

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
CURSO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA**

**DANIEL FARIAS**

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DE PARÂMETROS DE PROCESSOS  
INDUSTRIAIS UTILIZANDO A TECNOLOGIA LORA®**

**São Leopoldo**

**2018**

DANIEL FARIAS

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DE PARÂMETROS DE PROCESSOS  
INDUSTRIAIS UTILIZANDO A TECNOLOGIA LORA®**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Eletrônica, pelo Curso de  
Engenharia Eletrônica da Universidade do  
Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Marques de Figueiredo

São Leopoldo

2018

## RESUMO

A internet das coisas (*IoT*) vem trazendo inovação e revolucionando o modo como nos comunicamos e vivemos com as coisas ao nosso redor, não só em nossas casas e cidade, mas também na indústria com a chamada Internet Industrial das Coisas (*IIoT*). Neste contexto, tecnologias LPWA (*Low Power Wide Area*) vem se destacando por prover redes seguras, de longa distância, baixo custo, baixo consumo de energia e que podem ser aplicáveis dentro e fora da indústria. LoRa® (*Long-Range*) é uma tecnologia LPWA bastante atual, que utiliza o protocolo aberto LoRaWAN™ (*LoRa for Wide Area Networks*) e que vem se destacando pela flexibilidade de suas aplicações. Neste trabalho serão comparadas redes *wireless* comumente utilizadas na indústria, mostrando benefícios ao se utilizar a tecnologia LoRa®. Uma aplicação com hardware, software e rede corporativa voltada para a coleta de parâmetros de processos industriais mostrará as principais características e benefícios da tecnologia. Os parâmetros poderão ser visualizados de forma simples e rápida a partir de planilha Excel e aplicativo para dispositivos móveis.

**Palavras-chave:** IoT, LoRa®, LoRaWAN™

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comunicação <i>Wireless</i> na <i>IoT</i> .....	15
Figura 2 – Comunicações sem fio .....	17
Figura 3 – Arquitetura LoRaWAN™ .....	20
Figura 4 – Comunicação estrela LoRa® .....	21
Figura 5 – Classes de dispositivos .....	22
Figura 6 – Especificações LoRaWAN™ para a América do Norte e Brasil .....	23
Figura 7 – Modulação <i>spread spectrum</i> .....	25
Figura 8 – Demodulação <i>spread spectrum</i> .....	26
Figura 9 – Estrutura do Pacote LoRa® .....	28
Figura 10 – Diagrama de blocos da arquitetura LoRa® Semtech .....	31
Figura 11 - Gateways LoRaWAN™ registrados pela The Things Network Foundation .....	36
Figura 12 – Dispositivos LORA1276 .....	40
Figura 13 – Dispositivo LoPy .....	41
Figura 14 - RAK831 LoRa® Gateway .....	41
Figura 15 – Metodologia do projeto .....	42
Figura 16 – Aplicação em planta fabril .....	44
Figura 17 – Protótipo do transmissor .....	46
Figura 18 – Aplicação <i>Top Level</i> .....	47
Figura 19 – Comparação entre Rede LoRaWAN™ e ZigBee .....	48
Figura 20 – Cálculo do tempo do pacote no ar .....	55
Figura 21 – Telas do aplicativo .....	56
Figura 22 – Tela de seleção de porta USB .....	57
Figura 23 – Tabela de visualização de parâmetros .....	58
Figura 24 – Local de instalação do módulo transmissor de 100 mW .....	59
Figura 25 – Local de instalação do <i>gateway</i> .....	60
Figura 26 – Área de testes da tecnologia .....	62
Figura 27 – Área para teste de distância .....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre tecnologias LPWAN .....	19
Tabela 2 – Taxa de transmissão LoRa® .....	28
Tabela 3 – Comparação entre Redes LoRaWAN™ e SigFox® .....	35
Tabela 4 – Rede Wireless industrial LoRa® .....	45
Tabela 5 – Comparação entre LoRaWAN™ aplicada e proposta .....	49
Tabela 6 – Tempo de leitura dos parâmetros.....	54
Tabela 7 – Relação do tempo de pacote no ar com BW e SF.....	61
Tabela 8 – Relação da perda de pacote com o incremento da distância .....	62
Tabela 9 – Relação da distância alcançada com alteração de BW e SF .....	63

## LISTA DE SIGLAS

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
6LoWPAN	<i>IPv6 over Low power Wireless Personal Area Network</i> (Protocolo de redes de área pessoal sem fio de baixa potência versão 6)
ABINC	Associação Brasileira de Internet das Coisas
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i> (Conversor analógico para digital)
AFA	<i>Adaptative Frequency Agility</i> (Frequência adaptável ágil)
AFC	<i>Automatic Frequency Control</i> (Correção automática de frequência)
AGC	<i>Automatic Gain Control</i> (Controle automático de ganho)
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
APP	<i>Application</i> (Aplicativo)
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i> (Bluetooth de baixa energia)
BOM	<i>Bill off material</i> (Lista de materiais)
BW	<i>Bandwith</i> (Largura de Banda)
COAP	<i>Constrained Application Protocol</i> (Protocolo de aplicação restrita)
CR	<i>Corretion Factor</i> (Fator de Correção)
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i> (Verificação de redundância cíclica)
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i> (Modulação por espalhamento espectral)
DIO	Digital Input/Output (Entrada e saída digital)
EDA	<i>Electronic Design Automation</i> (Automação de <i>design</i> eletrônico)
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i> (Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência)
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i> (Modulação por Chaveamento de Frequência)
GFSK	<i>Gaussian Frequency Shift Keying</i> (Chaveamento de Frequência Gaussiana)
GMSK	<i>Gaussian Minimum Shift Keying</i> (Chaveamento de Mudança Mínima Gaussiana)
GPS	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
I&Q	<i>In-phase and Quadrature Components</i> (Componentes em fase e quadratura)

IEEE	<i>Institute of Electrical and Eletronics Engineers</i> (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)
IF	<i>Intermediate Frequency</i> (Frequência intermediária)
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
IIOT	<i>Industrial Internet of Things</i> (Internet Industrial das Coisas)
IOT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i> (Industrial, Científico e Médico)
LAN	<i>Local Area Network</i> (Rede Local)
LBT	<i>Listen Before Talk</i> (Ouve antes de falar)
LNA	<i>Low Noise Amplifier</i> (Amplificador de baixo ruído)
LoRa®	<i>Long-Range</i> (Longo Alcance)
LoRaWAN™	<i>LoRa for Wide Area Networks</i> (LoRa® para redes de longa distância)
LPWAN	<i>Low Power Wide Area Network</i> (Rede de ampla área e baixa potência)
LTE	<i>Long Term Evolution</i> (Evolução a longo prazo)
LTE-M	<i>Long Term Evolution for Machine</i> (Evolução a longo prazo para máquinas)
M2M	<i>Machine to Machine</i> (Máquina a máquina)
MAC	<i>Medium Access Control</i> (Controle de Acesso Médio)
MBUS	<i>Meter-Bus</i> (Barramento do Medidor)
NAAS	<i>Network as a Service</i> (Rede como serviço)
OFDM	<i>Orthogonal frequency-division multiplexing</i> (Multiplexação de Divisão de Frequência Ortogonal)
OOK	<i>On-Off Keying</i> (Chaveamento liga/desliga)
PCI	Placa de Circuito Impresso
PHY	<i>Physical Layer Implementation</i> (Implementação de Camada Física)
PLL	<i>Phase Locked Loop</i> (Loop de Travamento de Fase)
RDTDMA	<i>Random Frequency and Time Division Multiple Access</i> (Acesso múltiplo por divisão de tempo)
RF	<i>Radio Frequency</i> (Rádio Frequência)
RPMA	<i>Random Phase Mutiple Acess</i> (Múltiplo acesso aleatório de fase)
RSSF	Rede de Sensor sem Fio

