



Centro de Tecnologia e Urbanismo  
Departamento de Engenharia Elétrica

**João Vinícius Bueno**

# **Desenvolvimento de Rede de Sensores Sem Fio Baseada na Tecnologia LoRaWAN**

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
da Universidade Estadual de Londrina  
para obtenção do Título de Mestre em  
Engenharia Elétrica.

Londrina, PR  
2021



João Vinícius Bueno

# Desenvolvimento de Rede de Sensores Sem Fio Baseada na Tecnologia LoRaWAN

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Eletrônicos  
Especialidade: Instrumentação Eletrônica

Orientadora:  
Profa. Dra. Maria Bernadete de Moraes  
França

Londrina, PR  
2021



## **Ficha Catalográfica**

Bueno, João Vinícius

Desenvolvimento de Rede de Sensores Sem Fio Baseada na Tecnologia LoRaWAN. Londrina, PR, 2021. 60 p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina, PR. Departamento de Engenharia Elétrica .

1. Internet das Coisas. 2. Rede de Sensores Sem Fio. 3. Comunicação Sem Fio. 4. LoRa. 5. LoRaWAN. I. Universidade Estadual de Londrina. Departamento de Engenharia Elétrica . II. Desenvolvimento de Rede de Sensores Sem Fio Baseada na Tecnologia LoRaWAN.

João Vinícius Bueno

# Desenvolvimento de Rede de Sensores Sem Fio Baseada na Tecnologia LoRaWAN

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Uni-  
versidade Estadual de Londrina para obtenção  
do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Eletrônicos  
Especialidade: Instrumentação Eletrônica

## Comissão Examinadora

---

Profa. Dra. Maria Bernadete de Moraes  
França  
Depto. de Engenharia Elétrica  
Orientadora

---

Prof. Dr. José Alexandre de França  
Depto. de Engenharia Elétrica  
Universidade Estadual de Londrina

---

Prof. Dr. Luis Fernando Caparroz Duarte  
Depto. de Engenharia Elétrica  
UTFPR Cornélio Procópio

14 de julho de 2021

Dedico este trabalho aos meus pais, minha irmã, minha namorada, aos amigos e todos aqueles que sempre me apoiaram e acreditaram em mim.

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus que me permitiu enfrentar todas as dificuldades da vida e chegar até esse momento.

Agradeço aos meus pais, João Tavares Bueno e Zélia Ferreira de Rezende Bueno, que me deram todo o apoio e o incentivo para atingir meus objetivos, e também à minha irmã Aline de Rezende Bueno, que esteve comigo por toda a caminhada.

Agradeço especialmente à minha namorada Ana Lara de Goes, que todos os dias esteve comigo e me incentivou a nunca desistir e a sempre ser melhor.

Agradeço à minha orientadora Maria Bernadete de Moraes França e aos membros da banca examinadora por todos os conselhos, suporte e contribuições durante o trabalho, bem como a todos os professores do departamento pelos conhecimentos e ensinamentos passados.

Agradeço aos meus companheiros de laboratório, que me ajudaram em todos os momentos e que, com certeza, sem eles, eu não teria chegado até aqui. E agradeço também a todos aqueles que de alguma forma estiveram comigo durante esses anos e que contribuíram para meu crescimento.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

# Resumo

LPWAN é um termo usado para nomear uma tecnologia que permite comunicação em áreas amplas, com baixo custo de implantação e melhor consumo de energia, o que é adequado para aplicações IoT. Esse conceito pode ser aplicado nas mais diferentes áreas, porém, cada aplicação tem suas características próprias. Assim, surgiu a definição de Rede de Sensores Sem Fio, que possui a capacidade de coletar diversos tipos de dados de um ambiente ou sistema e transmiti-los para uma central por meio de protocolos de comunicação sem fio. O presente trabalho tem como objetivos desenvolver uma Rede de Sensores Sem Fio utilizando a tecnologia LoRaWAN e fazer a caracterização dos parâmetros construtivos dos nós sensores, com a medição do consumo de corrente e distância máxima alcançada na comunicação para cada modo de operação. Foram desenvolvidos quatro nós sensores utilizando o módulo Radioenge LoRaWAN em conjunto com uma placa de desenvolvimento STM32F4 Discovery para atuar como microcontrolador externo, além do sensor de temperatura e umidade relativa HDC1080, o sensor de luminosidade BH1750FVI e o sensor capacitivo de umidade do solo. Também foi usado o *gateway* Radioenge LoRaMESH para repassar os dados coletados pelos nós sensores para o servidor de rede *The Things Network*. Foi possível realizar a comunicação sem fio com a tecnologia LoRa e o protocolo LoRaWAN, onde os dados foram recepcionados pelo servidor, mesmo que alguns dados tenham sido perdidos durante o processo. Em uma primeira versão da implementação do sistema, o consumo médio de corrente dos nós sensores ficou acima de 80 mA, fazendo com que o tempo de vida da bateria fosse de aproximadamente 6 horas com a bateria alcalina de 9 V. Na segunda versão, foi utilizada uma bateria LiPo de 7,4 V, um conversor CC-CC e foi feito o aprimoramento do *software* dos nós sensores, o consumo foi reduzido para 43 mA e o tempo elevado para 58 horas. Os dados puderam ser transmitidos por comunicação sem fio até uma distância de 3.000 metros e puderam ser tratados diretamente no servidor de rede e disponibilizados para visualização no mesmo.

**Palavras-chaves:** Internet das Coisas; Rede de Sensores Sem Fio; Comunicação Sem Fio; LoRa; LoRaWAN.

# Abstract

LPWAN is a term used to name a technology that allows communication in wide areas, with low cost of implantation and better energy consumption, which is suitable for IoT applications. This concept can be applied in the most different areas, however, each application has its own characteristics. Thus, the definition of Wireless Sensor Network arose, which has the capacity to collect various types of data from an environment or system and transmit it to a central through wireless communication protocols. The present work aims to develop a Wireless Sensor Network using LoRaWAN technology and characterize the constructive parameters of the sensor nodes, with the measurement of current consumption and maximum distance achieved in the communication for each operating mode. Four sensor nodes were developed using the Radioenge LoRaWAN module together with an STM32F4 Discovery development board to act as an external microcontroller, in addition to the HDC1080 temperature and relative humidity sensor, the BH1750FVI light sensor and the capacitive soil moisture sensor. Radioenge LoRaMESH gateway was also used to pass the data collected by the sensor nodes to the The Things Network network server. It was possible to carry out wireless communication with LoRa technology, where the data was received by the server, even if some data was lost during the process. In a first version of the system implementation, the average current consumption of the sensor nodes was above 80 mA, making the battery life time approximately 6 hours with the 9 V alkaline battery. In the second version, a 7,4 V LiPo battery was used, with a DC-DC converter and the improvement of the sensor node's software, the consumption was reduced to 43 mA and the time increased to 58 hours. The data could be transmitted wirelessly up to a distance of 3.000 meters and could be processed directly on the network server and made available for viewing on it.

**Keywords:** Internet of Things; Wireless Sensor Network; Wireless Communication; LoRa; LoRaWAN.

# Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Abreviaturas

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos . . . . .	4
1.1.1	Objetivos Gerais . . . . .	4
1.1.2	Objetivos Específicos . . . . .	5
1.2	Estrutura do Trabalho . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>6</b>
2.1	Rede de Sensores Sem Fio . . . . .	6
2.1.1	Topologias de Redes de Sensores Sem Fio . . . . .	8
2.1.2	Estrutura de uma Rede de Sensores . . . . .	10
2.2	LoRa e LoRaWAN . . . . .	10
2.2.1	LoRa . . . . .	11
2.2.2	LoRaWAN . . . . .	13
2.2.3	Arquitetura LoRaWAN . . . . .	15
2.3	Trabalhos Relacionados . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Materiais e Métodos</b>	<b>21</b>
3.1	Dispositivos Utilizados . . . . .	21
3.1.1	Módulo de Transmissão . . . . .	21
3.1.2	Gateway . . . . .	23

3.1.3	Conjunto de Sensores . . . . .	24
3.1.4	Microcontrolador . . . . .	26
3.1.5	Servidor de Rede . . . . .	27
3.2	Desenvolvimento . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussão</b>	<b>34</b>
4.1	Montagem dos Nós Sensores . . . . .	34
4.2	Consumo de Corrente e Tempo de Vida da Bateria . . . . .	36
4.3	Distância de Comunicação . . . . .	45
4.4	Recepção e Tratamento dos Dados . . . . .	46
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>51</b>
5.1	Conclusão . . . . .	51
5.2	Trabalhos Futuros . . . . .	52
	<b>Anexo A – Comandos AT</b>	<b>53</b>
A.1	Formato dos Comandos . . . . .	53
A.2	Lista de Comandos . . . . .	53
	<b>Anexo B – Datasheet Bateria 9 V</b>	<b>55</b>
	<b>Anexo C – Manual Bateria LiPo 7,4 V</b>	<b>56</b>
	<b>Referências</b>	<b>58</b>



# Lista de Figuras

1.1	Alcance e uso de largura de banda da LPWAN comparada a outras tecnologias de comunicação. . . . .	2
2.1	Modelo de uma Rede de Sensores Sem Fio. . . . .	7
2.2	Diagrama de blocos de um nó sensor básico. . . . .	7
2.3	Exemplo de consumo de corrente de um nó sensor. . . . .	8
2.4	Topologias usadas em Redes de Sensores Sem Fio. . . . .	9
2.5	Estrutura de transmissão de dados em Redes de Sensores Sem Fio. . . . .	11
2.6	<i>Up-chirps</i> e <i>down-chirps</i> não modulados. . . . .	12
2.7	Exemplo de dados modulados em <i>Chirp Spread Spectrum</i> . . . . .	12
2.8	Janelas de recepção das classes do LoRaWAN. . . . .	17
3.1	The Things Node. . . . .	22
3.2	STM32L0 Discovery Kit LoRa. . . . .	22
3.3	Módulo Radioenge LoRaWAN. . . . .	23
3.4	<i>Gateway</i> Radioenge LoRaMESH. . . . .	24
3.5	Sensores utilizados para coleta de dados. . . . .	25
3.6	Arduino Uno. . . . .	27
3.7	Placa de desenvolvimento STM32F4 Discovery. . . . .	28
3.8	Registro do <i>gateway</i> no servidor de rede. . . . .	29
3.9	Registro de um nó sensor no servidor de rede. . . . .	30
3.10	Chaves utilizadas na configuração dos nós sensores. . . . .	31
3.11	Fluxograma de funcionamento dos nós sensores no modo <i>RUN</i> . . . . .	32
3.12	Fluxograma de funcionamento dos nós sensores no modo <i>STOP</i> . . . . .	33
4.1	Placa para alimentação dos componentes dos nós sensores. . . . .	35

4.2	Nó sensor sendo montado dentro de caixa plástica com bateria alcalina de 9 V e reguladores de tensão lineares. . . . .	35
4.3	Bateria LiPo de 7,4 V e 2500 mAh. . . . .	36
4.4	Conversor CC-CC Step Down com saída fixa em 5 V. . . . .	36
4.5	Nó sensor sendo montado dentro de caixa plástica com bateria LiPo de 7,4 V e conversor CC-CC. . . . .	37
4.6	Dados recebidos no servidor de rede a cada 1 minuto. . . . .	38
4.7	Gráfico dos valores de corrente consumida pelo nó sensor na configuração SF9 e 125 kHz. . . . .	43
4.8	Função de tratamento dos dados no servidor de rede. . . . .	47
4.9	Dados recebidos no servidor de rede a cada 20 minutos e com valores convertidos para o primeiro nó sensor. . . . .	48
4.10	Dados recebidos no servidor de rede a cada 20 minutos e com valores convertidos para o segundo nó sensor. . . . .	48
4.11	Dados recebidos no servidor de rede a cada 20 minutos e com valores convertidos para o terceiro nó sensor. . . . .	49
4.12	Dados recebidos no servidor de rede a cada 20 minutos e com valores convertidos para o quarto nó sensor. . . . .	50

# Lista de Tabelas

2.1	<i>Data Rate</i> para o padrão australiano de 915 MHz. . . . .	14
4.1	Consumo de corrente do nó sensor na operação em Classe A a cada 1 minuto, modo <i>RUN</i> . . . . .	39
4.2	Período de duração dos eventos do nó sensor na operação em Classe A a cada 1 minuto, modo <i>RUN</i> . . . . .	39
4.3	Corrente média e duração da bateria do nó sensor na operação em Classe A a cada 1 minuto, modo <i>RUN</i> . . . . .	40
4.4	Corrente média e duração da bateria do nó sensor na operação em Classe A a cada 20 minutos, modo <i>RUN</i> . . . . .	40
4.5	Consumo de corrente do nó sensor na operação em Classe A a cada 1 minuto, modo <i>STOP</i> . . . . .	42
4.6	Período de duração dos eventos do nó sensor na operação em Classe A a cada 1 minuto, modo <i>STOP</i> . . . . .	42
4.7	Corrente média e duração da bateria do nó sensor na operação em Classe A a cada 1 minuto, modo <i>STOP</i> . . . . .	43
4.8	Corrente média e duração da bateria do nó sensor na operação em Classe A a cada 20 minutos, modo <i>STOP</i> . . . . .	44
4.9	Corrente consumida por cada componente isolado, em modo <i>STOP</i> . . . . .	44
4.10	Distâncias máximas alcançadas pela comunicação sem fio LoRa. . . . .	45
A.1	Lista de comandos AT. . . . .	54

# Lista de Abreviaturas

**ABP** Activation by Personalization

**ADR** Adaptative Data Rate

**CSS** Chirp Spread Spectrum

**GPS** Global Positioning System

**IoT** Internet of Things

**ISM** Industrial, Scientific and Medical

**LoRa** Long Range

**LoRaWAN** Long Range Wide Area Network

**LPWAN** Low Power Wide Area Network

**NB-IoT** Narrowband - Internet of Things

**RSSF** Rede de Sensores Sem Fio

**RTC** Real Time Clock

**SF** Spreading Factor

**SNR** Signal to Noise Ratio

**TTN** The Things Network

# 1 Introdução

Nos últimos anos, a Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) se tornou um dos tópicos mais promissores nas áreas técnica, social e econômica. Essa expressão foi inventada por Kevin Ashton em 1999 e o termo normalmente se refere a cenários onde a conectividade com a rede e a capacidade computacional estão embarcadas nos objetos, ou seja, representa um conceito geral para a habilidade de objetos ligados em uma rede, que coletam dados do ambiente ao seu redor e os compartilham através da internet. Eles geram, trocam e consomem dados com o mínimo de intervenção humana.

Com o crescimento massivo das tecnologias IoT, um número cada vez maior de aplicações práticas podem ser encontradas em muitos campos, incluindo segurança, rastreamento, agricultura, medição, cidades e casas inteligentes (MEKKI et al., 2019). Isso permitiu o surgimento de carros autônomos, transporte eficiente de bens, economia de energia em edificações e iluminação pública, melhoria no uso de terras agrícolas, conexão de áreas remotas e até mesmo a proteção da vida selvagem. Segundo Daecher e Schmid (2016), “a IoT possui potencial para impactar na vida humana em grande escala. Por exemplo, em um mundo onde a fome persiste, as técnicas de ‘agricultura inteligente’ usam dados de sensores focados no clima, condições do solo e controle de pestes para ajudar os fazendeiros a melhorar a produtividade de suas plantações”.

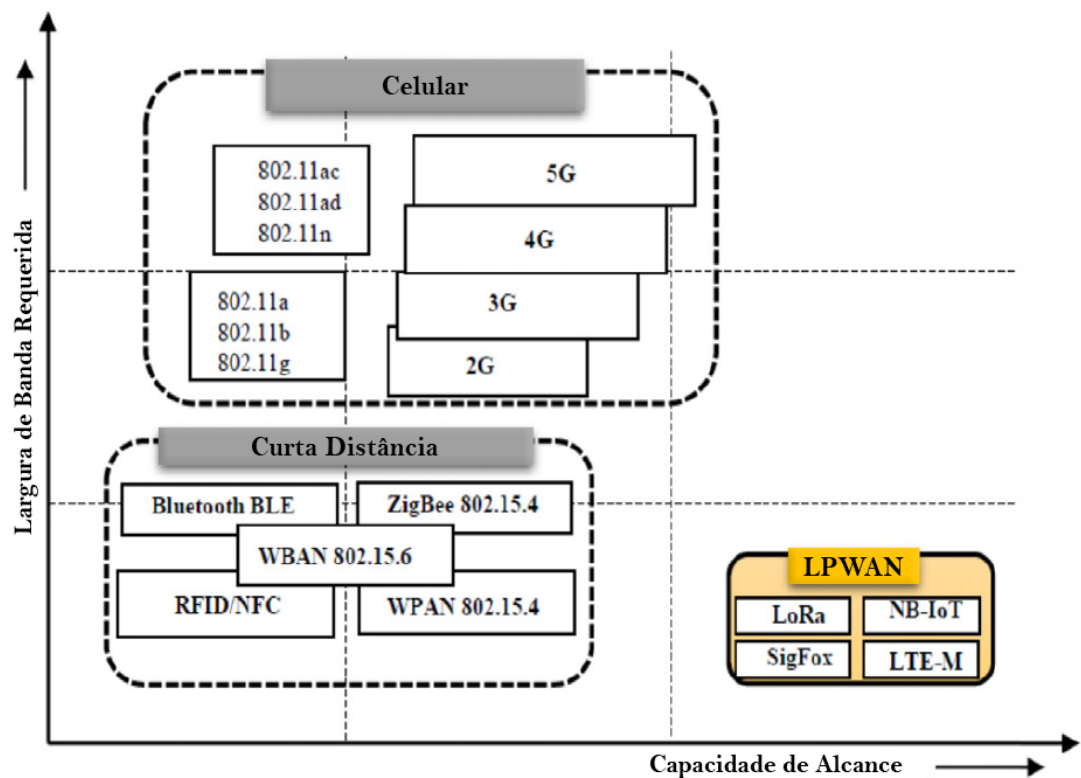
Muitas iniciativas que utilizam o conceito de IoT focam primeiramente no sensoramento, implantando e arranjando *hardware*, *software* e dispositivos para coletar e transmitir dados. Porém, esses passos preliminares são apenas o começo, pois eles podem se tornar processos totalmente automatizados (DAECHER; SCHMID, 2016).

As aplicações IoT muitas vezes possuem requisitos específicos, como longo alcance, baixa taxa de transmissão de dados e baixo consumo de energia. Isso faz com que tecnologias de rádio de baixo alcance e soluções baseadas em comunicação por rede de celular, que consomem muita energia, não se adaptem às necessidades. Dessa forma, fez-se necessário o surgimento da tecnologia de comunicação sem fio

conhecida como *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) (MEKKI et al., 2019).

LPWAN é um termo usado para nomear uma tecnologia que permite comunicação em áreas amplas, com baixo custo de implantação e melhor consumo de energia. Uma comparação entre as tecnologias existentes é mostrada na Figura 1.1. A comunicação LPWAN é adequada para aplicações IoT, que só precisam transmitir pequenas quantidades de informação a uma longa distância (SINHA; WEI; HWANG, 2017).

**Figura 1.1:** Alcance e uso de largura de banda da LPWAN comparada a outras tecnologias de comunicação.



Fonte: Adaptado de Sinha, Wei e Hwang (2017).

Segundo Mekki et al. (2019), “muitas tecnologias LPWAN surgiram tanto em bandas de frequência licenciadas quanto em não licenciadas. Entre elas, Sigfox, LoRaWAN e NB-IoT são as tecnologias emergentes líderes atualmente”. Como em muitos casos os dispositivos IoT são alimentados por bateria, o perfil de uso de energia deve ser cuidadosamente desenvolvido para estender seu tempo de vida. O alcance da comunicação precisa ir de centenas de metros até vários quilômetros, já que os dispositivos são distribuídos em uma grande área de operação (HAXHI-BEQIRI et al., 2018).

Os conceitos que envolvem a IoT e LPWAN podem ser aplicados nas mais diferentes áreas de conhecimento e nos mais diversos ambientes de monitora-

mento. Porém, cada aplicação tem características próprias e diferentes entre si, o que faz com que, apesar dos conceitos básicos serem similares, as características construtivas e organizacionais sejam bastante diferentes.

Uma das áreas na qual se enquadra a aplicação dessas tecnologias é a Agricultura de Precisão. Durante muito tempo, os conceitos da agricultura convencional dominaram o sistema produtivo mundial. Nessa prática, os insumos são aplicados de maneira homogênea sobre toda a área de produção, bem como todo campo é irrigado em quantidade igual e em períodos pré-determinados. Nenhum estudo mais profundo é realizado e não são levadas em consideração as necessidades específicas de cada parte do campo de cultivo, tendo como resultado uma lavoura com produtividade não uniforme.

Para modificar esse cenário, surgiu a Agricultura de Precisão. Esse tipo de sistema de manejo está fundamentado no conceito de que o espaço e o tempo influenciam nos rendimentos do cultivo. A Agricultura de Precisão visa o gerenciamento mais detalhado do sistema de produção agrícola como um todo, não somente das aplicações de insumos ou de mapeamentos diversos, mas de todos os processos envolvidos na produção (EMBRAPA, 2015). O principal conceito é aplicar os insumos no local correto, no momento adequado, as quantidades de insumo necessárias à produção agrícola, para áreas cada vez menores e mais homogêneas, tanto quanto a tecnologia e os custos envolvidos o permitam (NUNES, 2016). Portanto, é importante levar em conta a diversidade de condições que existe no campo e tomar ações de acordo com as diferenças, buscando a melhoria do manejo das culturas, diminuição da contaminação do solo, aperfeiçoamento do uso de insumos, redução dos custos de produção e aumento da produtividade.

