

MEC-SETEC
INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS – *CAMPUS* FORMIGA
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FREDERICO HENRIQUE NERY

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO COM UTILIZAÇÃO DE LORA COMO
ALTERNATIVA DE COMUNICAÇÃO NO CARREGAMENTO FERROVIÁRIO**

FORMIGA – MG
2018

FREDERICO HENRIQUE NERY

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO COM UTILIZAÇÃO DE LORA COMO
ALTERNATIVA DE COMUNICAÇÃO NO CARREGAMENTO FERROVIÁRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof.^a MSc. Ana Paula Lima dos Santos

FORMIGA – MG

2018

FREDERICO HENRIQUE NERY

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO COM UTILIZAÇÃO DE LORA COMO
ALTERNATIVA DE COMUNICAÇÃO NO CARREGAMENTO FERROVIÁRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Avaliado em: ____ de _____ de _____.

Nota: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a MSc. Ana Paula Lima dos Santos - Orientadora

Prof. MSc. Patrick Santos de Oliveira - Avaliador

Prof. MSc. Rafael Vinicius Tayette da Nobrega - Avaliador

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus pela graça de poder concluir mais uma etapa em minha vida.

Aos meus pais Eliana e Elson que foram os alicerces que ofereceram todas as condições para que eu realizasse esse sonho.

Ao meu irmão Phillipe, pelo carinho e confiança.

Aos meus eternos amigos de curso que compartilharam extensivas horas de estudos e momentos de dificuldades.

Aos funcionários e professores do IFMG – *Campus* Formiga pela dedicação ao trabalho e pelo suporte.

À minha orientadora, Prof.^a Msc. Ana Paula Lima dos Santos, pela disponibilidade, orientação e ajuda.

Enfim, a todos que de alguma maneira contribuíram para que esse momento chegasse.

À minha família.

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”

(Ayrton Senna)

RESUMO

O transporte ferroviário é um fator importante para o desenvolvimento de diversas economias mundiais. Através dos trilhos são transportados os principais produtos das indústrias agrícolas, minerais e siderúrgicas. Dessa maneira, esse trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um protótipo para auxiliar no processo de operação no carregamento de vagões ferroviários. Nesse processo, seja na distribuição da carga ou pesagem, de acordo com a solicitação do operador, os vagões são movimentados pelo maquinista. A comunicação entre o operador de carregamento e o maquinista acontece, geralmente, por meio de rádios, ocasionando assim um grande volume de informações nas frequências destinadas para a comunicação. Assim, com o intuito de reduzir essas informações e possíveis interferências, o protótipo elaborado com o desenvolvimento deste trabalho, trata-se de um dispositivo que, utilizando a plataforma embarcada Arduino, transmite informações para movimentação, parada ou atenção à composição. Devido à extensão dos pátios e terminais, para realizar tal comunicação, o protótipo utiliza a tecnologia LoRa, tecnologia de radiofrequência que permite comunicação a longas distâncias com baixo consumo de energia. Por fim, o protótipo foi validado em uma aplicação real, para a qual verificou-se uma redução no número de interferências no processo de carregamento, promovendo ganhos de produtividade e segurança nas operações ferroviárias.

Palavras chave: Carregamento Ferroviário, LoRa, Comunicação, Arduino.

ABSTRACT

Rail transport is an important factor in the development of several world economies. It is through the rails that are transported the main products of the agricultural, mineral and steel industries. Therefore, this present work has as objective the development of a prototype to aid in the process of operation in the loading of railway wagons. In the loading process, whether for load distribution or weighing, the wagons are positioned at various times by the locomotive driver, responsible for the train, requested by the operator. Nowadays, in several courtyards and terminals, communication between the loading operator and the driver takes place through radios, thus causing a large volume of information in the frequencies destined for communication. Thus, in order to reduce this information and possible interferences, the prototype developed with the development of this work is a device that, using the Arduino embedded platform through visual signals, transmits information for movement, stop or attention to the train. Due to the extension of the courtyards and terminals, to carry out such communication, the prototype uses LoRa technology, radiofrequency technology that allows communication over long distances with low energy consumption. Lastly, the prototype was validated in a real example of application, where noticed a reduction in the number of interferences in the loading process, promoting gains on productivity and safety in the railway operations.

Keywords: Rail Loading, LoRa, Communication, Arduino.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz de transporte de cargas no Brasil.....	13
Figura 2 - Processo de carregamento ferroviário.	14
Figura 3 - Evolução das LPWANs.	18
Figura 4 - Distância <i>versus</i> Vida útil bateria.	19
Figura 5 - Largura de banda <i>versus</i> Alcance.....	19
Figura 6 - Tecnologia <i>Ultra-Narrow Band</i> – SigFox.....	20
Figura 7 - Comparação entre espectro do RPMA com o do Wi-Fi.	22
Figura 8 - Estrutura em Camadas da Tecnologia LoRaWAN.....	23
Figura 9 - Arquitetura LoRaWAN.....	24
Figura 10 - Densidade espectral de potência em função da frequência.....	27
Figura 11 - Processo de modulação do sinal.	28
Figura 12 - Processo de demodulação do sinal.	28
Figura 13 - Comportamento sinal <i>up-chirp</i>	30
Figura 14 - Chirps para diferentes SF.	33
Figura 15 - Tipos de Arduino.	35
Figura 16 - Arduino UNO.....	36
Figura 17 - Arduino IDE.....	37
Figura 18 - Versões Dragino LoRa <i>Shield</i>	39
Figura 19 - Pinagem Dragino LoRa <i>Shield</i> v1.4.	40
Figura 20 - Modelo de comunicação proposto.	42
Figura 21 - Esquemático da montagem do Transmissor.....	43
Figura 22 - Esquemático da montagem do Receptor.	44
Figura 23 - Montagem	45
Figura 24 - Ilustração do protótipo Transmissor desenvolvido.	46
Figura 25 - Ilustração do protótipo Receptor desenvolvido.	47
Figura 26 - Diagrama de pareto causas das interferências no carregamento..	48
Figura 27 - Utilização do dispositivo na sala de carregamento.	49
Figura 28 - Utilização do dispositivo na locomotiva.....	49
Figura 29 - Quantidade de interferência mês	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Participação do setor de transportes na economia brasileira.....	12
Tabela 2 - Principais tecnologias LPWAN.....	20
Tabela 3 - Valores teóricos de taxa de transmissão em função do SF	32
Tabela 4 - Características Dragino LoRa <i>Shield</i>	38
Tabela 5 - Versões Dragino LoRa <i>Shield</i>	39
Tabela 6 - Entradas e saídas do Transmissor.....	43
Tabela 7 - Saídas do Receptor.....	44
Tabela 8 - Levantamento de custos do protótipo	51

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Problema	13
1.2 Justificativa	15
1.3 Objetivos.....	15
1.3.1 Objetivo Geral	15
1.3.2 Objetivos Específicos.....	15
1.3.3 Objetivos Institucionais.....	16
1.4 Estrutura do Trabalho	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Redes LPWA	17
2.1.1 SigFox	20
2.1.2 Ingenu	21
2.1.3 LoRaWAN	23
2.2 LoRa PHY.....	25
2.2.1 Taxa de Codificação.....	30
2.2.2 Fator de Espalhamento	31
3 METODOLOGIA.....	34
3.1 Arduino	34
3.1.2 <i>Software</i>	37
3.2 Dragino LoRa <i>Shield</i>	38
3.2.1 Biblioteca Arduino LoRa.....	40
3.3 Modelo Proposto.....	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1 Protótipo	45
4.1.1 Transmissor	46

4.1.2 Receptor.....	47
4.2 Exemplo de Aplicação	48
4.3 Levantamento de Custos	51
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
5.1 Conclusões	52
5.2 Trabalhos Futuros.....	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
ANEXO I.....	58
ANEXO II.....	61

1 INTRODUÇÃO

O transporte de cargas é fator essencial para a economia e o desenvolvimento de todo país. Qualquer nação fica literalmente paralisada se houver interrupção de seu sistema de transportes. O impacto do fato mencionado é ainda mais severo em países com dimensões continentais, como o caso do Brasil. Em 2018, a greve geral dos caminhoneiros que durou 11 dias foi responsável por um prejuízo de R\$ 15,9 bilhões à economia (G1, 2018). Sem transportes, produtos essenciais não chegariam às mãos de seus consumidores, indústrias não produziriam, não haveria comércio externo. Dessa maneira, a busca por condições e tecnologias que viabilizem e melhorem processos referentes aos transportes são de suma importância.

Para visualizar a importância do setor de transportes para a economia brasileira, a Tabela 1 apresenta a participação desse setor na composição do PIB brasileiro, na qual as informações são dados estatísticos do IBGE do ano de 2014.

Tabela 1 - Participação do setor de transportes na economia brasileira

PARTICIPAÇÃO DO SETOR DE TRANSPORTES NA ECONOMIA BRASILEIRA	
Valor adicionado pelo setor de transportes no PIB (%)	4,5%
Valor adicionado pelo setor de transportes no PIB (R\$)	R\$ 212,72 bilhões

Adaptada: (CNS, 2015).

Para mensurar tamanha importância e de como uma melhoria no setor de transportes pode contribuir para o aumento da eficiência econômica do país, o elevado custo com estoques nas grandes empresas é um indicativo. Estimativas indicam que cerca de R\$ 118 bilhões de excesso de estoque são mantidos pelas empresas brasileiras ao longo das cadeias produtivas como forma de se proteger das ineficiências do transporte, consequência de atrasos, acidentes e roubos de

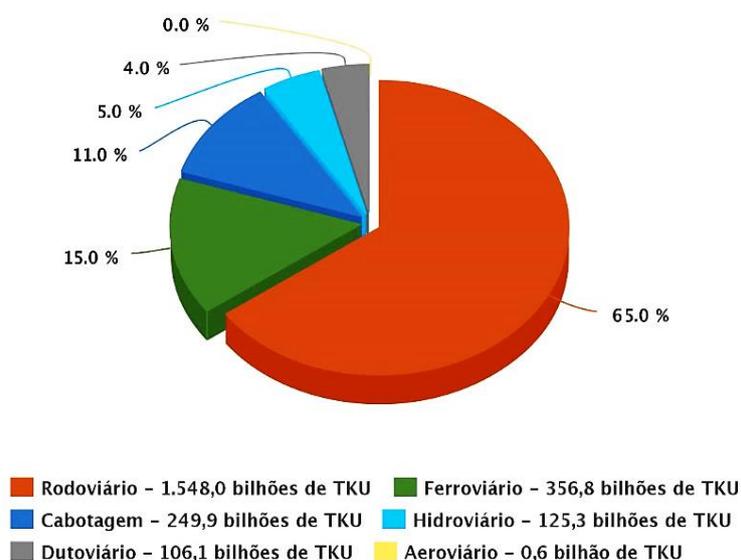
carga. Dado o exposto, um setor de transportes mais confiável e eficiente poderia diminuir sobremaneira estes custos, liberando recursos da ordem de bilhões de reais que poderiam ser reinvestidos em atividades produtivas. Muito além de um simples setor, o transporte é um serviço horizontalizado que viabiliza os demais setores, afetando diretamente a segurança, a qualidade de vida e o desenvolvimento econômico do país (CNT, 2008).

1.1 Problema

Com grande extensão territorial, o Brasil conta com vários modais de transporte, maneira pela qual uma logística de produtos e pessoas é realizada para integração e escoamento das riquezas do país. A Figura 1 mostra a distribuição porcentual de cargas transportadas entre os principais modais.

Analisando a Figura 1, fica evidente a dependência do modal rodoviário na matriz de transporte brasileira, determinante para a vulnerabilidade e ineficiência do transporte de cargas no Brasil. Comparado a países com dimensões semelhantes, é notório a importância do modal ferroviário para o desenvolvimento econômico. Apesar de seu elevado custo de implementação, o transporte ferroviário apresenta inúmeras vantagens como o grande volume de cargas transportadas, maior eficiência energética e mais segurança.

Figura 1 - Matriz de transporte de cargas no Brasil



Fonte: (PNL, 2015).

As macro etapas inerentes ao processo do transporte ferroviário de carga podem ser identificadas como: carregamento, circulação e descarga. Nas quais, diversas particularidades contribuem para maior agilidade e, por consequência, maior produção. O problema apresentado neste trabalho foi identificado na etapa de carregamento, mostrado na Figura 2.

Durante o carregamento dos vagões se faz necessária uma comunicação entre o maquinista, o condutor da locomotiva e o operador do carregamento, responsável pela abertura dos silos e controle do volume em cada vagão. Tal comunicação é realizada por meio de rádios. Apesar das empresas do transporte ferroviário possuírem regulamentos que padronizam a comunicação, muitas vezes, em terminais com mais pontos de carregamento, o volume de informações na frequência destinada para comunicação pode ser elevado, prejudicando assim a produtividade e segurança dos envolvidos, caso alguma informação não seja recebida adequadamente.

Figura 2 - Processo de carregamento ferroviário



Fonte: Autor.

1.2 Justificativa

A melhoria contínua é apontada por diversos estudos como uma peça chave para manter a competitividade de uma empresa em um cenário dinâmico. Além da produtividade, hoje, diversas empresas possuem grandes investimentos direcionados para melhoria, os quais contribuem para os indicadores de saúde e segurança. As estatísticas de saúde e segurança são importantes para *marketing* corporativo, além de serem indicadores fiscalizados por órgãos que aplicam multas em casos de desconformidades.

Portanto, buscando melhorias nos terminais de carregamento do modal ferroviário, o presente trabalho propõe a elaboração de um dispositivo, de baixo custo, para padronizar o processo de carregamento de vagões, criando uma interface de comunicação entre o operador do carregamento e o maquinista operador da composição. Além disso, com a tecnologia empregada na comunicação do dispositivo, LoRa, possíveis novas aplicações como a conectividade de dispositivos em redes de Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) e comunicação máquina-máquina (*Machine to Machine* - M2M) poderão surgir, contribuindo assim para a modernização de processos e atividades no transporte ferroviário de cargas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta monografia é a elaboração de um dispositivo de baixo custo para comunicação em terminais de carregamento ferroviário, reduzindo significativamente o volume de informações trocadas na frequência de comunicação via rádio.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, alguns objetivos específicos devem ser alcançados:

- Realizar uma revisão bibliográfica para conhecer o estado da arte das redes LPWAN;
- Apresentar as características técnicas da tecnologia LoRa;
- Estudar sistemas embarcados;
- Implementar o protótipo, baseado no Arduino e *Shield* de comunicação Dragino LoRa, para realizar a comunicação do processo de carregamento ferroviário;
- Realizar o levantamento do custo estimado para a confecção do dispositivo;
- Comparar e analisar o resultado da implementação do dispositivo.

1.3.3 Objetivos Institucionais

Com o desenvolvimento desta monografia alguns objetivos institucionais podem ser alcançados:

- Incentivar a interdisciplinaridade, fomentando estudos relacionados ao transporte de cargas, promovendo melhorias em processos;
- Gerar conhecimento para futuros projetos que englobem a comunicação sem fio em longas distância;
- Formar mão de obra especializada na área de sistemas embarcados.