RSSI	<i>Received Signal Strength Indication</i> (Indicador de intensidade de sinal recebido)
SF	<i>Spreading Factor</i> (Fator de Espalhamento)
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> (Interface Periférica Serial)
TLS	<i>Transport Layer Security</i> (Segurança da Camada de Transporte)
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i> (Transmissor Receptor Assíncrono Universal)
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i> (Sistema Universal de Telecomunicações Móveis)
UNB	<i>Ultra Narrow Band</i> (Banda Ultra Estreita)
USB	<i>Universal Serial Bus</i> (Porta Serial Universal)
VBA	<i>Visual Basic for Applications</i> (Visual Basic para aplicações)
VPN	<i>Virtual Private Network</i> (Rede Privada Virtual)
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i> (Fidelidade sem fio)
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> (Rede local sem fio)
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i> (Rede de área pessoal sem fio)



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>12</b>
<b>2.1 Redes Industriais</b> .....	<b>13</b>
2.1.1 Redes <i>Wireless</i> .....	14
<b>2.2 Internet das Coisas</b> .....	<b>16</b>
2.2.1 Aplicação na Indústria .....	16
<b>2.3 Low-Power Wide-Area Network (LPWAN)</b> .....	<b>17</b>
2.3.1 LoRa® e LoRaWAN™ .....	19
<b>2.4 SemTech LoRa®</b> .....	<b>24</b>
2.4.1 Arquitetura do Sistema LoRa® SemTech .....	30
2.4.2 Camada Física LoRa® .....	32
2.4.3 MAC LoRa® .....	33
<b>2.5 Análise de Mercado</b> .....	<b>34</b>
2.5.1 Redes LoRaWAN™ no Brasil .....	35
2.5.2 Aplicações de Redes LoRaWAN™ no Brasil .....	37
2.5.3 Dispositivos LoRa® .....	39
2.5.3.1 LORA1276-C1 e LORA1276-F30 .....	39
2.5.3.2 LoPy .....	40
2.5.3.3 RAK831 LoRa® Gateway .....	41
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>42</b>
<b>3.1 Método de Análise de Projeto</b> .....	<b>42</b>
<b>3.2 Materiais</b> .....	<b>45</b>
<b>3.3 Estudo de Caso</b> .....	<b>47</b>
<b>3.4 Métricas</b> .....	<b>49</b>
<b>4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO</b> .....	<b>51</b>
<b>4.1 Desenvolvimento de <i>Hardware</i></b> .....	<b>51</b>
4.1.1 Transmissor LoRa® .....	51
4.1.2 Gateway LoRa® .....	52
<b>4.2 Desenvolvimento de <i>Software</i></b> .....	<b>53</b>
4.2.1 Transmissor LoRa® .....	53
4.2.2 Gateway LoRa® .....	55

4.2.2.1 Aplicativo .....	56
4.2.2.2 VBA Excel .....	57
<b>4.3 Integração do Sistema .....</b>	<b>58</b>
<b>5 TESTES E VALIDAÇÕES.....</b>	<b>61</b>
5.1 Perda de Pacotes .....	61
5.2 Alcance.....	63
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>65</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>67</b>
<b>APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO DO <i>HARDWARE</i> DESENVOLVIDO PARA TRANSMISSOR 100 MW.....</b>	<b>71</b>
<b>APÊNDICE B – PCI DO <i>HARDWARE</i> DESENVOLVIDO PARA TRANSMISSOR 100 MW.....</b>	<b>72</b>
<b>APÊNDICE C – BOM DO <i>HARDWARE</i> DESENVOLVIDO PARA TRANSMISSOR 100 MW.....</b>	<b>73</b>
<b>APÊNDICE D – ESQUEMÁTICO DO <i>HARDWARE</i> DESENVOLVIDO PARA TRANSMISSOR 500 MW.....</b>	<b>74</b>
<b>APÊNDICE E – PCI DO <i>HARDWARE</i> DESENVOLVIDO PARA TRANSMISSOR 500 MW.....</b>	<b>75</b>
<b>APÊNDICE F – BOM DO <i>HARDWARE</i> DESENVOLVIDO PARA TRANSMISSOR 500 MW.....</b>	<b>76</b>
<b>APÊNDICE G – ESQUEMÁTICO DO <i>HARDWARE</i> DESENVOLVIDO PARA GATEWAY 500 MW.....</b>	<b>77</b>
<b>APÊNDICE H – PCI DO <i>HARDWARE</i> DESENVOLVIDO PARA GATEWAY 500 MW .....</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICE I – BOM DO <i>HARDWARE</i> DESENVOLVIDO PARA GATEWAY 500 MW .....</b>	<b>79</b>
<b>APÊNDICE J – DIAGRAMA DE BLOCOS DO APP DESENVOLVIDO .....</b>	<b>80</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A Internet das Coisas (*IoT*) promete revolucionar o modo como vivemos, nos comunicamos, agimos e como as coisas ao nosso redor se comunicam conosco. Há um grande interesse na *IoT* e mais recentemente na Internet Industrial das Coisas (*IIoT*), em que estudos independentes preveem um crescimento exponencial de receita e volume nos próximos dez anos (VANGELISTA, 2015). Estes dispositivos conectados podem ser máquinas, sensores, atuadores ou qualquer equipamento ligado à rede transmitindo ou recebendo informações. A comunicação entre máquinas *Machine to Machine (M2M)* e decisões instantâneas sem intervenção humana serão cada vez mais comuns tanto por meio físico quanto por transmissão sem fio.

Neste contexto, as redes sem fio LPWA (*Low Power Wide Area*) representam um novo paradigma em que podem ser utilizadas para complementar as tradicionais redes existentes trazendo uma solução de baixo custo e baixo consumo para as coisas conectadas que não necessitam de grandes taxas de transmissão de dados. As redes LPWA podem suprir a deficiência da comunicação de redes tradicionais de curto alcance como ZigBee, *Bluetooth*, Z-Wave, redes locais sem fio (WLAN) como *Wi-Fi (Wireless Fidelity)* e redes celulares como GSM (*Global System for Mobile Communications*), 3G (*3rd Generation*) e LTE (*Long Term Evolution*). Várias alianças são construídas em torno de redes LPWA para padronizar e vencer os desafios da comunicação em massa esperada para *IoT* e *M2M*, podendo ser citadas LoRa Alliance™, Weightless™, DASH7 Alliance™ além de tecnologias proprietárias como SigFox® (RAZA, 2017).

A LoRa Alliance™ é uma das alianças mais bem-sucedidas em redes LPWAN (*Low Power Wide Area Network*). Utiliza a tecnologia proprietária LoRa® (*Long-Range*) da Semtech, porém, seu protocolo LoRaWAN™ (*LoRa for Wide Area Networks*) é aberto, o que possibilita o desenvolvimento de aplicações voltadas para a *IoT*. LoRa® utiliza modulação por Espalhamento espectral (*spread spectrum*) na qual a energia média do sinal transmitido é espalhada sobre uma largura de faixa muito maior do que a largura de faixa que contém a informação, isto permite que a tecnologia possa ser aplicada em ambientes industriais com ruídos de radiofrequência (RF), equipamentos elétricos pesados e intermodulação.

Em uma planta fabril de grande dimensão, com setores isolados e centenas de dispositivos monitorando e controlando o processo de fabricação, redes de

comunicação de baixo consumo de energia, alto alcance e, principalmente, baixo custo de implementação e manutenção são fundamentais. LoRaWAN™ propicia uma rede de comunicação sem fio (*Wireless*) ideal para fabricas com foco em aplicação *M2M* onde os dispositivos devem fornecer apenas informações de parâmetros de processo facilitando a análise e tratamento de eventos anormais.