Outra área possível de aplicação é o ambiente florestal. Incêndios florestais são motivos de preocupação em âmbito mundial devido aos prejuízos por eles causados, tanto no aspecto econômico quanto na biodiversidade. Mesmo com um número considerável de satélites sendo utilizados, algumas queimadas não são possíveis de serem detectadas, pois algumas condições, como nuvens, queimadas de pequena duração e imprecisão na localização do foco de queima, impedem ou prejudicam a detecção (MONCKS et al., 2016).

A eficiência no combate aos incêndios florestais está diretamente ligada à rapidez na detecção e precisão na localização do evento, minimizando assim os danos causados. A melhor forma de combater um incêndio florestal é através de sua prevenção. Segundo Moncks et al. (2016), “abordagens capazes de proporcionar monitoramento de uma área maior, com envio de dados em intervalos menores ou

até mesmo *online*, seriam aquelas baseadas em RSSFs (Redes de Sensores Sem Fio)”.

Outra possibilidade ainda é o monitoramento da performance de plantas solares fotovoltaicas. Um dos desafios do século 21 é fornecer energia para a humanidade de forma segura, limpa e sustentável. Fontes fotovoltaicas são atualmente uma das soluções industriais líderes por causa de sua alta densidade de energia, segurança de fornecimento e sustentabilidade (SHUDA; RIX; BOOYSEN, 2018).

A adição de recursos solares fotovoltaicos à rede elétrica introduz vários novos desafios, como geração intermitente, geração de harmônicos extras e perda de inércia devido aos sistemas fotovoltaicos estarem substituindo os geradores convencionais. Segundo Shuda, Rix e Booysen (2018), “os principais problemas que os operadores de rede tem que lidar diariamente são a flutuação que acontece na tensão e a instabilidade da frequência”. O monitoramento dos parâmetros de saída de uma planta fotovoltaica é crucial para assegurar que os operadores de rede possam gerenciar efetivamente as flutuações causadas por ela. Os dois principais fatores que determinam a saída de um módulo solar são temperatura e irradiação solar. Medições detalhadas são necessárias pois esses parâmetros variam constantemente devido à variação do clima, as quais podem ser realizadas com as Redes de Sensores Sem Fio.

Com isso, verifica-se que as mais diversas áreas de aplicação podem contar com a implementação de sistemas de monitoramento baseados em LPWAN e IoT, de forma a melhorar a performance de sistemas ou até mesmo realizar a prevenção de problemas.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivos Gerais

O presente trabalho tem como objetivos gerais desenvolver uma Rede de Sensores Sem Fio, utilizando os conceitos de IoT e LPWAN, a partir da tecnologia de comunicação sem fio LoRa e do protocolo LoRaWAN, fazer a caracterização dos parâmetros construtivos dos nós sensores, com a medição do consumo de corrente e distância máxima alcançada na comunicação para cada modo de operação e obter dados reais dos sensores para validar o funcionamento do sistema. Para isso, utilizou-se sensores conectados a nós para transmitir os dados coletados através do protocolo de comunicação sem fio até o servidor de rede para posterior tratamento.



### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver uma Rede de Sensores Sem Fio funcional utilizando a tecnologia de comunicação LoRa e o protocolo LoRaWAN;
- Medir o consumo energético de um nó sensor para estimar o tempo de vida da bateria em cada modo de operação;
- Medir a distância máxima que um nó sensor pode alcançar da estação base em cada modo de operação;
- Coletar dados reais dos sensores para validar o funcionamento do sistema.

## 1.2 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo o primeiro a introdução ao tema, onde são abordadas as motivações e os objetivos do trabalho.

O Capítulo 2 aborda de forma mais detalhada as componentes e os aspectos que consistem em uma Rede de Sensores Sem Fio e se aprofunda nas características da tecnologia LoRa e do protocolo LoRaWAN, bem como apresenta alguns trabalhos relacionados ao tema.

O Capítulo 3 descreve o desenvolvimento do sistema proposto e os materiais e métodos utilizados na implementação da Rede de Sensores sem Fio.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos com o sistema e é feita uma discussão sobre os mesmos.

Por fim, no Capítulo 5, é apresentada uma conclusão sobre o trabalho e algumas propostas de trabalhos futuros.

## 2 Fundamentação Teórica

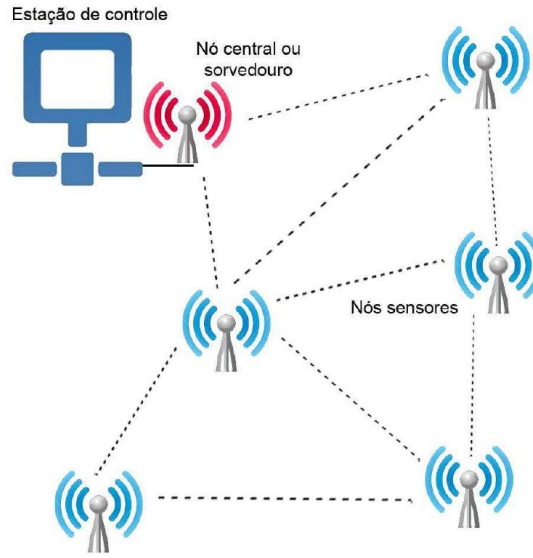
### 2.1 Rede de Sensores Sem Fio

Algumas aplicações com as tecnologias IoT e LPWAN possuem a necessidade de concentrar uma grande quantidade de sensores espalhados por uma área, podendo chegar a milhares de dispositivos. Dessa forma, é importante incorporá-los em uma rede, sendo possível o controle e a troca de informações entre si. Com isso, surgiu a definição de Rede de Sensores Sem Fio (RSSF).

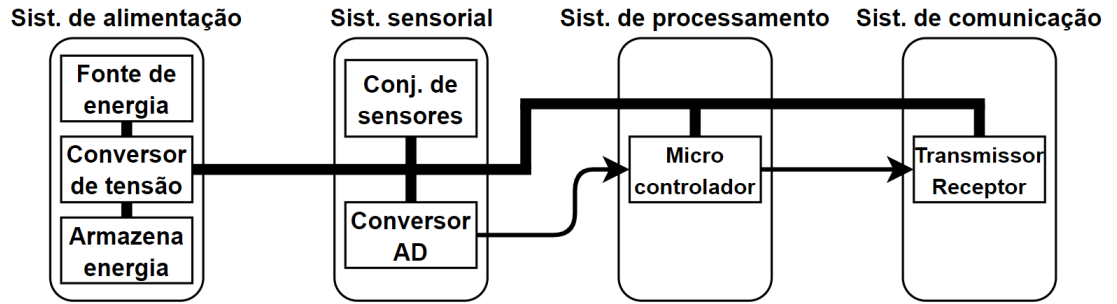
Uma RSSF possui a capacidade de coletar diversos tipos de dados de um ambiente ou sistema e transmiti-los para uma central por meio de protocolos de comunicação sem fio. Com as informações obtidas, pode-se tomar as decisões necessárias para o completo controle de uma área extensa. Essas redes têm características muito específicas, decorrentes das restrições de *hardware* e *software*. Esses aspectos condicionam a sua organização, as topologias e a forma como as componentes do modelo de referência interagem e se organizam (SILVA; SILVA; BOAVIDA, 2016). Portanto, uma RSSF é um conjunto de nós sensores com capacidade de se agrupar em uma rede, sendo que um dos nós pode ser uma central, com o objetivo de monitorar fenômenos físicos. A Figura 2.1 mostra um exemplo de Rede de Sensores Sem Fio com múltiplos nós sensores.

Segundo Silva, Silva e Boavida (2016), “cada nó sensor é constituído por uma bateria, um microprocessador, uma memória, um sistema básico de transmissão/recepção e um conjunto de sensores”, porém, em nós mais complexos ainda podem haver outros componentes, como sistemas de carregamento da bateria, painéis solares para a alimentação ou sistema GPS. A Figura 2.2 mostra o diagrama de blocos dos componentes de um nó sensor básico.

Uma das características chave das RSSFs é o seu baixo consumo de energia, visto que os nós sensores são normalmente alimentados por bateria. É comum encontrar afirmações de que os dispositivos podem operar por alguns anos utilizando uma bateria de pequeno porte (SMEEKS; LOENEN; POL, 2020). Dessa

**Figura 2.1:** Modelo de uma Rede de Sensores Sem Fio.

Fonte: Carvalho et al. (2012).

**Figura 2.2:** Diagrama de blocos de um nó sensor básico.

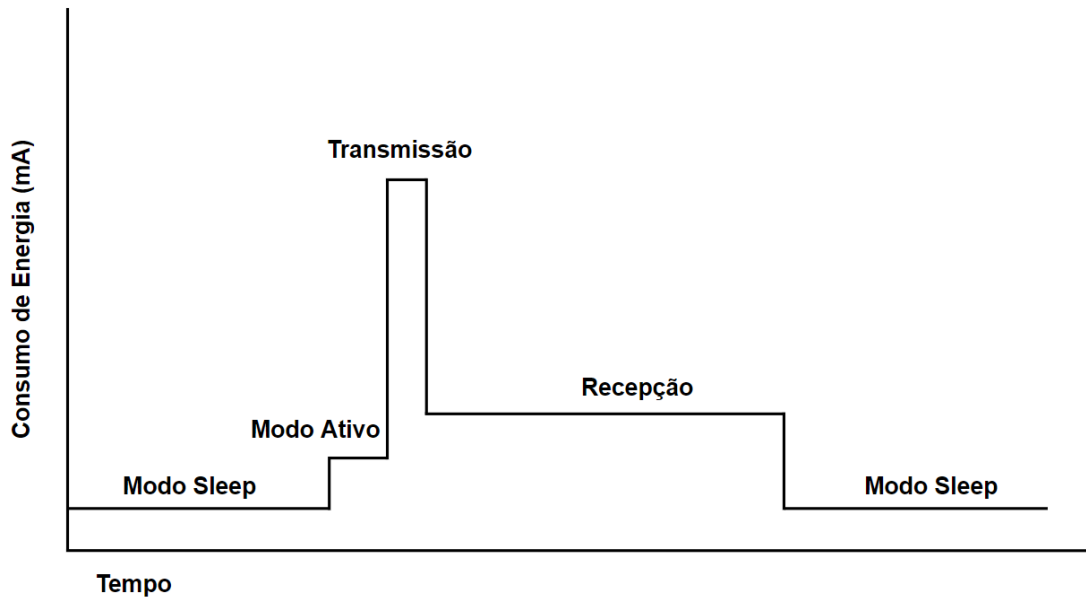
Fonte: Adaptado de Silva, Silva e Boavida (2016).

forma, torna-se viável estimar o tempo de vida aproximado que um nó sensor pode ter baseado nas características de consumo de energia e da bateria. A seguinte equação descreve esse cálculo,

$$t_{Bat} = \frac{Cap_{Bat}}{I_{Med}}, \quad (2.1)$$

onde  $t_{Bat}$  é o tempo de vida da bateria, em horas,  $Cap_{Bat}$  é a capacidade da bateria, em Ampère-hora, e  $I_{Med}$  é a corrente média consumida, em Ampère.

Porém, o que define o tempo de vida dos nós é, principalmente, sua forma de uso, visto que o maior consumo de energia se dá no momento da transmissão de um dado, mas a maior parte do tempo ele se encontra em estado de espera. Esse consumo varia no tempo de acordo com a ação que o nó sensor precisa fazer em determinado momento, como mostra a Figura 2.3.

**Figura 2.3:** Exemplo de consumo de corrente de um nó sensor.

Fonte: Adaptado de Smeeks, Loenen e Pol (2020).

Assim, para se obter o consumo médio de corrente de um nó sensor no tempo, é necessário utilizar a seguinte equação,

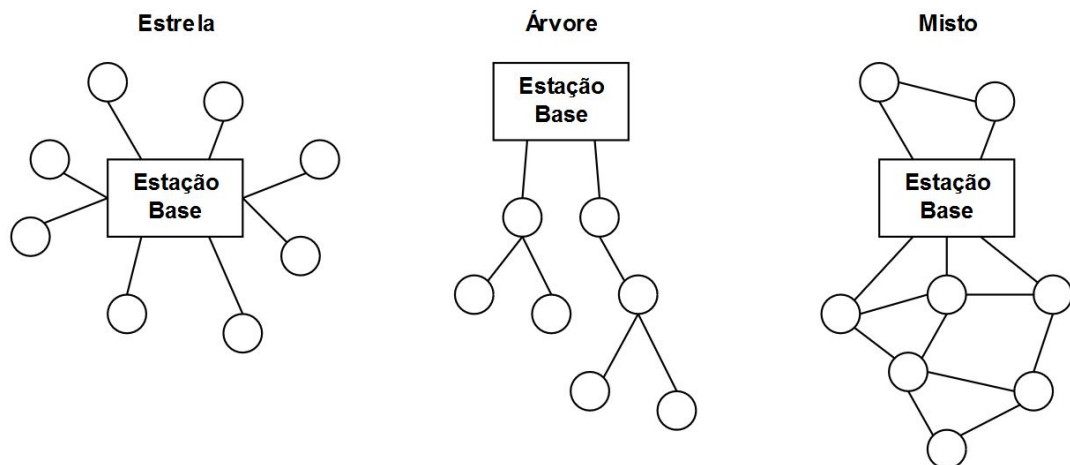
$$I_{Med} = \frac{\sum(I_{ev} \times t_{ev})}{t_{total}}, \quad (2.2)$$

onde  $I_{ev}$  é a corrente consumida em cada evento, em Ampère,  $t_{ev}$  é o tempo de duração do evento, em segundos, e  $t_{total}$  é a duração total de todos os eventos, em segundos.

### 2.1.1 Topologias de Redes de Sensores Sem Fio

Um dos aspectos mais importantes das RSSFs é sua capacidade de se organizar em diferentes topologias, podendo ter uma estrutura formada de acordo com a necessidade e as características do ambiente monitorado ou de acordo com a tecnologia de comunicação utilizada. Os nós sensores podem ser arranjados nas configurações *ad hoc* ou pré-planejada. No arranjo *ad hoc*, os nós sensores são colocados aleatoriamente na área monitorada, enquanto no arranjo pré-planejado, eles são colocados em grade, distribuição ótima, 2D ou 3D (HODGE et al., 2014). Existem três tipos principais de topologias que são bastante utilizadas, conforme mostrado na Figura 2.4.

Na topologia estrela (*star*), todos os nós sensores estão ligados diretamente à estação base e não estão conectados com nenhum outro nó. Esse tipo de arranjo

**Figura 2.4:** Topologias usadas em Redes de Sensores Sem Fio.

Fonte: Adaptado de Hodge et al. (2014).

é o mais simples e econômico, porém exige que todos os nós sensores estejam ao alcance do nó central. Isso pode levar a um gasto energético diferente entre cada nó devido a diferença entre as distâncias e a consequente necessidade de maior potência de transmissão para os nós mais distantes. No entanto, os nós podem se manter em modo de baixo consumo por mais tempo por não precisarem retransmitir uma mensagem proveniente de outro nó.

Na topologia árvore (*tree*), a estação base é ligada diretamente aos nós mais próximos, que por sua vez também se conectam a outros nós mais distantes do nó central, chamados de “filhos”. Uma característica desse arranjo é que um nó “pai” pode ter mais de um nó “filho”, porém um “filho” pode ter somente um “pai”. Nesse caso, existe um menor gasto energético dos nós mais externos, pois eles só transmitem suas informações, enquanto os mais internos consomem mais energia, pois precisam repassar mensagens de outros nós além de seus próprios dados. Porém, não há redundância nas conexões. Se uma das ligações se romper, uma série de outros nós pode perder sua capacidade de enviar dados até a base. Além disso, a complexidade das conexões aumenta.

Já na topologia mista (*mesh*), os nós sensores podem se ligar tanto à estação base quanto aos nós vizinhos que estiverem em seu alcance. Eles também podem se ligar a mais de um nó, o que permite uma maior redundância e garantia de transmissão dos dados, visto que se houver um rompimento de alguma das conexões, ainda haverá outro caminho para percorrer até o nó central. Em contrapartida, a complexidade da rede aumenta ainda mais e o consumo de energia pode ser ainda maior, pois os nós sensores intermediários terão o trabalho de

repassar mensagens de vários outros nós que não possuem alcance até a estação base.

Segundo Silva, Silva e Boavida (2016), “as características das redes de sensores e, em particular, as características dos seus nós, têm enorme influência nas topologias utilizadas neste tipo de rede”. Determinar qual a melhor topologia e a melhor configuração a se utilizar em uma RSSF pode ser um trabalho complexo e requer, muitas vezes, uma troca entre as características, sendo necessário avaliar quais serão as condições de aplicação para a tomada de decisão desse aspecto. Uma rede pode minimizar a retransmissão entre nós, precisar assegurar um nível mínimo de serviço (incluir um certo nível de redundância), minimizar o uso de energia para preservar a vida da bateria ou precisar assegurar a acessibilidade dos nós (HODGE et al., 2014).

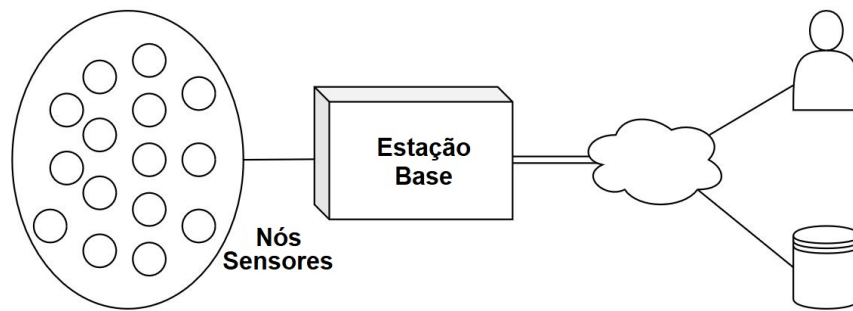
### 2.1.2 Estrutura de uma Rede de Sensores

Em uma RSSF típica, os nós sensores são organizados em uma das topologias e transmitem os dados para a estação base, que retransmite essas informações para centrais de controle ou diretamente para o usuário, através de sistemas de comunicação de longo alcance com ou sem fio.

Os nós sensores são espalhados em um ambiente e coletam os dados de maneira síncrona e periódica ou de forma assíncrona devido a algum agente externo. Esses dados podem ou não ser pré-processados no próprio nó, dependendo da aplicação e das características da rede. Em seguida, as informações são enviadas para um nó central ou estação base, que as concentra e envia para o servidor de rede, onde a aplicação pode processá-las. Além disso, o raio de alcance do sistema de transmissão e recepção de dados determina a distância máxima que um nó sensor pode estar da estação base, para a efetiva comunicação da rede. A Figura 2.5 mostra como se dá o fluxo da transmissão dos dados.

## 2.2 LoRa e LoRaWAN

A tecnologia de comunicação sem fio conhecida como LoRa, abreviatura para *Long Range* (longo alcance), possui duas partes principais que são complementares. LoRa é uma técnica de modulação para LPWANs e também dá o nome aos transceptores de rádio proprietários da empresa Semtech. Ela é a camada física que traduz os dados digitais para sinais de rádio frequência que podem ser enviados e recebidos pelo ar. Já o LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*)

**Figura 2.5:** Estrutura de transmissão de dados em Redes de Sensores Sem Fio.

Fonte: Próprio autor.

é um protocolo de *software* que utiliza a camada física LoRa. É um padrão que define a estrutura dos pacotes de dados e o modo como eles são processados no servidor, além de descrever como as informações são criptografadas. É possível utilizar somente a modulação e os transceptores LoRa em aplicações, porém usar o LoRaWAN traz todos os benefícios que a tecnologia pode proporcionar, como a seleção do plano de frequência compatível com a região, a escolha da configuração de transmissão mais adequada à aplicação e a classe de operação.

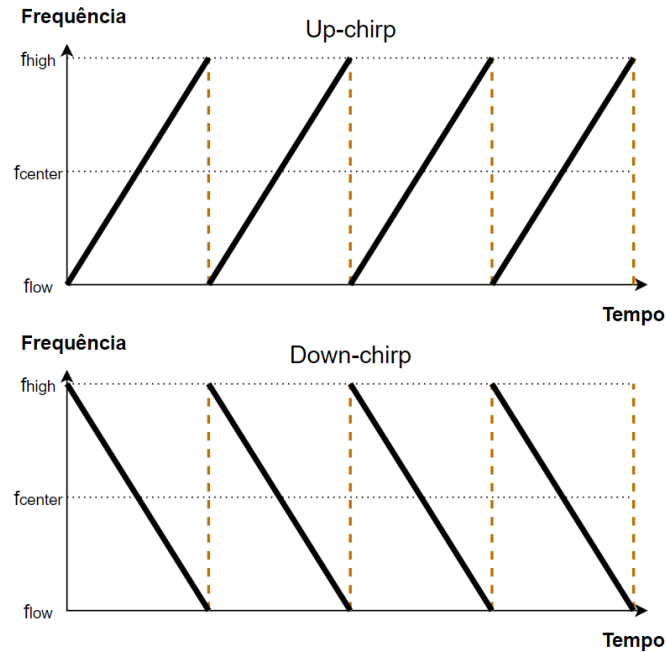
### 2.2.1 LoRa

Quando se quer realizar comunicação sem fio, é necessário encontrar uma forma de transmitir os dados, que normalmente consistem em bits ou bytes. As informações a serem enviadas precisam ser moduladas em algum tipo de fenômeno físico que as represente, usualmente ondas eletromagnéticas utilizadas em sinais de rádio frequência. Pode-se manipular essas ondas alterando sua amplitude, frequência ou fase de forma que isso retrate os dados de interesse. Essa é a camada física de um sistema de comunicação sem fio, componente que possui a capacidade de transformar os bytes em ondas eletromagnéticas (SEMTECH, 2020).