1.4 Estrutura do Trabalho

Esta monografia é constituída por cinco capítulos, no qual o Capítulo 2 inclui revisão bibliográfica das redes LPWAN, além, de detalhes das principais características da tecnologia de comunicação sem fio LoRa. O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada, contendo detalhes do desenvolvimento do protótipo. Os resultados obtidos são descritos e discutidos no Capítulo 4. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica de modo a identificar o Estado da Arte das redes de baixa potência e que operem em uma área extensa (*Low Power Wide Area Networks*), e das tecnologias que suportam as mesmas, apresentando com maior profundidade as características gerais da tecnologia LoRa, objeto de estudo para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Redes LPWA

LPWANs são um tipo de rede sem fio com foco em aplicações de baixo consumo de energia e que operem em uma área extensa (*Low Power Wide Area*). São alternativas utilizadas para a comunicação entre usuários e objetos com capacidade de sensoriamento, processamento e comunicação, a chamada Internet das Coisas IoT, *Internet of Things* (CENTENARO et al., 2015).

Apesar de parecer recente, segundo (MOSEEV, 2017), já na década de 1980 surgiram redes que faziam o uso de semelhante topologia e arquitetura das hoje conhecidas LPWANs que, naquele tempo, eram utilizadas para conectar dispositivos de alarme. A AlarmNet, uma subsidiária da ADEMCO, empresa de serviços de segurança, conectou detectores de incêndio em uma rede sem fio e assim monitorava sua operação. A rede operava com frequência de 928 MHz nos EUA e atendia cerca de 65% da população. Além desta, já na década de 1990, a ARDIS, uma rede sem fio com uma ampla área de cobertura que pertencia à Motorola, conectava equipamentos para automatizar as vendas e transações *on-line*. Posteriormente, a American Mobile adquiriu a ARDIS e o novo proprietário transferiu o serviço ao cliente para redes mais modernas. Com o desenvolvimento gradual da tecnologia, os provedores de soluções de monitoramento mudaram para redes 2G.

Nos dias atuais, com a crescente demanda de conectividade entre dispositivos, dado as aplicações IoT e M2M, diversas empresas somam esforços em buscar tecnologias para suprir tal necessidade. A história mais recente das LPWANs começa em meados de 2009, com a empresa francesa SIGFOX, pioneira da nova era das LPWANs. Desde então, nos últimos anos, diversos

laboratórios e empresas desenvolvem soluções e dispositivos para as LPWANs. A Figura 3 evidencia a evolução das LPWANs.

Figura 3 - Evolução das LPWANs



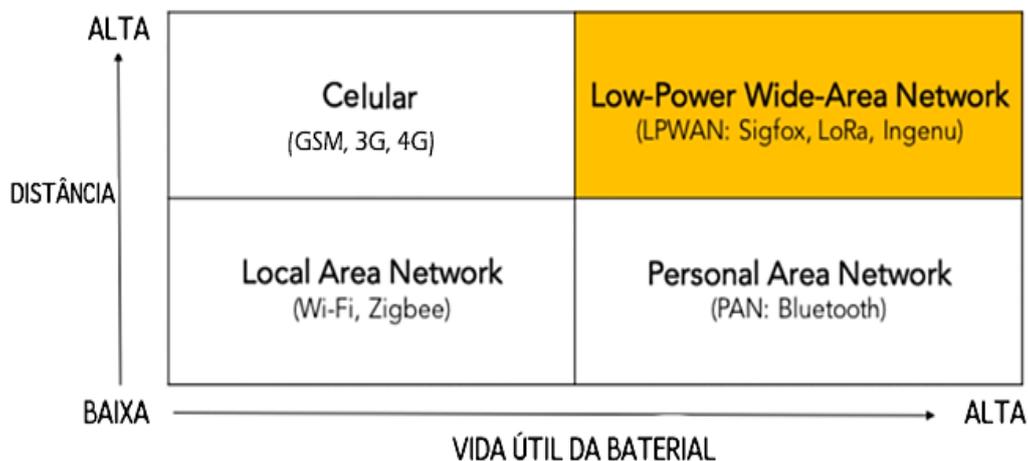
Fonte: (MOSEEV, 2017).

Em seus aspectos construtivos, as LPWANs implementam uma tecnologia de camada física que troca a taxa de transmissão por alcance. Isso ocorre pois, quanto menor a taxa de transmissão, maior a duração da mensagem e conseqüentemente maior a energia de bit, resultando no aumento da qualidade de recepção do sinal e proporcionando uma maior cobertura, estimada na ordem de 10 a 50 quilômetros em áreas rurais e 2 a 10 quilômetros em áreas urbanas. A taxa de transmissão está na ordem de centenas de bits ou dezenas de kilobits por segundo. Ainda assim, apesar da baixa taxa de transmissão, espera-se que as LPWANs atendam a muitas aplicações da IoT, as quais geralmente requerem transmissões esporádicas de dados (PETRIC et al., 2016).

Além disso, é conhecido que os dispositivos de rádios irradiam energia para o espaço e, quanto mais energia eles usam para transmitir, mais longe o sinal irá atingir. Dado o exposto, os desenvolvedores de dispositivos tradicionalmente enfrentam uma escolha entre o alcance e a duração da bateria. Contudo, os dispositivos LPWAN quebram esse paradigma. Utilizando técnicas de modulação do sinal a ser transmitido, os dispositivos conseguem atender às necessidades de distância resguardando ainda o consumo de energia. As técnicas de modulação são específicas de cada padronização (CONRAD, 2015).

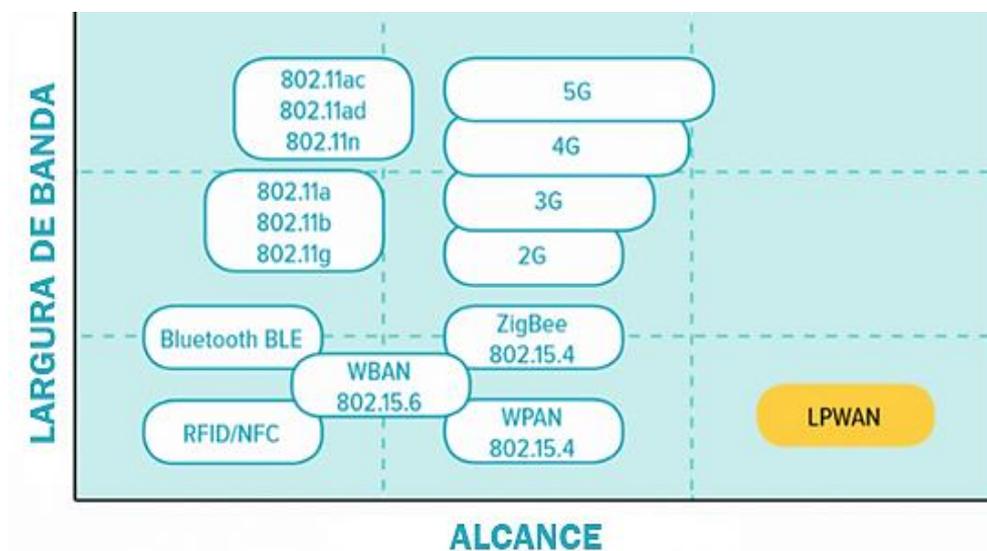
As Figuras 4 e 5 destacam as características de diversas tecnologias de rede comparando os aspectos de distância por consumo de bateria e largura de banda, respectivamente.

Figura 4 - Distância versus Vida útil bateria



Fonte: (CONRAD, 2015).

Figura 5 - Largura de banda versus Alcance



Fonte: (McCLELLAND, 2017).

Entre as principais opções de LPWAs disponíveis hoje, algumas ganham destaque. Essas incluem LoRaWAN, Sigfox e Ingenu (anteriormente OnRamp Wireless), que operam em faixas de frequência não licenciadas, sendo, por

consequência, mais acessíveis. Por outro lado, existem ainda as futuras tecnologias celulares IoT padronizadas pela 3GPP, incluindo LTE Categoria M, que possuem maiores taxas de transmissão e operam em frequências não licenciadas. Em suma, cada opção de conectividade das LPWANs oferece os benefícios de alcance e duração de baterias, contudo, elas possuem diferenças importantes que afetam sua adequação a finalidades específicas (WALLACE, 2017). Na Tabela 2 são mostradas as principais características das redes LPWANs que utilizam faixas não licenciadas, ISM.

Tabela 2 - Principais tecnologias LPWAN

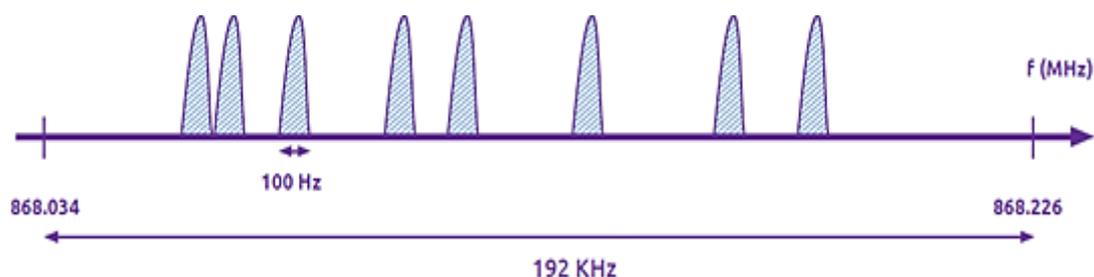
TECNOLOGIAS	SigFox	LoRaWAN	Ingenu
PADRONIZAÇÃO	Privada	Associação	Associação
FREQUÊNCIA	868 / 902 MHz	433 / 868 / 780 / 915 MHz	2.4 GHz
MODULAÇÃO	BPSK	CSS	DSSS
ALCANCE	Rural: 30-50 km Urbano: 3-10 km	Rural: 15 km Urbano: 2-5 km	Rural: 5-10 km Urbano: 1-3 km
TAXA DE TRANSMISSÃO	Upload: <300 bps Download: 8 bits/dia	Upload: 300 bps – 50 kbps Download: 300 bps – 50 kbps	Upload: 624 kbps Download: 156 kbps
PACOTE	12 bits	Definido pelo usuário	6 bits – 10 kbits

Fonte: Elaborada pelo autor.

2.1.1 SigFox

A rede Sigfox trata-se de uma tecnologia que utiliza uma largura de banda de 192 kHz, com cada transmissão de 100 Hz de largura, técnica conhecida com banda ultra estreita (*Ultra-Narrow Band - UNB*) (SIGFOX, 2017).

Figura 6 - Tecnologia *Ultra-Narrow Band* – SigFox



Fonte: (SIGFOX, 2017).

Assim como a maioria das redes LPWAN, a SigFox possui arquitetura muito comum, na qual a simplicidade é a grande aliada, uma vez que não é necessário consumo de energia em tarefas complexas na camada de rede, pois elas são executadas na nuvem, na camada de servidores de rede. Esse é um trunfo importante desta tecnologia, porque possibilita que os dispositivos finais sejam extremamente simples, o que reduz muito o custo, além de possibilitar também o baixo consumo de energia (WND, 2017).

O *gateway* da rede SigFox é capaz de lidar com até um milhão de dispositivos finais, pois opera em um sistema de comunicações de dispositivos como redes de comunicação móvel (celulares) de banda *ultra-narrow* projetado para suportar implantações IoT, com uma área de cobertura de 30-50 km em áreas rurais e 3-10 km em áreas urbanas. Contudo, a banda *ultra-narrow* é conseguida usando largura de banda do canal inferior a 1 kHz que transporta dados de apenas 12 bytes de *uplink*¹, comparados a 256 bytes da LoRa, e 8 bytes de *dowlink*², com baixa taxa de dados, de até 100 bps, muito menor que LoRa (SANCHEZ-IBORRA e CANO, 2016).

2.1.2 Ingenu

A Ingenu, anteriormente conhecida como On-Ramp Wireless, é uma *startup* americana que inseriu no mercado uma solução para IoT baseada na tecnologia de acesso múltiplo aleatório por fase (*Random Phase Multiple Access* – RPMA). As implantações da RPMA começaram em 2011, portanto já possuem uma base instalada em vários continentes para aplicações industriais, agrícolas e de segurança. Entre as principais virtudes que a Ingenu prega em relação ao RPMA, está a sua capacidade de adaptação em qualquer lugar do mundo, isso por utilizar um espectro de frequência livre nos cinco continentes, a banda de 2,4 GHz, que possui maior liberdade na maior parte das regiões. Como exemplo, as regulamentações europeias e americanas não impõem limites de *duty cycle* (ciclo de trabalho) para a frequência de 2,4 GHz (RAZA, KULKARNI, e SOORIYABANDARA, 2017).

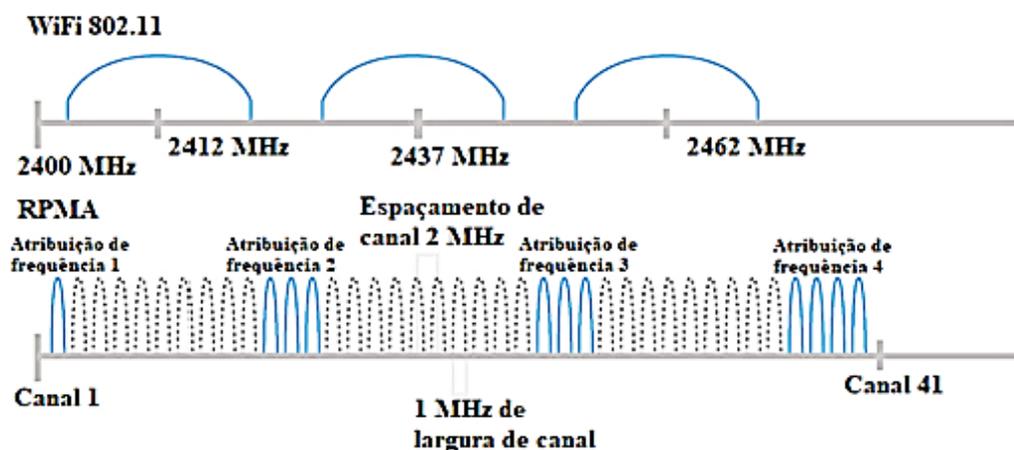
¹ *Uplink* é o enlace no qual os dados vão do dispositivo para o *gateway*.

² *Dowlink* é o enlace no qual os dados vão do *gateway* para o dispositivo.