Utilizando a topologia de estrela, é possível conectar milhares de dispositivos finais a alguns quilômetros de distância em um único concentrador de dispositivos (*gateway*) e prover uma rede completa a partir de servidores, isso reduz o custo pois a informação não precisa ser roteada por vários nós com curto alcance e evita utilizar tecnologias que necessitam infraestrutura mais robusta e com maior consumo de energia como redes celulares. Máquinas podem enviar a informação ao mesmo ponto e facilitar o trabalho de Engenheiros de Processos com a rápida obtenção dos parâmetros.

Nesta pesquisa serão comparadas redes sem fio disponíveis, destacando os pontos que podem influenciar na decisão de escolha de um projeto *M2M*. Também será demonstrada a capacidade de redes LoRaWAN™ na indústria, mais especificamente em uma fábrica que atua na área de papel e celulose que segue rigorosos padrões de qualidade e necessita que seu processo seja controlado. O objetivo é criar um produto genérico que possa ser utilizado em qualquer indústria, transmitir a informação de equipamentos que geram algum sinal digital ou analógico a ser lido, processado e transmitido.

A pesquisa está estruturada da seguinte forma: o capítulo 2 apresenta os conceitos básicos necessários para o entendimento do trabalho mostrando redes existentes e tendências tecnológicas a partir da revisão bibliográfica. É dada ênfase a tecnologias LPWA e LoRa®. O capítulo 3 apresenta a metodologia e o sistema proposto para o problema levantado. Neste capítulo será realizada uma descrição da proposta de implementação bem como sua concepção, desenvolvimento, limites e resultados esperados. O capítulo 4 apresenta a implementação proposta e a maneira como a metodologia do capítulo 3 é aplicada. O capítulo 5 apresenta resultados práticos da tecnologia, protocolo e aplicação seguindo com as conclusões do trabalho no capítulo 6. Por fim, as referências bibliográficas apresentam a extensa pesquisa realizada.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados os elementos fundamentais para o entendimento do trabalho a ser desenvolvido, bem como os estudos que mostram sua aplicabilidade na indústria de papel e celulose que é foco deste trabalho. Embora este ramo da indústria não seja inovador, há uma necessidade de adaptar o produto de acordo com as necessidades que surgem. Tais mudanças requerem formas mais precisas e eficientes no controle do processo de fabricação, bem como o mínimo de contato humano para evitar acidentes, manter a qualidade e as exigências requeridas pelos órgãos regulamentadores. Há uma necessidade de análises no processo que garantam que cada etapa de fabricação seja realizada de forma a deixar o produto dentro das especificações (CONTROL BIO, 2012).

Via de regra esta análise requer coleta de parâmetros críticos aos processos, verificação de paradas de máquina e alarmes de acionamentos eletromecânico. Quando este processo não é automatizado, ele se torna suscetível a falha humana que traz imprecisão às análises. Uma planta industrial automatizada que cobre grande área geralmente tem vários setores separados e com limitação estrutural onde a automatização do processo nem sempre é viável ou quando é, implica em grande investimento de equipamentos. A coleta de parâmetros do processo desses setores requer utilizar extenso cabeamento ou transmissão de longo alcance sem fio. A escolha da tecnologia a ser utilizada pode trazer elevados custos de investimento, manutenção e riscos à segurança dos colaboradores.

Não há um padrão comercial para o mercado de comunicações industriais, mas em se tratando de comunicação física há alguns padrões dominantes como: *Modbus*, *EIA-232* e *EIA-485*, *Fieldbus*, *Profibus*, *ASi*, *DeviceNet* e *Foundation Fieldbus* que possuem aplicações em várias áreas da indústria (MACKAY, 2003) e são a maneira mais tradicional de transmissão de dados.

De outra forma, redes *Wireless* são uma tendência tecnológica que estão em constante evolução e começam a tomar o espaço das redes cabeadas sendo uma boa alternativa quando não se pode interromper o processo produtivo para instalação de infraestrutura de comunicação. Há diversas topologias empregadas em redes de comunicação sem fio que são escolhidas de acordo com sua aplicação podendo ser conexão ponto a ponto, estrela, malha entre outras. Os benefícios da transmissão sem fio levaram a uma série de soluções que variam de redes celulares em larga escala

orientada por voz como UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) e soluções de redes sem fio orientadas dados como WLAN (*Wireless Local Area Network*), WPAN (*Wireless Personal Area Network*) e redes de sensores sem fio (RSSF) (WILLIG, 2005).

Atrelado as redes sem fio, o conceito de *IoT* vem ganhando cada vez mais espaço na indústria com a chamada Internet Industrial das coisas e traz benefícios que tornam a vida mais prática e automatizada tanto no chão de fábrica quanto na gestão do negócio. Com o desenvolvimento de novas tecnologias como microcontroladores, transmissores e receptores, há uma gradual mudança da interface analógica dos anos 60, para a digital nos dias atuais (GILCHRIST, 2016). A instrumentação moderna está voltada à transferência de informações digitais de um ponto a outro. Existem vários sensores com capacidade de comunicação digital para a maioria das aplicações tradicionais como medição de temperatura, pressão, nível, fluxo, massa, densidade e parâmetros de sistemas de potência ligados a uma rede global ou pessoal (MACKAY, 2003).

A tecnologia a ser utilizada na *IoT* depende dos requisitos da rede *Wireless*, não há um padrão específico. A medida que novas tecnologias vão surgindo, são incorporadas as redes existentes, desta forma, diversas tecnologias como ZigBee, SigFox®, *Bluetooth* e LoRa® surgiram na última década. Há algumas características que definem se a tecnologia é aplicável a *IoT*, sendo elas: baixo consumo de energia, *range* de distância e rendimento máximo (MAHMOUND, 2016). Embora muitas tecnologias atendam aos critérios de *IoT*, somente algumas se enquadram a redes de longo alcance e ampla cobertura. Dentre as novas tecnologias e redes aplicadas a *IoT* e também a *IIoT*, o LoRaWAN™ traz benefícios que visam o longo alcance na transmissão dos dados a um baixo consumo de energia.

## **2.1 Redes Industriais**

As Redes Industriais permitem a comunicação de equipamentos e se tornaram indispensáveis nos processos industriais. Dentre as tecnologias associadas ao controle industrial, as redes de comunicação vêm se destacando e são as que tiveram a maior evolução na última década (SCHNEIDER ELECTRIC, 2007). A infraestrutura de comunicação de dados que define a quantidade, velocidade e qualidade da informação a ser transmitida é constituída de um transmissor para envio, um receptor

para recebimento dos dados e um meio de propagação que pode ser ligações de fio de cobre, fibra óptica em redes por cabeamento e o ar quando utilizado rádio e micro-ondas em redes *Wireless* (MACKAY, 2003).

### 2.1.1 Redes *Wireless*

A adoção da tecnologia *Wireless* na indústria nos anos 2000, teve um início pouco promissor. Considerada lenta e insegura, muitos departamentos de segurança de Tecnologia da Informação evitaram ou proibiram seu uso nas empresas. Gradualmente a tecnologia sem fio foi evoluindo a partir dos primeiros sistemas que apenas ofereciam comunicação a baixas taxas de dados e em poucos metros de distâncias. Esta evolução da tecnologia levou praticamente toda a década onde procurou-se desenvolver não só a capacidade de transmissão como também a segurança na transmissão dos dados. Grande parte desta evolução ocorreu em redes domésticas e indústrias de pequeno porte onde a segurança não era tão crítica. Essa transformação surgiu por causa dos avanços na modulação da tecnologia sem fio. Por exemplo, em menos de 1 década, a tecnologia *Wi-Fi 802.11b* passou a transmitir de 1-2 Mbps para 70-90 Mbps na tecnologia *Wi-Fi 802.11n* e após alguns anos já foi possível transmitir uma taxa teórica de 6 Gbps com a tecnologia *Wi-Fi 802.11ad*, o que trouxe aceitação total pela indústria por proporcionar mobilidade flexibilidade e segurança no ambiente de trabalho (GILCHRIST, 2016).