LoRa é uma tecnologia de modulação baseada em espalhamento espectral de *chirp* (*Chirp Spread Spectrum* - CSS). A CSS é uma técnica de espalhamento espectral que usa pulsos *chirp* modulados em frequência linear de banda larga para codificar informações. Esse é um método no qual um sinal é deliberadamente espalhado no domínio da frequência. Um *chirp*, também chamado de sinal de varredura (*sweep signal*), é um sinal no qual a frequência aumenta (*up-chirp*) ou diminui (*down-chirp*) ao longo do tempo (LIE, 2018). Ele é o sinal portador no qual os dados serão modulados. Assim como outros métodos de espalhamento espectral, a CSS utiliza inteiramente a largura de banda alocada para espalhar

o sinal, tornando-a robusta a ruídos de canal. A Figura 2.6 mostra como são os *chirps* sem um sinal modulado. Os *chirps* são mudados ciclicamente e é a frequência dos saltos que determina como o dado é codificado. As larguras de banda que são utilizadas na tecnologia LoRa para o espalhamento são 125 kHz, 250 kHz e 500 kHz.

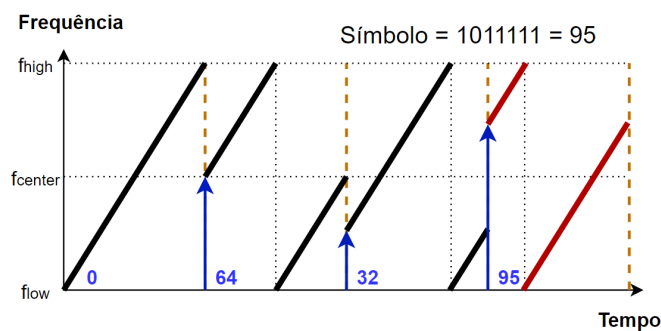
**Figura 2.6:** *Up-chirps* e *down-chirps* não modulados.



Fonte: Adaptado de Lie (2018).

A Figura 2.7 mostra o exemplo de um dado de 7 bits, cujo valor em decimal é 95, modulado em um *chirp*. Os demais valores são referências de números conhecidos.

**Figura 2.7:** Exemplo de dados modulados em *Chirp Spread Spectrum*.



Fonte: Adaptado de Lie (2018).

A tecnologia LoRa é conhecida por seu longo alcance e robustez a interferência. A taxa de transmissão de dados é baixa, variando de 250 bps a 21,9



kbits, levando em consideração o padrão australiano de 915 MHz. O tamanho máximo do pacote de dados difere em cada região, baseado nas regulamentações de espectro e taxa de transmissão utilizada. Segundo Semtech (2020), “Maiores taxas de transmissão significam menores fatores de espalhamento e uma maior probabilidade de perda de pacotes de dados. Menores taxas implicam em maiores fatores de espalhamento e podem ser usados quando a qualidade do sinal é ruim”. Porém, isso resulta em maior tempo para que todos os dados cheguem ao destino através do ar, o que pode levar a um maior consumo de energia dos dispositivos. Além disso, o maior tempo de transmissão também pode reduzir a capacidade de recepção da estação base, pois mantém os canais de comunicação ocupados.

O Fator de Espalhamento (*Spreading Factor* - SF) representa o número de bits que podem ser codificados em um *chirp* e cada símbolo possui  $2^{SF}$  valores possíveis (LIE, 2018). O Fator de Espalhamento e a largura de banda escolhidas para serem utilizadas implicam na velocidade com que um dado é transmitido. Quanto maior a largura de banda e menor o SF, maior será a taxa de transmissão (SEMTECH, 2020). Essas informações são definidas de acordo com a especificação regional utilizada.

Os padrões regionais são definidos pela LoRa Alliance e especificam diversos detalhes da camada física da tecnologia LoRa. No Brasil, por exemplo, utiliza-se o padrão australiano de 915 MHz. Isso significa que as bandas de frequência utilizadas devem estar entre as frequências 915 MHz e 928 MHz para os dispositivos utilizados no país e também estabelece como essas bandas devem ser divididas em 72 canais dentro dessa faixa (ALLIANCE, 2020). A Tabela 2.1 descreve a taxa de transferência de bits de acordo com o Fator de Espalhamento e a largura de banda, sendo codificado em um número de *Data Rate*.

LoRa não é aplicável em situações que exigem alta velocidade de transmissão, como *streaming* de áudio, vídeo ou imagens, mas é muito útil para enviar dados de sensores para a rede e transmitir comandos para dispositivos. Normalmente, um nó sensor pode enviar dados a qualquer momento para a rede, pois a estação base está sempre ativa, mas a rede pode enviar informações para os nós sensores somente quando eles estiverem aptos.

### 2.2.2 LoRaWAN

LoRaWAN é um protocolo de *software* que utiliza a camada física LoRa e especifica as características das mensagens enviadas entre os dispositivos e a rede, além da forma como elas são processadas. O LoRaWAN descreve como os meca-

**Tabela 2.1:** *Data Rate* para o padrão australiano de 915 MHz.

Data Rate	Configuração	Taxa de bits [bit/s]
0	LoRa: SF12 / 125 kHz	250
1	LoRa: SF11 / 125 kHz	440
2	LoRa: SF10 / 125 kHz	980
3	LoRa: SF9 / 125 kHz	1.760
4	LoRa: SF8 / 125 kHz	3.125
5	LoRa: SF7 / 125 kHz	5.470
6	LoRa: SF8 / 500 kHz	12.500
7	RFU	-
8	LoRa: SF12 / 500 kHz	980
9	LoRa: SF11 / 500 kHz	1.760
10	LoRa: SF10 / 500 kHz	3.900
11	LoRa: SF9 / 500 kHz	7.000
12	LoRa: SF8 / 500 kHz	12.500
13	LoRa: SF7 / 500 kHz	21.900
14	RFU	-

Fonte: Adaptado de Alliance (2020).

nismos de comunicação são executados, definindo a configuração dos parâmetros de rádio, como a taxa de transmissão, canais habilitados, configurações de temporização relacionadas aos dispositivos, ativação, checagem da integridade das mensagens, manutenção de sessão e criptografia da aplicação (SEMTECH, 2020).

Esse protocolo utiliza bandas de frequências subgigahertz, ou seja, frequências inferiores a 1 GHz, o que permite maior alcance na comunicação quando comparado com sistemas que operam em frequências superiores. Segundo Semtech (2020), “Os canais de comunicação LoRaWAN operam em um espectro de frequência não licenciado, chamado de Bandas Industriais, Científicas e Médicas (*Industrial, Scientific and Medical Band* - ISM), permitindo seu uso sem a necessidade da obtenção de uma licença da autoridade nacional de regulamentação e tornando-o gratuito”. Muitas tecnologias operam no espectro licenciado, o que requer que o operador obtenha uma licença paga, podendo chegar a custar milhões. Segundo Sinha, Wei e Hwang (2017) e Mekki et al. (2019), o custo para utilização do espectro com NB-IoT, por exemplo, é superior a 500 milhões de Euros por megahertz. Porém, mesmo que o espectro usado não seja licenciado, ele é regulamentado e está sujeito a limitações.

As frequência utilizadas pelo LoRaWAN diferem de acordo com o país ou a região do mundo, baseadas nas regulamentações locais. Isso faz com que os dispositivos precisem de diferentes antenas e *hardware* certificado em cada região.

Uma característica do LoRaWAN é a capacidade que a rede possui de oti-

mizar automaticamente a velocidade na qual os dispositivos enviam dados. Essa funcionalidade é chamada de Taxa de Dados Adaptativa (*Adaptive Data Rate* - ADR). Com isso, os nós podem mudar de forma independente seus Fatores de Espalhamento, resultando em menos tempo de transmissão e aumentando a capacidade da rede. Porém, para a utilização dessa função, é necessário o uso de mais de um *gateway*. Na prática, isso significa que o nó sensor que estiver mais próximo do *gateway* pode usar uma taxa de transmissão maior, resultando em menos tempo de transmissão, enquanto o dispositivo mais distante usam uma taxa menor. Além disso, essa característica não pode ser usada em dispositivos móveis (SEMTECH, 2020).

### 2.2.3 Arquitetura LoRaWAN

A arquitetura primária do LoRaWAN consiste em 4 partes: os nós, os *gateways*, que são as estações base, o servidor de rede e o servidor de aplicação. A infraestrutura física do LoRaWAN é formada por nós que enviam e recebem dados de *gateways*, que por sua vez são conectados à internet.

Os nós são pequenas partes de *hardware* que podem receber e enviar dados via comunicação LoRa. Eles possuem algum tipo de capacidade sensível junto com algum poder computacional e podem funcionar com uma bateria por longos períodos de tempo, já que seu consumo de corrente é baixo se comparado com outras tecnologias. Segundo Sinha, Wei e Hwang (2017), o pico de corrente do LoRa é de 32 mA, enquanto do NB-IoT pode chegar a 300 mA. Esses dispositivos podem se comunicar bidirecionalmente, o que significa que eles podem enviar mensagens *uplink*, que são informações enviadas do nó sensor para o *gateway*, e também receber mensagens *downlink*, que são informações ou comandos enviados da rede para os nós passando pelo *gateway* (SEMTECH, 2020). Existem três modos operacionais dos nós sensores LoRaWAN, conhecidos como Classe A, Classe B e Classe C. As classes definem quando um dispositivo pode receber mensagens *downlink*. Segundo Semtech (2020), “Um nó pode mudar de classe a qualquer momento durante sua operação, sendo que essa troca pode ser iniciada tanto pelo próprio dispositivo quanto por um comando da rede”.

A Classe A forma a base do protocolo LoRaWAN e é a principal usada, pois todos os dispositivos devem ser compatíveis com essa classe. Quando operam nessa classe, os nós podem enviar *uplinks* a qualquer momento, mas só podem receber *downlinks* exatamente após terem enviado uma mensagem *uplink*. Além disso, é o dispositivo que sempre deve iniciar a comunicação com a rede. Esse é o

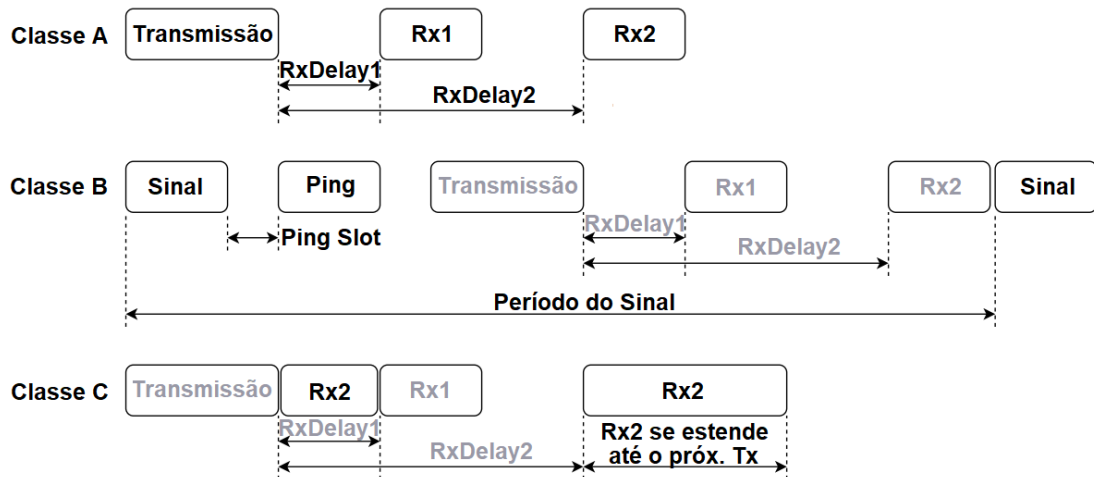
modo mais eficiente energeticamente, pois os nós não precisam ficar aguardando alguma possível comunicação da rede a qualquer momento. Cada transmissão é seguida de duas janelas curtas de recepção e o nó deve agendar um *downlink* baseado em sua própria necessidade de comunicação. Assim, o servidor precisa esperar a próxima mensagem *uplink* agendada para poder transmitir. A duração da janela de recepção deve ser, no mínimo, o tempo necessário para o receptor de rádio efetivamente detectar um pacote *downlink*. Essa classe é aplicável para dispositivos que enviam dados em um período definido de tempo ou quando há a ocorrência de eventos específicos.

Dispositivos que operam na Classe B podem receber *downlinks* em intervalos específicos de tempo. Para isso, a rede sincroniza o intervalo de tempo enviando sinais. Essa classe consome mais energia que a Classe A, pois os dispositivos passam mais tempo esperando alguma mensagem da rede. Nessa classe, os dispositivos possuem uma janela de recepção extra em períodos agendados. Com isso, o nó pode abrir janelas de recepção que podem ser usadas pela rede para iniciar a comunicação *downlink*.

Os dispositivos configurados na Classe C podem receber *downlinks* a praticamente qualquer momento. Esse modo requer que a antena esteja sempre energizada, o que faz com que o consumo de energia seja maior que nas outras classes, tornando-a menos aplicável como modo operacional padrão. Normalmente, essa classe é usada temporariamente para eventos específicos. Nessa classe, os dispositivos possuem janelas de recepção contínuas que só são fechadas quando o dispositivo está transmitindo. As mesmas janelas da Classe A são implementadas na Classe C, com a diferença que a segunda janela se mantém aberta até a próxima transmissão.

A Figura 2.8 mostra o formato das janelas de recepção de cada classe.

Os *gateways*, também chamados de estações base ou pontos de acesso, recebem os pacotes LoRaWAN que são enviados pelos nós sensores e também enviam pacotes de dados de volta para eles. Ele é a ponte entre os transceptores e o servidor (ZHAO et al., 2017). Os *gateways* demodulam os sinais recebidos em um *buffer* binário, e os dados são enviados para o servidor de rede na internet, através de outro protocolo de comunicação, como Ethernet, WiFi ou conexão celular. Essas mensagens *uplink* são enviadas junto com metadados, incluindo a indicação da potência do sinal recebido, a relação sinal-ruído (*Signal to Noise Ratio* - SNR), tempo de chegada, canal e taxa de transmissão (SEMTECH, 2020). O *gateway* envia os pacotes e seus metadados para o servidor de rede que é configurado nele.

**Figura 2.8:** Janelas de recepção das classes do LoRaWAN.

Fonte: Adaptado de Semtech (2020).

O servidor de rede pode ser público ou privado e pode estar hospedado na nuvem ou mesmo no próprio *gateway*. Como os *gateways* só modulam e demodulam pacotes LoRa e mantêm a conexão com o servidor de rede, eles podem trabalhar com muitos pacotes ao mesmo tempo, enquanto rodam em um *hardware* limitado.

O servidor de rede é onde os processos mais complexos de manipulação de dados são feitos. Ele é responsável por rotear as mensagens para o servidor de aplicação, selecionar o *gateway* para *downlink*, remover mensagens duplicadas e criptografar os dados. Esse servidor possui um registro dos dispositivos, com informações como endereços, chaves de sessão e contador de mensagens, além de conhecer os parâmetros de rádio dos nós sensores, como classe de operação, janelas de tempo e plano de frequências. Com essas informações, o servidor de rede pode identificar o dispositivo que enviou o pacote de dados (SEMTECH, 2020).

O servidor de aplicação é conectado ao servidor de rede, pois ele recebe os *uplinks* e envia os *downlinks* à rede. É esse servidor que interpreta os dados do usuário e muitas vezes possui interface web para gerir os dispositivos e os dados, podendo também se integrar com outras plataformas (SEMTECH, 2020).

A arquitetura de uma rede LoRaWAN é definida pelo conjunto de regras desenvolvido pela LoRa Alliance, onde são previstas especificações como o formato de criptografia, a construção de mensagens *uplinks* e *downlinks*, as classes de operação, as janelas de recepção e muito mais. Essas especificações estão em constante atualização para melhorias de segurança e do processo de comunicação (ALLIANCE, 2018).

## 2.3 Trabalhos Relacionados

Os estudos para a utilização das tecnologias de comunicação sem fio nos âmbitos climático, ambiental e agrícola têm crescido nos últimos anos, visto que, além do reconhecimento da necessidade de se empregar recursos mais avançados nessas áreas, houve o surgimento de diferentes tecnologias que permitiram a melhor aplicação de tais métodos.

Yoon et al. (2018) construiu um sistema para agricultura inteligente empregando três diferentes tecnologias de comunicação, sendo usadas LPWAN e *Bluetooth* como comunicação sem fio e RS485 como comunicação cabeada. Foram utilizados sensores de temperatura, umidade e dióxido de carbono nos nós sensores e os dados eram transmitidos até seus respectivos *gateways*, que eram equipados com módulos de internet sem fio para repassar os dados ao servidor de rede através do protocolo MQTT. A comunicação sem fio apresentou maior perda de dados comparada à cabeada, porém padrões similares foram recebidos. A rede LPWAN permitiu a transmissão e recepção dos dados a uma distância de 500 metros com o *gateway* instalado dentro de uma construção.

Dholu e Ghodinde (2018) propuseram o desenvolvimento de nós sensores capazes de medir parâmetros de um campo agrícola e criar sinais de ativação para os atuadores. Os parâmetros eram umidade do solo, temperatura e umidade relativa ao redor das plantas e intensidade luminosa. O trabalho utilizou um kit de desenvolvimento baseado em ESP8266, que possui um módulo WiFi integrado. Os dados podiam ser enviados para a nuvem e serem acompanhados através de um aplicativo móvel. Assim, os resultados obtidos eram apresentados em gráficos e podiam ser acessados pelo celular.

No trabalho de Harun et al. (2015), foi desenvolvido um sistema de controle de irrigação de estufas utilizando Redes de Sensores Sem Fio. Foi feito o monitoramento de parâmetros críticos para a agricultura, como pH, temperatura e umidade ambiente e umidade do solo. A arquitetura proposta possui vários nós XBee dispostos nas estufas, que coletam dados e os transmitem para o *gateway* através do protocolo ZigBee. O *gateway*, por sua vez, possui um módulo GSM, que permite que os dados sejam enviados para o servidor de rede via GPRS ou SMS. Bombas e válvulas foram utilizadas para controlar a irrigação de fertilizantes e água nas estufas. Os testes mostraram uma maior eficiência da irrigação automatizada quando comparada com a agendada.

Zhao et al. (2017) Desenvolveu um sistema de irrigação baseado na tecno-

logia LoRa contendo duas partes principais, o nó de irrigação e o *gateway*. O nó é formado por quatro partes: o módulo transmissor utiliza o *transciever* SX1276 da Semtech, para o módulo de controle foi escolhido o microcontrolador STM32L151CB, o módulo de irrigação tem a válvula solenoide DN15CR03 e o módulo de energia conta com uma bateria de lítio carregada por um gerador hidroelétrico. Já o *gateway* possui três partes: o *host* baseado em um Raspberry Pi 3 e que se comunica com o receptor LoRa via SPI, o *tranciever* LoRa com base em um SX1301 e dois SX1255 e o módulo GPS. O servidor de rede, que ficava na nuvem, era responsável por processar e armazenar os dados e ainda fornecer aplicações. A distância de comunicação obtida nos experimentos foi de até 8 km e o sistema de irrigação pode ser controlado remotamente e seu *status* checado. Os nós permitem controlar a atuação da irrigação através da válvula solenoide, o que sugere um uso maior de energia, sendo necessário um bom sistema de carregamento da bateria.

Santos et al. (2019) implementou uma rede sem fio de curto e médio alcance com um sistema de predição para antecipar potenciais disfunções em plantações dentro de uma estufa. Os nós utilizavam sensores de temperatura do ar, temperatura do solo, umidade do ar, umidade do solo e luminosidade e eram controlados por um Arduino Uno juntamente com uma placa de comunicação LoRa com o chip SX1272, além de possuírem um sistema de captação solar para carga da bateria. O *gateway* usado era baseado em um Arduino Mega também em conjunto com um módulo SX1272. Os dados coletados pelo sistema eram enviados ao servidor de rede onde era executado um *software* para predição dos eventos climáticos e envio de notificações para o usuário. O tempo de duração da bateria dos nós sensores foi de 8 dias sem recarga e a distância atingida foi de até 800 m. Além disso, foi observado um ganho de até 18% no desenvolvimento das plantas utilizando o sistema proposto.