O RPMA usa um esquema de acesso físico patentado, chamado de DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*), ou espectro de espalhamento de sequência direta em tradução livre, somente para o *uplink*. Além disso, trata-se de uma variação do conhecido acesso múltiplo por divisão de código (*Code Division Multiple Access* – CDMA), sendo que a grande diferença é que o RPMA permite que múltiplos transmissores compartilhem um mesmo intervalo de tempo. Para isso, o RPMA aumenta a duração do intervalo de tempo do CDMA tradicional e, em seguida, libera o acesso ao canal dentro desse intervalo de tempo, adicionando um atraso aleatório para cada transmissor. Essa técnica possibilita a redução da sobreposição de sinal entre os transmissores, uma vez que eles não acessam o canal ao mesmo tempo, além de aumentar a relação de interferência do sinal (*Signal Interference Ratio* – SIR) para cada enlace (INGENU, 2016).

A tecnologia RPMA utiliza a banda universal de 2,4 GHz do espectro não licenciado que oferece 80 MHz de largura de banda. Porém, a tecnologia RPMA usa apenas 1 MHz de largura por canal, sendo assim, capaz de suportar uma rede inteira. Complementando, com um *buffer* de 1 MHz em cada lado de um canal e 80 MHz de largura de banda disponível, existem um total de 40 canais a escolher (MEIRELES, 2018). Esse tipo de largura de banda dá ao RPMA uma enorme flexibilidade para localizar a frequência com menos tráfego, mesmo em áreas onde o Wi-Fi está presente, uma vez que 11 canais RPMA são intercalados entre os canais do Wi-Fi em um cenário ideal, conforme é observado na Figura 7.

Figura 7 - Comparação entre espectro do RPMA com o do Wi-Fi

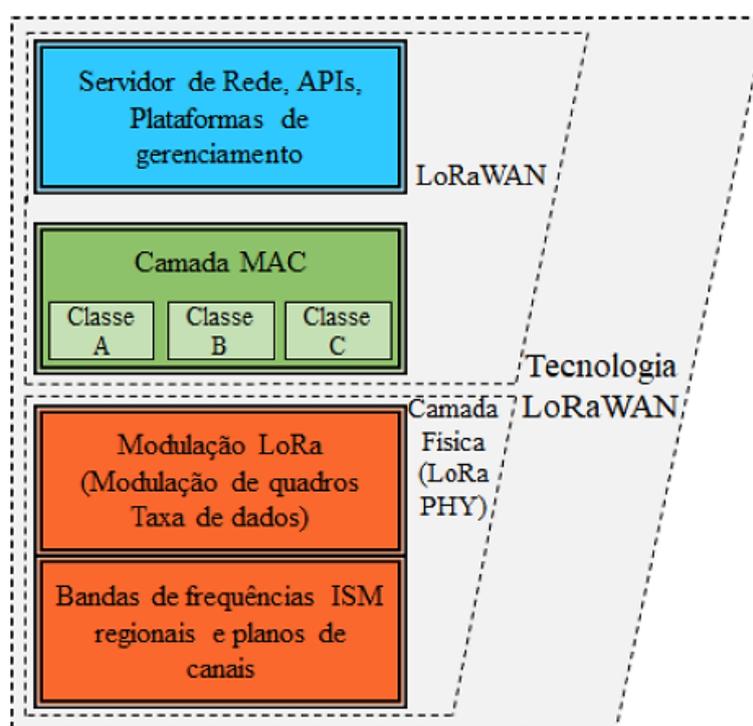


Fonte: (INGENU, 2016).

2.1.3 LoRaWAN

LoRa (*Long Range*), em português longo alcance, é uma nova tecnologia de rede de comunicação sem fio criada pela Semtech e promovida através da LoRa Alliance. A LoRa Alliance é uma associação aberta, com início desde março de 2015 e que hoje registra mais de 500 membros. Os membros incluem líderes de tecnologia como IBM, Cisco, HP, Foxconn, Semtech e Sagemcom, bem como as principais empresas de produtos como Schneider, Bosch, Diehl, Mueller e outros (LORA ALLIANCE, 2017). Todos os membros compactuam de um comum interesse no desenvolvimento e na aplicação da tecnologia LoRa na Internet das Coisas. Contudo, na prática, a tecnologia LoRa é simplesmente a estrutura física/eletrônica que permite a modulação, abordada com maior profundidade na seção 2.2 deste documento.

Figura 8 - Estrutura em camadas da tecnologia LoRaWAN



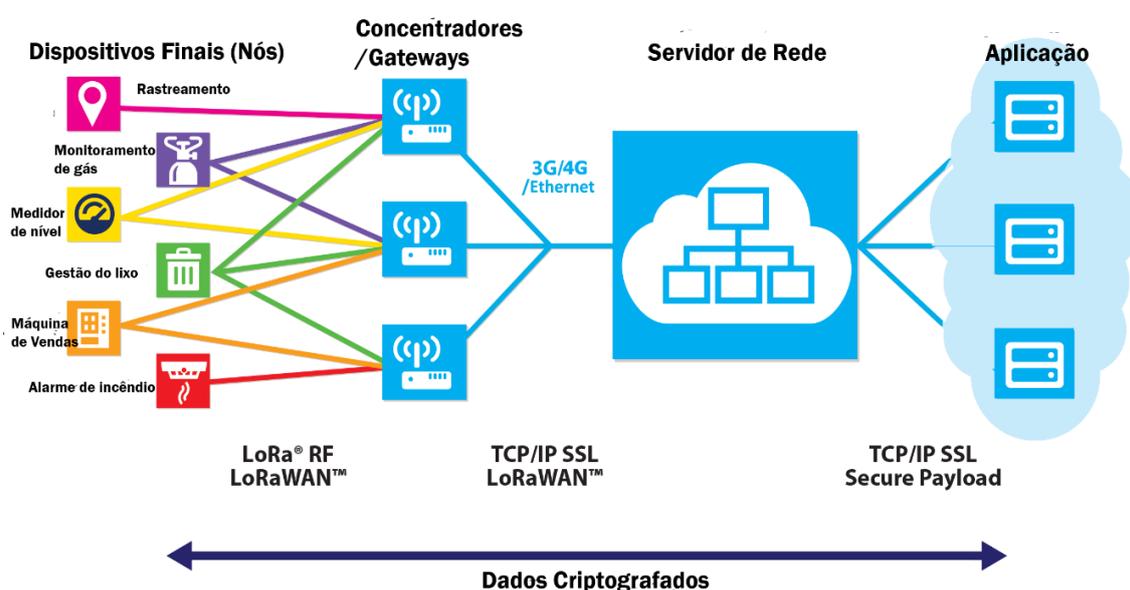
Fonte: (MOLANO, 2018).

Para criar uma rede, a camada de controle de acesso ao meio é necessária. A camada lógica da rede (camada MAC, Servidor de Rede e Servidor de Aplicação), recebe o nome de LoRaWAN. A associação da camada física LoRa com a camada lógica da rede LoRaWAN constituem a rede

LoRaWAN. Desse modo, dispositivos terminais conectam-se na rede, sendo estabelecidos os parâmetros de frequência e taxas de transmissão através da camada lógica da rede (MOLANO, 2018). Um modelo de camadas de funções para a tecnologia LoRaWAN é mostrado na Figura 8.

Em suma, a rede LoRaWAN é composta por três tipos de dispositivos: terminais, *gateways* e servidores. Os dispositivos terminais são objetos inteligentes, porém, tipicamente, com restrições energéticas. Podem ser sensores, atuadores ou outros tipos de dispositivos inteligentes. Os *gateways* são dispositivos com restrições mais leves em termos de energia e processamento, que servem de ligação entre o LoRaWAN e outras redes. Os servidores são dispositivos que recebem e analisam as informações enviadas pelos dispositivos terminais ou que comandam os dispositivos terminais (MOLANO, 2018). A Figura 9 mostra a arquitetura de comunicação da rede LoRaWAN.

Figura 9 - Arquitetura LoRaWAN



Fonte: (NNNCO, 2015).

Uma das principais características da LoRaWAN é sua topologia em estrela. As redes em estrela diminuem o tráfego de rede quando se trata de roteamento de informações se comparada a outras topologias. Porém, para tornar as redes em estrela de longo alcance viáveis, o *gateway* deve ter uma

capacidade muito alta para receber uma grande quantidade de mensagens dos inúmeros nós. Esta capacidade é alcançada utilizando dados adaptativos que avalie e use um transceptor multi-canal multi-modem no *gateway* para que mensagens simultâneas em vários canais possam ser recebidas (LORA ALLIANCE, 2017).

Outro importante benefício da rede LoRaWAN é o trabalho assíncrono dos nós. Tal característica permite que os dispositivos fim, nós da rede, se comunicam apenas quando eles estiverem prontos para enviar seus dados ou se forem programados, método ALOHA, como é conhecido na literatura. Diferentemente de redes síncronas nas quais os nós frequentemente precisam “despertar” para iniciar a sincronização com a rede e verificar se há mensagens, com isso, esta sincronização consome grande quantidade de energia e é a principal causa de redução da vida útil da bateria (LORA ALLIANCE, 2017).

2.2 LoRa PHY

A camada física da rede LoRaWAN (LoRa PHY) utiliza tecnologia de propriedade da empresa Semtech. O LoRa usa a tecnologia de modulação CSS (*Chirp Spread Spectrum* - espalhamento espectral *chirp*), desenvolvida originalmente para aplicações de radar e utilizada em aplicações militares. A modulação CSS é uma técnica de codificação para transmissão digital de sinais que usa uma tecnologia de espalhamento do sinal a ser transmitido no espectro de frequência gerando um sinal de portadora de *chirp*. Os *Chirp* (*Compressed High Intensity Radar Pulse* - Pulso de Radar de Alta Intensidade Comprimido) são sinais que possuem amplitude constante e varrem toda a largura de banda, variando a frequência de maneira linear em um determinado espaço de tempo. Se a frequência muda da menor para a maior, diz-se que é um sinal de *up-chirp*, se a frequência muda do maior para o menor, chama-se de *down-chirp* (MARQUES, 2018).

Quando se trata de espalhamento espectral, um importante conceito deve ser abordado, o teorema de Shannon – Hartley. Teorema este que indica a capacidade máxima de taxa de dados que pode ser transmitida em determinadas larguras de banda na presença de ruídos (SEMTECH, 2015).

Dessa maneira, a capacidade do canal pode ser expressa através da equação (2.1),

$$C = B \times \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (2.1)$$

na qual:

C - Capacidade do canal (bits/s);

B - Largura de banda (Hz);

S - Potência média do sinal recebido (watts);

N - Potência média de ruído ou interferência (watts);

S/N - Taxa de sinal/ruído (SNR) expressada como uma taxa de potência média.

Realizando a manipulação da equação (2.1) para log de base natural e, sabendo que $\ln = \log_e$, tem-se:

$$\frac{C}{B} = 1,433 \times \frac{S}{N} \quad (2.2)$$

Sabendo que na aplicação de espalhamento espectral a taxa sinal/ruído é consideravelmente baixa, posto que o sinal de potência está frequentemente abaixo do esperado, conforme evidenciado na Figura 10. Assumindo então que a razão S/N é muito menor que 1, a equação (2.2) pode ser escrita como:

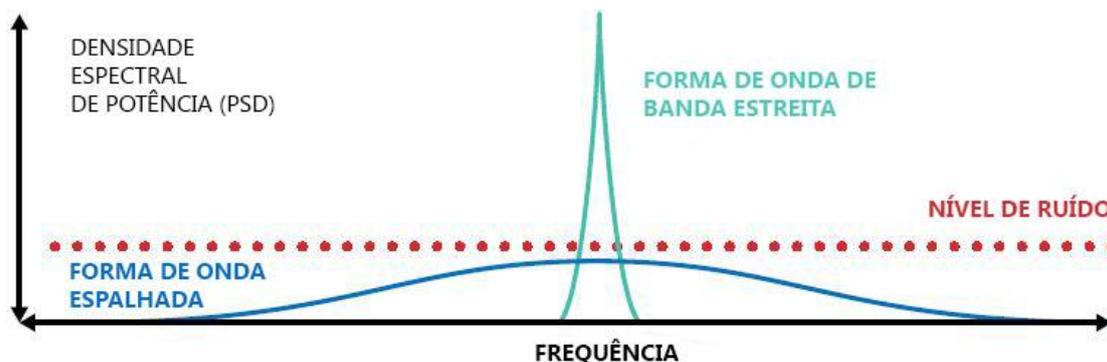
$$\frac{C}{B} \approx \frac{S}{N} \quad (2.3)$$

Ou,

$$\frac{N}{S} \approx \frac{B}{C} \quad (2.4)$$

Dessa maneira, a partir da equação (2.4) é possível observar que num sinal com a relação sinal/ruído fixa, apenas a largura de banda precisa ser modificada (SEMTECH, 2015).

Figura 10 - Densidade espectral de potência em função da frequência.

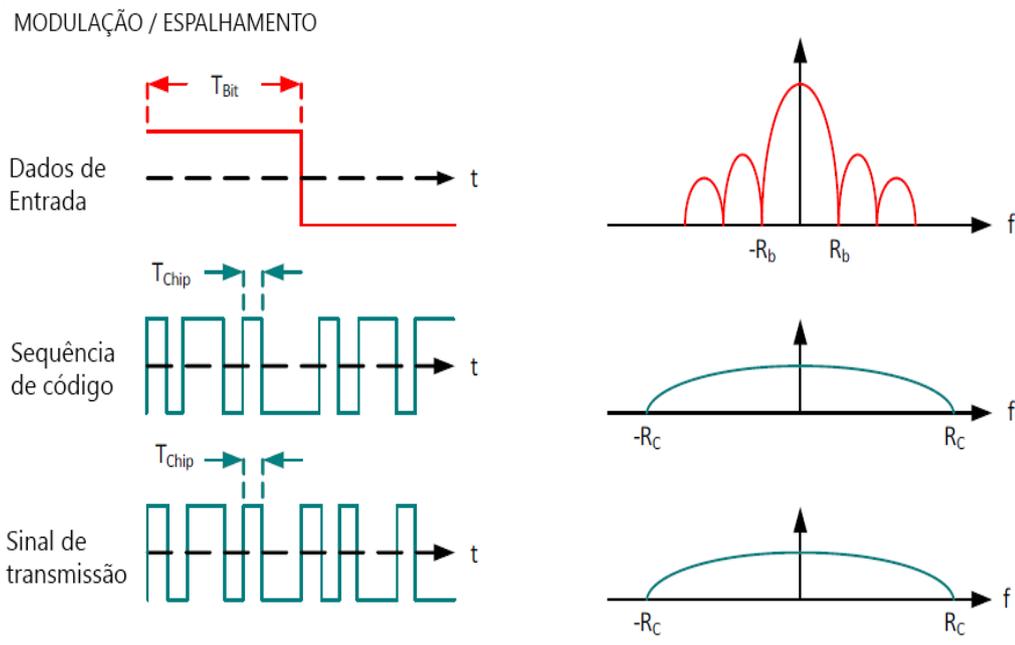


Fonte: (MULTITECH, 2017).