Há várias topologias aplicáveis a redes de comunicação industriais, as mais comuns são do tipo estrela e do tipo malha (CENTENARO, 2016). Redes estrela são mais comumente usados por dispositivos cujos nós finais tem restrição de consumo de energia e são de simples implementação. Tipicamente há um *gateway* no centro que faz a comunicação entre os dispositivos. Em uma rede simples, dois nós, um *gateway* e dois links são necessários para fazer uma simples comunicação, sua grande vantagem é a redução de tráfego digital. Redes do tipo malha propagam a informação por todos os nós até chegar no concentrador, todos recebendo a mesma mensagem. Isto adiciona considerável complexidade a comunicação, diminui a potência do sinal transmitido e geralmente requer que os nós tenham fontes de maior capacidade (SEMTECH, 2015a).

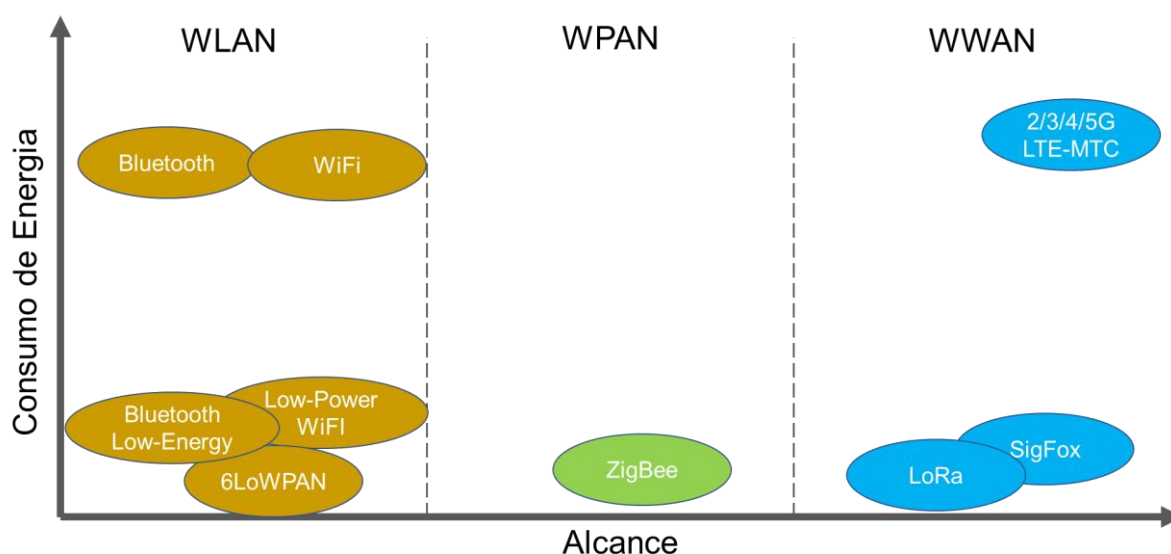
Com base nas principais topologias de redes industriais, surgiram tecnologias sem fio que estavam preocupados com a comunicação de dados *M2M*. O *Wi-Fi*,

*Bluetooth* e posteriormente *ZigBee* desenvolveram a transmissão de dados em curtas distâncias e com altas taxas de transmissão de dados dentro das instalações industriais. Outras tecnologias como *LoRaWAN™* e *SigFox®*, viram a oportunidade de transmissão de dados a grandes distâncias sem que a taxa de transmissão fosse o principal fator (GARCIA, 2017). Ambas tecnologias têm como premissa a segurança e confiabilidade dos dados de modo a evitar o vazamento de informações por transferência mal direcionada (GILCHRIST, 2016). Em inúmeras aplicações a tecnologia *Wireless* é utilizada por vários motivos (MACKAY, 2003):

- Custos reduzidos com cabeamento;
- Rápida instalação;
- Equipamento portátil e que pode ser facilmente deslocado;
- Transmissão de dados em qualquer formato;
- Altas taxas de dados dependendo da tecnologia.

Em aplicações que requerem baixo consumo em curtas distâncias os candidatos são *ZigBee*, *6LoWPAN (IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks)* e *Low-Power Wi-Fi*. Para comunicação distante a melhor opção é o protocolo *LoRaWAN™* e *SigFox®*. Como cada tecnologia, a escolha do módulo para cada protocolo desempenha um papel vital na duração da bateria (MAHMOUD, 2016). A figura 1 mostra características das principais tecnologias *Wireless* para a *IoT*.

Figura 1 – Comunicação *Wireless* na *IoT*



Fonte: Elaborado pelo autor.



Como mencionado, existem várias redes utilizados na *IoT*, a figura 1 apresenta as principais e faz uma comparação entre o consumo de energia e seu alcance. Observa-se que redes LoRa® e SigFox® tem melhores características nestes quesitos.

## 2.2 Internet das Coisas

O avanço da internet na indústria trouxe mais do que serviços econômicos e escalonáveis em computação na nuvem. Através da interconectividade, a indústria tem capacidade de conectar objetos inteligentes, máquinas, dispositivos, sensores, atuadores e até mesmo pessoas. Ao mesmo passo que há maior conectividade, também se constroem sistemas de autodiagnóstico e autoconfiguração, o que aumenta sua confiabilidade e usabilidade. A tecnologia de comunicação tem trazido soluções cada vez menores e com baixo consumo de energia (GILCHRIST, 2016).

Aplicativos *Smart IoT* melhoram a maneira como interagimos e estão lidando com alguns dos maiores desafios enfrentados pelas cidades e comunidades: mudanças climáticas, controle da poluição, alerta precoce de desastres naturais e salvamento de vidas (SEMTECH, 2018a). Através da ajuda de bilhões de coisas conectadas, a vida humana se torna mais segura, mais produtiva e mais confortável (SEMTECH, 2016a). Ao mesmo tempo, criaram-se oportunidade de negócio substanciais para vários setores da indústria que melhoram suas operações e eficiência gerando redução de custos.

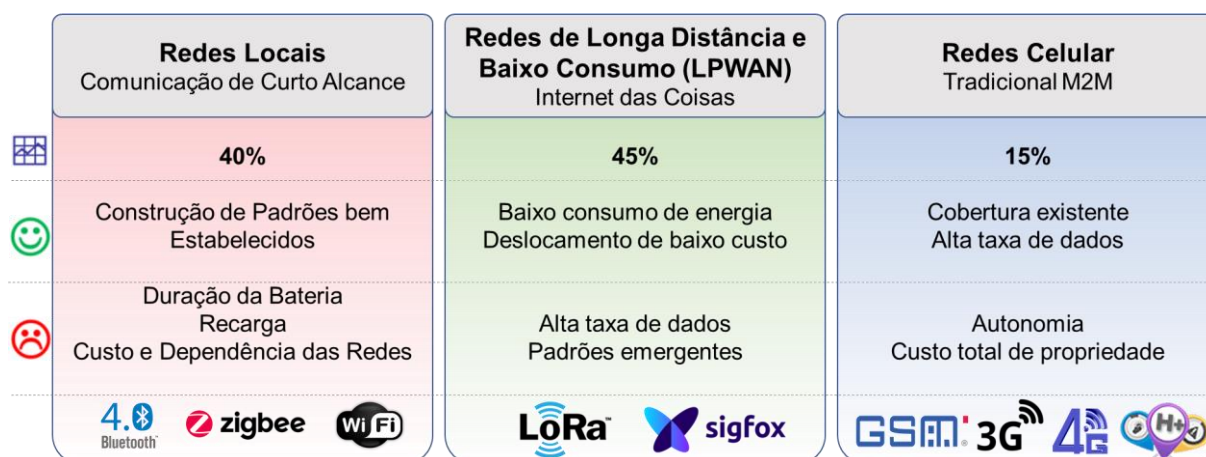
### 2.2.1 Aplicação na Indústria

O verdadeiro potencial da *IIoT* é criar maneiras novas e inteligentes de trabalhar através da automação, máquinas inteligentes e análises avançadas. Na indústria os métodos e tecnologias da *IIoT* já estão sendo adotados para reduzir custos e aumentar a eficiência, a segurança e lucros. No entanto, há uma tendência que a *IIoT* venha a integrar-se a nuvem mesclando aplicativos locais em sistemas regionais e globais (GILCHRIST, 2016).