No trabalho de Aquino-Santos et al. (2011), os autores buscam desenvolver um nó sensor que seja suficientemente leve, energeticamente eficiente e capaz de monitorar e controlar variáveis físicas. É utilizado o modelo LPC2148F, que possui um processador ARM7TDMI-S. A plataforma é equipada com um rádio XBEE Pro Zigbee, escolhido devido a sua combinação de leveza, longo alcance de transmissão, compatibilidade com a interface serial do processador ARM e interface de pacote, trazendo as vantagens de ser um sistema barato, energeticamente eficiente e altamente resistente em ambientes externos. O nó sensor desenvolvido busca ser eficiente energeticamente e prático de manusear. Porém, o uso de comunicação Zigbee faz com que o alcance seja limitado se comparado com outras

tecnologias possíveis de serem utilizadas.

Lee e Ke (2018) propõem o desenvolvimento de um módulo LoRa com rede em topologia *mesh*. Ele é baseado no Nuvoton Nano100LE3BN, um microprocessador ARM Cortex M0 e no *transciever* LoRa de 430 MHz SX1278 da Semtech com uma antena helicoidal com ganho de 1,9 dBi. O desenvolvimento foca na performance da comunicação sem fio ao invés dos requerimentos de baixo consumo e tanto os nós quanto os *gateways* usam a mesma plataforma de *hardware*. Esse módulo pode atuar como um rádio e aceitar comandos AT via USB ou UART e é alimentado com 5 V via USB. Os autores buscaram priorizar a qualidade de comunicação, deixando de lado os requerimentos de consumo, que são importantes em aplicações com tecnologia LoRa.

Já em Wan et al. (2017), é utilizado um nó de teste baseado no microcontrolador de 8 bits PIC16F1947 da Microchip, que possui um núcleo CMOS e tecnologia nanoWatt XLP. O módulo LoRa AS62-DTU20, baseado no Semtech SX1278, é conectado ao microcontrolador através de uma porta serial e usado para simular a transmissão de dados via LoRa entre os nós em situações reais. O nó possui uma entrada AD para uso de um sensor de temperatura ou umidade do solo e é alimentado por uma bateria de ácido-chumbo de 12 V através de um módulo de alimentação ZY-WRDS-2W. O fato de se utilizar um microcontrolador de 8 bits pode limitar o uso de alguns tipos de sensores, a depender da aplicação.

Diversas tecnologias de comunicação podem ser utilizadas para implementar uma Rede de Sensores Sem Fio, bem como podem haver várias topologias de construção. É importante levar em consideração os parâmetros ambientais que precisam ser monitorados, além das características que cada tecnologia proporciona, de forma que ela possa fornecer resultados adequados à aplicação.



## 3 Materiais e Métodos

Para se fazer a medição da corrente consumida pelos nós sensores durante sua operação, utilizou-se o método do resistor *shunt*, onde um resistor de baixo valor e alta precisão é colocado em série com a carga de interesse e a queda de tensão medida sobre ele determina a corrente. O resistor deve ser pequeno o suficiente para que sua queda de tensão não interfira no circuito, mas ainda assim ser possível obter uma leitura sobre ele. Com isso, pode-se realizar as medições com um osciloscópio a fim de se obter o valor da corrente consumida em cada fase de operação da carga e o posterior cálculo da corrente média e do tempo de vida da bateria que alimenta o circuito.

### 3.1 Dispositivos Utilizados

As RSSFs possuem duas partes principais de componentes de *hardware*, o *gateway* e o nó sensor. Enquanto os *gateways* são peças únicas, os nós sensores são formados pelo módulo de transmissão e recepção, pelo microcontrolador e pelo conjunto de sensores, além do sistema de alimentação.

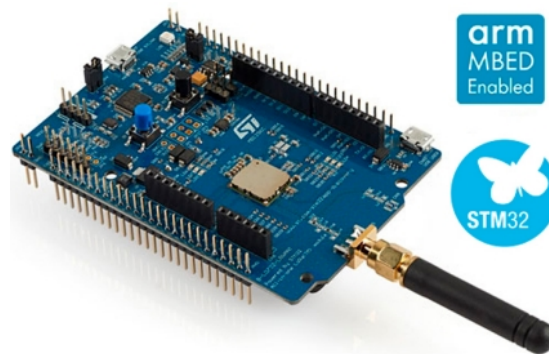
#### 3.1.1 Módulo de Transmissão

Uma opção de módulo de transmissão e recepção existente no mercado para desenvolvimento dos nós sensores é o The Things Node, desenvolvido pela The Things Industries. Ele é baseado no microcontrolador SparkFun Pro de 3,3 V e 8 MHz com a adição de um módulo LoRaWAN fabricado pela Microchip. Ele já possui um sensor de temperatura, acelerômetro digital, sensor de luz, botão e LED RGB, tudo encapsulado em uma caixa a prova d'água, e permite o uso de três pilhas AAA como alimentação (NETWORK, 2017a). A Figura 3.1 mostra o The Things Node. Por possuir todos esses componentes incorporados, esse módulo permite o desenvolvimento da rede de sensores com facilidade, porém ele opera somente nas faixas de frequência europeia de 868 MHz e americana de 915 MHz, que não são compatíveis para uso em território brasileiro.

**Figura 3.1:** The Things Node.

Fonte: Network (2017b).

A STMicroelectronics possui a placa de Desenvolvimento chamada STM32L0 Discovery Kit LoRa. Ela é uma ferramenta que permite desenvolver soluções baseadas nas tecnologias LoRa, Sigfox e FSK/OOK. Esse kit é composto por um módulo de transmissão CMWX1ZZABZ-091 fabricado pela Murata, um microcontrolador STM32L072CZ e um transceiver SX1276. O usuário possui acesso a todos os periféricos do microcontrolador e a placa já possui a interface de programação ST-Link/V2-1 embarcada. A comunicação LoRa do kit pode operar nas classes A, B e C, permite utilizar comandos AT, opera na faixa de frequência de 860 MHz a 930 MHz e também é compatível com a tecnologia Sigfox (STMICROELECTRONICS, 2018). A Figura 3.2 mostra o STM32L0 Discovery Kit LoRa.

**Figura 3.2:** STM32L0 Discovery Kit LoRa.

Fonte: STMicroelectronics (2018).

Porém, foram utilizados quatro módulos de transmissão e recepção Radioenge LoRaWAN para formar a rede e transmitir os dados coletados até o *gateway* via protocolo LoRaWAN. Ele é um *transceiver* com tecnologia LoRa de baixo consumo e longo alcance, que integra o protocolo LoRaWAN 1.0.3 e opera nas classes A ou C, sendo que a classe B não é implementada. Possui uma interface UART de comandos AT com *Baud Rate* configurável, que permite a configuração dos parâmetros de transmissão do módulo e o envio dos dados para a rede através

de um microcontrolador externo. O módulo opera na banda de frequência australiana de 915 MHz e nele foi usado uma antena omnidirecional articulada com ganho de 3 dBi e frequência de 915 MHz, também compatíveis com os parâmetros regionais utilizados no país. O módulo possui certificação junto à ANATEL, permitindo seu uso dentro das normas nacionais e internacionais de comunicação. A Figura 3.3 mostra um nó sensor Radioenge LoRaWAN.

**Figura 3.3:** Módulo Radioenge LoRaWAN.



Fonte: Próprio autor.

Os comandos AT são *strings* que sempre iniciam com os caracteres “AT+” seguido do comando específico a ser executado. Esse comando pode vir seguido ou não de um modificador. Caso o não haja modificador, o comando irá executar uma tarefa. Caso o modificador seja “=?”, será retornada a informação desejada do módulo. Já para o modificador “=”, a informação logo a seguir dele será enviada para o nó sensor. A Tabela A.1 apresentada no Anexo A descreve os comandos AT que podem ser usados com alguma funcionalidade para o módulo Radioenge LoRaWAN.

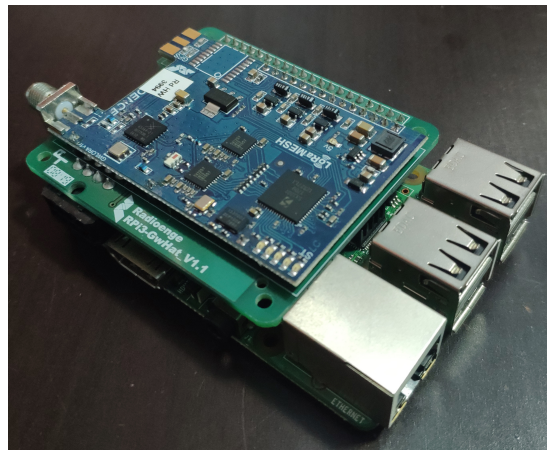
### 3.1.2 Gateway

O servidor de rede utilizado, por ser aberto e colaborativo, permite o uso de *gateways* de terceiros, que estejam no alcance dos nós sensores, para formação da RSSF. Como a área onde foi implementada a RSSF não tinha nenhuma cobertura de um *gateway* para comunicação LoRa, foi necessária a colocação de um para que os dados fossem enviados para a rede.

Como os módulos LoRaWAN escolhidos foram da fabricante Radioenge, optou-se por utilizar um *gateway* de mesma marca para haver compatibilidade e facilidade na aquisição. Dessa forma, o *gateway* utilizado para enviar os dados ao servidor de rede foi o Radioenge LoRaMESH. Ele é um módulo que permite receber e enviar informações através de uma rede sem fio LoRaWAN e faz uma ponte

entre a camada física do tipo LoRa e uma interface SPI, que é utilizada para a comunicação com o concentrador SX1301 da Semtech, sendo necessário um dispositivo que receba esses dados pela SPI e os envie via protocolo TCP/IP para o servidor de rede. Isso é feito através de uma placa Raspberry Pi 3 Model B, executando um *software* para retransmissão de pacotes de dados (*Packet Forwarder*). Foi instalado nele um sistema operacional embarcado básico baseado em Linux, o qual possui o UDP *Packet Forwarder*, desenvolvido pela Semtech, que usa o protocolo UDP para transferir os pacotes de dados LoRaWAN do *gateway* para o servidor de rede. No *gateway* ainda foi usada uma antena omnidirecional de fibra de vidro com ganho de 8,5 dBi e frequência de 915 MHz, compatível com os parâmetros regionais LoRaWAN estabelecidos pelo padrão australiano e utilizado no Brasil. O *gateway* também possui certificação junto à ANATEL, permitindo seu uso dentro das normas nacionais e internacionais de comunicação. A Figura 3.4 mostra o *gateway* usado.

**Figura 3.4:** *Gateway* Radioenge LoRaMESH.



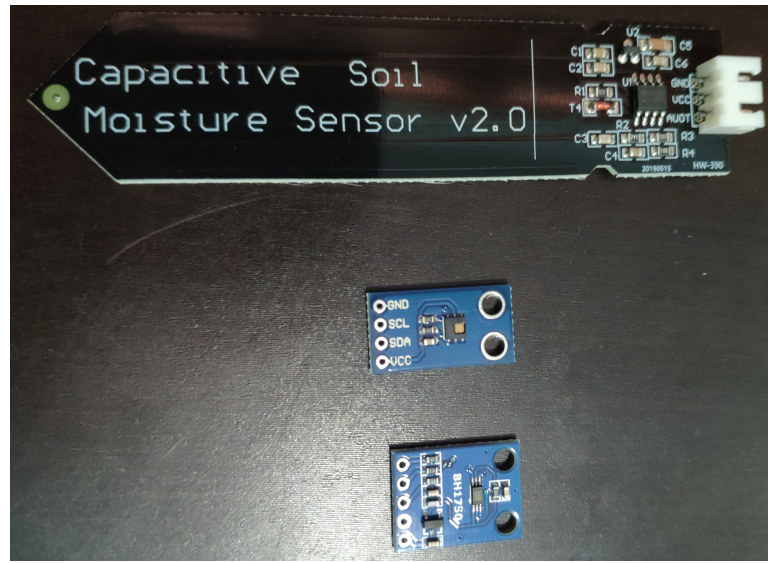
Fonte: Próprio autor.

### 3.1.3 Conjunto de Sensores

Para realizar a coleta dos dados para os testes da comunicação sem fio com o protocolo LoRaWAN, utilizou-se três sensores em cada nó: HDC1080 da Texas Instruments, BH1750FVI da Rohm Semiconductor e um sensor capacitivo de umidade do solo. O HDC1080 é um sensor digital de temperatura e umidade relativa de alta precisão que fornece as medidas através de uma interface I2C, com resolução de 14 bits e precisão da medida de temperatura de  $\pm 0,2$  °C e de umidade relativa de  $\pm 2\%$ . Ele pode ser configurado através de registradores para medição individual ou contínua, ou seja, pode-se realizar medidas isoladas

de temperatura ou de umidade ou se pode obter ambos os dados em uma única leitura. O BH1750FVI é um sensor de luminosidade ambiente que também fornece as medidas através de uma interface I2C, com resolução de 16 bits, permitindo leituras de até 65.535 lx. A precisão pode ser configurada para  $\pm 1$  lx ou  $\pm 4$  lx dependendo da velocidade com que se pretende ter a medição. O sensor capacitivo de umidade do solo possui uma saída analógica de 0 a 3 V que pode ser lida através de um conversor analógico-digital, com as medidas variando de 0 a 100% dependendo da quantidade de água presente no solo. A Figura 3.5 mostra os três sensores utilizados.

**Figura 3.5:** Sensores utilizados para coleta de dados.



Fonte: Próprio autor.

Os valores lidos do sensor de temperatura e umidade relativa HDC1080, apesar de possuírem resolução de 14 bits, são lidos em formato de 16 bits, ou seja, um valor entre 0 e 65.535. Esses números podem ser convertidos para um valor de temperatura ou de umidade relativa através das equações a seguir (INSTRUMENTS, 2014),

$$Temperatura = \left( \frac{TEMP[15 : 00]}{2^{16}} \right) \times 165 - 4, \quad (3.1)$$

$$Umidade_{AR} = \left( \frac{RH[15 : 00]}{2^{16}} \right) \times 100. \quad (3.2)$$

O valor da temperatura é dado em graus Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) e o de umidade relativa em porcentagem (%). Os termos  $TEMP[15 : 00]$  e  $RH[15 : 00]$  representam os valores em 2 bytes (16 bits) correspondentes a cada medida, armazenados nos

registradores do sensor, ou seja, os valores de temperatura e umidade relativos lidos diretamente do sensor através da interface I2C.

O sensor de luminosidade BH1750FVI possui resolução de 16 bits e, assim como o anterior, fornece em sua interface I2C valores entre 0 e 65.535. Esse número pode ser convertido para um valor de luminosidade a partir da seguinte equação (SEMICONDUCTOR, 2011),

$$Luminosidade = \left( \frac{LX[15 : 00]}{1,2} \right). \quad (3.3)$$

O valor da luminosidade é dado em lux (lx) e o termo  $LX[15 : 00]$  representa os 2 bytes (16 bits) lidos diretamente do sensor através da interface I2C.

Como o sensor capacitivo de umidade do solo possui uma saída analógica, com valores de tensão entre 0 e 3 V, o valor digital referente a sua medição depende da resolução do conversor analógico-digital utilizado. Considerando a resolução do ADC da placa de desenvolvimento STM32F4 Discovery de 12 bits, o valor digital pode ser entre 0 e 4.095. Para converter esse valor em uma medida representativa de umidade, usa-se a seguinte equação,

$$Umidade_{SOLO} = -\left( \frac{HM[11 : 00]}{40,95} \right) + 100, \quad (3.4)$$

onde o valor da umidade do solo é dado em porcentagem (%) e o termo  $HM[11 : 00]$  representa os 12 bits lidos com o conversor analógico-digital.

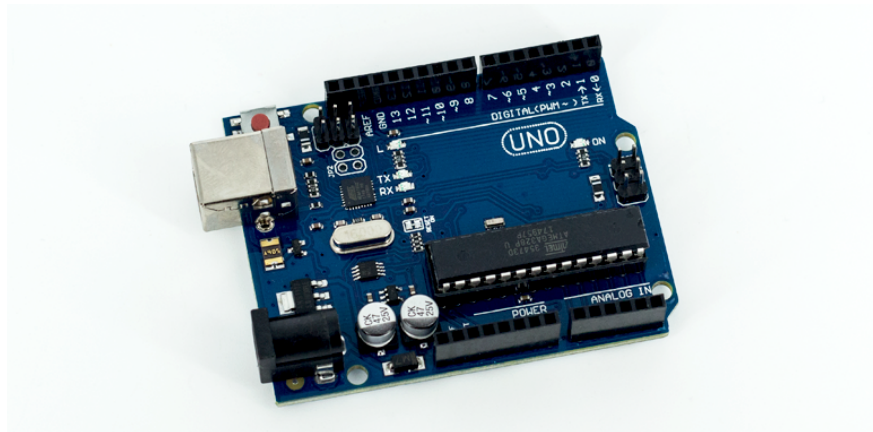
### 3.1.4 Microcontrolador

No caso da utilização de um microcontrolador externo para o nó sensor, existem diversas opções que podem ser utilizadas. Uma opção bastante simples e comum é o uso do Arduino, uma plataforma de desenvolvimento de *hardware* e *software* livre usada na elaboração de projetos eletrônicos. A placa mais usual é o Arduino Uno, mostrado na Figura 3.6. Ela possui um oscilador a cristal de 16 MHz e um regulador linear de 5 V. Além disso, possui 14 pinos digitais de entrada e saída, sendo que 6 deles podem gerar PWM, 6 entradas analógicas, pinos de alimentação para circuitos externos de 5 V, 3,3 V e GND, além de entradas de referência. Pode ser alimentado via USB ou por bateria e possui um LED embutido. Seu componente principal é microcontrolador ATmega328P, um AVR de 8 bits fabricado pela Atmel. Ele possui como periféricos dois *timers* de 8 bits e um de 16 bits, seis canais PWM, oito conversores analógico-digitais de 10 bits,



duas interfaces SPI, uma USART, entre outros componentes (THOMSEN, 2017).

**Figura 3.6:** Arduino Uno.



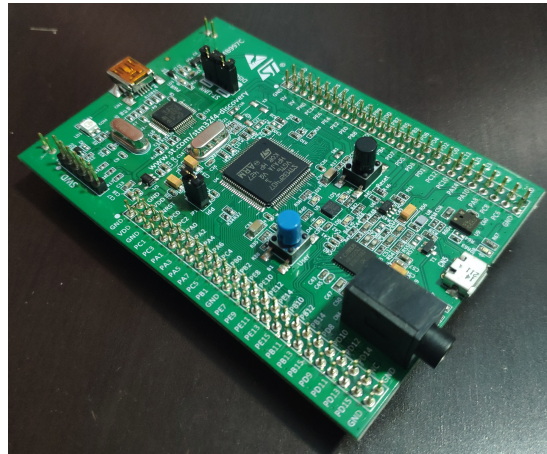
Fonte: Thomsen (2017).

Porém, foi utilizada como microcontrolador externo a placa de desenvolvimento STM32F4 Discovery, da STMicroelectronics, mostrada na Figura 3.7, que possui mais recursos que o Arduino. Ela é baseada no microcontrolador STM32F407VGT6 com núcleo ARM de 32 bits e possui diversos periféricos disponíveis para uso. Além disso, já conta com a interface de programação ST-Link/V2-A embarcada, acelerômetro digital, microfone, *driver* de áudio, LEDs, botão e conector USB. Seu microcontrolador também permite o uso do RTC e de modos de baixo consumo de energia eficientes (STMICROELECTRONICS, 2017). Com ela, foram feitas as leituras dos dados dos sensores através das interfaces I2C e ADC, o controle temporal do fluxo de comunicação, a configuração dos parâmetros de transmissão dos nós sensores e o envio dos dados para o *gateway*, ambos através da interface UART de comandos AT do módulo LoRaWAN.

### 3.1.5 Servidor de Rede

Os dados que chegam até o *gateway* são enviados por este para um servidor de rede através do protocolo TCP/IP. O servidor aceita e responde a solicitações feitas pelo cliente, ou seja, é responsável por encaminhar os dados que chegam dos dispositivos para a aplicação. O servidor de rede utilizado foi o *The Things Network* (TTN). Ele é um servidor colaborativo que faz o mapeamento dos dispositivos, repassa os dados dos nós sensores para a aplicação correta e envia mensagens de volta para o nó correspondente. Com ele, é possível receber os dados em forma de bytes, fazer o tratamento adequado e integrá-los em um painel de controle, de forma que o usuário possa visualizar e tomar as ações necessárias.

**Figura 3.7:** Placa de desenvolvimento STM32F4 Discovery.



Fonte: Próprio autor.

A escolha dos dispositivos utilizados foi feita baseada principalmente na disponibilidade dos materiais no momento do desenvolvimento, além da possibilidade de se encontrar produtos no mercado que atendam os requisitos propostos e as normas legais de aplicação da comunicação sem fio. O *gateway* e os módulos LoRaWAN foram escolhidos devido a fácil disponibilidade no mercado, facilidade de uso e boa documentação, além de possuírem certificados na ANATEL, garantindo que suas características atenderiam os processos de comunicação. Os sensores utilizados nos testes da RSSF e a placa de desenvolvimento STM32F4 Discovery já se encontravam disponíveis para uso, portanto optou-se por verificar como seria o comportamento da rede com tais componentes.