Existem diversos métodos que realizam o espalhamento espectral de sinais, contudo, a mais utilizada é o de sequência direta (*Direct Sequence Spread Spectrum* - DSSS). Nesse método, a fase portadora do transmissor muda de acordo com uma sequência de código. Este processo geralmente é realizado multiplicando o sinal de dados desejado por um código de espalhamento, também conhecido como uma sequência de quebra. A sequência de quebra ocorre em uma taxa muito mais rápida do que o sinal de dados e, portanto, espalha a largura de banda do sinal para além da largura de banda original ocupada apenas pelo sinal original. O termo quebra é usado para distinguir os bits codificados mais curtos dos bits não codificados mais longos do sinal de informação (SEMTECH, 2015). A Figura 11 demonstra o processo de modulação/espalhamento do sinal.

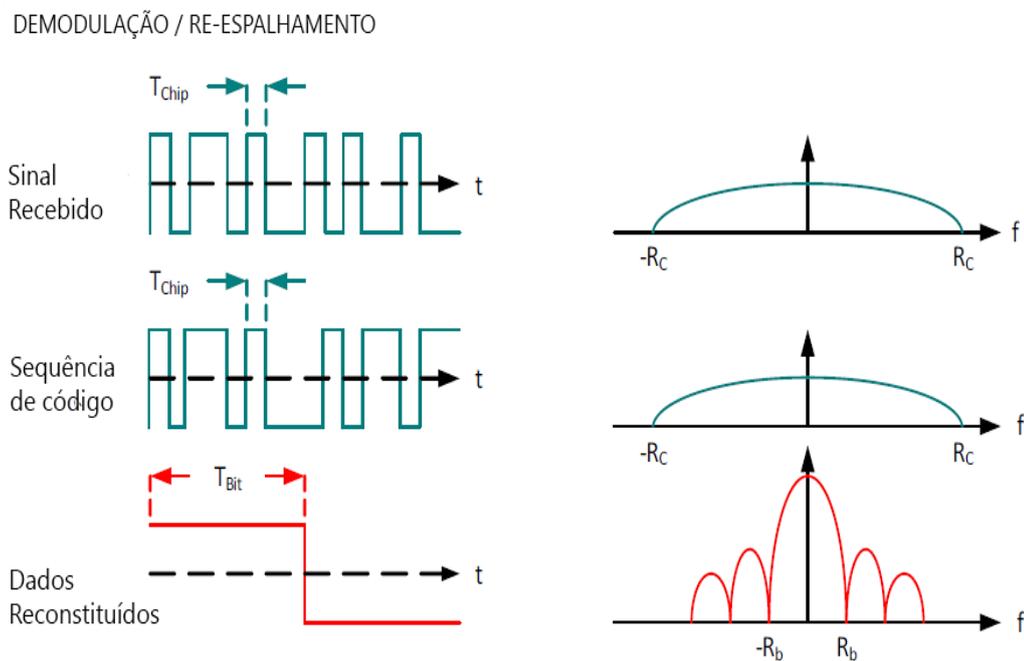
Por outro lado, no receptor, o sinal transmitido é novamente multiplicado por uma sequência de códigos, denominada sequência de chips, igual ao da transmissão, levando este sinal novamente à largura de banda original, finalizando a transmissão. Na Figura 12, que mostra o processo de demodulação do sinal, pode-se perceber a similaridade do sinal recebido com o sinal transmitido da Figura 11.

Figura 11 - Processo de modulação do sinal



Fonte: (SEMTECH, 2015).

Figura 12 - Processo de demodulação do sinal



Fonte: (SEMTECH, 2015).

Na técnica DSSS a gama de espalhamento espectral depende da quebra por bit, na qual é a sequência de quebras para uma dada taxa de dados

desejada, onde é chamado de ganho de processamento (G_p). A equação (2.5) define o ganho que é expresso em dB.

$$G_p = 10 \times \log_{10} \left(\frac{R_c}{R_b} \right) \quad (2.5)$$

Na qual:

R_c - Taxa de chips (Chips/segundo)

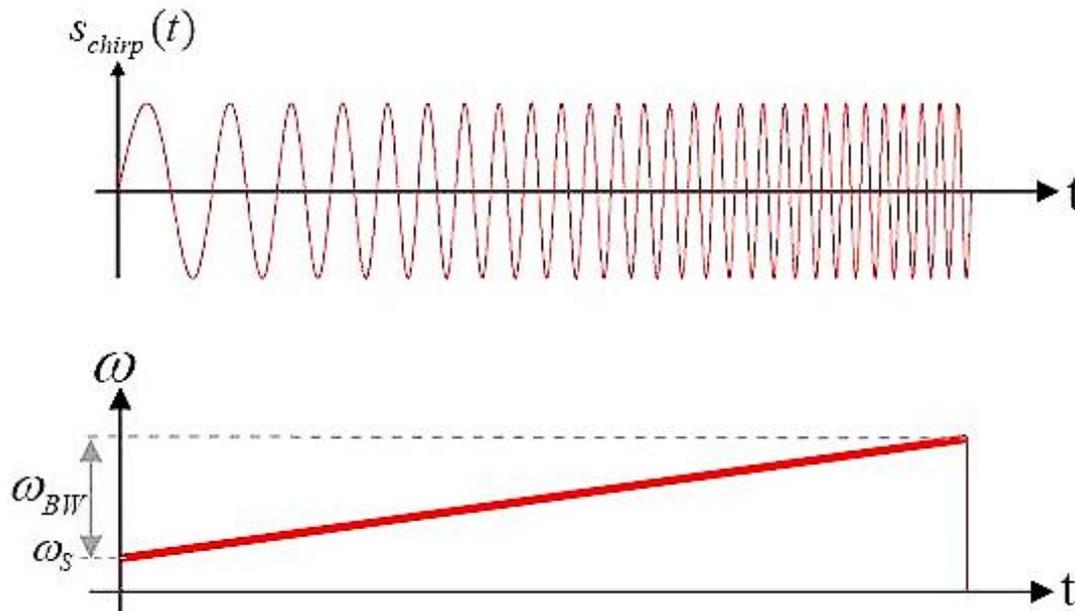
R_b - Taxa de transmissão de bits (bits/segundo)

Além do ganho de processamento inerente à transmissão desejada, os sinais de interferência também são reduzidos e espalhados com largura de banda maior que a do sinal a ser transmitido, com isso o receptor pode filtrar os sinais indesejados facilmente. O DSSS é amplamente utilizado em aplicativos de comunicação de dados. No entanto, existem desafios para dispositivos e redes de baixo custo ou que exigem baixo consumo de energia. Geralmente, como nos casos dos GPSs, que também utilizam a técnica do DSSS, o sistema exigirá um *clock* de referência altamente preciso e, portanto, custoso. Além disso, quanto mais longo o código de espalhamento, maior o tempo requerido pelo receptor para realizar uma correlação ao longo de todo o comprimento da sequência de código, ou por busca sequencial através de sequências de código ou implementação de múltiplos correlacionadores em paralelo (SEMTECH, 2015).

Dessa maneira, vista a limitação e os problemas da técnica DSSS, o método CSS busca prover uma comunicação de baixo custo e consumo de energia. A utilização de toda a largura de banda do canal de transmissão, como observado no comportamento do sinal *chirp* na Figura 13, faz com que o método se torne robusto ao ruído de canal e a desvios de frequência causados pelo uso de cristais de baixo custo ou mesmo causados pelo efeito Doppler, tornando-se uma boa opção para comunicações móveis, na qual este efeito é relevante (SEMTECH, 2015). Dessa maneira, vários parâmetros estão disponíveis para personalização da modulação LoRa: largura de banda (BW), fator de espalhamento (SF) e taxa de código (CR). A largura de banda, por sua vez, possui três larguras programáveis: 125 kHz, 250 kHz e 500 kHz nas

especificações gerais do LoRa. Os demais parâmetros são abordados nas seções posteriores.

Figura 13 - Comportamento sinal *up-chirp*



Fonte: (KIM, 2008).

2.2.1 Taxa de Codificação

A taxa de codificação (T_c) tem relação direta com a técnica Correção Adiantada de Erros (*Forward Error Correction* - FEC), utilizada pelo LoRa. A taxa de código (CR) define quantos bits são utilizados para dados de redundância na mensagem, a fim de realizar a recuperação de erros. São definidos quatro valores de T_c para serem implementados, sendo estes: 4/5, 4/6, 4/7, e 4/8. Uma taxa de codificação maior oferece maior proteção, contudo, incrementa o tempo ao ar (*time on air*) (BOR et al., 2016).

$$T_c = \frac{4}{4 + CR} \quad (2.6)$$

Na qual:

$$CR \in \{1,2,3,4\}$$

2.2.2 Fator de Espalhamento

Segundo (SEMTECH, 2015), são definidos seis valores diferentes para o parâmetro de fator de espalhamento, sendo eles: SF7, SF8, SF9, SF10, SF11 e SF12. Devido ao uso da técnica de espalhamento pelo LoRa, grandes sequencias de bits são codificadas em um único símbolo, reduzindo assim a relação sinal ruído (*Signal-to-Noise Ratio*, SNR) interferência de outras frequências nas transmissões de dados. Dessa maneira, para completo entendimento, algumas relações como a taxa de bits de dados desejada, a taxa de símbolos e a taxa de chip para a modulação LoRa precisam ser equacionadas. Primeiramente, podemos definir a taxa de bits de dados conforme a equação (2.7),

$$R_b = SF \times \frac{1}{\left[\frac{2^{SF}}{BW} \right]} \quad (2.7)$$

na qual:

SF - Fator de espalhamento, $SF \in \{7,8,9,10,11,12\}$

BW - Largura de banda, $BW \in \{125KHz, 250KHz, 500KHz\}$

Além disto, o tempo requerido para o envio de um símbolo LoRa, pode ser definido pela equação (2.8):

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (2.8)$$

A partir de equação (2.8) define-se também a taxa de símbolos, equacionada como segue:

$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{BW}{2^{SF}} \quad (2.9)$$

A partir das equações anteriores pode-se definir a taxa de chips R_c como:

$$R_c = R_s \times 2^{SF} \quad (2.10)$$

Ao manipular as equações (2.9) e (2.10) pode-se observar que na modulação do LoRa a taxa de chip depende apenas da largura de banda, ou seja, a taxa de chip é igual à largura de banda.

$$R_c = \frac{BW}{2^{SF}} \times 2^{SF} = BW \quad (2.11)$$

Ademais, conforme citado na seção 2.2.2, da utilização da correção de erros, a taxa de transmissão de bits mostrada na equação (2.7) pode ser reescrita como segue:

$$R_b = SF \times \frac{4}{\left[\frac{4 + CR}{2^{SF}} \right] \left[\frac{BW}{BW} \right]} [bits/seg] \quad (2.12)$$

Com isso, na Tabela 3 são exibidos os valores teóricos de taxa de transmissão para diferentes fatores de espalhamento, para uma CR igual a 4/5 (a menor redundância no FEC) e uma largura de banda de 500 kHz (a maior largura).

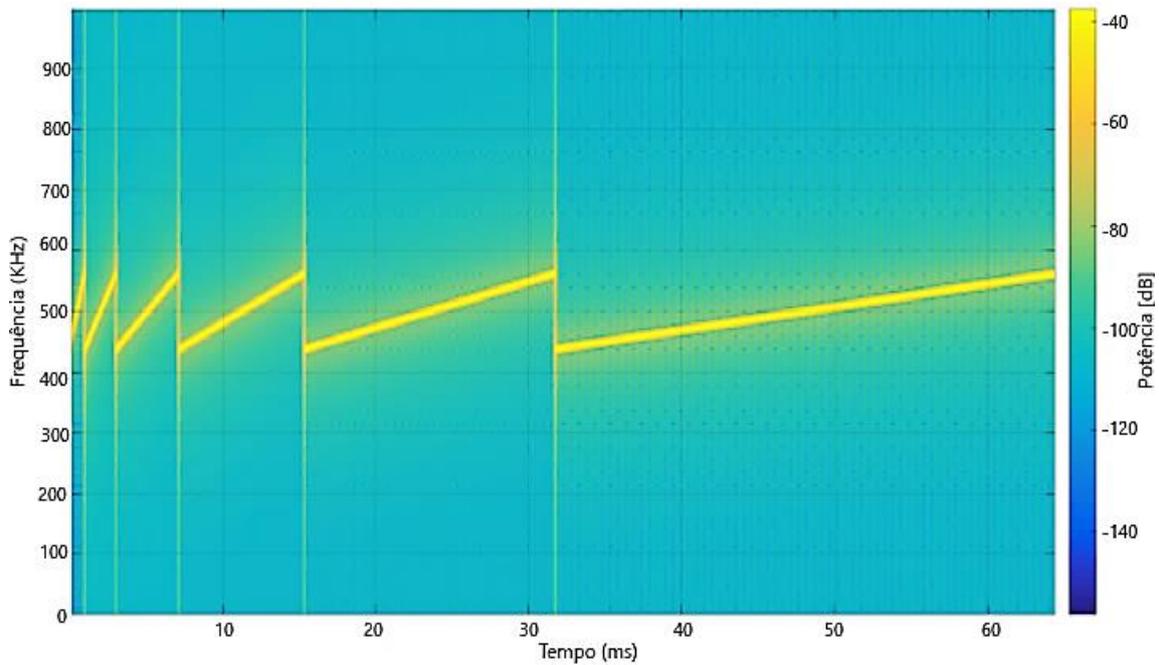
Tabela 3 - Valores teóricos de taxa de transmissão em função do SF

FATOR DE ESPALHAMENTO	TAXA DE TRANSMISSÃO TEÓRICA (bits/s)
SF7	21875
SF8	12500
SF9	7031
SF10	3906
SF11	2148
SF12	1172

Fonte: (MOLANO, 2018).

Analisando a Figura 14, pode-se observar o comportamento espectral dos fatores de espalhamento, de 7 a 12, da esquerda para a direita. Analisando a figura é possível constatar que a duração de um *Chirp* com determinado fator de espalhamento N será sempre o dobro da duração de um pulso com fator de espalhamento $N-1$.

Figura 14 - *Chirps* para diferentes SF



Fonte: (GHOSLYA, 2017).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados detalhes dos equipamentos utilizados para elaboração do protótipo. Sendo assim, demonstra-se aqui, as principais características da placa de desenvolvimento Arduino, o *shield* de comunicação LoRa, bem como detalhes da programação. Por fim, é apresentada a proposta de comunicação feita pelo protótipo.

3.1 Arduino

O Arduino foi desenvolvido no *Interaction Design Institute* (Instituto de Design de Interação) em Ivrea, na Itália, começou como um projeto do professor Massimo Banzi. Em meados de 2005, com demais colegas de trabalho, Banzi teve a ideia de desenvolver sua própria placa de prototipagem eletrônica que possibilitasse atividades escolares de forma a ter um orçamento mais baixo do que o proporcionado pelos sistemas similares da época. Em conjunto eles formularam uma plataforma na qual seus estudantes pudessem facilmente criar projetos de eletrônica baseados em microcontroladores baratos (BANZI, 2012).

