirp* será posteriormente modulado pelo sinal dos dados a serem transmitidos. Antes, porém, esses dados passam por um tratamento de codificação, no qual o sinal original é combinado com um outro de maior frequência através de uma lógica determinada. No exemplo estudado em (DSSS - DIRECT SEQUENCE SPREAD SPECTRUM, 2018), foi empregada uma porta lógica ou exclusivo pra combinar os sinais. A Figura 24 exemplifica o processo.

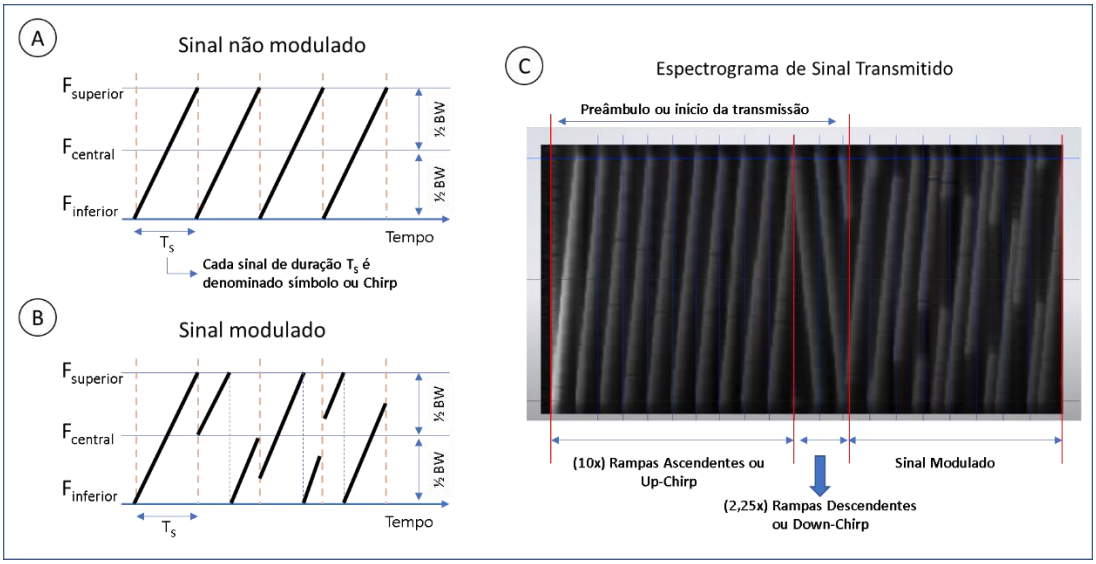
Figura 24 – Codificação dos dados



Fonte: adaptado de (DSSS - DIRECT SEQUENCE SPREAD SPECTRUM, 2018).

Para a formação do sinal CSS, o sinal *Chirp* será combinado com o sinal dos dados já codificados e encaminhados ao rádio para transmissão. A Figura 25 apresenta um espectrograma esquemático do sinal *Chirp* não modulado. Em B está o sinal A combinado com os dados codificados, formando o sinal modulado, e em C, uma visão de uma medição real de um sinal modulado, no qual o preâmbulo do início da transmissão é apresentado, mostrando, da esquerda para a direita, 10 *Up-Chirps*, sendo os dois últimos codificados e representando a identificação da rede, denominado palavra de sincronização, e seguidos 2,25 *Down-Chirps* e então a mensagem propriamente dita (CROCE *et al.*, 2020; LORA/LORAWAN TUTORIAL 13: SYMBOL, SPREADING FACTOR AND CHIP, 2018). O tamanho do preâmbulo é configurável. Esse tema será tratado mais adiante ao se apresentar a formação de pacotes.

Figura 25 - Modulação do sinal para transmissão



Fonte: adaptado de (LORA/LORAWAN TUTORIAL 13: SYMBOL, SPREADING FACTOR AND CHIP, 2018).

Da Figura 25 A e B percebe-se que a variação de frequência do sinal modulado ou não, ocupa a Largura de Banda (BW) do canal utilizado na transmissão.