## 3.2 Desenvolvimento

Primeiramente, o *gateway* precisou ser registrado no servidor de rede TTN para que houvesse a efetiva comunicação, como na Figura 3.8. Para isso, foi necessário passar o número EUI, que é a identidade do *gateway* e pode ser obtido dele próprio, para o servidor. Além disso, também foi definido o plano de frequência australiano de 915 MHz e o roteador local brasileiro para identificar a região na qual ele iria funcionar. Com o registro pronto, fez-se a configuração interna do *gateway*, de modo que ele pudesse operar no plano de frequência correto e com o mesmo número EUI passado ao servidor. Após isso, executou-se o *Packet Forwarder*. Assim, o *gateway* passou a estar conectado com a rede TTN e todo dado recebido por ele pode ser repassado ao servidor.

Na placa de desenvolvimento STM32F4 Discovery, foram feitas as confi-



**Figura 3.8:** Registro do *gateway* no servidor de rede.

**REGISTER GATEWAY**

**Gateway EUI**  
The EUI of the gateway as read from the LoRa module

B8 [ ] [ ] [ ] [ ] [ ] [ ] [ ] [ ] CD 8 bytes

☒ **I'm using the legacy packet forwarder**  
Select this if you are using the legacy [Semtech packet forwarder](#).

**Description**  
A human-readable description of the gateway

Gateway Radioenge LoRaMESH baseado em Raspberry Pi.

**Frequency Plan**  
The [frequency plan](#) this gateway will use

Australia 915MHz

**Router**  
The router this gateway will connect to. To reduce latency, pick a router that is in a region which is close to the location of the gateway.

ttn-router-brazil

Fonte: Próprio autor.

gurações dos periféricos que foram usados para interagir com os demais componentes do sistema. Foi utilizada uma interface UART com *Baud Rate* definido em 9.600 bps para enviar os comandos AT ao módulo LoRaWAN e receber as respostas desses comandos. Usou-se duas interfaces I2C disponíveis para comunicação com os sensores HDC1080 e BH1750FVI. Configurou-se um conversor analógico-digital de 12 bits para realizar a leitura dos dados do sensor capacitivo de umidade do solo. Além disso, foi utilizado um temporizador (*timer*) de modo que ele gerasse uma rotina de interrupção a cada 10 segundos e pudesse controlar o intervalo de tempo entre a realização de cada medição dos sensores e do envio dos dados para o servidor. Mesmo durante o período de espera, o microcontrolador ficava no modo *RUN*, ou seja, mantinha a alimentação e os *clocks* dos periféricos ligados o tempo todo.

Para que os nós sensores pudessem enviar dados até o servidor de rede através do *gateway*, foi necessário criar uma aplicação dentro da rede TTN. Essa aplicação contém chaves únicas que dizem ao nó que é para ela que os dados devem ser enviados. Dessa forma, garante-se que os dados chegarão ao destino esperado. Além disso, a aplicação criada também configura o modo como o nó sensor deve ser ativado para que haja comunicação com a rede.

Os nós sensores também precisaram ser registrados na aplicação criada para realizar as configurações. Para isso, é necessário obter o número EUI dos dispositivos, que assim como no *gateway*, é a identidade dos mesmos. Esse valor é

obtido através da interface UART usando comandos AT. Esse número é passado para a aplicação, como na Figura 3.9, para que o módulo registrado possa ser reconhecido.

**Figura 3.9:** Registro de um nó sensor no servidor de rede.

**REGISTER DEVICE** [bulk import devices](#)

**Device ID**  
This is the unique identifier for the device in this app. The device ID will be immutable.

node-13045 ✓

**Device EUI**  
The device EUI is the unique identifier for this device on the network. You can change the EUI later.

00 2D ✓ 8 bytes

**App Key**  
The App Key will be used to secure the communication between you device and the network.

this field will be generated ✓

**App EUI**

70 6C ✓

Fonte: Próprio autor.

Em seguida, com o registro dos dispositivos feito, foi definido o modo de ativação como *Activation by Personalization* (ABP) dentro da aplicação. Esse método de ativação é mais simples e faz com que os nós sensores sejam sempre conhecidos pela rede, pois são predefinidas as chaves de sessão e de aplicação e o endereço do dispositivo, como mostra a Figura 3.10. Como esses valores são fixos, basta passá-los uma única vez aos dispositivos através dos comandos AT para que a comunicação seja efetivada permanentemente. Esses valores também foram configurados nos dispositivos utilizando a placa de desenvolvimento STM32F4 Discovery. Além disso, também foi necessário configurar nos nós sensores, com comandos AT, o modo de ativação para ABP.

Para finalizar as configurações referentes aos parâmetros de comunicação sem fio do protocolo LoRaWAN, ainda foram enviados mais alguns comandos AT para os nós sensores com a placa de desenvolvimento STM32F4. Foi definida a Classe A como modo de operação para a rede, de forma a se obter o melhor gerenciamento do consumo de energia. Também foi definida a máscara de canais correspondente ao servidor de rede TTN.

Para se trabalhar com o sensor HDC1080, é necessário ajustar sua funcionalidade através do registrador de configuração, escrevendo dois bytes utilizando a interface I2C. Ele possui dois modos básicos de operação, onde se pode ler os dados de temperatura e de umidade relativa separadamente, ou realizar a leitura

**Figura 3.10:** Chaves utilizadas na configuração dos nós sensores.

The image shows a configuration interface for a LoRaWAN node. It includes the following fields:

- Activation Method:** A dropdown menu set to 'ABP'.
- Device EUI:** A field with a hex value of '00' followed by several empty boxes, ending with '2D' and a copy icon.
- Application EUI:** A field with a hex value of '70' followed by several empty boxes, ending with '6C' and a copy icon.
- Device Address:** A field with a hex value of '26' followed by several empty boxes, ending with 'F4' and a copy icon.
- Network Session Key:** A field with a hex value of 'B8' followed by several empty boxes, ending with 'E2' and a copy icon.
- App Session Key:** A field with a hex value of 'D8' followed by several empty boxes, ending with 'A6' and a copy icon.

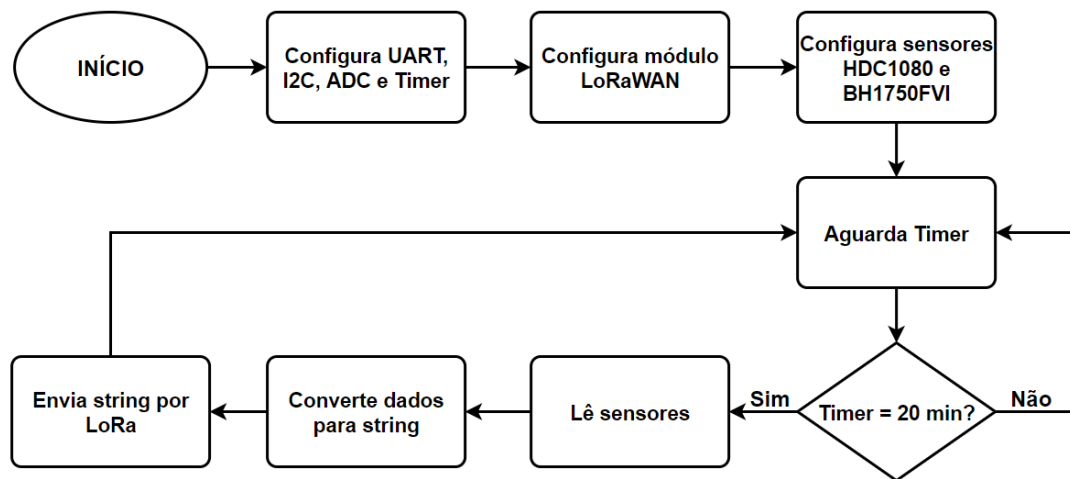
Fonte: Próprio autor.

dos dois dados de forma sequencial. Dessa forma, fazendo uso da placa de desenvolvimento STM32F4 Discovery, conectando uma de suas interfaces I2C ao sensor, o mesmo foi configurado para realizar a leitura sequencial dos dados. O sensor BH1750FVI precisou ser configurado para as leituras serem ativadas, pois ele possui a característica de iniciar desativado na primeira energização. Para isso, escreve-se um byte através da I2C com o comando específico de ativação. Após a configuração inicial, mesmo que ele volte para o estado desativado, é possível ler os dados diretamente, pois ele pode se reativar automaticamente com o comando de leitura. O sensor capacitivo de umidade do solo não precisa ser configurado previamente, bastando iniciar a leitura dos seus dados através de um conversor analógico-digital.

Por fim, com o *gateway* conectado ao servidor de rede TTN, com o módulo LoRaWAN configurado e conectado à aplicação e com o microcontrolador e os sensores preparados para uso, deu-se início a tomada de dados. Tanto a leitura dos sensores quanto o envio dos dados para o *gateway* foram realizados a cada 20 minutos. No restante do tempo, o nó sensor ficava em estado de espera para maior economia de energia. No momento das tomadas, primeiramente eram feitas medidas de temperatura e umidade relativa do ar no ambiente com o sensor HDC1080, logo em seguida era lida a luminosidade ambiente com o sensor BH1750FVI e por último era medida a umidade do solo com o sensor capacitivo. Os bytes de dados coletados eram unidos e transformados em uma *string* na placa de desenvolvimento STM32F4 Discovery e passados para o nó sensor através da

interface UART de comandos AT. O nó, então, enviava os dados pela comunicação sem fio LoRa até o *gateway*, que os repassava para o servidor de rede *The Things Network* utilizando o protocolo TCP/IP executando o *Packet Forwarder*. No servidor, os dados recebidos eram apresentados à aplicação criada, onde eram tratados e mostrados como valores representativos de temperatura, umidade relativa do ar, luminosidade e umidade do solo. A Figura 3.11 mostra o fluxograma que representa a funcionalidade do *software* dos nós sensores.

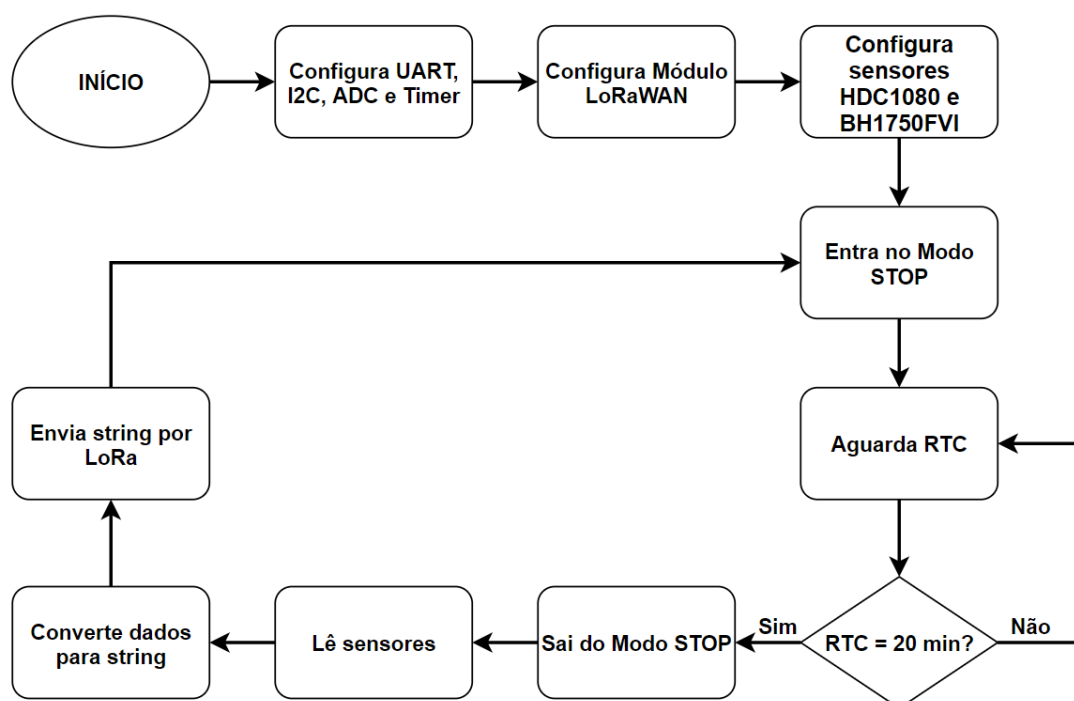
**Figura 3.11:** Fluxograma de funcionamento dos nós sensores no modo *RUN*.



Fonte: Próprio autor.

Para conseguir melhorar o desempenho do consumo de corrente do nó sensor, o *software* da placa de desenvolvimento STM32F4 Discovery foi modificado para que, durante o tempo de espera, ele entrasse no modo *STOP*, que é um modo de baixo consumo de corrente onde o regulador de tensão e os *clocks* dos periféricos são desligados. Para “acordar” o microcontrolador desse estado para que ele pudesse realizar as leituras e envio dos dados, utilizou-se o *Real Time Clock* (RTC), que é um contador independente alimentado por um oscilador interno, para gerar um interrupção a cada período de tempo e religar o sistema. A Figura 3.12 mostra o fluxograma desse *software*.

**Figura 3.12:** Fluxograma de funcionamento dos nós sensores no modo *STOP*.



Fonte: Próprio autor.

## 4 Resultados e Discussão

A aplicação de Redes de Sensores Sem Fio requer características específicas dos nós sensores, visando o melhor desempenho. O consumo de energia dos equipamentos precisa ser baixo, pois, na maiorias das vezes, eles são alimentados por baterias, sendo necessária a otimização de seu uso para prolongar ao máximo o tempo de vida. Além disso, é necessário cobrir uma área ampla, portanto é desejável um alto alcance de transmissão. Dessa forma, a tecnologia escolhida para a aplicação foi a LoRaWAN, visando atender aos requisitos propostos.

Segundo Sinha, Wei e Hwang (2017), o dado teórico de consumo de corrente no modo *Sleep* é de  $1\ \mu\text{A}$ , com um pico de corrente de 32 mA durante o envio, e pode atingir um distância de até 15 km. Em seu trabalho, Wixted et al. (2016) atingiu um distância máxima de 2,2 km em ambiente urbano, enquanto Sanchez-Iborra et al. (2018) obteve o alcance máximo de 6,5 km. Zhao et al. (2017) teve um pico de consumo de corrente de 53 mA no momento do envio dos dados, enquanto o consumo no modo *Sleep* foi de  $97\ \mu\text{A}$ .

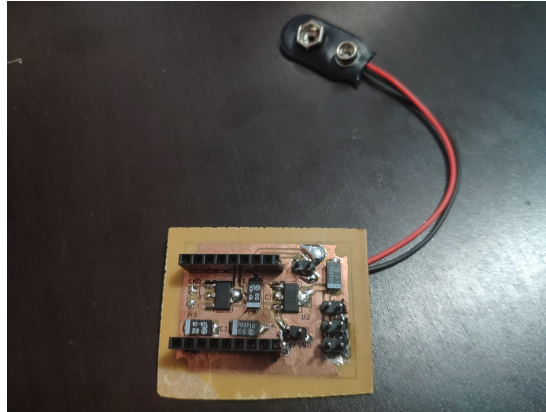
Para a operação dos nós sensores, definiu-se como meta que o consumo de corrente no modo *Sleep* deveria atingir o valor aproximado de  $100\ \mu\text{A}$  e um pico próximo de 50 mA. Ainda, a distância de comunicação escolhida foi de no mínimo 2.000 metros em área urbana.

### 4.1 Montagem dos Nós Sensores

Tanto o módulo LoRaWAN quanto a placa de desenvolvimento STM32F4 Discovery são alimentados com tensão contínua de 5 V, enquanto os três sensores utilizados são ligados com 3,3 V. Primeiramente, foram escolhidas baterias alcalinas de 9 V para alimentar os nós, portanto foi necessário usar um sistema de regulação de tensão para adequar o valor da bateria aos valores requisitados pelos demais componentes. Foram utilizados em cada nó dois reguladores de tensão lineares LM1117, da Texas Instruments, um na versão com saída em 5 V e outro com saída em 3,3 V. Como foi necessário criar um circuito para a ali-

mentação, aproveitou-se o espaço disponível e foram colocados conectores para unir o módulo LoRaWAN, dessa forma otimizando o espaço utilizado. A Figura 4.1 mostra a placa fabricada.

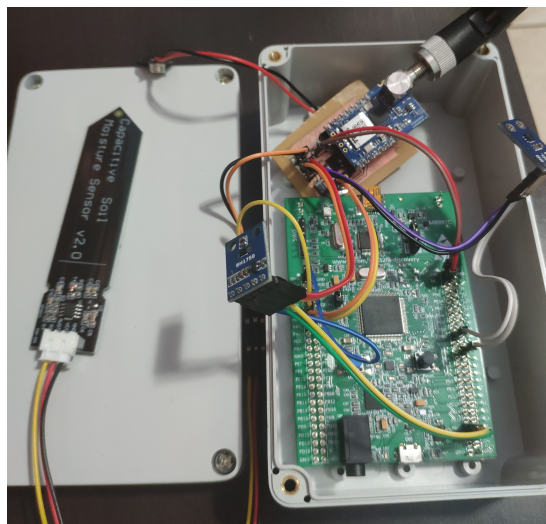
**Figura 4.1:** Placa para alimentação dos componentes dos nós sensores.



Fonte: Próprio autor.

Os quatro nós sensores foram organizados e montados em caixas plásticas fechadas e impermeáveis, visto que eles ficam expostos ao tempo e possíveis intempéries, somente com as partes dos sensores responsáveis pela aquisição dos dados expostas, com seus circuitos também protegidos pela caixa. A Figura 4.2 mostra a realização da montagem.

**Figura 4.2:** Nó sensor sendo montado dentro de caixa plástica com bateria alcalina de 9 V e reguladores de tensão lineares.



Fonte: Próprio autor.

Obteve-se êxito ao ligar os nós sensores utilizando a bateria alcalina de 9 V com o sistema de alimentação escolhido. Os nós puderam desenvolver as tarefas designadas com a energia entregue pela bateria através dos reguladores.

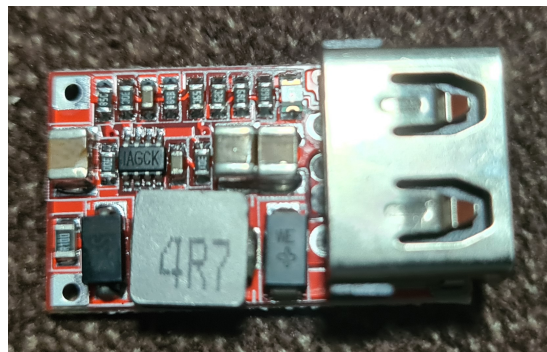
Visando melhorar o desempenho do sistema, a bateria alcalina de 9 V foi substituída por uma bateria de LiPo de 7,4 V recarregável, como mostrada na Figura 4.3, e a placa com reguladores foi trocada por um conversor CC-CC Step Down com saída fixa em 5 V, mostrado na Figura 4.4.

**Figura 4.3:** Bateria LiPo de 7,4 V e 2500 mAh.



Fonte: Próprio autor.

**Figura 4.4:** Conversor CC-CC Step Down com saída fixa em 5 V.



Fonte: Próprio autor.

O nó sensor sendo montado na caixa de plástico impermeável, juntamente com os novos componentes, é mostrado na Figura 4.5.

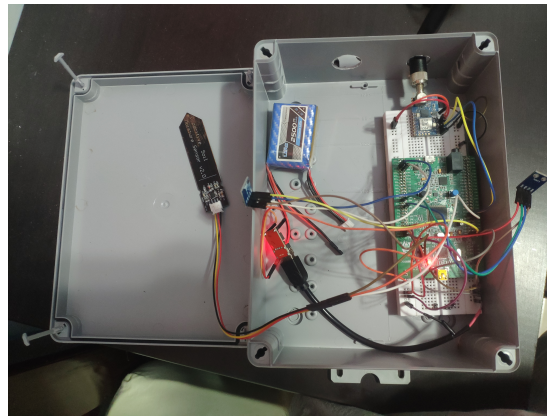
Assim como anteriormente, os nós sensores puderam desempenhar suas tarefas com êxito usando a energia fornecida pela nova bateria através do conversor.

## 4.2 Consumo de Corrente e Tempo de Vida da Bateria

Para iniciar os testes com a Rede de Sensores Sem Fio, foi definido que a leitura dos sensores e o envio dos dados coletados para o servidor de rede se daria a



**Figura 4.5:** Nó sensor sendo montado dentro de caixa plástica com bateria LiPo de 7,4 V e conversor CC-CC.



Fonte: Próprio autor.

cada 1 minuto, de forma que se pudesse visualizar os acontecimentos com maior frequência. A partir disso, deu-se início ao funcionamento da rede, sendo que as informações obtidas dos sensores podiam ser vistas no painel de controle no servidor de rede *The Things Network* em formato de bytes, ou seja, como um conjunto de caracteres hexadecimais duplos, conforme visto na Figura 4.6. O microcontrolador STM32F4 Discovery foi colocado no modo *RUN*, ou seja, todos os periféricos continuavam alimentados e com o seus respectivos *clocks* ligados, mesmo no momento de espera.