Anteriormente, sensores e dispositivos eram incorporados a sistemas através de cabos a outros dispositivos ou sistemas de entradas e saídas remotas que poderiam fornecer a interface de comunicação e inteligência, mas novamente, sua implantação em locais remotos era limitada pela passagem de cabeamento. Essa

dificuldade de comunicação entre sistemas devido utilização de cabos e energia tem sido aliviada pelos vários padrões de comunicação *Wireless* (ALLIANCE, 2015). A figura 2 mostra uma comparação entre as tecnologias de comunicação sem fio.

Figura 2 – Comunicações sem fio



Fonte: Adaptado de (ALLIANCE, 2015).

A figura mostra os padrões amplamente adotados na indústria. O *Wi-Fi* e *Bluetooth* servem muito bem ao propósito de comunicar dispositivos pessoais a altas taxas e localmente, porém necessitam uma fonte de energia. Tecnologias LPWAN são projetadas para dispositivos que precisam transmitir pequena quantidade de dados a longas distâncias, seus nós são otimizados para custo e duração de anos da bateria com maior utilização do espectro de frequência (ALLIANCE, 2016). Sistemas de comunicação celular são projetados para utilização ideal do espectro o que compromete o nó final em termos de custo e vida útil da bateria, sua modulação baseada em OFDM (*Orthogonal frequency-division multiplexing*) ou FDMA (*Frequency Division Multiple Adess*), requer um transmissor linear para criar a modulação necessitando maior energia. Nenhuma tecnologia pode suprir completamente a necessidade da *IoT* (ALLIANCE, 2015), mas em se tratando de consumo de energia e distância de transmissão, a tecnologia LPWAN é a mais viável.

### 2.3 Low-Power Wide-Area Network (LPWAN)

Redes de baixa potência e ampla área (LPWAN) são projetadas para suportar uma grande quantidade de dispositivos previstos para a *IoT* (ALLIANCE, 2015). As

pesquisas e desenvolvimentos mais recentes em tecnologia de comunicação sem fio incluem redes *IIoT* voltadas ao baixo custo e baixo consumo de energia onde a fonte de energia utilizada pode vir a durar vários anos (GILCHRIST, 2016). Embora existam diversas aplicações de *IIoT* para comunicações WAN de baixa potência, há algumas premissas que a tecnologia deve providenciar, sendo elas: baixo custo, baixo consumo de energia, faixa de operação, dimensões reduzidas, escalabilidade, segurança e variedade de aplicações.

Muitas vezes precisamos conectar dispositivos remotamente situados em áreas urbanas ou rurais e que não há ponto de conectividade ou fonte externa, este é um problema cotidiano que os designers de sistemas de *IIoT* tem que enfrentar em aplicações de engenharia industrial e civil. As tecnologias LPWAN desenvolvem métodos que tornam os protocolos de aplicação e formatos de dados muito mais eficientes. Fontes de baixa potência exigem que os dispositivos rodem em nível mínimo de energia e por isso devem comunicar seus dados de forma oportuna e isso tem sérias implicações no *design* do protocolo a ser utilizado. As frequências mais baixas têm melhor rendimento em termos de econômica de energia, no entanto, tem uma taxa mais lenta na transmissão dos dados (GILCHRIST, 2016).

Tecnologias LPWAN podem ser divididas em dois grupos (VANGELISTA, 2015):

- UNB (*Ultra Narrow Band*): Canais de banda estreita na ordem 25 kHz;
- *Wideband*: Canais de banda larga de 125, 250 ou 500 kHz utilizando técnica de espalhamento do espectro para alocar vários usuários em um canal.

Uma única tecnologia não pode atender a toda gama de aplicações projetadas para a *IIoT* (ALLIANCE, 2015). Por isso várias tecnologias vêm surgindo trazendo diferentes soluções visando alcance, baixo custo e vida útil da bateria. Neste contexto, as principais tecnologias LPWAN utilizadas são: SigFox®, nWave, Dash7, Ingénue, *Low Power Wi-Fi*, LTE-M (*Long Term Evolution for Machine*), Weightless-P e LoRaWAN™ (FINNEGAN, 2018). Quanto à categoria de faixa de operação, as tecnologias podem ser licenciadas e não licenciadas para a ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). As faixas licenciadas são utilizadas pela tecnologia celular e as não licenciadas são utilizadas pelas tecnologias SigFox®, LoRaWAN™ entre outras. A tabela 1 mostra uma comparação entre as diferentes tecnologias LPWAN.

Tabela 1 – Comparação entre tecnologias LPWAN

Tecnologia	Faixa de operação	Taxa de transmissão	Alcance	Topologia
SigFox®	868/915 MHz ISM	100 b/s	30 - 50 km (rural) 3 - 10 km (urbano)	Estrela
LoRaWAN™	433/868/ 915 MHz ISM	300 b/s a 50 kb/s	15 km (rural) 2 - 5 km (urbano)	Estrela
nWave	1 GHz ISM	100 b/s	20 - 30 km (rural) 10 km (urbano)	Estrela
Dash7	1 GHz ISM	9,6 kb/s a 166,667 kb/s	0 - 5 km	Ponto a ponto, estrela, árvore
Ingénue RPMA	2,4 GHz ISM	624 kb/s	3,2 km	Estrela
Weightless-P	1 GHz ISM	200 b/s a 100 kb/s	2 km	Estrela
Low Power Wi-Fi	Acima de 1GHz não ISM	152 kb/s a 346,666 Mb/s	1 km	Estrela, árvore
LTE-M	Celular não ISM	200 kb/s	2,5 – 5 km	Estrela

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 1 apresenta diversas redes com tecnologias LPWA e mostra que a escolha de qual será utilizada irá depender dos requisitos da aplicação como taxa de transmissão, alcance e topologia aplicável a rede.

### 2.3.1 LoRa® e LoRaWAN™

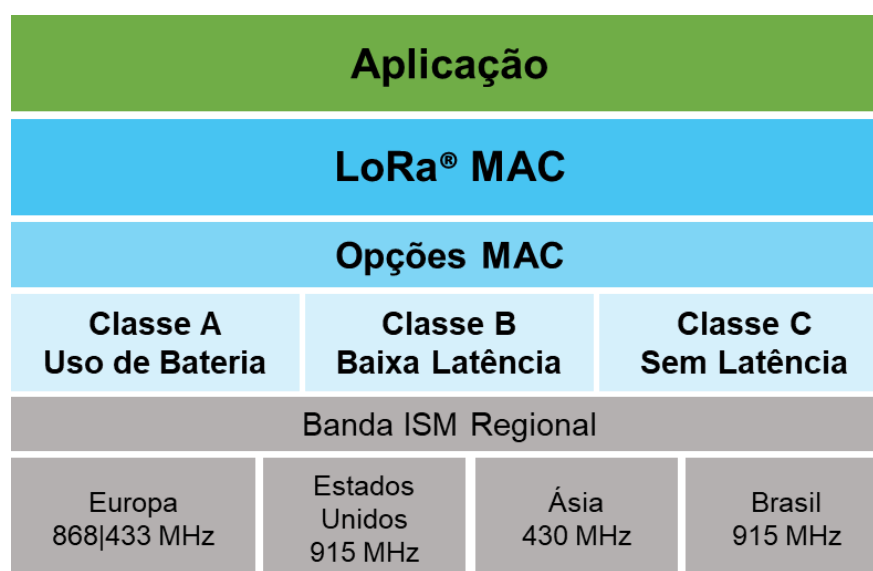
A tecnologia LoRa®, desenvolvida pela Semtech, é utilizada na banda ISM de Sub-GHz, sendo aberta a pessoas que não têm autorização dos reguladores de frequência de rádio. É fácil de implementar e tem custo mínimo de investimento e manutenção (SONG, 2017). Consistem em três componentes principais (VANGELISTA, 2015):

- Dispositivos finais: Sensores, atuadores conectados pela interface LoRa® a outro (s) *gateway* (s) LoRa®;
- *Gateways* LoRa®: Concentradores de dispositivos finais LoRa® até um servidor de Rede LoRa®;

- Servidor de Rede LoRa®: Servidor de Rede que controla toda interconexão LoRa®.