A Camada Física LoRa®, foi concebida para ser uma solução para baixo volume de dados, de baixo consumo de potência e de elevado alcance de comunicação. Desta forma, com o objetivo de otimizar essas características, é possível ajustar alguns

parâmetros da rede ao contexto específico da aplicação. Esses parâmetros são: Largura de Banda (BW), *Spread Factor* (SF) e *Code Rate* (CR). É preciso fazer uma avaliação criteriosa para o estabelecimento desses parâmetros, uma vez que afetam o desempenho de todo o sistema, incluindo taxa efetiva de transmissão de dados, facilidade com que o receptor conseguirá decifrar as mensagens recebidas e a resistência do sinal ao ruído Augustin *et al.* (2016).

- **Largura de Banda ou *Bandwidth* (BW):** é a faixa de frequências reservada para a comunicação. A especificação LoRa® define três larguras de banda: 125 kHz, 250 kHz e 500 kHz. Cada região do planeta e cada país dentro das regiões define quais faixas de frequências adota e como utilizá-las, através de uma Plano de Frequência (ALLIANCE, Lora, 2017).

  A LoRa® Alliance, através da sua especificação *RP002-1.0.3 LoRaWAN™ Regional 40 Parameters* define os chamados Parâmetros Regionais de Configuração e uso das faixas de frequência nas rede LoRa® para as diferentes regiões de alocação de frequências (LORA ALLIANCE, 2021).

  No Brasil, a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) definiu, e através do Ato nº 14.448, de 4 de dezembro de 2017, Seção 10, as faixas para a categoria de radiocomunicação de radiação restrita como sendo 902 a 907,5 MHz e 915 a 928 MHz (ANATEL, 2018).

  Do ponto de vista da comunidade LoRa® isso cria uma inconsistência, pois o LoRa® Alliance atua com a padronização e planos de frequência. Os EUA e Canadá usam o plano denominado US915, cujas frequências variam de 902 a 928 MHz. Já o plano da Austrália, denominado AU915, ocupa as frequências de 915 a 928 MHz.

  Considerando a fragmentação da faixa brasileira é preciso criar um plano de frequências específico para o Brasil, para que os canais sejam adequadamente alocados.

  Do ponto de vista regulatório, não há impedimento para uso das larguras de banda de 125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz, desde que respeitadas as limitações do item 10.2.5 do Ato nº 14.448, de 4 de dezembro de 2017 (ANATEL, 2018).

- **Fator de Espalhamento ou Spread Factor (SF):** indica a quantidade de dados úteis do usuário que serão codificados dentro de cada *Chirp* modulado. Esse valor pode ser definido dentro da faixa de 7 a 12.

- **Taxa de Codificação ou Coding Rate (CR)**: refere-se à quantidade de bits que podem ser inseridos para efeito de correção de erros para cada grupo de quatro bits de dados úteis do usuário. Em LoRa®, é possível inserir de um a quatro bits para verificação de erro. A taxa de codificação é calculada pela Equação 1:

$$\boldsymbol{CR} = \frac{\mathbf{4}}{(\boldsymbol{n} + \mathbf{4})} \qquad (1)$$

onde: n = 1, 2, 3 ou 4.

Quanto maior “n”, mais bits de correção de erro serão inseridos para cada conjunto de quatro bits de dados úteis de usuário. Como consequência, o Tempo de Transmissão ou *Time on Air* (ToA) aumentará, o que, em termos de alcance da transmissão, é positivo. Porém aumenta o consumo de energia dispendida na transmissão, bem como aumenta a chance de haver colisões com outros pacotes que possam estar em trânsito provenientes de outros dispositivos terminais ou concentradores.

Juntos, a Largura de Banda, o Fator de Espalhamento e a Taxa de Codificação, definem a taxa de transmissão de dados úteis do usuário através da Equação 2 (SEMTECH, 2015).:

$$\boldsymbol{R_b} = \boldsymbol{SF}\frac{\boldsymbol{CR}}{\left(\frac{\boldsymbol{2^{SF}}}{\boldsymbol{BW}}\right)} \text{ bit/s} \qquad (2)$$

onde:

R_b	Taxa de transmissão de dados
SF	Fator de espalhamento: 7 a 12
BW	Largura de Banda, em Hertz: 125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz
CR	Taxa de Codificação empregada na carga útil. O CR assume os valores de n da Equação 1, sendo 1 para 4/5 até 4 para 4/8

A Tabela 6 apresenta alguns valores calculados com base na Equação 2 para alguns cenários de variação dos três parâmetros.