Nessa forma de funcionamento, foi possível identificar os eventos que compõem todo o período de atividade dos nós sensores e medir o consumo de corrente e o período de duração de cada evento. Essas medições foram feitas para cada uma das configurações de Fator de Espalhamento e largura de banda definidas pelo *data rate*, conforme a Tabela 2.1. Nesse caso, foi constatado que, apesar das configurações regionais do padrão australiano de 915 MHz permitirem até doze *data rates* diferentes, somente sete são implementados no módulo LoRaWAN utilizado. Levando em conta a operação em Classe A, foram identificados quatro eventos distintos, sendo eles o estado de espera, onde o nó sensor somente aguarda o período de tempo determinado, o estado de transmissão dos dados para a rede e duas janelas de recepção, onde o nó aguarda uma possível chegada de informações da rede. Os valores medidos de corrente consumida em cada evento estão contidos na Tabela 4.1, bem como seus respectivos períodos de duração estão dispostos na Tabela 4.2. O tempo do evento de espera é calculado como a diferença entre o tempo total e os tempos dos demais eventos.

Como a variação da corrente consumida pelo nó sensor em cada evento acon-

**Figura 4.6:** Dados recebidos no servidor de rede a cada 1 minuto.

counter	port	
445	1	payload: 6D 00 9E 64 00 14 B7 00
441	1	payload: 6D 0C 9E 64 00 14 B9 00
438	1	payload: 6D 18 9D E4 00 14 AF 00
437	1	payload: 6D 24 9DA4 00 14 B0 00
435	1	payload: 6D 28 9DA4 00 18 B4 00
434	1	payload: 6D 1C 9D E4 00 18 B4 00
433	1	payload: 6D 18 9DA4 00 14 B7 00
432	1	payload: 6D 18 9D 64 00 00 B5 00
428	1	payload: 6D 38 9D 10 00 00 B7 00
425	1	payload: 6D 6C 9C 0C 00 00 B7 00
424	1	payload: 6D 74 9BCC 00 00 B3 00
422	1	payload: 6DCC 9B 38 00 04 B8 00
421	1	payload: 6E 08 9C 28 00 10 B5 00

Fonte: Próprio autor.

tece na ordem de milissegundos, para realizar a medição dessa corrente, utilizou-se um resistor com valor nominal de  $1\ \Omega$  e tolerância de  $\pm 1\%$ . O valor real do resistor foi obtido com o multímetro digital Uni-T UT89XD, na escala Ôhmica de até  $600\ \Omega$ , sua menor escala. O valor medido foi de  $1,0\ \Omega$ . Esse resistor foi colocado em série com a alimentação do sistema, entre a bateria e o regulador de tensão, assim, seguindo a Lei de Ohm, a queda de tensão medida sobre ele representa o valor da corrente consumida pelo nó, sem interferir no funcionamento do mesmo. A medição do valor da tensão sobre o resistor foi feita com o osciloscópio InstruStar ISDS205B, que possui largura de banda de 20 MHz, taxa de amostragem em tempo real de 48 MS/s e as medidas podem ser feitas diretamente via interface USB.

Com os valores medidos da corrente consumida e do período de cada evento, pode-se calcular a corrente média para cada configuração, conforme a Equação 2.2, e também o tempo aproximado de duração da bateria alcalina de 9 V que

**Tabela 4.1:** Consumo de corrente do nó sensor na operação em Classe A a cada 1 minuto, modo *RUN*.

Configuração	$I_{espera}$ (mA)	$I_{transm}$ (mA)	$I_{rec1}$ (mA)	$I_{rec2}$ (mA)
SF12 / 125 kHz	80	189,0	97,5	97
SF11 / 125 kHz	80	187,5	97,5	97
SF10 / 125 kHz	80	187,5	97,0	97
SF9 / 125 kHz	80	183,0	91,0	91
SF8 / 125 kHz	80	190,0	97,0	95
SF7 / 125 kHz	80	189,0	95,0	95
SF8 / 500 kHz	80	188,0	92,0	95

Fonte: Próprio autor.

**Tabela 4.2:** Período de duração dos eventos do nó sensor na operação em Classe A a cada 1 minuto, modo *RUN*.

Configuração	$t_{espera}$ (s)	$t_{transm}$ (ms)	$t_{rec1}$ (ms)	$t_{rec2}$ (ms)
SF12 / 125 kHz	56,92	1.483,0	796,1	797
SF11 / 125 kHz	58,04	741,1	420,0	796
SF10 / 125 kHz	58,60	370,6	236,4	797
SF9 / 125 kHz	58,88	186,0	136,0	796
SF8 / 125 kHz	59,01	103,5	89,0	796
SF7 / 125 kHz	59,08	57,7	65,4	795
SF8 / 500 kHz	59,11	25,8	64,9	796

Fonte: Próprio autor.

alimenta o nó sensor, segundo a Equação 2.1. Considerando que a bateria possui uma capacidade de carga de 500 mAh, conforme indicado no *datasheet* incluso no Anexo B, os valores calculados se encontram na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3:** Corrente média e duração da bateria do nó sensor na operação em Classe A a cada 1 minuto, modo *RUN*.

Configuração	$I_{Med}$ (mA)	$t_{Bat}$ (h)
SF12 / 125 kHz	83,15	6,01
SF11 / 125 kHz	81,68	6,12
SF10 / 125 kHz	80,96	6,18
SF9 / 125 kHz	80,49	6,21
SF8 / 125 kHz	80,41	6,22
SF7 / 125 kHz	80,32	6,23
SF8 / 500 kHz	80,26	6,23

Fonte: Próprio autor.

O tempo de 1 minuto foi utilizado somente para se obter os valores de corrente consumida e período de duração dos eventos do nó sensor. Porém, determinou-se que o tempo a ser utilizado para as leituras dos sensores e o envio dos dados para a rede durante a operação da RSSF seria de 20 minutos. Assim, levando em consideração que somente o valor do tempo de espera varia com essa mudança, ou seja, as correntes e os períodos medidos dos eventos permanecem os mesmos, calculou-se também a corrente média e a duração da bateria para os 20 minutos, sendo os resultados dispostos na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4:** Corrente média e duração da bateria do nó sensor na operação em Classe A a cada 20 minutos, modo *RUN*.

Configuração	$t_{espera}$ (s)	$I_{Med}$ (mA)	$t_{Bat}$ (h)
SF12 / 125 kHz	1.196,92	80,16	6,24
SF11 / 125 kHz	1.198,04	80,08	6,24
SF10 / 125 kHz	1.198,60	80,05	6,25
SF9 / 125 kHz	1.198,88	80,02	6,25
SF8 / 125 kHz	1.199,01	80,02	6,25
SF7 / 125 kHz	1.199,08	80,02	6,25
SF8 / 500 kHz	1.199,11	80,01	6,25

Fonte: Próprio autor.

Com os resultados obtidos das medições e dos cálculos, pode-se observar que existe um pico de corrente durante o período de transmissão, mas que o *data rate* não influencia diretamente no valor da corrente, sendo que as pequenas diferenças entre os valores se deve à própria medição. Porém, nota-se que o *data rate* tem impacto direto no período de transmissão e no primeiro período de recepção, onde o tempo aumenta conforme o *data rate* diminui. Isso se dá pois a velocidade da

transmissão varia e, consequentemente, é necessário que o nó sensor transmita por mais tempo para *data rates* menores. Esse aumento no tempo de transmissão faz com que a corrente média consumida também aumente, levando a um menor tempo de vida da bateria.

Além disso, é notório que o tempo de vida da bateria aumenta quando o tempo de espera aumenta, já que o maior consumo de energia se dá no momento da transmissão dos dados. Porém, o principal fator que determina o valor da corrente média consumida é a corrente no momento de espera, sendo que esse valor ocupa, no mínimo, 95% do tempo total. A duração da bateria de aproximadamente 6 horas e 15 minutos é um valor consideravelmente baixo, já que o esperado é pouca manutenção e tempo de duração que pode chegar a meses, visto que os nós sensores ficam espalhados por uma área ampla.

Visando melhorar o desempenho e aumentar o tempo de vida dos nós sensores, algumas mudanças em sua construção foram feitas. A bateria alcalina de 9 V foi substituída por uma bateria LiPo recarregável com tensão nominal de 7,4 V e capacidade de corrente de 2.500 mAh, conforme mostra a Figura 4.3. Além disso, como os reguladores de tensão lineares apresentam baixa eficiência na conversão, eles foram substituídos por um conversor CC-CC Step Down com entrada entre 6 V e 24 V e saída fixa em 5 V, que possui uma eficiência de até 97,5% na conversão da tensão e pode fornecer corrente de até 3 A, visto na Figura 4.4. Ainda, o *firmware* utilizado na placa de desenvolvimento STM32F4 Discovery foi modificado e passou a entrar no modo de baixo consumo *STOP*, onde seu regulador de tensão e os *clocks* dos periféricos são desligados visando diminuir o consumo de corrente. O modo *STOP* é controlado pelo temporizador RTC, que permite que o microcontrolador seja reativado para realizar suas tarefas e, em seguida, volte para o modo de baixo consumo.

Mantendo a operação em Classe A, foram identificados cinco eventos distintos, sendo eles o estado de espera, onde o nó sensor somente aguarda o período de tempo determinado em modo de baixo consumo, o estado ativo, onde o microcontrolador realiza as leituras dos sensores e o envio dos dados para o módulo LoRaWAN, o estado de transmissão dos dados para a rede e duas janelas de recepção, onde o nó aguarda uma possível chegada de informações da rede. Esses eventos podem ser vistos na Figura 4.7 e é possível fazer a correlação com o gráfico da Figura 2.3. Os valores medidos de corrente consumida em cada evento estão contidos na Tabela 4.5, bem como seus respectivos períodos de duração estão dispostos na Tabela 4.6.

**Tabela 4.5:** Consumo de corrente do nó sensor na operação em Classe A a cada 1 minuto, modo *STOP*.

Configuração	$I_{esp}$ (mA)	$I_{at}$ (mA)	$I_{tran}$ (mA)	$I_{rec1}$ (mA)	$I_{rec2}$ (mA)
SF12 / 125 kHz	43	73,2	153,3	55,1	55,1
SF11 / 125 kHz	43	72,9	153,3	55,2	55,0
SF10 / 125 kHz	43	73,3	153,0	55,1	54,8
SF9 / 125 kHz	43	73,2	153,8	55,0	55,2
SF8 / 125 kHz	43	73,0	153,7	55,7	54,9
SF7 / 125 kHz	43	73,6	152,8	55,3	55,0
SF8 / 500 kHz	43	73,4	153,8	55,2	55,1

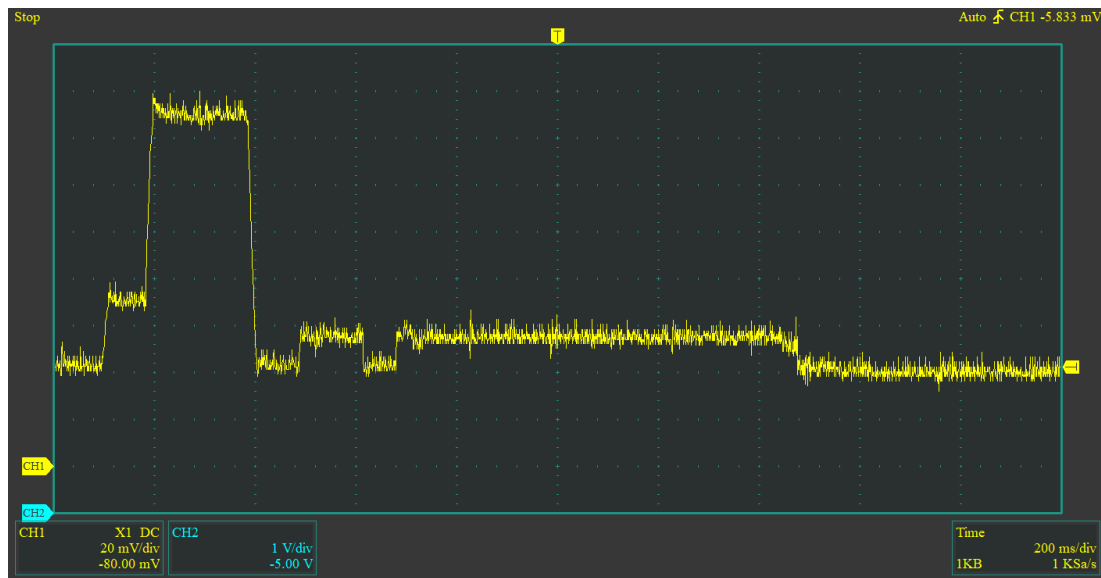
Fonte: Próprio autor.

**Tabela 4.6:** Período de duração dos eventos do nó sensor na operação em Classe A a cada 1 minuto, modo *STOP*.

Configuração	$t_{esp}$ (s)	$t_{at}$ (ms)	$t_{tran}$ (ms)	$t_{rec1}$ (ms)	$t_{rec2}$ (ms)
SF12 / 125 kHz	56,86	60,0	1.482,8	796,0	797
SF11 / 125 kHz	57,98	59,3	741,4	421,2	796
SF10 / 125 kHz	58,54	59,8	370,7	236,1	797
SF9 / 125 kHz	58,82	60,1	185,3	136,3	795
SF8 / 125 kHz	58,95	59,9	102,9	88,7	797
SF7 / 125 kHz	59,02	59,0	56,5	65,2	796
SF8 / 500 kHz	59,05	60,1	25,7	64,8	798

Fonte: Próprio autor.

**Figura 4.7:** Gráfico dos valores de corrente consumida pelo nó sensor na configuração SF9 e 125 kHz.



Fonte: Próprio autor.

Com os valores medidos da corrente consumida e do período de cada evento, pode-se calcular a corrente média para cada configuração, conforme a Equação 2.2, e também o tempo aproximado de duração da bateria LiPo que alimenta o nó sensor, segundo a Equação 2.1. Considerando que a bateria possui uma capacidade de carga de 2.500 mAh, conforme indicado na Figura 4.3, os valores calculados se encontram na Tabela 4.7.

**Tabela 4.7:** Corrente média e duração da bateria do nó sensor na operação em Classe A a cada 1 minuto, modo *STOP*.

Configuração	$I_{Med}$ (mA)	$t_{Bat}$ (h)
SF12 / 125 kHz	46,08	54,26
SF11 / 125 kHz	44,64	56,01
SF10 / 125 kHz	43,91	56,93
SF9 / 125 kHz	43,56	57,39
SF8 / 125 kHz	43,40	57,61
SF7 / 125 kHz	43,31	57,73
SF8 / 500 kHz	43,25	57,80

Fonte: Próprio autor.

Assim como anteriormente, levando em consideração que somente o valor do tempo de espera varia e as correntes e os períodos medidos dos eventos permanecem os mesmos, calculou-se também a corrente média e a duração da bateria para os 20 minutos, sendo os resultados dispostos na Tabela 4.8.

A substituição dos principais componentes de alimentação do nó sensor e a

**Tabela 4.8:** Corrente média e duração da bateria do nó sensor na operação em Classe A a cada 20 minutos, modo *STOP*.

Configuração	$t_{espera}$ (s)	$I_{Med}$ (mA)	$t_{Bat}$ (h)
SF12 / 125 kHz	1.196,92	43,16	57,93
SF11 / 125 kHz	1.198,04	43,08	58,03
SF10 / 125 kHz	1.198,60	43,05	58,07
SF9 / 125 kHz	1.198,88	43,03	58,10
SF8 / 125 kHz	1.199,01	43,02	58,11
SF7 / 125 kHz	1.199,08	43,02	58,12
SF8 / 500 kHz	1.199,11	43,01	58,12

Fonte: Próprio autor.

utilização do modo de baixo consumo no *firmware* do microcontrolador melhoraram o desempenho e o tempo de vida do nó. A corrente média consumida pelo nó passou de 80 mA para 43 mA, apresentando uma diminuição de 46,25% no consumo, enquanto o tempo de vida aumentou, passando de 6 horas e 15 minutos para aproximadamente 58 horas, o que representa 9,3 vezes mais tempo de funcionamento da bateria. Assim, observa-se que as mudanças realizadas surtiram o efeito esperado, diminuindo o consumo e aumentando o tempo de vida do nó sensor. Porém, o valor de corrente estipulado ainda não pode ser atingido nessas condições, sendo necessário ainda desenvolver melhorias e soluções para que possa ser atingido.

Como o valor mais significante de corrente é o valor durante o período de espera, já que ele ocupa mais de 95% do período de tempo, considerando o *firmware* com o modo *STOP* ativado, foram medidas as correntes consumidas por cada componente separadamente durante esse período. A placa de desenvolvimento STM32F4 Discovery possui pinos que permitem a leitura da corrente do microcontrolador de forma isolada do restante dos componentes da placa. Dessa forma, foram medidas as correntes consumidas pelo microcontrolador somente, pela placa de desenvolvimento como um todo e pelo módulo LoRaWAN. Os resultados estão dispostos na Tabela 4.9.

**Tabela 4.9:** Corrente consumida por cada componente isolado, em modo *STOP*.

Componente	$I_{isolado}$ (mA)
Módulo LoRaWAN	4,5
Placa STM32F4 Discovery	36,0
Microcontrolador STM32F407VGT6	5,0

Fonte: Próprio autor.

A partir dos dados da Tabela 4.9, observou-se que os demais componentes



presentes na placa de desenvolvimento, como o sistema de programação embarcado STLink V2, por exemplo, ainda continuam ativos e consumindo corrente da bateria. Isso também é possível identificar visualmente, visto que o LED continua aceso mesmo com o microcontrolador tendo seu regulador de tensão desativado. Dessa forma, uma possível melhoria para que o nó sensor possa consumir menos corrente e possuir mais tempo de vida é desativar os sistemas que continuam operantes, substituir a placa de desenvolvimento por outro microcontrolador que não possua essa característica ou ainda construir uma placa dedicada, eliminando tudo que não é utilizado e consome energia da bateria.

### 4.3 Distância de Comunicação

Um fator importante a se determinar no uso de sistemas de comunicação sem fio é a distância máxima de comunicação, ou seja, o quão longe os nós sensores podem estar do *gateway* e ainda conseguir enviar os pacotes de dados até ele. Assim, foram feitos testes para determinar a distância de comunicação em cada uma das configurações de Fator de Espalhamento e largura de banda. Primeiramente, os nós foram configurados com o Fator de Espalhamento 12 e largura de banda de 125 kHz e levados a uma distância de 500 metros do *gateway*, sendo aferida com o medidor de distância digital de um carro. A comunicação era testada nesse ponto e, caso ainda houvesse entrega dos pacotes, os nós eram novamente distanciados em 500 metros do último ponto, até que não houvesse mais êxito no envio dos dados. Após isso, a distância era refinada, medindo a cada 100 metros até atingir o ponto correto. Para as demais configurações, sabendo que as distâncias seriam menores, partia-se do último ponto medido na configuração anterior e retornava-se 100 metros, até a comunicação voltar a existir. As distâncias determinadas estão dispostas na Tabela 4.10.

**Tabela 4.10:** Distâncias máximas alcançadas pela comunicação sem fio LoRa.

Configuração	Distância (m)
SF12 / 125 kHz	3.000
SF11 / 125 kHz	2.700
SF10 / 125 kHz	2.400
SF9 / 125 kHz	2.000
SF8 / 125 kHz	1.800
SF7 / 125 kHz	1.500
SF8 / 500 kHz	1.500

Fonte: Próprio autor.

Com os dados obtidos da Tabela 4.10, é possível observar que a menor

distância máxima é de 1.500 metros para as configurações SF7 e 125 kHz e para SF8 e 500 kHz, enquanto a maior distância máxima é de 3.000 metros para a configuração SF12 e 500 kHz. Isso mostra que o fator de espalhamento e a largura de banda determinam o quão longe a comunicação pode chegar, ou seja, quanto maior o fator de espalhamento, maior será a distância atingida.

Além disso, outro fator que determina o comportamento da comunicação sem fio é o ambiente ao qual ele está inserido. Em ambiente urbano, a distância máxima tende a ser menor que em um ambiente rural, pois há mais obstáculos que interferem no sinal de comunicação, causando enfraquecimento do sinal e até mesmo perda de dados.

## 4.4 Recepção e Tratamento dos Dados

Com o período de coleta dos dados e transmissão dos mesmos para o servidor de rede definido em 20 minutos, iniciou-se novas medições que duraram por algumas horas. Os dados captados pelos sensores foram, então, disponibilizados para visualização.

A cada leitura dos sensores, eram coletados 8 bytes de informação e enviados para o servidor. Os dois primeiros bytes eram referentes ao valor de temperatura ambiente coletados com o sensor HDC1080 e os bytes 3 e 4 foram referentes ao valor da umidade relativa do ar também do sensor HDC1080. Os bytes 5 e 6 foram as medidas de luminosidade feitas com o sensor BH1750FVI e os últimos dois significavam o valor lido do sensor capacitivo de umidade do solo.

Todos os bytes recebidos pelo servidor de rede foram tratados diretamente na aplicação criada, a partir do código mostrado na Figura 4.8. Esses dados foram transformados em valores representativos de temperatura, umidade relativa, luminosidade e umidade do solo baseado nas Equações 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4, respectivamente.

Os dados convertidos foram, então, apresentados na página da aplicação de forma a ser possível interpretá-los facilmente, conforme mostrado nas Figuras 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12 para o primeiro, segundo, terceiro e quarto nós, respectivamente.