“A filosofia do Arduino concentra-se em desenvolver projetos, e não em falar sobre eles. Ela representa uma busca constante por meios mais rápidos e poderosos de criarmos protótipos. Exploramos muitas técnicas de prototipagem e desenvolvemos formas de pensar cada vez mais práticas (BANZI, 2012).”

Ao longo dos anos, o Arduino tem sido o cérebro de milhares de projetos, desde objetos do cotidiano até instrumentos científicos complexos. Dentre as principais características da plataforma destacam-se:

- Baixo custo;
- Multi plataforma;
- Ambiente de programação de fácil utilização;
- *Open-source* e *hardware/software* extensivo.

Atualmente, devido às inúmeras entradas e modelos, o Arduino pode ser aplicado em diferentes funções e aplicações. Na Figura 15 observam-se as principais características construtivas da família Arduino.

Figura 15 - Tipos de Arduino

	Arduino Uno	Arduino Mega2560	Arduino Leonardo	Arduino Due	Arduino ADK	Arduino Nano	Arduino Pro Mini	Arduino Esplora
								
Microcontrolador	ATmega328	ATmega2560	ATmega32u4	AT91SAM3X8E	ATmega2560	ATmega168 (versão 2.x) ou ATmega328 (versão 3.x)	ATmega168	ATmega32u4
Portas digitais	14	54	20	54	54	14	14	-
Portas PWM	6	15	7	12	15	6	6	-
Portas analógicas	6	16	12	12	16	8	8	-
Memória	32 K (0,5 K usado pelo bootloader)	256 K (8 K usados pelo bootloader)	32 K (4 K usados pelo bootloader)	512 K disponível para aplicações	256 K (8 K usados pelo bootloader)	16 K (ATmega168) ou 32K (ATmega328), 2 K usados pelo bootloader	16 K (2k usados pelo bootloader)	32 K (4 K usados pelo bootloader)
Clock	16 Mhz	16 Mhz	16 Mhz	84 Mhz	16 Mhz	16 Mhz	8 Mhz (modelo 3.3v) ou 16 Mhz (modelo 5v)	16 Mhz
Conexão	USB	USB	Micro USB	Micro USB	USB	USB Mini-B	Serial / Módulo USB externo	Micro USB
Conector para alimentação externa	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
Tensão de operação	5v	5v	5v	3.3v	5v	5v	3.3v ou 5v, dependendo do modelo	5v
Corrente máxima portas E/S	40 mA	40 mA	40 mA	130 mA	40 mA	40 mA	40 mA	-
Alimentação	7 - 12 Vdc	3.35 - 12 V (modelo 3.3v), ou 5 - 12 V (modelo 5v)	5v					

Fonte: (COELHO, 2015).

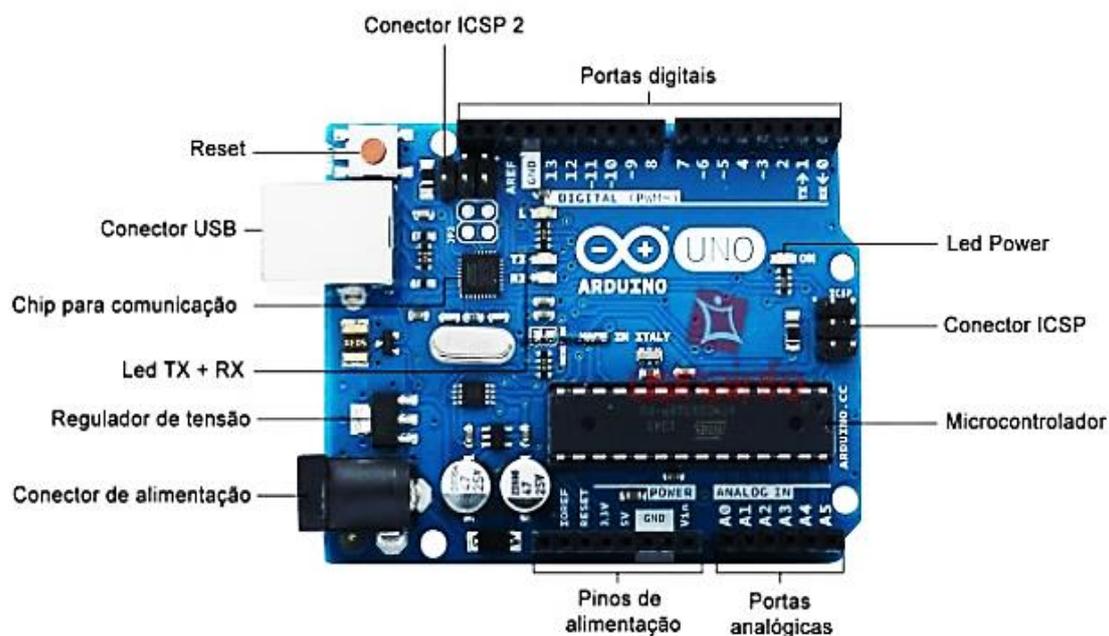
3.1.1 Hardware

O modelo utilizado nesse trabalho, o Arduino Uno revisão 3, trata-se de uma plataforma de prototipagem eletrônica de *hardware* livre projetado com o microcontrolador Atmega328, fabricado pela Atmel. A escolha do modelo justifica-se, além do seu baixo custo, por sua disponibilidade no mercado e compatibilidade com o módulo de comunicação Dragino LoRa, abordado na seção 3.2 desse documento.

Os pinos da placa são organizados como segue:

- 14 pinos de entrada e saída digital (pinos 0-13): Esses pinos podem ser utilizados como entradas ou saídas digitais de acordo com a necessidade do projeto e conforme definido por programação;
- 6 pinos de entradas analógicas (pinos A0 - A5): Esses pinos são dedicados a receber valores analógicos, por exemplo, a tensão de um sensor. Os valores a serem lidos devem estar na faixa de 0 a 5 V os quais serão convertidos para valores digitais entre 0 e 1023;
- 6 pinos de saídas analógicas (pinos 3, 5, 6, 9, 10 e 11): São pinos digitais que podem ser programados para serem utilizados como saídas analógicas, utilizando modulação PWM.

Figura 16 - Arduino UNO



Fonte: (EMBARCADOS, 2013).

A alimentação da placa pode ser feita a partir da porta USB do computador ou através de um adaptador AC. Para o adaptador AC recomenda-se uma tensão de 9 a 12 volts (EMBARCADOS, 2013).

3.1.2 Software

O Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) é um programa especial executado por um computador que permite a criação de *sketches* para a placa Arduino em uma linguagem simples, modelada a partir da linguagem *Processing*. No momento do *upload* do *sketch* para a placa, o código escrito é traduzido para a linguagem C e é transmitido para o compilador *avr-gcc*, importante *software* de código aberto que realiza a tradução final de seus comandos, agora para uma linguagem que pode ser compreendida pelo microcontrolador. Assim o Arduino simplifica ao máximo as complexidades inerentes à programação de microcontroladores. O Arduino IDE na sua versão 1.8.3 pode ser visualizado na Figura 17. Os *shields*, módulos, que adicionam funcionalidades ao Arduino exigem também muitas vezes bibliotecas especializadas, e essas são normalmente fornecidas e mantidas pelos desenvolvedores do módulo (EVANS; NOBLE; HOCHENBAUM, 2013).

Figura 17 - Arduino IDE

The image shows a screenshot of the Arduino IDE software interface. The window title is "Blink | Arduino 1.8.3". The menu bar includes "Arquivo", "Editar", "Sketch", "Ferramentas", and "Ajuda". Below the menu bar is a toolbar with icons for opening files, saving, and other functions. The main text area displays the code for the "Blink" sketch. The code includes comments about the public domain status and modification dates by Scott Fitzgerald, Arturo Guadalupi, and Colby Newman. The code defines a setup function to initialize the LED_BUILTIN pin as an output and a loop function that turns the LED on and off with a 1000ms delay. The status bar at the bottom indicates "10" and "Arduino Nano, ATmega328 em COM8".

```
Blink
|
This example code is in the public domain.

modified 8 May 2014
by Scott Fitzgerald

modified 2 Sep 2016
by Arturo Guadalupi

modified 8 Sep 2016
by Colby Newman
*/

// the setup function runs once when you press reset or power the
void setup() {
  // initialize digital pin LED_BUILTIN as an output.
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
}

// the loop function runs over and over again forever
void loop() {
  digitalWrite(LED_BUILTIN, HIGH); // turn the LED on (HIGH is t
  delay(1000); // wait for a second
  digitalWrite(LED_BUILTIN, LOW); // turn the LED off by making
  delay(1000); // wait for a second
}
10
Arduino Nano, ATmega328 em COM8
```

Fonte: Autor.

As etapas de programação do Arduino podem ser divididas da seguinte maneira:

1. Conexão da placa a uma porta USB do computador;
2. Desenvolvimento de um *sketch* com comandos para a placa;
3. *Upload* do *sketch* para a placa, utilizando a comunicação USB;
4. Aguardar a reinicialização, em seguida ocorrerá à execução do *sketch* criado.

A partir do momento que foi feito o *upload* o Arduino não precisa mais do computador, o Arduino executará o *sketch* criado, desde que seja ligado a uma fonte de energia (EMBARCADOS, 2013).

3.2 Dragino LoRa *Shield*

O Dragino LoRa *Shield* foi o dispositivo eletrônico utilizado nesse trabalho para realizar a comunicação sem fio. O módulo é baseado nos chips Semtech SX1276/SX1278 e tem como principal objetivo ser a conectividade de aplicativos de redes de sensores sem fio profissionais, como sistemas de irrigação, medição inteligente, cidades inteligentes, e assim por diante (DRAGINO TECHNOLOGY, 2017). Na Tabela 4 é apresentada uma síntese das principais características do módulo.

Tabela 4 - Características Dragino LoRa *Shield*

Dragino LoRa <i>Shield</i>	
Tensão de alimentação	3,3 – 5 V
Alcance	até 1,5 km
Taxa de dados	até 300 kbps
Frequência de operação	915 MHz / 868 MHz / 433 MHz
Sensibilidade	-148 dBm
Potência	110 mW

Fonte: (DRAGINO TECHNOLOGY, 2017).

O Dragino LoRa *shield* pode ser utilizado em algumas plataformas de desenvolvimento como Arduino e Rapsberry Pi. Para a família Arduino o módulo possui compatibilidade com os seguintes modelos: Arduino Leonardo, Uno, Mega e DUE. Desde sua primeira versão, o módulo vem recebendo alterações que objetivam melhorar o desempenho e facilitar seu uso. Na Tabela 5 são mostradas as alterações aplicadas em cada uma das versões.

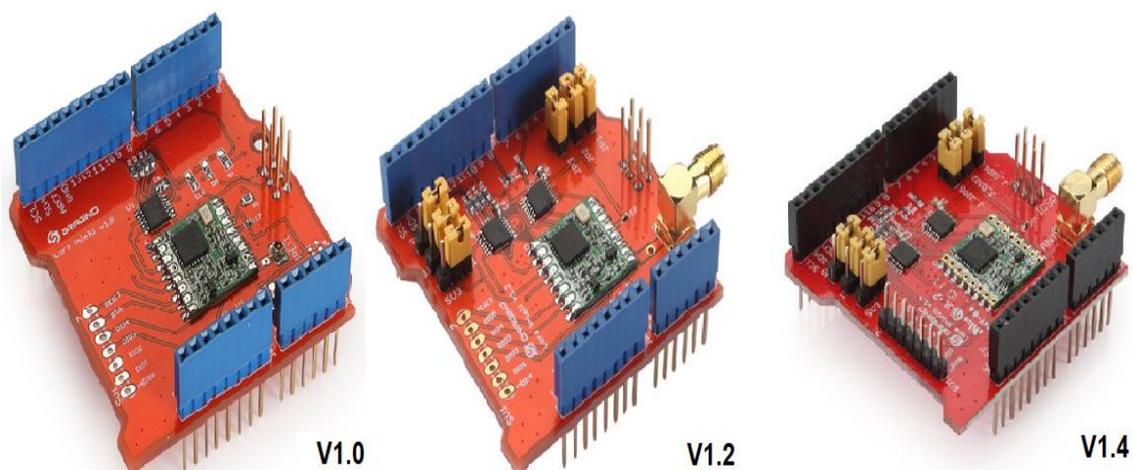
Tabela 5 - Versões Dragino LoRa *Shield*

Versão	Principais Alterações
v1.0	Primeira versão de <i>hardware</i>
v1.2	Conexão das entradas digitais ao Arduino. Alteração conector i-pex para conector SMA.
v1.3	Alteração da tensão de alimentação 5V para 3,3V. Conexão direta ao pino +3,3V do Arduino.
v1.4	Adição dos resistores R9/R10/R11, possibilitar alteração da pino LoRa CS para outras entradas.

Fonte: (DRAGINO TECHNOLOGY, 2017).

A Figura 18 mostra o *design* de cada uma das versões do módulo. No desenvolvimento desse trabalho foi utilizado a sua versão mais recente, 1.4.

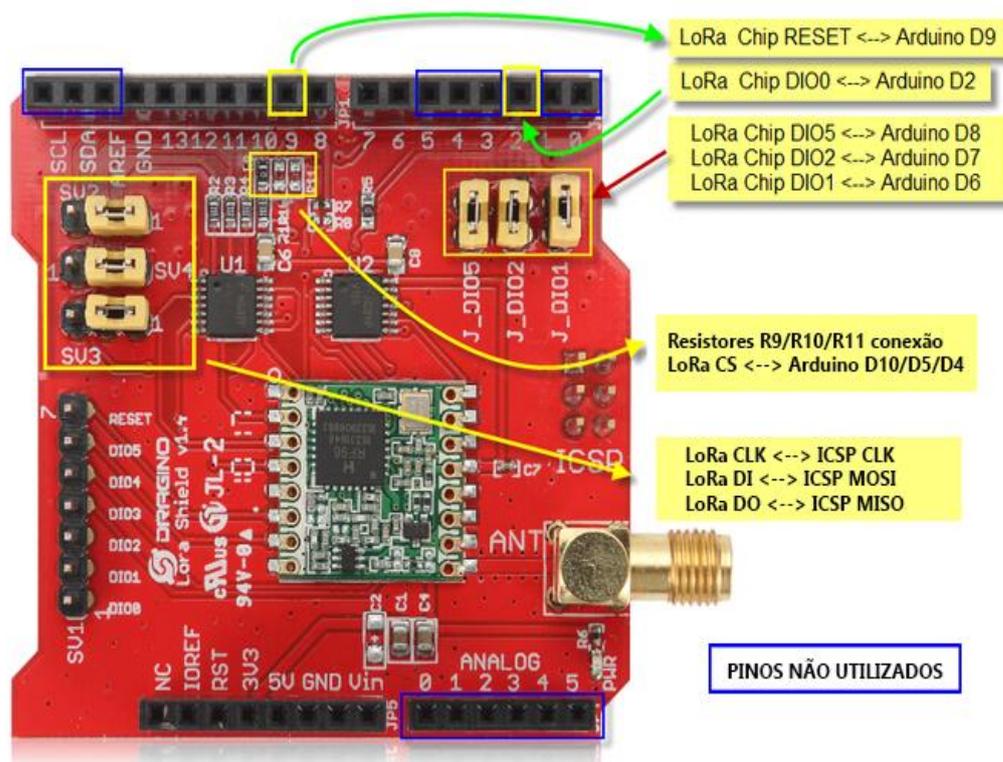
Figura 18 - Versões Dragino LoRa *Shield*



Fonte: (DRAGINO TECHNOLOGY, 2017).