Tabela 6 – Taxas de Transmissão em função da variação de parâmetros de configuração de modulação LoRa® – Calculado a partir da equação

R_b (bit/s)	BW = 125KHz		BW = 250KHz		BW = 500KHz	
SF	**CR**: n=1	**CR**: n=4	**CR**: n=1	**CR**: n=4	**CR**: n=1	**CR**: n=4
7	5.469	3.418	10.938	6.836	21.875	13.672
8	3.125	1.953	6.250	3.906	12.500	7.813
9	1.758	1.099	3.516	2.197	7.031	4.395
10	977	610	1.953	1.221	3.906	2.441
11	537	336	1.074	671	2.148	1.343
12	293	183	586	366	1.172	732

Fonte: o autor.

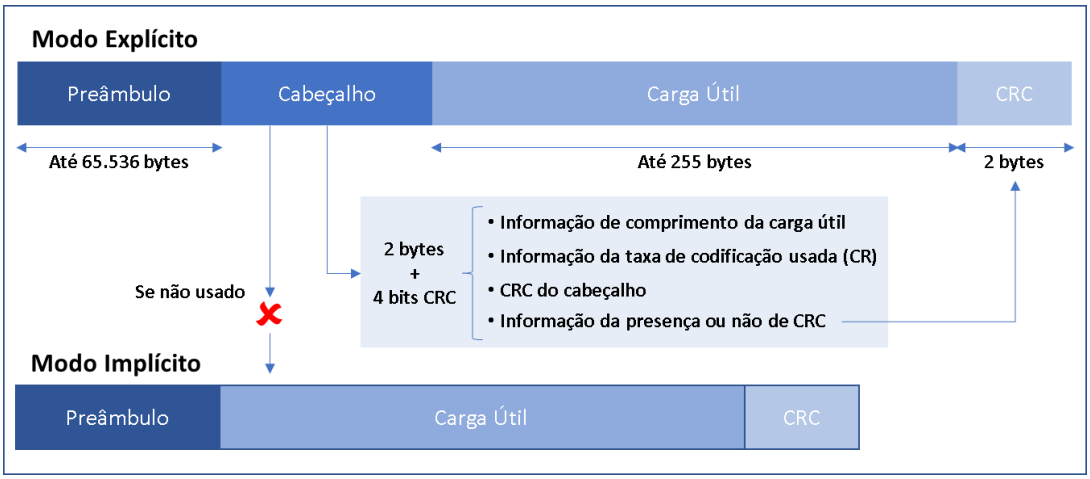
Tempo de Transmissão ou *Time on Air* (ToA)

Quando é selecionado um Fator de Espalhamento mais baixo, é possível atingir as maiores taxas de transmissão de bit/s e por consequência, os menores tempos de transmissão.

Vale ressaltar que há uma restrição regulatória, no que se refere ao tempo de vida do pacote e que se reflete no parâmetro. O chamado tempo de permanência (*dwell time*) deve seguir o estabelecido no Ato nº 14.448, de 4 de dezembro de 2017 (ANATEL, 2018), no seus itens 10.2, 10.3 e 10.4.

Para fazer o cálculo do Tempo de Transmissão, é necessário avaliar o pacote de nível físico que a tecnologia LoRa® utiliza. A Figura 26 apresenta esta estrutura.

Figura 26 – Formatos do pacote da mensagem LoRa® nível físico



Fonte: adaptado de Casals et al. (2017); (LORA/LORAWAN TUTORIAL 17: LORA PACKET FORMAT, TIME ON AIR AND ADAPTIVE DATA RATE, 2018); Ertürk et al. (2019).

A estrutura padrão do pacote LoRa® consta das seguintes estruturas:

Preâmbulo ou *Preamble:* possui tamanho variável, podendo atingir até 65.536 bytes. Essa estrutura tem a função de informar à outra ponta da comunicação que uma comunicação se iniciará e lhe permite preparar-se para receber os dados que virão a seguir.