O fato de os dados poderem ser convertidos diretamente no servidor de rede, ao invés de fazer isso no próprio nó sensor antes de enviá-los, é de grande importância para diminuir consumo de energia, fator que é crítico para a durabilidade da bateria.

**Figura 4.8:** Função de tratamento dos dados no servidor de rede.

```
1 function Decoder(bytes, port) {
2   var temperature = Number((((bytes[0] << 8) | bytes[1])/65536.00)*165.00 - 40.00).toFixed(2);
3   var humidityair = Number((((bytes[2] << 8) | bytes[3])/65536.00)*100.00).toFixed(2);
4   var luminosity = Number((((bytes[4] << 8) | bytes[5])/1.20)).toFixed(2);
5   var humiditysoil = Number((((bytes[6] << 4) | (bytes[7] >> 4))/40.95)*(-1.00)) + 100.00).toFixed(2);
6
7   return {
8     Temp: temperature,
9     UmiAr: humidityair,
10    Lumi: luminosity,
11    UmiSolo: humiditysoil,
12  }
13 }
```

decoder has no changes

Fonte: Próprio autor.

Notou-se que alguns dos dados que eram coletados, mesmo sendo enviados através do LoRa, não eram recepcionados no servidor de rede. As perdas de dados em sistemas de comunicação, especialmente em comunicação sem fio, são comuns e podem ser detectadas e reenviadas pelo nó sensor por meio da retransmissão das informações que foram perdidas, caso aquela informação seja crucial para o bom desempenho de algum sistema. Em operações onde a perda de dados não é algo crítico, pode-se deixar de usar a retransmissão. Nesse caso, como os dados coletados variam lentamente, optou-se por não usar a retransmissão e aguardar a próxima chegada de dados.

A utilização da tecnologia das Redes de Sensores Sem Fio, aliada à conectividade LoRaWAN, trazem benefícios diretos ao usuário, que pode automatizar seus sistemas e intervir de forma rápida e eficaz caso algum problema seja detectado.

**Figura 4.9:** Dados recebidos no servidor de rede a cada 20 minutos e com valores convertidos para o primeiro nó sensor.

port					
1	payload: 6E 4C 98 A0 02 80 93 00	Lumi: "533.33"	Temp: "31.09"	UmiAr: "59.62"	UmiSolo: "42.56"
1	payload: 6E 94 97 CC 02 80 98 00	Lumi: "533.33"	Temp: "31.27"	UmiAr: "59.30"	UmiSolo: "40.61"
1	payload: 6E 98 96 8C 02 C0 95 00	Lumi: "586.67"	Temp: "31.28"	UmiAr: "58.81"	UmiSolo: "41.78"
1	payload: 6E D8 95 F8 02 D0 8F 00	Lumi: "600.00"	Temp: "31.44"	UmiAr: "58.58"	UmiSolo: "44.13"
1	payload: 6F 00 94 38 02 DC 96 00	Lumi: "610.00"	Temp: "31.54"	UmiAr: "57.90"	UmiSolo: "41.39"
1	payload: 6F 30 92 20 02 DC 8C 00	Lumi: "610.00"	Temp: "31.66"	UmiAr: "57.08"	UmiSolo: "45.30"
1	payload: 6F 58 92 60 04 28 A1 00	Lumi: "886.67"	Temp: "31.76"	UmiAr: "57.18"	UmiSolo: "37.09"
1	payload: 6F 88 90 D0 04 28 99 00	Lumi: "886.67"	Temp: "31.89"	UmiAr: "56.57"	UmiSolo: "40.22"
1	payload: 6F 9C 90 4C 02 C0 99 00	Lumi: "586.67"	Temp: "31.94"	UmiAr: "56.37"	UmiSolo: "40.22"
1	payload: 70 30 89 F8 02 C0 A1 00	Lumi: "586.67"	Temp: "32.31"	UmiAr: "53.89"	UmiSolo: "37.09"
1	payload: 70 68 83 60 05 B8 8B 00	Lumi: "1220.00"	Temp: "32.45"	UmiAr: "51.32"	UmiSolo: "45.69"

Fonte: Próprio autor.

**Figura 4.10:** Dados recebidos no servidor de rede a cada 20 minutos e com valores convertidos para o segundo nó sensor.

port					
2	payload: 6DCC 6E 70 A5 74 07 00	Lumi: "35296.67"	Temp: "30.77"	UmiAr: "43.14"	UmiSolo: "6.62"
2	payload: 6D 94 6E C0 A6 00 F3 00	Lumi: "35413.33"	Temp: "30.63"	UmiAr: "43.26"	UmiSolo: "5.05"
2	payload: 6D8C 6F 00 A6 00 0E 00	Lumi: "35413.33"	Temp: "30.61"	UmiAr: "43.36"	UmiSolo: "8.18"
2	payload: 6D6C 6F C0 A6 C8 FA 00	Lumi: "35580.00"	Temp: "30.53"	UmiAr: "43.65"	UmiSolo: "2.32"
2	payload: 6D 38 70 00 A6 3C 12 00	Lumi: "35463.33"	Temp: "30.39"	UmiAr: "43.75"	UmiSolo: "5.45"
2	payload: 6D 30 70 10 A5 84 FA 00	Lumi: "35310.00"	Temp: "30.37"	UmiAr: "43.77"	UmiSolo: "2.32"
2	payload: 6D 14 70 10 A4 DC 0E 00	Lumi: "35170.00"	Temp: "30.30"	UmiAr: "43.77"	UmiSolo: "6.23"
2	payload: 6C E8 6F 4C A4 DCF 6 00	Lumi: "35170.00"	Temp: "30.19"	UmiAr: "43.48"	UmiSolo: "3.88"
2	payload: 6D 24 6F 0C A4 DC 0F 00	Lumi: "35170.00"	Temp: "30.34"	UmiAr: "43.38"	UmiSolo: "3.88"
2	payload: 6D 60 6F 00 A4 B8 FA 00	Lumi: "35140.00"	Temp: "30.50"	UmiAr: "43.36"	UmiSolo: "2.32"
2	payload: 6D 84 6F C0 A4 B8 10 00	Lumi: "35140.00"	Temp: "30.59"	UmiAr: "43.65"	UmiSolo: "3.49"

Fonte: Próprio autor.

**Figura 4.11:** Dados recebidos no servidor de rede a cada 20 minutos e com valores convertidos para o terceiro nó sensor.

port					
3	payload: 6D 74 74 08 C0 48 B5 00	Lumi: "41020.00"	Temp: "30.59"	UmiAr: "45.32"	UmiSolo: "29.28"
3	payload: 6D 44 74 C8 C0 48 88 00	Lumi: "41020.00"	Temp: "30.59"	UmiAr: "45.62"	UmiSolo: "46.86"
3	payload: 6D 38 74 48 C0 68 B3 00	Lumi: "41046.67"	Temp: "30.63"	UmiAr: "45.42"	UmiSolo: "30.06"
3	payload: 6D 28 73 54 C0 68 86 00	Lumi: "41046.67"	Temp: "30.73"	UmiAr: "45.05"	UmiSolo: "47.64"
3	payload: 6D 44 73 48 BE 54 B9 00	Lumi: "40603.33"	Temp: "30.90"	UmiAr: "45.03"	UmiSolo: "27.72"
3	payload: 6D 54 73 88 BE 0C 90 00	Lumi: "40543.33"	Temp: "31.12"	UmiAr: "45.13"	UmiSolo: "43.74"
3	payload: 6D 38 71 84 BE 0C B8 00	Lumi: "40543.33"	Temp: "31.25"	UmiAr: "44.34"	UmiSolo: "28.11"
3	payload: 6D 60 71 04 BE 50 9D 00	Lumi: "40600.00"	Temp: "31.39"	UmiAr: "44.15"	UmiSolo: "38.66"
3	payload: 6D 8C 74 08 BE F4 C2 00	Lumi: "40736.67"	Temp: "31.77"	UmiAr: "45.32"	UmiSolo: "24.20"
3	payload: 6D 7C 73 88 BE 7C 9E 00	Lumi: "40636.67"	Temp: "32.08"	UmiAr: "45.13"	UmiSolo: "38.27"
3	payload: 6D 64 72 84 BE 84 D1 00	Lumi: "40643.33"	Temp: "32.52"	UmiAr: "44.73"	UmiSolo: "18.34"
3	payload: 6D 8C 72 44 BE 50 AA 00	Lumi: "40600.00"	Temp: "33.09"	UmiAr: "44.64"	UmiSolo: "33.58"

Fonte: Próprio autor.

**Figura 4.12:** Dados recebidos no servidor de rede a cada 20 minutos e com valores convertidos para o quarto nó sensor.

port					
4	payload: 5E F8BD44 09 34 FE 00	Lumi: "1963.33"	Temp: "21.21"	UmiAr: "73.93"	UmiSolo: "8.18"
4	payload: 5E FCBAB4 09 30 E8 00	Lumi: "1960.00"	Temp: "21.22"	UmiAr: "72.93"	UmiSolo: "9.35"
4	payload: 5F 18BC68 09 3C 02 00	Lumi: "1970.00"	Temp: "21.29"	UmiAr: "73.60"	UmiSolo: "8.18"
4	payload: 5F 24BB20 09 38 EA 00	Lumi: "1966.67"	Temp: "21.32"	UmiAr: "73.10"	UmiSolo: "8.57"
4	payload: 5F 18BA9C 09 30 0D 00	Lumi: "1960.00"	Temp: "21.29"	UmiAr: "72.89"	UmiSolo: "4.66"
4	payload: 5F 1CBA18 09 2C EF 00	Lumi: "1956.67"	Temp: "21.30"	UmiAr: "72.69"	UmiSolo: "6.62"
4	payload: 5F 28BB60 09 34 0E 00	Lumi: "1963.33"	Temp: "21.33"	UmiAr: "73.19"	UmiSolo: "5.05"
4	payload: 5F 30BD2C 09 2C F2 00	Lumi: "1956.67"	Temp: "21.35"	UmiAr: "73.90"	UmiSolo: "5.45"
4	payload: 5F 34BD70 09 2C 0E 00	Lumi: "1956.67"	Temp: "21.36"	UmiAr: "74.00"	UmiSolo: "5.05"
4	payload: 5F 44BAE0 09 30 FA 00	Lumi: "1960.00"	Temp: "21.40"	UmiAr: "73.00"	UmiSolo: "2.32"
4	payload: 5F 58B8D0 07 4C 13 00	Lumi: "1556.67"	Temp: "21.45"	UmiAr: "72.19"	UmiSolo: "4.66"
4	payload: 5F 6CB850 07 B4 F4 00	Lumi: "1643.33"	Temp: "21.50"	UmiAr: "72.00"	UmiSolo: "4.66"

Fonte: Próprio autor.

## 5 Conclusões

### 5.1 Conclusão

A partir dos testes realizados com o sistema proposto, foi possível implementar uma Rede de Sensores Sem Fio utilizando a tecnologia de comunicação sem fio LoRaWAN. Além disso, os nós sensores que compõem a rede puderam ser alimentados tanto com uma bateria alcalina de 9V a partir de um circuito de regulação linear quanto com uma bateria LiPo de 7,4 V e 2.500 mAh através de um conversor CC-CC, o que é importante para a aplicação do tipo de comunicação proposto. Porém, com a bateria alcalina de 9 V, o consumo de corrente no período de espera, de 80 mA, ainda pode ser considerado alto para a aplicação, o que torna o tempo de vida da bateria curto, com pouco mais de 6 horas de duração. Com a substituição da bateria por uma de capacidade maior e o uso de conversor CC-CC, além da modificação no *software* do nó sensor, obteve-se uma melhora significativa na performance, com um consumo no período de espera de 43 mA e tempo de duração da bateria de aproximadamente 58 horas. Mas os valores pretendidos para o consumo, de 100  $\mu$ A no modo *Sleep* e 50 mA na transmissão, ainda não puderam ser atingidos.

Para melhorar a performance, se faz necessário utilizar um microcontrolador em placa dedicada ao invés da placa de desenvolvimento STM32F4 Discovery, sendo que alguns componentes dela consomem corrente acima do desejado. Considerando que a distância de comunicação alcançada foi de, pelo menos, 1.500 metros, podendo chegar aos 3.000 metros, os valores obtidos foram satisfatórios, tendo em vista que o valor desejado era de 2.000 metros em área urbana. Os bytes de dados são convertidos para valores representativos das medidas no próprio servidor de rede, o que ajuda a minimizar o consumo de energia dos nós sensores e ainda permite visualizar os dados de forma segura.

## 5.2 Trabalhos Futuros

- Utilizar um microcontrolador externo diferente para controle do nó sensor, de forma que o consumo de corrente possa ser ainda mais aprimorado;
- Desenvolver um algoritmo de controle do fluxo de dados, de forma que possa ser identificadas possíveis perdas de dados e realizada a retransmissão dos mesmos;
- Realizar trabalhos relacionados ao funcionamento e configuração do *gateway*, buscando aprimorar a cobertura da rede e o tratamento dos dados recebidos;
- Usar uma quantidade maior de nós sensores e *gateways*, sendo possível a aplicação do ADR na Rede de Sensores sem Fio.



## Anexo A – Comandos AT

### A.1 Formato dos Comandos

- “AT+comando<modificador>”
  - “=” para get
  - “=” para set
  - somente comando para run
  - “?” para help

Exemplos:

- “AT+JOIN” - Executa o comando de *join*
- “AT+DADDR=” - Retorna o endereço do dispositivo
- “AT+SEND=5:teste” - envia o texto na porta selecionada
- “AT+CHMASK?” - Help do comando CHMASK

### A.2 Lista de Comandos

Todos os comandos iniciam com AT.

**Tabela A.1:** Lista de comandos AT.

String de Comando	Descrição
+DADDR	Recebe/estabelece o endereço do dispositivo
+APPKEY	Recebe/estabelece a chave de aplicação
+APPSKEY	Recebe/estabelece a chave de sessão de aplicação
+NWKSKEY	Recebe/estabelece a chave de sessão de rede
+APPEUI	Recebe/estabelece o número EUI da aplicação
+ADR	Recebe/estabelece a taxa de dados adaptativa
+TXP	Recebe/estabelece a potência de transmissão
+DR	Recebe/estabelece o <i>data rate</i>
+DCS	Recebe/estabelece o ETSI <i>Duty cycle</i>
+PNM	Recebe/estabelece a rede pública
+DEUI	Recebe o número EUI do dispositivo kHz
+RX2FQ	Recebe/estabelece a janela de frequência Rx2
+RX2DR	Recebe/estabelece o <i>data rate</i> da janela Rx2
+RX1DL	Recebe/estabelece o <i>delay</i> da janela Rx1
+RX2DL	Recebe/estabelece o <i>delay</i> da janela Rx2
+JN1DL	Recebe/estabelece o <i>delay</i> de <i>join</i> da janela Rx1
+JN2DL	Recebe/estabelece o <i>delay</i> de <i>join</i> da janela Rx2
+NJM	Recebe/estabelece o modo de <i>join</i>
+NWKID	Recebe/estabelece o ID da rede
+CLASS	Recebe/estabelece a classe do dispositivo
+JOIN	Executa o procedimento de <i>join</i>
+NJS	Recebe o <i>status</i> do procedimento de <i>join</i>
+SENDB	Envia dados hexadecimais junto à porta da aplicação
+SEND	Envia dados de texto junto à porta da aplicação
+VER	Recebe a versão do <i>firmware</i> instalado
+CFM	Recebe/estabelece o modo de confirmação
+SNR	Recebe o SNR do último pacote recebido
+RSSI	Recebe o RSSI do último pacote recebido
+BAT	Recebe o nível da bateria
+BAUDRATE	Recebe/estabelece o <i>baud rate</i> da interface UART
+NBTRIALS	Recebe/estabelece o número de tentativas de retransmissão
+KEEPAIVE	Recebe/estabelece os pacotes <i>keep alive</i> do dispositivo
+CHMASK	Recebe/estabelece a máscara de canal
+ADC	Realiza a leitura dos pinos analógicos
+GPIOC	Configura os pinos I/O
+WPIN	Realiza a escrita dos pinos
+RPIN	Realiza a leitura dos pinos

Fonte: Adaptado de Radioenge (2020).

# Anexo B – Datasheet Bateria 9 V

# PRODUCT DATASHEET

**Energizer®**

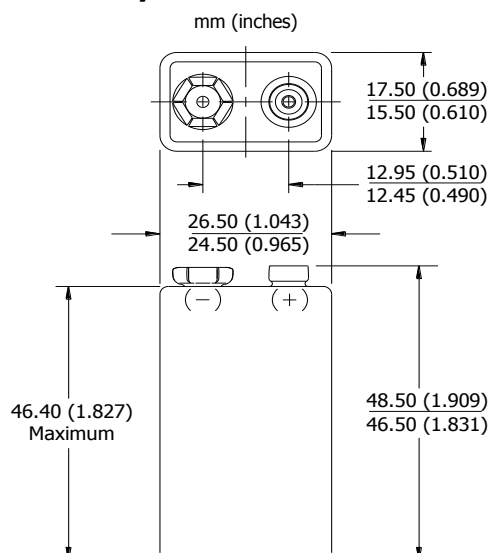
**Western European Region**  
+ 44 1494 556111  
[www.energizer.eu](http://www.energizer.eu)

9V

## ENERGIZER MAX



## Industry Standard Dimensions

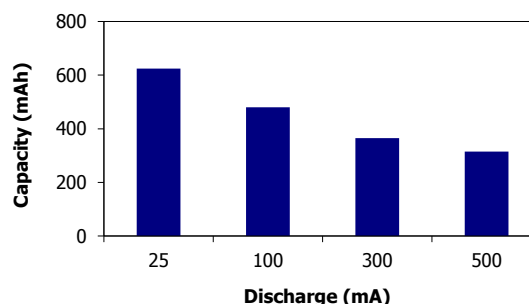


## Specifications

<b>Classification:</b>	Alkaline
<b>Chemical System:</b>	Zinc-Manganese Dioxide (Zn/MnO <sub>2</sub> ) No added mercury or cadmium
<b>Designation:</b>	ANSI-1604A, IEC-6LR61
<b>Nominal Voltage:</b>	9.0 volts
<b>Operating Temp:</b>	-18°C to 55°C (0°F to 130°F)
<b>Typical Weight:</b>	45.6 grams (1.6 oz.)
<b>Typical Volume:</b>	21.1 cubic centimeters (1.3 cubic inch)
<b>Jacket:</b>	Metal
<b>Shelf Life:</b>	5 years at 21°C
<b>Terminal:</b>	Miniature Snap

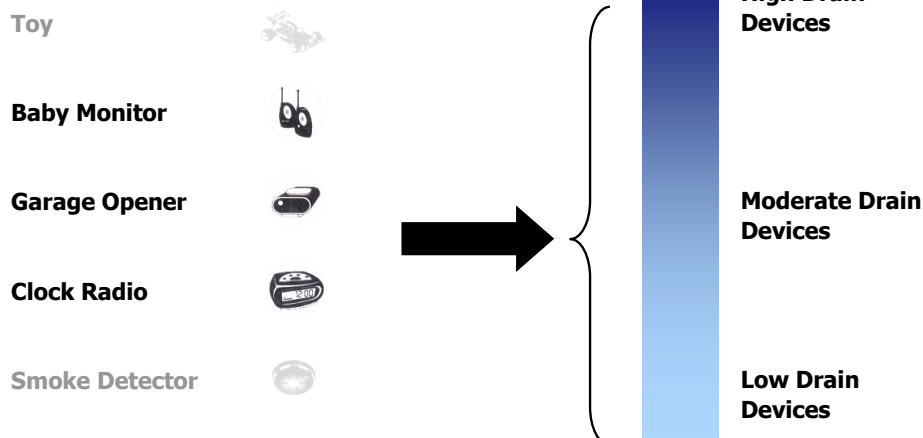
### Milliamp-Hours Capacity

Continuous discharge to 4.8 volts at 21°C



## Device Selection Guide:

### Battery Selection Indicator



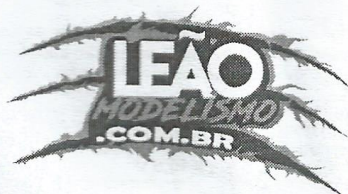
### **Important Notice**

**Important Notice**  
This datasheet contains typical information specific to products manufactured at the time of its publication.

©Energizer Holdings, Inc. - Contents herein do not constitute a warranty.



## Anexo C – Manual Bateria LiPo 7,4 V



### MANUAL DAS BATERIAS DE POLÍMERO DE LÍTIO DE ALTA POTÊNCIA (LI-PO)

Obrigado por adquirir uma bateria da Leão Modelismo (Li-Po). As baterias Li-Po oferecem uma excelente mistura de peso, potência e desempenho. No entanto, como todas as baterias Li-Po, elas exigem manuseio e cuidados adequados para um desempenho seguro e máximo.

As baterias de polímero de lítio vêm parcialmente carregadas e são significativamente mais voláteis do que as baterias alcalinas Ni-Cd ou Ni-MH. Mantenha as baterias fora do alcance das crianças, a menos que supervisionadas por um adulto responsável. Todas as instruções e avisos devem ser seguidos exatamente. **O MAU USO DAS BATERIAS LI-PO PODE RESULTAR EM INCÊNDIO.** Para mais informações, leia as seguintes instruções na íntegra antes de manusear e usar. Ao manusear, carregar ou usar esta bateria Li-Po, você assume todos os riscos associados às baterias de polímero de lítio. Se você não concordar com estas condições, retorne a bateria em condição nova e sem uso ao local de compra imediatamente.