LoRaWAN™ define protocolos LPWAN de comunicação e arquitetura do sistema para a rede de baixa potência que suporta baixo custo, mobilidade, assegura comunicação bidirecional para a *IoT*, *M2M*, *Smart City* e aplicações industriais. Utiliza o espectro não licenciado e livre abaixo de 1 GHz otimizado para comunicação de longas distâncias (ALLIANCE, 2015). A figura 3 mostra uma típica arquitetura do sistema.

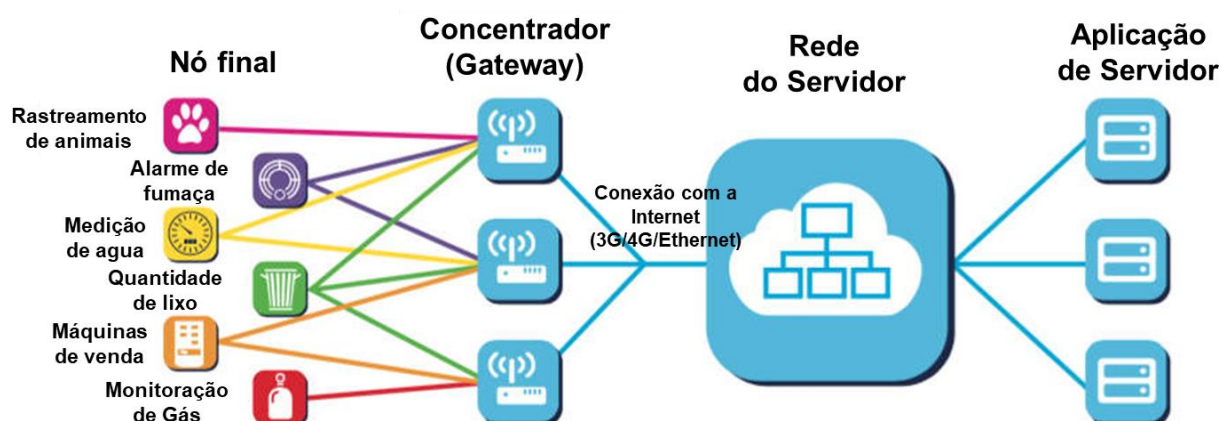
Figura 3 – Arquitetura LoRaWAN™



Fonte: Adaptado de (ALLIANCE, 2015).

A figura apresenta a estrutura para o protocolo LoRaWAN™, onde são definidas a banda ISM de operação, sua classe, estruturas do sistema e após aplicação para nó final e *gateway*. Muitas arquiteturas de rede existentes são por malha onde os nós finais encaminham a informação para nós intermediários para poder aumentar o alcance da comunicação e o tamanho da célula (ALLIANCE, 2015). Isso pode aumentar a complexidade da comunicação, reduz a capacidade da rede e diminui a vida útil da bateria, sem contar que nós intermediários poderão receber informações irrelevantes a eles. Quando possível, a arquitetura em estrela de longo alcance faz mais sentido para a preservação da vida útil da bateria, pois o nó pode comunicar-se diretamente com o *gateway*. A figura 4 apresenta a topologia da rede LoRa® utilizando comunicação do tipo estrela.

Figura 4 – Comunicação estrela LoRa®

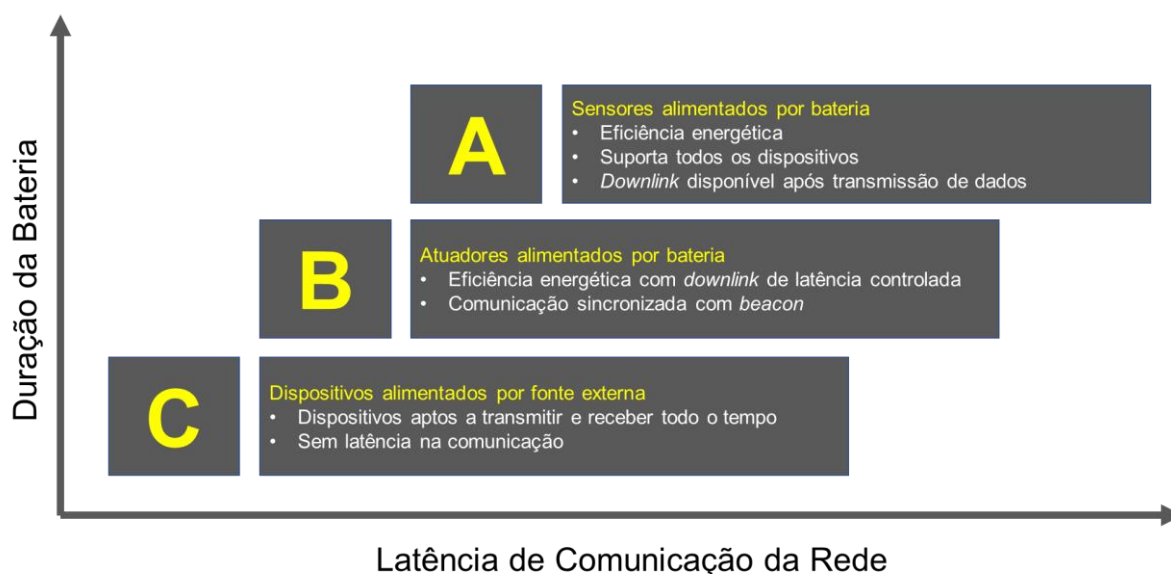


Fonte: Adaptado de (ALLIANCE, 2015).

Os nós de uma rede LoRaWAN™ utilizam um protocolo tipicamente referido como *Aloha*, onde eles são assíncronos e comunicam quando têm dados prontos para enviar ou são programados e orientados a eventos, o que significa que um dispositivo final pode “dormir” até a aplicação solicitar seu serviço (ALLIANCE, 2016).

LoRaWAN™ utiliza diferentes classes de dispositivos finais de forma a otimizar perfis de comunicação (VANGELISTA, 2015) e definir o tipo de acesso dos dispositivos finais via *Wireless* (NEUMANN, 2016). As três classes podem coexistir em uma mesma rede e os dispositivos podem mudar de uma classe para outra (ADELANTADO, 2016). A latência da comunicação e duração da bateria vai de acordo com a classe utilizada, sendo a classe A a mais econômica com maior latência e a classe C a com maior consumo de energia e menor latência. A figura 5 mostra a relação entre latência da comunicação e duração da fonte de alimentação de acordo com cada classe.

Figura 5 – Classes de dispositivos



Fonte: Adaptado de (ALLIANCE, 2015).