Cabeçalho ou *Header* (opcional): a tecnologia LoRa® permite dois tipos de comunicação a Explícita e a Implícita. A Explícita é a predefinida, e nela Cabeçalho é utilizado e carrega informações importantes para a outra ponta da comunicação, que são o tamanho da carga útil que virá a seguir, qual foi a codificação de correção de erro empregada (CR), e se a existe ao final da mensagem informação de CRC para correção de erros na carga útil do usuário. Adicionalmente, há um CRC do próprio cabeçalho, para que o receptor possa descartar a mensagem caso o cabeçalho venha corrompido.
Já em casos de aplicações em que as condições são bem controladas, tal como largura de banda fixa e estável (pouca interferência), dispositivos terminais fixos ou com baixa mobilidade, esses parâmetros podem ser pré-configurados em ambas as pontas, o que elimina a necessidade do cabeçalho, diminuindo o tamanho da mensagem e como consequência o consumo de energia.

Carga Útil: são os dados do usuário, e o seu tamanho máximo é variável e dependente das configurações dos parâmetros de rede e as condições de impostas por limites regulatórios. O padrão é de até 255 bytes.

Verificação de Redundância Cíclica ou *Cyclic Redudancy Check* (CRC): é o código incorporado ao final da mensagem, calculado com base em um algoritmo pré-definido e tem por objetivo permitir a recuperação de dados corrompidos. É aplicado à Carga Útil e é empregado em ambos os modos de comunicação, Implícito e Explícito. Uma vez apresentados os elementos que influenciam no tempo de transmissão de uma mensagem, é possível avaliar o ToA. Da Figura 26 as mensagens são formadas por um Preâmbulo e uma Carga Útil. Desta forma, o Tempo de Transmissão da mensagem será dado pela Equação 3:

$$\boldsymbol{T_{Mensagem} = ToA = T_{Preâmbulo} + T_{Carga\ Útil}} \quad (3)$$

Por sua vez o Tempo de Preâmbulo é dado pela Equação 4:

$$\boldsymbol{T_{Preâmbulo} = (n_{Preâmbulo} + 4,25) \times T_S} \quad (4)$$

O cálculo de T_S (Equação 5) envolve a largura de banda disponível e o fator de espalhamento espectral empregado, assim:

$$\boldsymbol{T_S = \frac{2^{SF}}{BW}} \quad (5)$$

Portanto a parcela de Tempo de Preâmbulo é dada pela Equação 6:

$$\boldsymbol{T_{Preâmbulo} = (n_{Preâmbulo} + 4,25) \times \frac{2^{SF}}{BW}} \quad (6)$$

A parcela correspondente à carga útil de usuário é dada pela Equação 7:

$$\boldsymbol{T_{Preâmbulo} = (n_{Preâmbulo} + 4,25) \times \frac{2^{SF}}{BW}} \quad (7)$$

onde $n_{Preâmbulo}$ é quantidade de *Chirps* usados no preâmbulo e 4,25 representa a quantidade de *Chirps* padrão, sendo 2 para a palavra de sincronização e 2,25 *Down-Chirps* de fechamento do preâmbulo.

Quanto à parcela de tempo associada à carga útil, esta é dada pela Equação 8:

$$\boldsymbol{T_{Carga\ Útil} = T_S \left\{ 8 + max\left(ceil\left[\frac{(8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20IH)}{4(SF - 2DE)} \right](CR + 4), 0 \right) \right\}} \quad (8)$$

onde:

Max Função máximo

Ceil Função Teto – retorna o menor número inteiro que é maior que o número do argumento

PL Carga útil em bytes

SF Fator de espalhamento: 7 a 12

CRC Sinalização para presença de CRC para carga útil. O valor será 1 se habilitado e 0 se desabilitado. O padrão é o CRC=1, habilitado

IH Sinalização para modo de comunicação implícita, sem cabeçalho, ou explícita, com cabeçalho. Se o valor for programado para 1 o cabeçalho estará desabilitado, se programado para 0 estará habilitado. O padrão é IH=0 – modo explícito habilitado

DE Para a largura de banda de 125 kHz e os fatores de espalhamento de 11 e 12, ou seja, um cenário de baixa capacidade espectral e sinal fraco, a ativação da sinalização DE possibilitará ativar recursos adicionais para a recuperação dos sinais recebidos. Se DE=1 a otimização de sinal estará habilitada. Se DE=0 estará desabilitada

CR Taxa de Codificação empregada na carga útil. O CR assume os valores de n da Equação 1. Sendo 1 para 4/5 até 4 para 4/8

O ToA é a soma dos resultados das Equações 7 e 8. A Semtech disponibiliza aplicativos para o cálculo de ToA com base na seleção dos parâmetros discutidos.