#### MANUSEIO E ARMAZENAMENTO

- 1) Baterias Li-Po devem sempre ser manuseadas com extremo cuidado. Cuidados devem ser tomados para evitar que sejam golpeados, amassados, perfurados (especialmente por objetos metálicos, como chaves de fenda ou facas) ou danificados de alguma outra forma.
- 2) Cuidado deve ser tomado para garantir que a bateria nunca esteja em curto. Mesmo um breve curto pode causar danos permanentes e catastróficos à bateria e resultar em incêndio. Uma bateria que tenha ficado em curto-circuito por apenas uma fração de segundo deve ser colocada em uma área aberta longe de materiais inflamáveis e observada por pelo menos 15 minutos. Também deve ser removido da utilização imediatamente. Para ajudar a evitar curtos-circuitos, é melhor armazenar e transportar a bateria em um recipiente não condutor (e de preferência à prova de fogo).
- 3) Ao armazenar ou transportar temporariamente a bateria, a faixa de temperatura deve ser de aproximadamente 4 a 49 graus Celsius para obter os melhores resultados. Não guarde a bateria em um carro ou luz solar direta, sempre que possível. Se armazenada em um carro quente, a bateria pode ser danificada ou até pegar fogo se a temperatura dentro do carro ficar muito quente.
- 4) Guarde a bateria em temperatura ambiente e aproximadamente 1/2 de carga para obter melhores resultados. Uma célula de Li-Po é aproximadamente 50% carregada quando está em 3.8V.

#### A TENSÃO APROXIMADA DE 1/2 CARGA PARA UMA BATERIA:

2S	3S	4S	5S	6S
(7.4V nominal) é de 7.6V	(11.1V nominal) é de 11.4V	(14.8 V nominal) é de 15.2 V	(18.5V nominal) é de 19.0V	(22.2V nominal) é de 22.8V

#### ANTES DA PRIMEIRA CARGA

- 1) Faça uma inspeção visual e física da bateria. Procure por condutores ou conectores danificados ou soltos, tubos encolhidos ou outras irregularidades que possam causar curto-circuito e eventual incêndio.
- 2) Verifique a polaridade adequada dos condutores e conectores instalados na fábrica. Use um voltímetro digital para garantir que as polaridades estejam corretas.
- 3) Verifique a voltagem da bateria usando um voltímetro digital ou o medidor de voltagem. A tensão das células dentro da bateria deve estar entre 3,5V e 3,9V cada.

#### A TENSÃO APROXIMADA DE UMA BATERIA NOVA DEVE VARIAR DE:

2S	3S	4S	5S	6S
(7.4V nominal) entre 7,0V e 7,8V	(11.1V nominal) entre 10,5V e 11,4V	(14,8 V nominal) entre 14,0V e 15,6V	(18.5V nominal) entre 17,5V e 19,5V	(22.2V nominal) entre 21,0V e 23,4V

Se algum dano ou irregularidade for encontrado, a polaridade das pontas ou dos conectores do fio não estiver correta, ou a voltagem da bateria for maior ou menor que as faixas listadas acima, ligue para (44) 3026-1860 para falar com um técnico de serviço. NÃO continue a manusear ou tentar usar a bateria sem instruções adicionais.

#### DIRETRIZES DE CARREGAMENTO E AVISOS

- 1) Você DEVE usar um carregador projetado especificamente para carregar APENAS baterias Li-Po. O carregador deve ser capaz de carregar "corrente constante / tensão constante". O não uso do carregador adequado pode resultar em incêndio causando ferimentos e / ou danos à propriedade. NÃO use um carregador Ni-Cd ou Ni-MH a qualquer momento.
- 2) A bateria deve sempre ser carregada em uma área aberta longe de qualquer material inflamável. A bateria nunca deve ser carregada dentro do equipamento ou em um veículo de tamanho normal. Também é sugerido que um extintor de incêndio do tipo "ABC" esteja prontamente acessível na área de carregamento, no caso de quaisquer problemas que resultarem em incêndio.
- 3) Nunca carregue a bateria sem supervisão. Ao carregar a bateria, você deve sempre permanecer em observação constante para monitorar o processo de carregamento e reagir a possíveis problemas que possam ocorrer.
- 4) Não carregue as baterias em série e / ou paralelo. Cada bateria deve ser carregada individualmente.
- 5) Após a descarga, a bateria deve ser resfriada à temperatura ambiente antes do carregamento.
- 6) Certifique-se de que o carregador esteja configurado para a contagem de células e / ou voltagem correta indicada na etiqueta da bateria. Como precaução adicional, confirme se as informações listadas no rótulo estão corretas.
- 7) Certifique-se de que o carregador esteja configurado para a taxa de carga correta. O carregador nunca deve ser configurado para carregar a bateria a uma taxa maior que 1C (1 vez a capacidade da bateria em amp horas). Alguns exemplos estão listados abaixo.

Baterias 430mAh devem ser carregadas em ou abaixo de 0,43 amps  
Baterias 800mAh devem ser carregadas em ou abaixo de 0,80 amps  
Baterias 1500mAh devem ser carregadas em ou abaixo de 1,5 amps  
Baterias 1800mAh devem ser carregadas em ou abaixo de 1,8 amps

Baterias 2100mAh devem ser carregadas em ou abaixo de 2,1 amps  
Baterias 3200mAh devem ser carregadas em ou abaixo de 3,2 amps  
Baterias 4000mAh devem ser carregadas em ou abaixo de 4,0 amps  
Baterias 5000mAh devem ser carregadas em ou abaixo de 5,0 amps



- 8) Você deve verificar a voltagem da bateria (usando um voltímetro digital ou medidor de voltagem) antes de cada sessão de carga para garantir que esteja na voltagem de partida mínima segura. Uma bateria que está abaixo da tensão inicial mínima de segurança foi sobrecarregada ou sofreu uma falha de uma ou mais das células e não deve ser carregada. A tensão inicial mínima segura é de aproximadamente 3,1V por célula.

NÃO CARREGUE UMA BATERIA:	2S (7.4V nominal) se estiver abaixo de 6,2V	3S (11.1V nominal) se estiver abaixo de 9,3V	4S (14.8V nominal) se estiver abaixo de 12,4V	5S (18,5 V nominal) se estiver abaixo de 15,5 V	6S (22,2 V nominal) se estiver abaixo de 18,6 V
---------------------------------	---	--	---	---	---

- 9) Não é recomendado "recarregar" uma bateria Li-Po totalmente carregada ou quase totalmente carregada. Tentar fazê-lo pode fazer com que o carregador sobrecarregue a bateria, resultando em danos à bateria e possível incêndio. Se a voltagem de cada célula dentro da bateria for de aproximadamente 4,1V ou superior, é melhor descarregar a bateria por pelo menos um curto período de tempo antes de tentar carregá-la.

NÃO CARREGUE UMA BATERIA:	2S (7.4V nominal) se estiver em ou acima de 8,2V	3S (11.1V nominal) se estiver em ou acima de 12,3V	4S (14.8V nominal) se estiver em ou acima de 16,4V	5S (18,5 V nominal) se estiver em ou acima de 20,5 V	6S (22,2 V nominal) se estiver em ou acima de 24,6 V
---------------------------------	--	--	--	--	--

- 10) As células de Li-Po NUNCA devem ser carregadas acima de 4,2V. Qualquer célula carregada com uma voltagem superior a 4,2V pode ser danificada e pode pegar fogo.

NÃO CARREGUE UMA BATERIA:	2S (7.4V nominal) se estiver mais que 8,4V	3S (11.1V nominal) se estiver mais que 12,6V	4S (14.8V nominal) se estiver mais que 16,8V	5S (18,5 V nominal) se estiver mais que 21,0 V	6S (22,2 V nominal) se estiver mais que 25,2 V
---------------------------------	--	--	--	--	--

- 11) Nunca aplique uma carga "lenta" a uma bateria Li-Po. O carregamento lento mesmo nas taxas mais baixas possíveis fará com que as células dentro da bateria sejam carregadas além de 4,2V, resultando em dano celular e potencial de incêndio.

Se, a qualquer momento durante o processo de carga (ou descarga), a bateria começar a inchar, pare de carregar (ou descarregar) imediatamente. Desconecte a bateria com rapidez e segurança e, em seguida, coloque-a em uma área aberta e segura, longe de materiais inflamáveis, para observá-la por pelo menos 15 minutos. Continuar a carregar ou descarregar uma bateria que tenha começado a balonar ou inchar pode resultar em incêndio. Uma bateria que tenha inchado ou inchado até mesmo uma pequena quantidade deve ser completamente removida da utilização.

#### DIRETRIZES E AVISOS DE DESCARGA

- 1) Baterias Li-Po da Leão Modelismo não devem ser descarregadas em taxas mais altas do que as especificadas no rótulo da bateria. Alguns exemplos estão listados abaixo.

NÃO DESCARREGUE UMA BATERIA DE:	20C 430mAh continuamente a uma taxa superior a 8,6 A	20C 1800mAh continuamente a uma taxa superior a 36,0 A	30C 3200mAh continuamente a uma taxa superior a 96,0 A	30C 5000mAh continuamente a uma taxa superior a 150,0 A
---------------------------------------	--	--	--	---

- 2) Não permita que a temperatura da bateria exceda 70°C graus durante a descarga. O resfriamento adequado para a bateria é necessário, especialmente durante a descarga ou perto das taxas máximas.
- 3) As células Li-Po NUNCA devem ser descarregadas abaixo de 3,0V para melhores resultados. Qualquer célula descarregada com uma tensão menor que 3,0V pode ser danificada, resultando em perda de desempenho e potencial incêndio quando a célula é carregada. Você deve sempre usar um ESC ou equipamento com a configuração adequada de corte de baixa tensão (3,0V por célula) para a bateria que estiver usando. Recomenda-se também que qualquer bateria que tenha sido sobrecarregada seja completamente removida da utilização.

NÃO DESCARREGUE UMA BATERIA:	2S (7.4V nominal) abaixo de 6,0V sob carga	3S (11.1V nominal) abaixo de 9,0V sob carga	4S (14.8V nominal) abaixo de 12,0V sob carga	5S (18,5 V nominal) abaixo de 15,0V sob carga	6S (22,2 V nominal) abaixo de 18,0V sob carga
------------------------------------	--	---	--	---	---

#### DIRETRIZES E AVISOS ADICIONAIS

- 1) Certifique-se de remover objetos metálicos, como anéis, relógios e pulseiras de suas mãos ao manusear baterias Li-Po. Embora os cortes causados por esses objetos possam causar danos à bateria e ao fogo em potencial, eles também podem causar ferimentos graves se não forem removidos do corpo.
- 2) Não é recomendável colocar as baterias Li-Po no bolso ou em qualquer outra área onde elas possam entrar em contato com objetos estranhos que possam causar curto-circuito, perfuração ou outras formas de danos.
- 3) Caso ocorra problema com um modelo contendo uma bateria Li-Po, você deve desconectar e remover a bateria do modelo com rapidez (e segurança), em seguida, colocá-la em uma área aberta e segura, longe de materiais inflamáveis para observá-la por pelo menos 15 minutos. NÃO coloque a bateria danificada em um carro ou outro local que não seja à prova de fogo. Em alguns casos, baterias danificadas (ou não) que não reagem adversamente após 15 minutos de observação ainda podem pegar fogo quando manuseadas, até muitas horas após o dano ter ocorrido. Cuidados extremos devem ser tomados ao manusear e /ou transportar a bateria danificada, e é melhor colocar a bateria danificada dentro de um LipoBag à prova de fogo até que ela possa ser descartada adequadamente.
- 4) Se, ao manusear uma bateria Li-Po de colisão ou de outra forma danificada, o eletrólito contido nas células entrar em contato com sua pele, lave imediatamente a(s) área(s) afetada(s) com sabão e água. Se o eletrólito entrar em contato com o(s) seu(s) olho(s), passe-os com uma quantidade generosa de água por 15 minutos e procure assistência médica imediata.
- 5) Se for necessário descartar uma bateria Li-Po por qualquer motivo, ligue para 44 3026-1860 para falar com um técnico de serviço para obter mais informações sobre como manusear, descarregar e descartar adequadamente a bateria.



Importado por: Leão Modelismo LTDA  
 CNPJ : 13.462.342/0001-75  
 Origem - China | NÃO É BRINQUEDO  
 Artigo de Hobby indicado para  
 maiores de 14 anos  
 Suporte e informações ligue:  
 44 3026-1860  
 WWW.LEAOMODELISMO.COM.BR



Este produto não deve ser descartado com outros resíduos. Em vez disso, é de responsabilidade do usuário descartar seu equipamento e entregá-lo a um ponto de coleta designado para a reciclagem de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos. A coleta separada e reciclagem do seu equipamento usado no momento do descarte ajudar a conservar os recursos naturais e garantir que ela seja reciclada em um maneira que proteja a saúde humana e o meio ambiente.

## Referências

- ALLIANCE, L. *LoRaWAN 1.0.3 Specification*. 2018. Disponível em: <https://loro-alliance.org/sites/default/files/2018-07/lorawan1.0.3.pdf>. Acesso em: 10/11/2020.
- ALLIANCE, L. *RP002-1.0.1 LoRaWAN Regional Parameters*. 2020. Disponível em: [https://loro-alliance.org/sites/default/files/2020-06/rp\\_2-1.0.1.pdf](https://loro-alliance.org/sites/default/files/2020-06/rp_2-1.0.1.pdf). Acesso em: 10/11/2020.
- AQUINO-SANTOS, R.; GONZÁLEZ-POTES, A.; EDWARDS-BLOCK, A.; VIRGEN-ORTIZ, R. A. Developing a new wireless sensor network platform and its application in precision agriculture. *Sensors*, Molecular Diversity Preservation International, v. 11, n. 1, p. 1192–1211, 2011.
- CARVALHO, F. B. S.; LEAL, B. G.; FILHO, J. V. S.; BAIOCCHI, O. R.; LOPES, W. T. A.; ALENCAR, M. S. Aplicações ambientais de redes de sensores sem fio. *Revista de tecnologia da informação e comunicação*, v. 2, n. 1, p. 14–19, 2012.
- DAECHER, A.; SCHMID, R. Internet of things: From sensing to doing. *Wall Street Journal*, 2016.
- DHOLU, M.; GHODINDE, K. Internet of things (iot) for precision agriculture application. In: IEEE. *2018 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*. [S.l.], 2018. p. 339–342.
- EMBRAPA. *O que é Agricultura de Precisão?* 2015. Disponível em: <https://www.macroprograma1.cnptia.embrapa.br/redeap2/o-que-e-agricultura-de-precisao>. Acesso em: 17/10/2020.
- HARUN, A. N.; KASSIM, M. R. M.; MAT, I.; RAMLI, S. S. Precision irrigation using wireless sensor network. In: IEEE. *2015 International Conference on Smart Sensors and Application (ICSSA)*. [S.l.], 2015. p. 71–75.
- HAXHIBEQIRI, J.; POORTER, E. D.; MOERMAN, I.; HOEBEKE, J. A survey of lorawan for iot: From technology to application. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 18, n. 11, p. 3995, 2018.
- HODGE, V. J.; O'KEEFE, S.; WEEKS, M.; MOULDS, A. Wireless sensor networks for condition monitoring in the railway industry: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, v. 16, n. 3, p. 1088–1106, 2014.
- INSTRUMENTS, T. *HDC1080 Low Power, High Accuracy Digital Humidity Sensor with Temperature Sensor*. [S.l.]: Data Sheet, Nov, 2014.



- LEE, H.-C.; KE, K.-H. Monitoring of large-area iot sensors using a lora wireless mesh network system: Design and evaluation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, v. 67, n. 9, p. 2177–2187, 2018.
- LIE, R. *LoRa/LoRaWAN Tutorial*. 2018. Disponível em: [https://www.mobilefish.com/developer/lorawan/lorawan\\_quickguide\\_tutorial.html](https://www.mobilefish.com/developer/lorawan/lorawan_quickguide_tutorial.html). Acesso em: 29/10/2020.
- MEKKI, K.; BAJIC, E.; CHAXEL, F.; MEYER, F. A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment. *ICT Express*, Elsevier, v. 5, n. 1, p. 1–7, 2019.
- MONCKES, P. C. S.; PEREIRA, C. R.; SILVA, M. S. da; YAMIN, A. C. Soluções de redução de consumo energético para redes de sensores sem fio (rssfs) aplicadas à ambientes florestais. *Tecno-Lógica*, v. 20, n. 2, p. 87–96, 2016.
- NETWORK, T. T. *The Things Node*. 2017. Disponível em: <https://www.thethingsnetwork.org/marketplace/product/the-things-node>. Acesso em: 16/06/2021.
- NETWORK, T. T. *The Things Node Technical Details*. 2017. Disponível em: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/devices/node>. Acesso em: 16/06/2021.
- NUNES, J. L. S. *Agricultura de precisão*. 2016. Disponível em: [https://www.agrolink.com.br/georreferenciamento/agricultura-de-precisao\\_361504.html](https://www.agrolink.com.br/georreferenciamento/agricultura-de-precisao_361504.html). Acesso em: 17/10/2020.
- RADIOENGE. *Módulo LoRaWAN Radioenge: Manual de Utilização*. 2020. Disponível em: [https://www.radioenge.com.br/uploads/dcdddc4ddd8e01c48ff7557824c4d0a41589481954-Manual\\_LoRaMESH\\_EndDevice\\_LoRaWAN.pdf](https://www.radioenge.com.br/uploads/dcdddc4ddd8e01c48ff7557824c4d0a41589481954-Manual_LoRaMESH_EndDevice_LoRaWAN.pdf). Acesso em: 28/11/2020.
- SANCHEZ-IBORRA, R.; SANCHEZ-GOMEZ, J.; BALLESTA-VIÑAS, J.; CANO, M.-D.; SKARMETA, A. F. Performance evaluation of lora considering scenario conditions. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 18, n. 3, p. 772, 2018.
- SANTOS, U. J. L.; PESSIN, G.; COSTA, C. A. da; RIGHI, R. R. Agriprediction: A proactive internet of things model to anticipate problems and improve production in agricultural crops. *Computers and electronics in agriculture*, Elsevier, v. 161, p. 202–213, 2019.
- SEMICONDUCTOR, R. *Digital 16bit serial output type ambient light sensor IC BH1750FVI*. [S.l.], 2011.
- SEMTECH. *LoRaWAN Academy*. 2020. Disponível em: <https://loro-developers.semtech.com/resources/lorawan-academy/courses/>. Acesso em: 17/10/2020.
- SHUDA, J. E.; RIX, A. J.; BOOYSEN, M. J. Towards module-level performance and health monitoring of solar pv plants using lora wireless sensor networks. In: IEEE. *2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica*. [S.l.], 2018. p. 172–177.
- SILVA, J. S.; SILVA, R. M.; BOAVIDA, F. *Redes de Sensores sem Fios*. Lisboa: FCA, 2016.

SINHA, R. S.; WEI, Y.; HWANG, S.-H. A survey on lpwa technology: Lora and nb-iot. *ICT Express*, Elsevier, v. 3, n. 1, p. 14–21, 2017.

SMEEKS, J. W.; LOENEN, J. V.; POL, R. V. D. *(Low) Power Consumption of End Devices*. 2020. Disponível em: [https://lora-developers.semtech.com/uploads/static/Low\\_Power\\_Consumption\\_End\\_Devices\\_Test.pdf](https://lora-developers.semtech.com/uploads/static/Low_Power_Consumption_End_Devices_Test.pdf). Acesso em: 16/11/2020.

STMICROELECTRONICS. *Discovery kit with STM32F407VG MCU*. 2017. Disponível em: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32f4discovery.html>. Acesso em: 18/06/2021.

STMICROELECTRONICS. *STM32L0 Discovery Kit LoRa*. 2018. Disponível em: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/b-1072z-lrwan1.html>. Acesso em: 17/06/2021.

THOMSEN, A. *O que é Arduino?* 2017. Disponível em: <https://www.filipeflop.com/blog/o-que-e-arduino>. Acesso em: 18/06/2021.

WAN, X.-F.; YANG, Y.; DU, X.; SARDAR, M. S. Design of propagation testnode for lora based wireless underground sensor networks. In: IEEE. *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERS-FALL)*. [S.l.], 2017. p. 579–583.

WIXTED, A. J.; KINNAIRD, P.; LARIJANI, H.; TAIT, A.; AHMADINIA, A.; STRACHAN, N. Evaluation of lora and lorawan for wireless sensor networks. In: IEEE. *2016 IEEE SENSORS*. [S.l.], 2016. p. 1–3.

YOON, C.; HUH, M.; KANG, S. G.; PARK, J.; LEE, C. Implement smart farm with iot technology. In: IEEE. *2018 20th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*. [S.l.], 2018. p. 749–752.

ZHAO, W.; LIN, S.; HAN, J.; XU, R.; HOU, L. Design and implementation of smart irrigation system based on lora. In: IEEE. *2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. [S.l.], 2017. p. 1–6.