Na Figura 19 são mostrados detalhes da distribuição dos pinos do módulo Dragino LoRa versão 1.4. Os pinos inseridos no retângulo azul não são utilizados pelo módulo, contudo, funcionam como uma extensão dos pinos do Arduino, sendo assim, disponíveis para demais aplicações.

Figura 19 - Pinagem Dragino LoRa Shield v1.4



Fonte: (DRAGINO TECHNOLOGY, 2017).

3.2.1 Biblioteca Arduino LoRa

Para realizar a comunicação do Arduino com dispositivos LoRa é necessário a instalação de uma biblioteca específica para realizar as configurações dos principais parâmetros e iniciar a comunicação, enviando e recebendo informação. A biblioteca utilizada nesse trabalho foi Arduino LoRa, disponível no GitHub, plataforma de hospedagem de código-fonte com controle de versão usando o Git. A página permite que programadores, utilitários ou qualquer usuário cadastrado na plataforma, contribuam em projetos privados e/ou *open-source* de qualquer lugar do mundo (TECHTUDO, 2011).

Atualmente a biblioteca encontra-se na sua versão 0.5.0 e é disponibilizada no seguinte endereço: <https://github.com/sandeepmistry/arduino-LoRa>. A biblioteca visa propor comunicação entre qualquer dispositivo rádio LoRa configurado com os mesmos parâmetros de rádio e em alcance pode 'enxergar' os pacotes. A mesma possui suporte para os chips Semtech SX1276/77/78/79 e para *shields* que utilizam os mesmos, como o caso do Dragino LoRa. A seguir, são apresentadas as principais funções pertencentes à biblioteca:

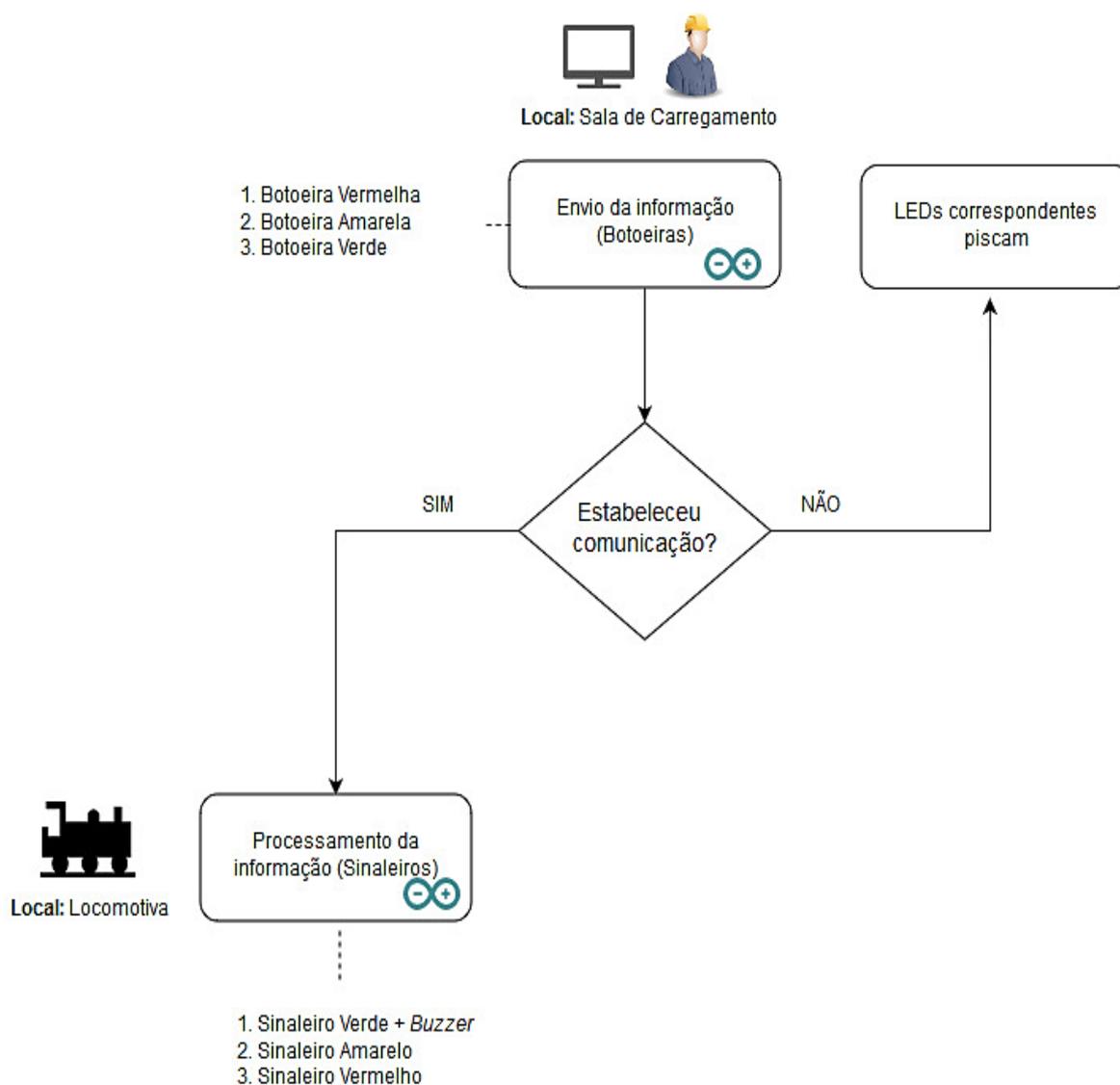
- *LoRa.begin(frequency)*: Inicia a biblioteca com a frequência especificada, na qual a frequência em Hz (433E6, 866E6, 915E6);
- *LoRa.onReceive(onReceive)*: Escolha de uma função de retorno para quando um pacote é recebido;
- *LoRa.receive()*: Coloca o rádio no modo de recepção contínua;
- *LoRa.setSpreadingFactor(spreadingFactor)*: Ajuste do fator de espalhamento (SF) do dispositivo, pré-configurado com valor 7;
- *LoRa.setSignalBandwidth(signalBandwidth)*: Ajuste da largura de banda (BW) do sinal do dispositivo, pré-configurado com valor 125E3 (125kHz);
- *LoRa.setCodingRate4(codingRateDenominator)*: Ajuste da taxa de codificação (CR) do dispositivo, pré-configurado com valor 5.

As demais funções, para envio e recebimento, estão comentadas no código fonte dos dispositivos presentes nos anexos I e II. Dentre os parâmetros utilizados, na rotina de programação foi configurada a frequência de operação de 915MHz, frequência ISM utilizada no Brasil e, fator de espalhamento de valor 11, que objetiva maior alcance. Os outros parâmetros não foram modificados, permanecendo, portanto, os valores pré-configurados.

3.3 Modelo Proposto

O modelo de comunicação proposto nesse trabalho é caracterizado por dois dispositivos, aqui caracterizados como transmissor e receptor. Cada um desses, é formado por uma placa de desenvolvimento Arduino UNO e um módulo de comunicação Dragino LoRa. O fluxograma que descreve o modelo é mostrado na Figura 20.

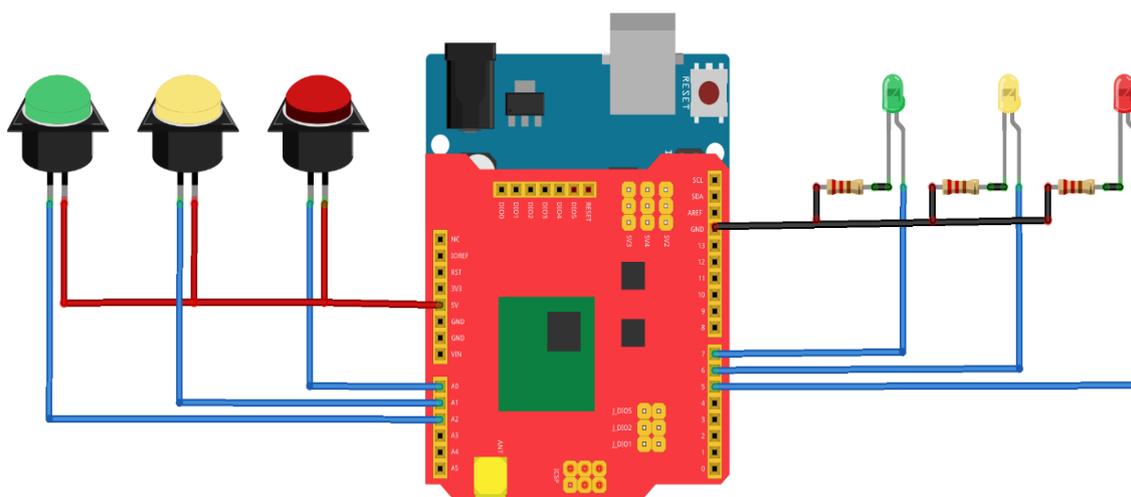
Figura 20 - Modelo de comunicação proposto



Fonte: Elaborada pelo autor.

O transmissor, localizado na sala de carregamento, é responsável por enviar informações ao receptor, através de botoeiras. As informações são para movimentação (Botoeira Verde), atenção (Botoeira Amarela) e parada (Botoeira Vermelha). O esquema de ligação dos componentes é mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Esquemático da montagem do Transmissor



fritzing

Fonte: Elaborada pelo autor.

A rotina de programação do Arduino presente no aparelho do transmissor foi elaborada sendo suas entradas e saídas configuradas conforme mostrado na Tabela 6. A escolha dos pinos foi realizada conforme disponibilidade e a facilidade de acesso para uso.

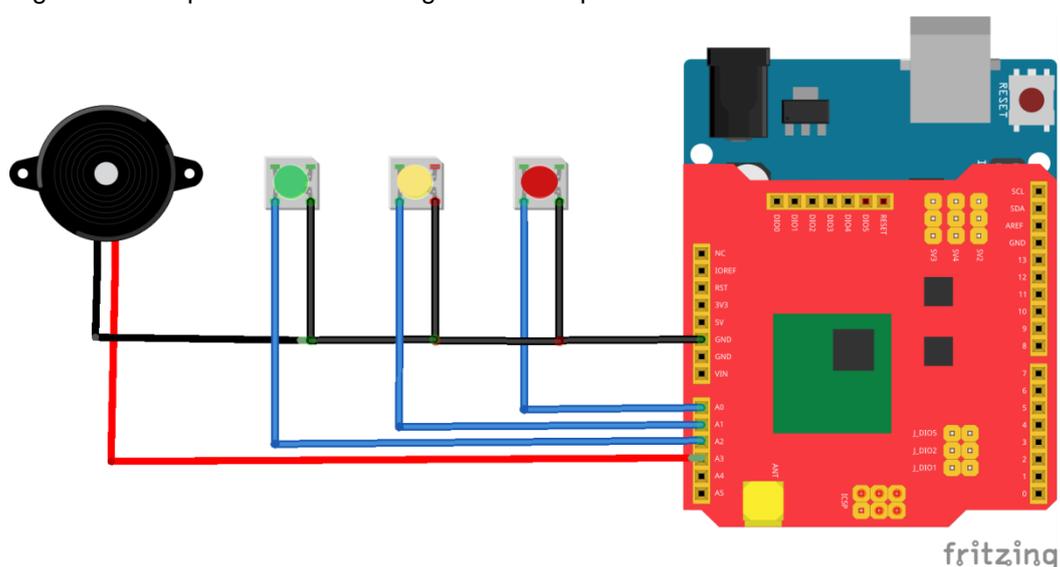
Tabela 6 - Entradas e saídas do Transmissor

ENTRADAS	
Botoeira Vermelha	A0
Botoeira Amarela	A1
Botoeira Verde	A2
SAÍDAS	
LED Verde	D5
LED Amarelo	D6
LED Vermelho	D7

Fonte: Elaborada pelo autor.

No receptor, localizado na locomotiva, a informação é processada e um sinaleiro é acionado na cor correspondente. Juntamente com o sinaleiro verde, um *buzzer* também é acionado alertando o maquinista a necessidade de movimentação. Além disso, ao receber a informação, o receptor envia um *feedback* como forma de assegurar que a comunicação foi bem-sucedida. Caso contrário, sem um *feedback*, LEDs correspondentes piscam informando que a informação não chegou ao destino. A Figura 22 mostra o esquema de ligação dos componentes do receptor.

Figura 22 - Esquemático da montagem do Receptor



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 7, são mostradas as respectivas portas de cada um dos componentes.

Tabela 7 - Saídas do Receptor

SAÍDAS	
Sinaleiro Vermelho	A0
Sinaleiro Amarelo	A1
Sinaleiro Verde	A2
<i>Buzzer</i>	A3

Fonte: Elaborada pelo autor.

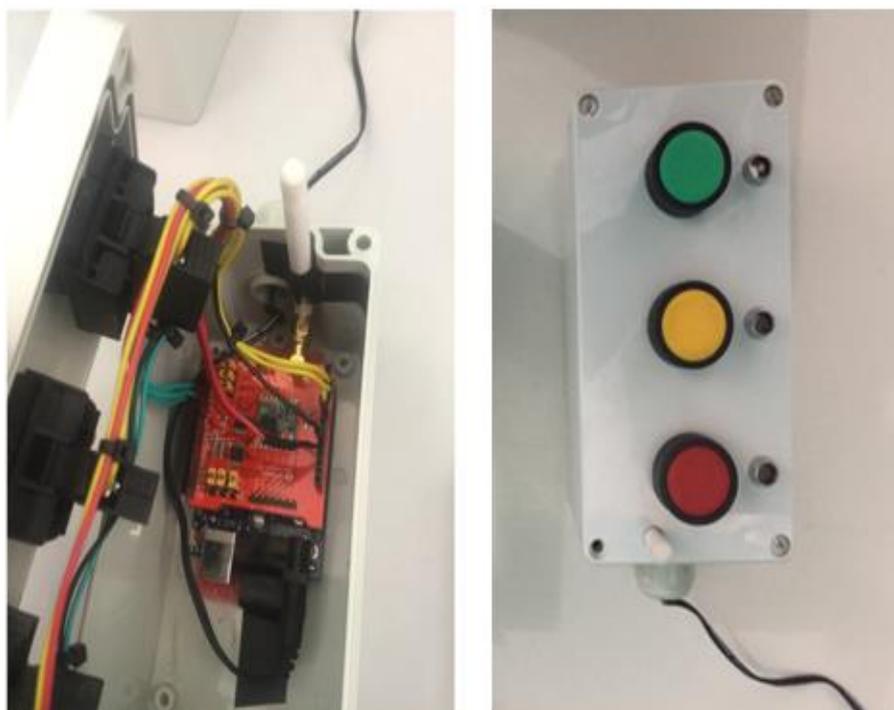
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados o dispositivo final para realizar a comunicação e discussões pertinentes a sua confecção. Além disso, é apresentado um exemplo de aplicação realizado em uma empresa de logística presente na cidade de Arcos, Minas Gerais. Dessa maneira, foi possível validar e mensurar os ganhos a partir da utilização do dispositivo. Por fim, é apresentado o levantamento de custos do trabalho.