Sob a ótica de consumo de energia, quanto menor o tempo de transmissão, menor o consumo de energia. Para calcular esse consumo, os autores manipulam os parâmetros da tecnologia e expressam esse consumo através da equação (9) do Apêndice B.

As Equações de (3) a (8) e respectivas informações foram adaptadas de (ALLIANCE, Lora, 2017); Casals *et al.* (2017); (SEMTECH, 2020b).

Camada de Enlace

Na tecnologia LoRaWAN™ a Camada de Enlace é simplificada com o objetivo de tornar a rede eficiente do ponto de vista energético, além de obter dispositivos terminais de baixo custo. Desta forma, LoRaWAN™ faz o controle de acesso ao meio de comunicação com um modelo ALOHA, no qual o aceso ao meio é feito de forma aleatória. Existem três estratégias de acesso ao canal, sendo denominadas por Classe A, B e C, que são implementadas nos dispositivos terminais e operam de forma coordenada com concentradores e servidores de rede Ertürk *et al.* (2019).

Classe A

É a forma básica de comunicação e é a padrão dos dispositivos terminais LoRa®, devendo ser suportada por todos eles. Neste modo de comunicação, apenas o dispositivo terminal inicia a comunicação, enviando para o concentrador a sua mensagem. Após o envio, são abertos dois intervalos de tempo para a recepção de mensagens a partir da rede, caso exista. Somente após um envio de dados a partir do dispositivo terminal é que a rede poderá enviar dados para o dispositivo.
Essa classe é a de menor consumo energético. Ertürk *et al.* (2019).

Classe B

Dispositivos operando na classe B, além das janelas de recepção de mensagens dos dispositivos terminais classe A, também controlam o recebimento de mensagens a partir da rede empregando um mecanismo de sincronização. A rede envia um pacote de sincronização e o dispositivo terminal envia uma mensagem de notificação informando que está preparado para receber mensagens durante e janela de recepção que se abriu. Essas janelas se abrem com uma periodicidade pré-determinada até a recepção de um novo pacote de sincronização da rede.

A decisão por operar no modo Classe B parte da Camada de Aplicação do usuário, que deve orquestrar o envio de solicitação ao dispositivo terminal para iniciar o processo de ativação do modo de comunicação.

Essa classe é menos eficiente do ponto de vista de consumo de energia, porém é mais flexível para que o dispositivo terminal receba mensagens (ALLIANCE, Lora, 2017).

Classe C

Dispositivos operando na Classe C possuem uma janela de recepção de dados constantemente aberta, a menos durante os intervalos em que ele esteja transmitindo dados.

Dispositivos que operam na Classe C não devem operar na Classe B.

A Camada de Aplicação no servidor é quem conhece o fato de o dispositivo terminal operar em Classe C, cabendo a ela gerenciar as suas comunicações. (ALLIANCE, Lora, 2017).

Do ponto de vista de aplicação, a Classe C oferece o menor tempo de latência, uma vez que a recepção está sempre ativada no dispositivo terminal, contudo é a menos eficiente do ponto de vista de consumo de energia.