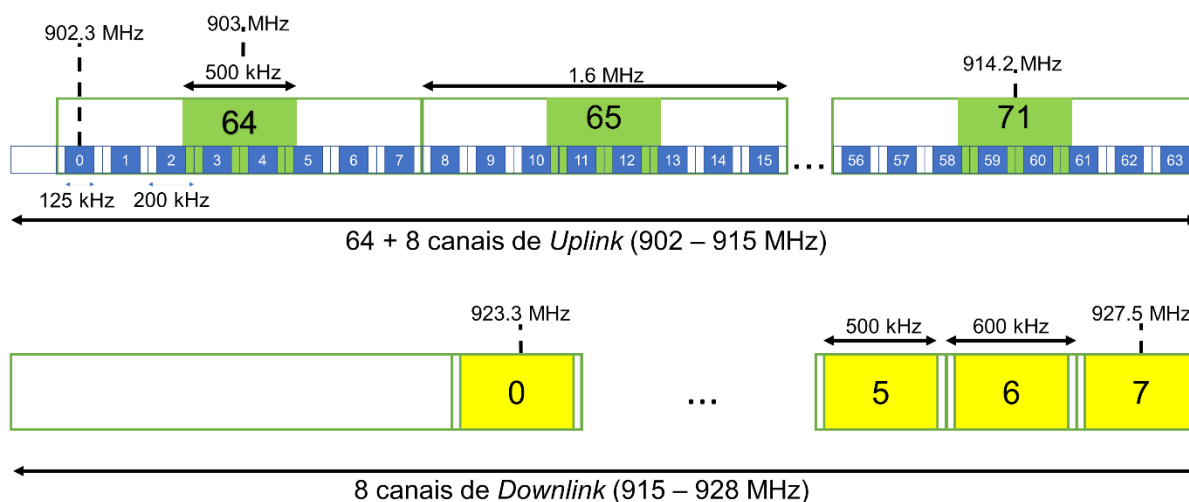
Os dispositivos têm as seguintes características de acordo com as classes (ALLIANCE, 2017a):

- Dispositivos Classe A – Classe padrão que permitem comunicação bi-direcional, podendo receber dados de *gateways* em janela de tempo predeterminado. É o sistema de menor consumo de energia;
- Dispositivos Classe B – Permitem comunicação bi-direcional, podem receber dados de *gateways* em janelas de tempo aleatórias e sincronizados com o servidor da rede por pacotes de *beacon* (fornecem pontos fixos de referência para o sistema). Permite que o servidor saiba quando o dispositivo final está “ouvindo”;
- Dispositivos Classe C – Permitem comunicação bi-direcional, tendo continuamente aberta a janela de transmissão apenas fechada na transmissão dos dados. Não recomendado com uso de baterias.

A especificação LoRaWAN™ varia um pouco de região para região com base nas diferentes alocações de espectro regionais regulamentares (ALLIANCE, 2015). Projetado para as frequências centrais de 433, 868 e 915 MHz tem frequências definidas apenas para Europa e América do Norte. De acordo com (ALLIANCE, 2017b), para o Brasil utilizam-se as definições norte americanas que define a banda ISM de 902-928 MHz com 64 canais de 125 kHz para *uplink*, nestas bandas a potência de saída máxima é de +30 dBm e o sinal pode permanecer até 400 ms por canal. A

faixa de 902,3 a 914,9 MHz é incrementada a cada 200 kHz, com oito canais de *uplink* adicionais de 500 kHz em incrementos de 1,6 MHz. Para *downlink* são oito canais de 500 kHz em incrementos de 600 kHz compreendido nas faixas de 923,3 MHz até 927,5 MHz. A figura 6 mostra as especificações para a América do Norte e Brasil.

Figura 6 – Especificações LoRaWAN™ para a América do Norte e Brasil



Fonte: Elaborado pelo autor

Os 64 canais de *uplink* que utilizam largura de banda (BW) de 125 kHz são numerados de 0 a 63 e os que utilizam BW de 500 kHz são numerados de 64 a 71. Canais de *downlink* que utilizam BW de 500 kHz são numerados de 0 a 7. Cabe ressaltar que para o Brasil, há uma faixa que compreende as extensões utilizadas para a tecnologia GSM e 3G para a transmissão das estações móvel que vão de 910 a 912,5 MHz, sendo assim, os equipamentos que utilizam tecnologia de espalhamento espectral não compreendem a faixa de 902 a 907,5 MHz (ANATEL, 2017).

LoRaWAN™ é uma das poucas redes *IoT* que implementam criptografia de ponta a ponta (ALLIANCE, 2017a). Em algumas aplicações tradicionais a informação é criptografada pela interface aérea, mas é transportada pela rede do usuário como texto simples. A segurança de rede garante a autenticidade do nó na rede, enquanto que a segurança na camada de aplicação garante que o operador da rede não tenha acesso aos dados de aplicativos do usuário final (ALLIANCE, 2015). Porém, os dispositivos finais são sobrecarregados com a implementação adicional de uma camada de segurança geralmente implementadas por algum tipo de VPN (*Virtual Private Network*) ou criptografia de camada como TLS (*Transport Layer Security*). Esta abordagem não é adequada a redes LPWAN visto que a implementação de segurança



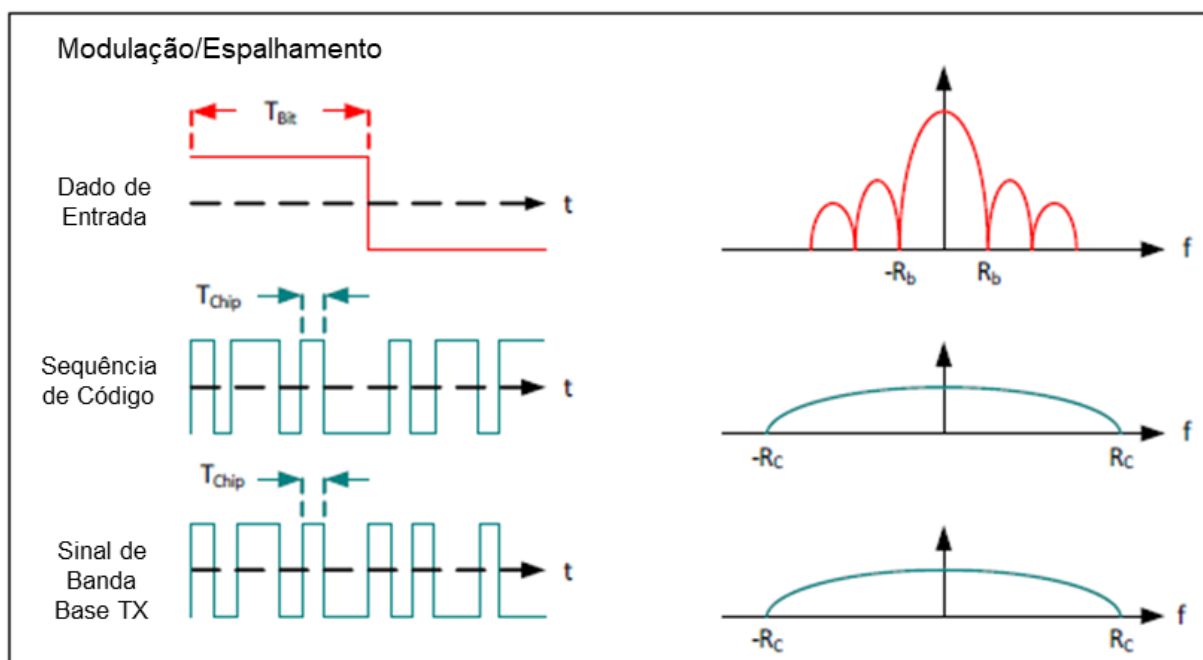
em camadas de topo gera consumo considerável de energia, complexidade e custo (ALLIANCE, 2017a).