4.1 Protótipo

Ainda que o dispositivo proposto neste trabalho tenha caráter de prototipagem, todos os componentes necessários para sua confecção foram dispostos de maneira segura para que o mesmo pudesse ser colocado em uso em uma aplicação prática. A Figura 23 mostra o interior e a vista superior do aparelho transmissor em sua montagem.

Figura 23 - Montagem



Fonte: Autor.

Durante elaboração do dispositivo verificou-se a necessidade de uma antena diferente da já presente no *shield* Dragino LoRa, visando amplificar o sinal e adequar a disposição no protótipo. A antena escolhida tem ganho de 3 dBi e possui articulação em sua estrutura que facilita seu manuseio. Para instalação foi necessário um adaptador SMA macho para RP- SMA fêmea.

4.1.1 Transmissor

A montagem final do dispositivo transmissor, presente na sala de carregamento, pode ser visualizada na Figura 24. Além do Arduino e do Dragino LoRa *shield*, o aparelho é composto por: sinaleiros, responsáveis pelo envio de informações; LED's de cores correspondentes às botoeiras, para indicar se a mensagem foi recebida; antena e fonte de alimentação.

Figura 24 - Ilustração do protótipo Transmissor desenvolvido



Fonte: Autor.

4.1.2 Receptor

A montagem final do dispositivo receptor, presente na locomotiva, pode ser visualizada na Figura 25. Além do Arduino e do *shield* Dragino LoRa, o aparelho é composto por: sinaleiros, responsáveis por informar o sinal recebido; *buzzer*, acionado juntamente com o sinaleiro verde para alertar o maquinista para movimentação; antena e fonte de alimentação. O *buzzer* está localizado no interior da caixa do dispositivo.

Figura 25 - Ilustração do protótipo Receptor desenvolvido



Fonte: Autor.

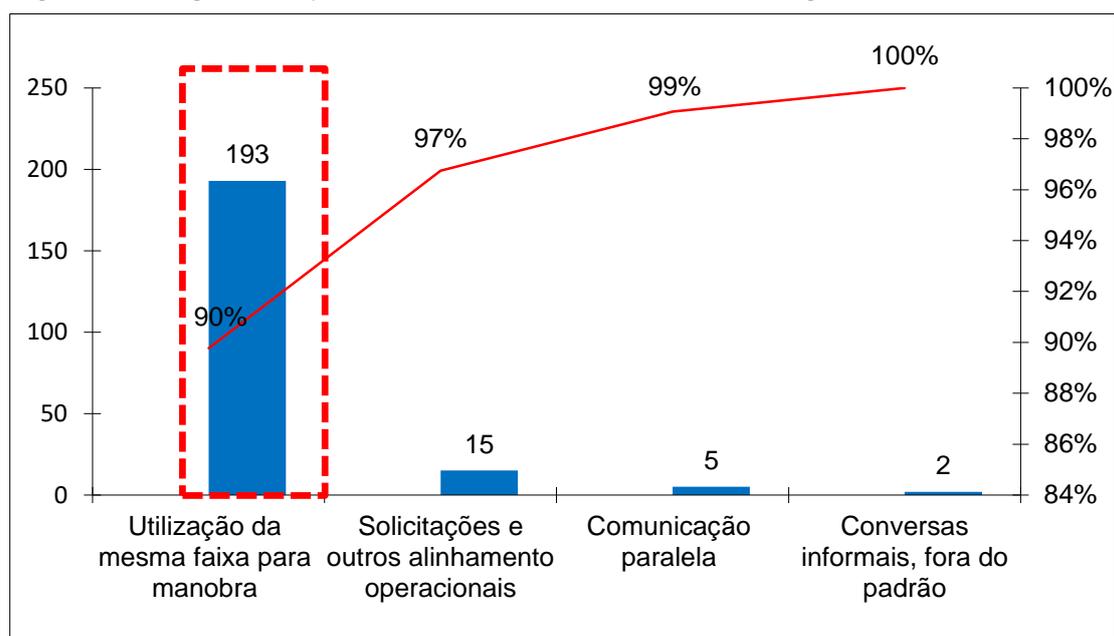
4.2 Exemplo de Aplicação

Para mensurar os ganhos com a utilização do dispositivo, o mesmo foi utilizado no processo de carregamento de uma empresa logística, situada na cidade Arcos-MG. A empresa é prestadora de serviço logístico para um importante cliente siderúrgico da cidade, transportando produtos primários para a planta do cliente no estado do Rio de Janeiro.

No pátio ferroviário do cliente, existem dois pontos de carregamento de materiais distintos, em operação simultânea. Para cada operação é necessária uma equipe de operação ferroviária e uma de comunicação. Devido a essa característica, comum em pátios de carregamento e, por contar com apenas uma faixa de rádio para comunicação de voz, o processo de carregamento é alvo de grande interferência. Neste exemplo de aplicação a distância máxima entre a sala de carregamento e a locomotiva é de aproximadamente 900 metros.

Para estratificar o problema da interferência, foi coletada uma amostra de dados a fim de se obter as principais causas e frequência das interferências. Em posse das informações, foi elaborado um diagrama de pareto que é mostrado na Figura 26. Ao analisar o diagrama, constata-se que a causa raiz das interferências é devido ao uso simultâneo entre os dois carregamentos.

Figura 26 - Diagrama de pareto causas das interferências no carregamento

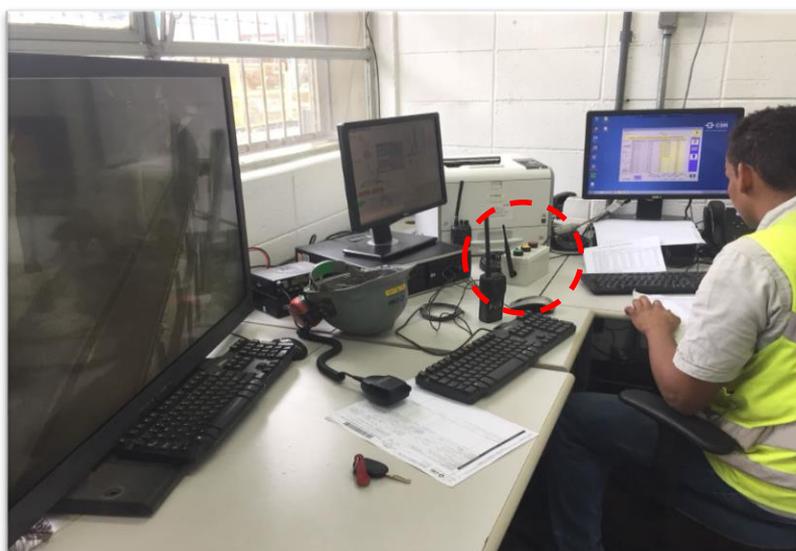


Fonte: Elaborada pelo autor.

Confirmada a causa raiz do problema, o dispositivo proposto para realizar a comunicação entre o maquinista e operador do carregamento foi aplicado no processo de carregamento descrito e validado com a coleta de dados operacionais reais.

A utilização do dispositivo é apresentada nas Figuras 27 e 28. A Figura 27 mostra a utilização do transmissor na sala de carregamento e a Figura 28 mostra o receptor localizado no interior da locomotiva.

Figura 27 - Utilização do dispositivo na sala de carregamento



Fonte: Autor.

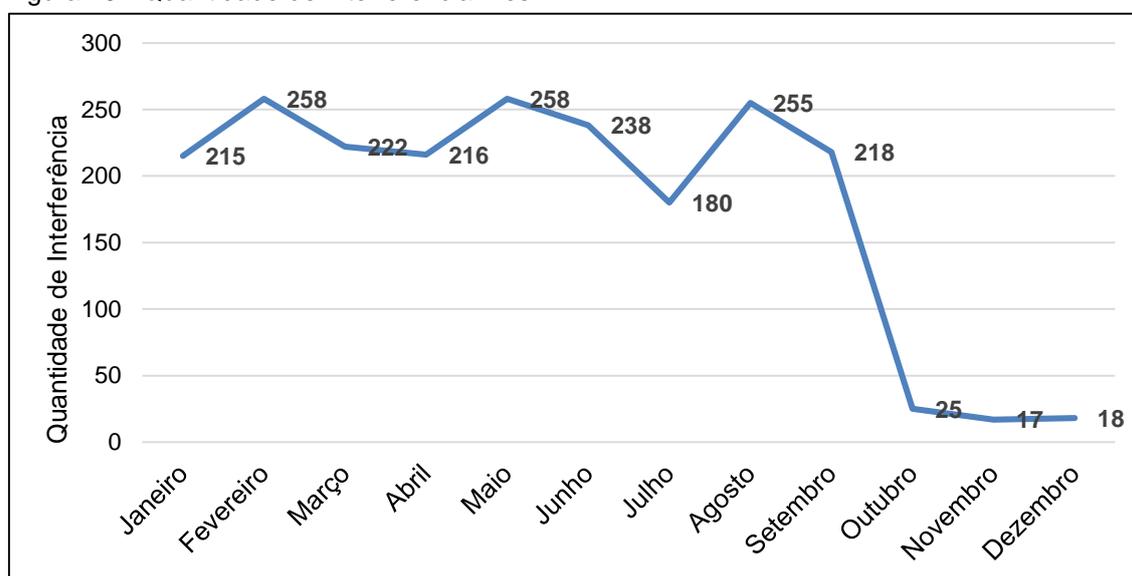
Figura 28 - Utilização do dispositivo na locomotiva



Fonte: Autor.

Durante todo o ano de 2017 foram coletadas amostras mensais de interferências no carregamento, sendo o valor final uma relação com o número de lotes de vagões carregados no mês. A utilização do protótipo teve início no último trimestre e os ganhos podem ser visualizados na Figura 29. Muito além da produtividade, com a diminuição do número de interferências que resulta em paradas no carregamento, o dispositivo trouxe maior segurança, uma vez que a partir da sua utilização o volume de informações de voz nas faixas de rádio também diminuiu.

Figura 29 - Quantidade de interferência mês



Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir dos dados coletados a utilização do protótipo no processo de carregamento ferroviário representa uma redução de 91,27% no número de interferência na comunicação por voz. Assim, pode-se concluir que o protótipo desenvolvido atendeu as expectativas e os seus ganhos foram validados de forma satisfatória.

Os relatos dos operadores do carregamento e dos maquinistas foram satisfatórios quanto ao uso do dispositivo. Segundo os mesmos, a diminuição do número de contato de rádio gera inclusive benefícios quanto à redução de estresse na jornada de trabalho, que geralmente é extensa, podendo chegar até 12 horas.

4.3 Levantamento de Custos

O levantamento de custos do protótipo foi baseado nos preços médios encontrados no sítio eletrônico de vendas *online* Mercado Livre (www.mercadolivre.com.br), cujo custo total estimado para a confecção do dispositivo é de R\$ 969,00. A partir das informações dispostas na Tabela 8, verifica-se que o custo do módulo de comunicação Dragino LoRa equivale a mais de 53% do custo total do dispositivo. A justificativa para o elevado valor deve-se ao fato que os módulos são importados, assim seu preço é dependente do câmbio da moeda nacional.

Tabela 8 - Levantamento de custos do protótipo

Componentes	Quantidade	Preço Unitário	Total	%
Arduino UNO R3	2	R\$ 40,00	R\$ 80,00	8,3%
Dragino LoRa <i>Shield</i>	2	R\$ 260,00	R\$ 520,00	53,7%
Caixa Elétrica em Poliéster 160x70x70 mm	2	R\$ 45,00	R\$ 90,00	9,3%
Botoeiras Industriais	3	R\$ 15,00	R\$ 45,00	4,6%
Sinaleiros Led 5V	3	R\$ 12,00	R\$ 36,00	3,7%
Fonte de Alimentação 12V	2	R\$ 13,00	R\$ 26,00	2,7%
Antena Dipolo 3dbi	2	R\$ 68,00	R\$ 136,00	14,0%
Adaptador SMA Macho X RP-SMA	2	R\$ 8,00	R\$ 16,00	1,7%
Outros componentes	-	-	R\$ 20,00	2,1%
Total estimado:			R\$ 969,00	100%

Fonte: Elaborada pelo autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta as conclusões obtidas após a finalização do projeto e as perspectivas para trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

O transporte ferroviário de cargas é um setor de grande relevância para o desenvolvimento da nação, uma vez que através dele são transportados os principais produtos necessários para diversos segmentos industriais. Embora o modal ferroviário do Brasil represente a segunda maior movimentação de cargas, o volume ainda é bastante inferior comparado ao transporte rodoviário, necessitando assim de investimentos. Dessa maneira, propondo melhoria na operação de carregamento de vagões ferroviários, este trabalho conduziu à elaboração de um dispositivo para auxiliar a comunicação dessa operação.

As características da comunicação do protótipo demandaram algumas particularidades como longo alcance, devido à extensão dos pátios ferroviários e restrição de potência do dispositivo. Tais características são fundamentos das redes LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) o que as tornaram objeto de estudo desse trabalho. As redes possuem vasta aplicação, especialmente sob o aspecto do paradigma da IoT e M2M, pois os objetos inteligentes, quase sempre, são restritivos quanto ao consumo de energia. Dentre as principais redes LPWAN destacam-se a Sigfox, Ingenu e LoRaWAN. Todas possuem características específicas que as diferem e as evidenciam em certos tipos de aplicações.

No desenvolvimento do trabalho foi construído um protótipo com dois nós capazes de trocar mensagens utilizando a tecnologia LoRa. Essa tecnologia trata-se da camada física utilizada para implementar redes LoRaWAN e tem se tornado uma aplicação cada vez mais adotada comercialmente devido à facilidade no acesso e uso. A tecnologia utiliza uma série de parâmetros para garantir a comunicação de longo alcance e baixa potência entre dispositivos,

entre eles o fator de espalhamento (*Spreading Factor* - SF) que aumenta a sensibilidade do receptor, ao custo de menores taxas de transmissão. Além disso, parâmetros como frequência de operação, largura de banda e a taxa de codificação também podem ser configurados conforme necessidade.