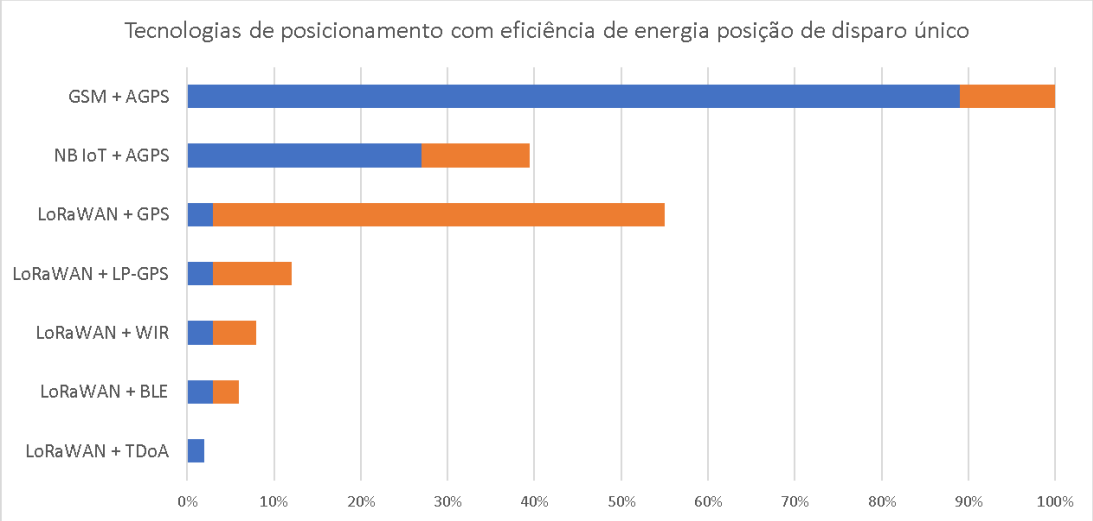
A Função ADR

O protocolo LoRaWAN™ suporta o mecanismo de Taxa de Dados Adaptativa ou *Adaptive Data Rate* (ADR). Esse mecanismo possibilita a adequação da taxa de transmissão de dados de um dispositivo terminal dependendo das condições da rede. O objetivo é reduzir o tempo de transmissão de mensagens, o que se traduz em um menor consumo de energia e por consequência uma maior vida útil da bateria. Ertürk *et al.* (2019).

Geolocalização

Quando se fala em aplicações nas quais o objeto monitorado pelo dispositivo IoT se encontra em locais de difícil acesso, ou ainda remotos, dispersos e com algum grau de movimentação, a aplicação de geolocalização é importante. Existem inúmeras aplicações, tais como gestão de ativos, rastreamento de encomendas, monitoramento de animais sejam domésticos ou para exploração econômica, entre muitas outras. Tecnologias convencionais de rastreamento são caras para adquirir e para manter. Assim, uma solução que não seja um alto consumidor de energia é bem-vinda para otimizar os Custos Totais de Propriedade ou *Total Cost of Ownership* (TCO). Na Figura 27 são comparadas diferentes soluções para fazer a geolocalização, considerando o consumo energético Yegin *et al.* (2020)

Figura 27 –Comparativo de consumo energético de soluções de geolocalização



Fonte: adaptado de Yegin et al. (2020).

Da Figura 27, percebe-se que o simples uso da tecnologia LoRaWAN™ combinada com outra tecnologia produz uma redução de ao menos 45% no consumo de energia. A seguir segue uma breve descrição das tecnologias apresentadas Yegin *et al.* (2020):

- **Sistema de Posicionamento Global ou *Global Positioning System* (GPS)**: são os sistemas de posicionamento baseados em sinais de satélite convencionais. Embora possibilitem uma elevada precisão da localização, são caros e tem um elevado consumo de energia. Adicionalmente, estão sujeitos às condições do tempo, principalmente durante o período de sincronização com os satélites;
- **GPS Assistido ou *Assisted GPS* (AGPS)**: nesta metodologia, dados orbitais, que tipicamente são carregados pelo dispositivo a partir dos satélites a uma taxa de transmissão baixa, estão previamente carregados em um servidor para que o dispositivo faça a descarga, teoricamente, em uma taxa mais elevada, consumindo menos energia. Devido às características da rede LoRaWAN™, bem como do dispositivo terminal, essa tecnologia não é relevante;
- **GPS de Baixa Potência ou *Low-Power GPS* (LP-GPS)**: nesta particularização da metodologia AGPS, algoritmos são utilizados para permitir a triangulação com o uso de apenas três satélites, o que melhora o desempenho da solução, tornando-a atrativa para uso combinado com LoRaWAN™;
- **Redes Wi-Fi e *Bluetooth Low-Energy* (WIR e BLE)**: são opções eficazes para aplicações em ambientes fechados;

- **Diferença do Tempo de Chegada ou *Time Difference of Arrival* (TDoA)**: baseia-se no tempo de chegada do sinal LoRa® transmitido por diferentes concentradores o que permite fazer uma triangulação da localização aproximada do dispositivo terminal. Embora tenha uma precisão inferior comparativamente a outros métodos, é o que apresenta a melhor eficiência energética, sendo indicado para aplicações em campo aberto em que a precisão da localização pode ser contornada pela aplicação do usuário.

Neste Apêndice foi apresentado um resumo das tecnologias LoRa® e LoRaWAN™, com o enfoque de seus parâmetros, que, adequadamente controlados, permitem uma comunicação eficiente, de elevado alcance e baixo consumo de energia, o que se traduz em eficiência operacional e baixos custos de manutenção.

Ainda há várias outras questões que merecem continuidade de análise para efeito de otimização, com destaque para:

- **Comandos de Camada de Enlace**: torna o controle da comunicação mais eficiente e adaptado às condições específicas da aplicação e do ambiente físico em que a implementação é realizada;
- **Metodologia para Atualização de *Firmware* pela Rede Sem Fio ou *Firmware Update Over the Air* (FUOTA)**: essa ferramenta de manutenção permite a adoção de um modelo operacional simplificado, uma vez que atualizações de software não requerem enviar uma equipe de campo para esse fim.

APÊNDICE B – Consumo de Energia em LoRa® e LoRaWAN™

Interpretando o gráfico da Figura 8, tem-se:
A energia consumida total será dada pela somatória (Equação 9):

$$\boldsymbol{E_T = E_{Ativa} + E_{Sleep}} \tag{9}$$

sendo que E_{Ativa} corresponde à soma dos itens 1 a 6 da Figura 8 e E_{Sleep} corresponde ao item 7.
No artigo é possível encontrar a totalidade das equações que desenvolvidas. Para efeito desse estudo, foi limitado às que representam grandezas de impacto no consumo de energia elétrica.

Detalhamento dos , de acordo com Bouguera *et al.* (2018):

1. *Wake-up* do Sistema: representa trazer o sistema para o modo operacional. Cada microcontrolador possui características próprias para sair do modo de economia de energia para o modo operacional. A energia consumida nessa fase pode ser expressa pela equação:

$$\boldsymbol{E_{WU} = P_{ON}(f_{MCU}).T_{WU}} \tag{10}$$

onde:

E_{WU}	Energia utilizada para a tarefa de entrar em modo operacional
$P_{ON}(f_{MCU})$	Potência do microcontrolador em função da sua frequência de operação f_{MCU}
T_{WU}	Tempo de duração da tarefa de wake-up

2. Medição: representa a tarefa que o sensor desempenha para medir a grandeza requerida. A energia consumida nessa fase pode ser expressa pela equação:

$$\boldsymbol{E_m = (P_{ON}(f_{MCU}) + P_m).T_m} \tag{11}$$

onde:

E_m	Energia utilizada para a tarefa de entrar em modo operacional

$P_{ON}(f_{MCU})$	Potência do microcontrolador em função da sua frequência de operação f_{MCU}
P_m	Potência consumida pelo sensor na tarefa de medição. Os autores do estudo atribuem a essa tarefa também a conversão do sinal de analógico para digital
T_m	Tempo de duração da tarefa de medição

3. Processamento de Dados: representa a tarefa de preparar os dados para serem enviados para um servidor, onde serão tomadas decisões. A energia consumida nessa fase pode ser expressa pela equação:

$$\boldsymbol{E_{Proc} = P_{ON}(f_{MCU}).T_{Proc}(f_{MCU})} \quad (12)$$

onde:

E_{Proc}	Energia utilizada para a tarefa de entrar em modo operacional
$P_{ON}(f_{MCU})$	Potência do microcontrolador em função da sua frequência de operação f_{MCU}
$T_{Proc}(f_{MCU})$	Tempo de duração da tarefa de processamento. Esse tempo depende da frequência de operação f_{MCU} do microcontrolador e do número de instruções utilizadas no processamento. Assim, $\boldsymbol{T_{Proc}(f_{MCU}) = \frac{N_{Inst}}{f_{MCU}}}$. No estudo, os autores utilizaram uma instrução por período do clock

4. Wake-up Transceptor: representa trazer o transceptor para o modo operacional, inicializado e pronto para transmitir e receber mensagens. A energia consumida nessa fase pode ser expressa pela equação:

$$\boldsymbol{E_{WUT} = (P_{ON}(f_{MCU}) + P_{WUT}).T_{WUT}} \quad (13)$$

onde:

E_{WUT}	Energia utilizada para a tarefa de o Transceptor entrar em modo operacional
$P_{ON}(f_{MCU})$	Potência do microcontrolador em função da sua frequência de operação f_{MCU}
P_{WUT}	Potência consumida pelo trasnceptor na tarefa de se inicializar.
T_{WUY}	Tempo de duração da tarefa de inicialização do Transceptor