Para confecção dos nós, foram usadas placas de prototipagem Arduino, além de uma biblioteca utilizada para comunicação entre os módulos Dragino LoRa que utilizam *chip* da Semtech. Os módulos foram complementados com outros componentes, como botoeiras e sinaleiros para criar uma interface entre o usuário no envio e recebimento das informações. Dessa maneira, dado acionamento de botoeiras, o operador do carregamento informa ao maquinista a necessidade de movimentação, parada ou atenção. Essa informação é processada e visualizada por meio dos sinaleiros. No sinal de movimentação, além do sinaleiro verde, um dispositivo sonoro foi idealizado, visando alertar a mudança de estado e, por consequência, evitar perda de produtividade.

Por fim, após o protótipo ser utilizado em uma aplicação real, conclui-se, que houve uma redução de 91,27% no número de interferências na comunicação por voz durante o processo de carregamento. Diminuição que representa, além de ganhos de produtividade, segurança para os colaboradores envolvidos na operação, visto maior assertividade das informações com o uso do dispositivo ao evitar contato por voz. Além disso, é possível afirmar, também, que o dispositivo representa uma alternativa economicamente vantajosa para as operações ferroviárias, visto que seu custo estimado de R\$ 969,00, é relativamente pequeno em relação aos benefícios identificados a partir da sua utilização.

5.2 Trabalhos Futuros

Como forma de prosseguimento da pesquisa desenvolvida neste trabalho, são sugeridas as seguintes propostas de trabalhos futuros:

- Programar os nós do protótipo para que realizem troca de informações empregando diferentes parâmetros para mensurar o desempenho;

- Desenvolvimento da miniaturização do protótipo utilizando Arduino nano e o *chip* LoRa;
- Melhorar a experiência do usuário incluindo letreiros que informam as cores dos sinaleiros e botoeiras do protótipo;
- Avaliar o consumo total de energia do dispositivo viabilizando a utilização de baterias para que o usuário possa realizar a comunicação em locais sem ponto de energia;
- Implementar *gateways* de baixo custo, baseados em sistemas embarcados, estabelecendo uma rede de comunicação entre os nós, buscando a conectividade de demais dispositivos e possíveis novas aplicações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTHMANN, M. **GitHub: Seja social com seu código**. TechTudo, 2011. Disponível em: <<https://www.techtudo.com.br/artigos/noticia/2011/06/github-seja-social-com-seu-codigo.html>>. Acesso em: 26 set. 2018

BANZI, M. **Primeiros Passos com Arduino**. São Paulo: Novatec, 2012.

BOR, M. C., ROEDIG, U., VOIGT, T., et al. **Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale?**. Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, MSWiM '16, pp. 59{67, New York, NY, USA, 2016. ACM.

BOR, M., VIDLER, J., ROEDIG, U. **"LoRa for the Internet of Things"**. In: Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks, EWSN '16, pp. 361{366, USA, 2016. Junction Publishing.

CENTENARO, M. et al. **Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the iot and smart city scenarios**. *CoRR*, abs/1510.00620, 2015. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1510.00620>>. Acesso em: 11 set. 2018.

CNS. **Estudos Especiais CNS – Os serviços na economia brasileira**. Confederação Nacional de Serviços, 2015

CNT. **Transporte de cargas no Brasil: ameaças e oportunidades para o desenvolvimento do país**. Confederação Nacional do Transporte, 2008

COELHO, F. ALEXSANDRO. **Qual Arduino Comprar? Conheça os tipos de Arduino**. (2015). Disponível em: <<http://luthortronics.com.br/qual-arduino-comprar-conheca-os-tipos-de-arduino/>>. Acesso em: 26 set. 2018

CONRAD, D. **How New Long-Range Radios Will Change the Internet of Things**. Medium, 2015. <<https://medium.com/@dconrad/how-new-long-range-radios-will-change-the-internet-of-things-ed8e6b5e367f>>. Acesso em: 11 set. 2018.

EVANS, M.; NOBLE, J; HOCHENBAUM, J. **Arduino em Ação**. São Paulo: Novatec, 2013.

GHOSLYA, SAKSHAMA. **LoRa: Symbol Generation**. All about LoRa and LoRaWAN, 2017. Disponível em: <<http://www.sghoslya.com/p/lora-is-chirp-spread-spectrum.html>>. Acesso em: 25 set. 2018.

G1. Ministério da Fazenda diz que greve dos caminhoneiros causou prejuízo de R\$15,9 bilhões à economia. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/noticia/ministerio-da-fazenda-diz-que-greve-dos-caminhoneiros-causou-prejuizo-de-r-15-bilhoes-a-economia.ghtml>>. Acesso em: 10 out. 2018

INGENU. HOW RPMA WORKS: The Making of RPMA. www.Ingenue.Com, p. 92, 2016a. Disponível em: <<http://www.ingenu.com/get-started/resources/>>. Acesso em: 25 set. 2018.

INGENU. How RPMA Handles Interference. p. 6, 2016b. Disponível em: <<http://www.ingenu.com/get-started/resources/>>. Acesso em: 25 set. 2018.

KIM, EUI. IK KIM, JIN., KANG, IK-SEON., GOOK PARK, CHAN., JEE, GYU-In. Simulation results of ranging performance in two-ray multipath model. (2008).

LORA ALLIANCE. What is LoRa?. Disponível em <<https://www.LoRa-alliance.org/What-Is-LoRa/LoRaWAN-White-Papers>>. Acesso em: 20 set. 2018.

MARQUES, J., BOCHIE, KAYLANI. LoRa. Grupo de Teleinformática e Automação (GTA), UFRJ. Disponível em: <<https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2018-1/trabalhos-vf/lora/>>. Acesso em: 22 set. 2018.

McCLELLAND, C. Should I Use LPWAN?. Medium, 2017. Disponível em: <<https://medium.com/iotforall/should-i-use-lpwan-94986e81ea29>> Acesso em: 11 set 2018

MEIRELES, LEONARDO VIDIGAL. Projeto de uma rede de internet das coisas para monitoramento e alerta de emergência em áreas de risco. 2018. 134 f. Dissertação (Mestrado em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/10072>> Acesso em: 20 set. 2018.

MOLANO ORTIZ, FERNANDO. Análise de desempenho de uma rede sem fio de baixa potência e longo alcance para a internet das coisas. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018. Disponível em: <<http://www.pee.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/dissertacoes-de-mestrado/2018/2016033228--84/file>>. Acesso em: 20 set. 2018

MOSEEV, V. **LPWAN networks: history and prospects**. Disponível em: <<https://iot.ru/promyshlennost/seti-lpwan-istoriya-i-perspektivy>>. Acesso em: 11 set. 2018.

MULTITECH. **LPWA: Unlocking the Future of the Internet of Things**. 2017 Disponível em: <https://www.engerati.com/system/files/lpwan_history_and_summary.pdf> Acesso em: 22 set. 2018

NNNCO. **Why LoRaWAN**. 2015. Disponível em: <<http://www.nnnco.com.au/lorawan>>. Acesso em: 20 set. 2018

PNL. Diagnóstico e proposições cenário de 2025. **Plano Nacional De Logística, 2015**.

RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. **Low Power Wide Area Networks: An Overview**. IEEE Communications Surveys & Tutorials 1, p. 18, 2017. Disponível em: <http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html>. Acesso em: 14 set. 2018.

SANCHEZ-IBORRA, Ramon; CANO, Maria-dolores. **State of the Art in LP-WAN Solutions for Industrial IoT Services**. Sensors, [s.l.], v. 16, n. 5, p.708-722, 12 set. 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s16050708>

SEMTECH. **LoRa Modulation Basics**. Disponível em <<http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf>> Acesso em: 20 set. 2018.

SIGFOX. **Sigfox Technical Overview**, 2017

SOUZA, Fábio. **Arduino - Primeiros Passos**. Novembro de 2013. Disponível em:<<http://www.embarcados.com.br/arduino/>>. Acesso em: 25 set. 2018

WALLACE, D. **The Many Flavors of Low-power Wide Area Network (LPWAN or LPWA)**. RTC Magazine, 2017. <<http://www.rtcmagazine.com/the-many-flavors-of-low-power-wide-area-network-lpwan-or-lpwa/>>. Acesso em: 11 set. 2018.

WND, B. **Uma visão técnica da Rede Sigfox**. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/uma-visao-tecnica-da-rede-sigfox/>>. Acesso em: 12 set. 2018.

ANEXO I

Neste anexo do trabalho é apresentado o *sketch* utilizado pelo Arduino do dispositivo transmissor.

```

/*****
* IFMG - CAMPUS FORMIGA
* Engenharia Elétrica
* Frederico Henrique Nery
* TCC - "DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO COM UTILIZAÇÃO DE LORA COMO
* ALTERNATIVA DE COMUNICAÇÃO NO CARREGAMENTO FERROVIÁRIO"
*
*
* TRANSMISSOR
*****/

/*****
* CONFIGURAÇÃO
*****/
int botoeira[]={A0,A1,A2}; //Pinos Boteiras
int leds[]={7,6,5}; //Pinos leds
int outstates[]={0,0,0}; //Estado inicial saídas
int instates[]={-1,-1,-1}; //Variável para verificar entrega

#define LORAFREQ (915000000L)
#define SF 11
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>
unsigned long tmout;

void setup()
{
  for(int i=0;i<3;i++)
  {
    pinMode(botoeira[i],INPUT_PULLUP); //Configurando entradas
    pinMode(leds[i],OUTPUT); //Configurando saídas
    digitalWrite(leds[i],LOW);
  }
  //Configuração Parâmetros LoRa
  LoRa.begin(LORAFREQ);
  LoRa.setSpreadingFactor(SF);
  LoRa.onReceive(onReceive);
  LoRa.receive();
  tmout=millis();
}

/*****
* CÓDIGO PRINCIPAL
*****/
void loop()
{
  for(int i=0;i<3;i++)
  {
    int d=digitalRead(botoeira[i]); //Realiza Leitura das Botoeiras
    if((d==0))
    {

```

```

delay(5);
if(digitalRead((botoeira[i])==0)&&(outstates[i]==0))
{
  for(int j=0;j<3;j++)
  {
    outstates[j]=0;
    instates[j]=-1;
  }
  outstates[i]=1;
  sendpacket(i); //Após mudança de estado, envia informação ao
Receptor
}
}
digitalWrite(leds[i],outstates[i]); //Altera estado do LED
pinMode(leds[i],OUTPUT);
//Compara se a entrega foi realizada

if((instates[i]!=outstates[i])&&((millis()/100)%2)==0){pinMode(leds[
i],INPUT);}
}
}

/*****
* ENVIO DE INFORMAÇÃO
*****/
void sendpacket(int i)
{
  LoRa.beginPacket(); //Início do envio de pacote
  //Preenchendo informações
  LoRa.print("BOTOEIRA");
  LoRa.print(i+1);
  if(outstates[i]){
    LoRa.print("ON");
  }else{
    LoRa.print("OFF");
  }
  LoRa.endPacket(); //Término do envio de pacote
  LoRa.receive(); //Retorna o dispositivo para modo de recepção
contínua
}

/*****
* RECEBIMENTO DE INFORMAÇÃO
*****/
void onReceive(int packetSize)
{
  char buf[20]="";
  int k;
  int n;
  for (int i = 0; i < packetSize; i++)
  {
    k=i;
    if(k>18){k=18;}
    buf[k]=(char)LoRa.read();
  }
  //Verifica o pacote (Ex.: SINAL1ON ou SINAL1OFF)
  if(buf[0]!='S'){return;}
  if(buf[1]!='I'){return;}
  if(buf[2]!='N'){return;}
  if(buf[3]!='A'){return;}
}

```

```
if(buf[4]!='L'){return;}
if(buf[6]!='O'){return;}
n=buf[5]-'1';
if((n<0)|| (n>3)){return;}
if((buf[7]=='F')&&(buf[8]=='F')){instates[n]=0;}
if((buf[8]=='N')){instates[n]=1;}
}
```

ANEXO II

Neste anexo do trabalho é apresentado o *sketch* utilizado pelo Arduino do dispositivo receptor.

```

/*****
 * IFMG - CAMPUS FORMIGA
 * Engenharia Elétrica
 * Frederico Henrique Nery
 * TCC - "DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO COM UTILIZAÇÃO DE LORA COMO
 * ALTERNATIVA DE COMUNICAÇÃO NO CARREGAMENTO FERROVIÁRIO"
 *
 *
 * RECEPTOR
 *****/

/*****
 * CONFIGURAÇÃO
 *****/
int sinaleiro[]={A0,A1,A2,A3}; //Pinos Sinaleiro + Buzzer (A3)
int outstates[]={0,0,0,0}; //verificar estado das saídas

#define LORAFREQ (915000000L)
#define SF 11
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>

void setup()
{
  for(int i=0;i<3;i++)
  {
    pinMode(sinaleiro[i],OUTPUT); //configurando como saída
    digitalWrite(sinaleiro[i],LOW);
  }
  //Configuração Parâmetros LoRa
  LoRa.begin(LORAFREQ);
  LoRa.setSpreadingFactor(SF);
  LoRa.begin(LORAFREQ);
  LoRa.onReceive(onReceive);
  LoRa.receive();
}

void loop()
{
}

/*****
 * RECEBIMENTO DE INFORMAÇÃO
 *****/
void onReceive(int packetSize)
{
  char buf[20]="";
  int k;
  int n;
  for (int i = 0; i < packetSize; i++)
  {

```

```

    k=i;
    if(k>18){k=18;}
    buf[k]=(char)LoRa.read(); //Realiza Leitura do Pacote
}
//Verifica o pacote (Ex.: BOTOEIRA1ON ou BOTOEIRA1OFF)
if(buf[0]!='B'){return;}
if(buf[1]!='O'){return;}
if(buf[2]!='T'){return;}
if(buf[3]!='O'){return;}
if(buf[4]!='E'){return;}
if(buf[5]!='I'){return;}
if(buf[6]!='R'){return;}
if(buf[7]!='A'){return;}
if(buf[9]!='O'){return;}
n=buf[8]-'1';
if((n<0)|| (n>3)){return;}
if((buf[10]=='F')&&(buf[11]=='F'))
{
    outstates[n]=0;
    if(n==2){outstates[3]=0} //buzzer junto com sinaleiro verde
}
if((buf[10]=='N'))
{
    outstates[n]=1;
    if(n==2){outstates[3]=1} //buzzer junto com sinaleiro verde
}
digitalWrite(sinaleiro[n],outstates[n]); // Altera o valor do
sinaleiro
sendpacket(n); // Envia confirmação ao Transmissor
}

/*****
* ENVIO DE INFORMAÇÃO
*****/
void sendpacket(int i)
{
    LoRa.beginPacket();//Início do envio de pacote
    //Preenchendo informações
    LoRa.print("SINAL");
    LoRa.print(i+1);
    if(outstates[i]){
        LoRa.print("ON");
    }else{
        LoRa.print("OFF");
    }
    LoRa.endPacket(); //Término do envio de pacote
    LoRa.receive(); //Retorna o dispositivo para modo de recepção
    continua
}

```