5. Transmissão de Dados: refere-se à tarefa de transmitir mensagens. A energia consumida nessa fase pode ser expressa pela equação:

$$\boldsymbol{E_{TR}} = (\boldsymbol{P_{ON}}(\boldsymbol{f_{MCU}}) + \boldsymbol{P_{TR}}).\boldsymbol{T_{TR}} \quad (14)$$

onde:

E_{TR}	Energia utilizada para a tarefa de o Transceptor transmitir uma mensagem
$P_{ON}(f_{MCU})$	Potência do microcontrolador em função da sua frequência de operação f_{MCU}
P_{TR}	Potência consumida pelo trasnceptor na tarefa de transmitir a mensagem
T_{TR}	Tempo de duração da tarefa de transmissão. Esse tempo vai variar em função da quantidade de bits que compõem a mensagem e do tempo de transmissão de cada bit. Como visto na seção sobre a tecnologia LoRa/LoRaWAN, esse é um parâmetro configurável em função das características da aplicação. De forma geral, $\boldsymbol{T_{TR}} = \boldsymbol{N_{BIT}}.\boldsymbol{T_{BIT}}$

6. Recepção de Dados: refere-se à tarefa de receber mensagens. Isso pode ocorrer apenas para o caso de transmissões com confirmação de chegada no destino, ou quando a outra ponta necessita enviar uma mensagem para o dispositivo IoT, por exemplo, para uma atualização de *firmware*. A energia consumida nessa fase pode ser expressa pela equação:

$$\boldsymbol{E_{R}} = (\boldsymbol{P_{ON}}(\boldsymbol{f_{MCU}}) + \boldsymbol{P_{R}}).\boldsymbol{T_{R}} \quad (15)$$

onde:

E_{R}	Energia utilizada para a tarefa de o Transceptor receber uma mensagem
$P_{ON}(f_{MCU})$	Potência do microcontrolador em função da sua frequência de operação f_{MCU}
P_{R}	Potência consumida pelo trasnceptor na tarefa de receber a mensagem
T_{R}	Tempo de duração da tarefa de transmissão. Esse tempo vai variar em função da quantidade de bits que compõem a mensagem e do tempo de recepção de cada bit. A mesma observação quanto ao tempo de transmissão vale para a recepção, ou seja, depende dos parâmetros de configuração da rede e especialmente do protocolo LoRaWAN™. Cabe ainda ressaltar, que a recepção de mensagens segue a configuração da rede e não a do dispositivo, o que pode significar um consumo de energia

diferente. Assim, deve ser considerados os cálculos para ambos os casos separadamente.

7. Modo *Sleep*: esse modo representa o estado de menor energia do dispositivo, em que algum de seus periféricos pode ser deixado como referência para dar início ao processo de desperar do dispositivo. Para aplicações com restrição de fonte de energia, como é o caso analisado neste trabalho, é desejado que o dispositivo mantenha-se o maior tempo possível no modo de baixo consumo de energia, para prolongar sua vida útil. A energia consumida nessa fase pode ser expressa pela equação:

$$\boldsymbol{E_{Sleep} = P_{Sleep}.T_{Sleep}} \tag{16}$$

onde:

E_{Sleep}	Energia utilizada durante o período em que o dispositivo se mantém em modo de baixo consumo de energia
P_{Sleep}	Potência consumida no modo de baixa energia
T_{Sleep}	Tempo de duração do modo de baixa energia

Finalmente, o estudo estabelece a energia consumida por bit transmitido:

$$\boldsymbol{E_{bit} = \frac{P_{cons}(P_{Tr}).\left(N_{Payload} + N_P + 4,25\right).2^{SF}}{8.PL.BW}} \tag{17}$$

onde:

E_{bit}	Energia utilizada para a transmissão de um bit útil
$P_{cons}(P_{Tr})$	Potência total consumida em função da potência de transmissão
$N_{Payload}$	Número de símbolos utilizados para transmitir a carga útil
N_P	Número de símbolos do preâmbulo
SF	Fator de Espalhamento (7 a 12)
PL	Carga Útil em bytes
BW	Largura de banda utilizada na rede LoRa

Neste Apêndice B, foram demonstrados os cálculos realizados para a obtenção de um impotante fator estimador do consumo de energia que é a energia consumida para a transmissão de um bit.