LoRa® é a primeira tecnologia LPWAN comercial de baixo custo antes apenas utilizado por áreas militares e espaciais. Diferente da modulação FSK (*Frequency Shift Keying*), que usam modulação chaveada, LoRa® é baseada em modulação por propagação do espectro que tem as mesmas características de baixa potência da modulação FSK, porém com aumento considerável na faixa de comunicação. Esta técnica usa banda larga de frequência linear modulada de pulsos para codificar informações, onde a frequência cresce ou decresce com determinado tempo. Utiliza todo o canal da banda para transmitir um sinal, o tornando robusto a ruídos de canal e resistente a erros de frequência relativo de longo prazo e de efeito Doppler. LoRa® permite o link de comunicação a longo alcance a um consumo mínimo de energia (ALLIANCE, 2015).

De uma perspectiva de caso de negócio, há muita atividade no setor de *IoT* e grandes expectativas. Redes LPWAN tem implantação imediata, sem custo para licença e muitas vezes requer menos investimentos que um simples *upgrade* de *software*. Um único *gateway* ou estação base pode cobrir toda uma cidade de grande porte ou centenas de quilômetros com mínima infraestrutura (ALLIANCE, 2015).

## 2.4 SemTech LoRa®

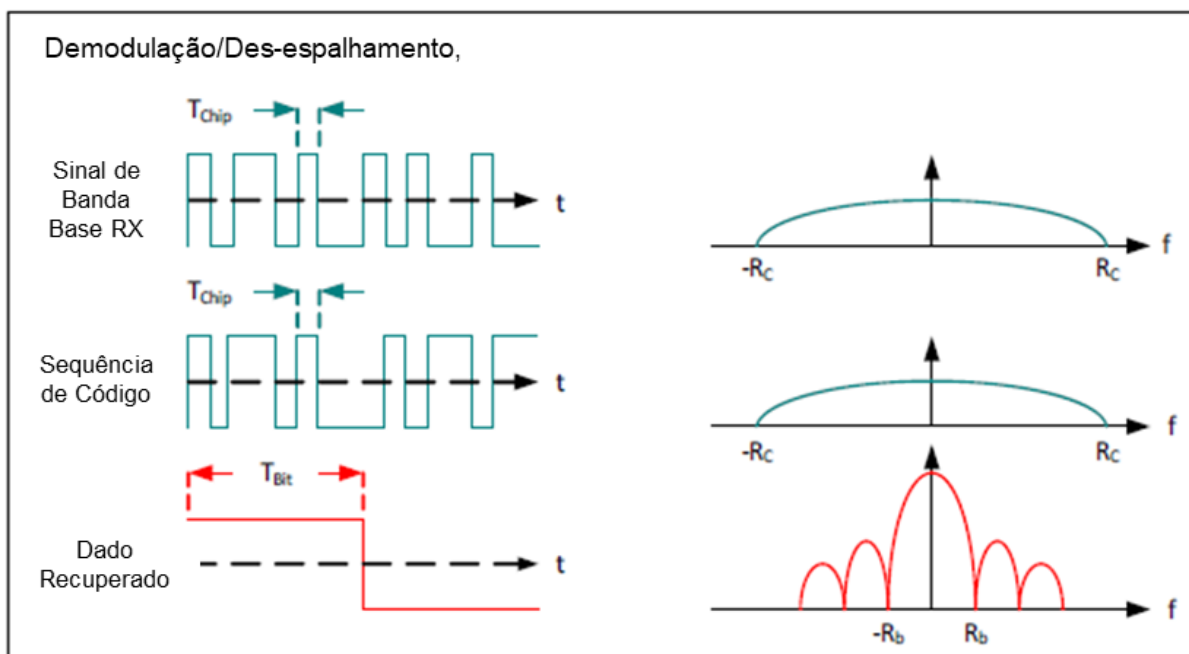
LoRa® é uma modulação proprietária da Semtech que utiliza o método de espalhamento espectral (*spread spectrum*). É uma implementação de camada física (PHY) podendo ser implementada em alto nível, coexistir e operar com outras arquiteturas de redes existentes. Nos sistemas de espalhamento de espectro direto (DSSS), a fase de transporte do transmissor muda de acordo com uma sequência de código. O sinal de dados é multiplicado por um código de espalhamento conhecido como *chips* com taxa muito superior ao sinal de dados, isso faz com que o sinal se espalhe na largura da banda que vai além do sinal original (SEMTECH, 2015). A figura 7 mostra a modulação do sinal por espalhamento espectral.

Figura 7 – Modulação *spread spectrum*

Fonte: Adaptado de (SEMTECH, 2015).

A figura mostra que o sinal a ser transmitido se espalha pela banda disponível com maior concentração da potência no centro. Também é mostrado o termo *chip* usado no código de multiplicação para distinguir o menor *bit* codificados dos *bits* não codificados mais longos do sinal de informação. O espalhamento do espectro é obtido gerando um sinal de *chips* que varia continuamente em frequência, uma vantagem deste método é que as compensações de tempo e frequência entre o transmissor e o receptor são equivalentes, reduzindo bastante a complexidade do design do receptor. A largura de banda de frequência deste *chip* é equivalente à largura de banda espectral do sinal (SEMTECH, 2015).

No receptor, o sinal de dados desejado é recuperado multiplicando-se novamente por uma réplica da sequência de espalhamento. Este processo de multiplicação no receptor efetivamente comprime o sinal espalhado de volta a sua largura de banda original não distribuída (SEMTECH, 2015), conforme apresentado na figura 8.

Figura 8 – Demodulação *spread spectrum*

Fonte: Adaptado de (SEMTECH, 2015).

O processo de recuperação do sinal é feito com a mesma sequência de *chips* usada no transmissor de forma a recuperar corretamente as informações (SEMTECH, 2015).

Esta modulação utiliza taxa de dados variáveis, com fatores de propagação ortogonais, o que permite que o sistema troque taxa de dados por alcance ou potência do sinal de forma a ser otimizado (SEMTECH, 2015). Códigos usados nos diferentes fatores de espalhamento (SF) são ortogonais, o que significa que múltiplas janelas podem ser trocadas na rede ao mesmo tempo, desde que cada um seja enviado com um dos seis diferentes fatores de espalhamento (7 a 12). Este fator faz a taxa de dados variar de 0,3 kb/s até 27 kb/s (ADELANTADO, 2016). A equação que define taxa de modulação  $R_{b\_}$  em *bits* é apresentada em (2.1).

$$R_{b\_} = SF * \frac{1}{\left[ \frac{2^{SF}}{BW} \right]} \text{ bits/seg} \quad (2.1)$$

Onde:

SF = fator de espalhamento;

BW = largura de banda de modulação (125, 250 ou 500 kHz).

O módulo transceptor LoRa® Semtech define a transmissão de um *chip* por segundo por Hertz de largura de banda que pode ser definido a partir do período de transmissão do símbolo  $T_S$  da equação (2.2) (SEMTECH, 2015).

$$T_S = \frac{2^{SF}}{BW} \text{ seg} \quad (2.2)$$

A taxa do símbolo  $R_S$  é a inversão de  $T_S$  definido por:

$$R_S = \frac{1}{T_S} = \frac{BW}{2^{SF}} \text{ simbolos/seg} \quad (2.3)$$

A taxa *chip*,  $R_C$  é dada por:

$$R_C = R_S * 2^{SF} = \frac{BW}{2^{SF}} * 2^{SF} = BW \quad (2.4)$$

A equação (2.4) mostra que a taxa de *chips* é a mesma que a largura de banda utilizada.

Para deixar o sinal a ser transmitido mais robusto, LoRa® inclui um esquema de correção de erro dado pela equação (2.5) (SEMTECH, 2015).

$$CR = \frac{4}{4 + F_{CR}} \quad (2.5)$$

Onde  $F_{CR}$  é um fator de correção de 1 a 4.

A taxa de modulação com o fator de correção é dada pela equação (2.6).

$$R_b = SF \frac{CR}{\left[ \frac{2^{SF}}{BW} \right]} \text{ bits/seg} \quad (2.6)$$

A tabela 2 apresenta a taxa nominal de transmissão para algumas configurações do LoRa®.

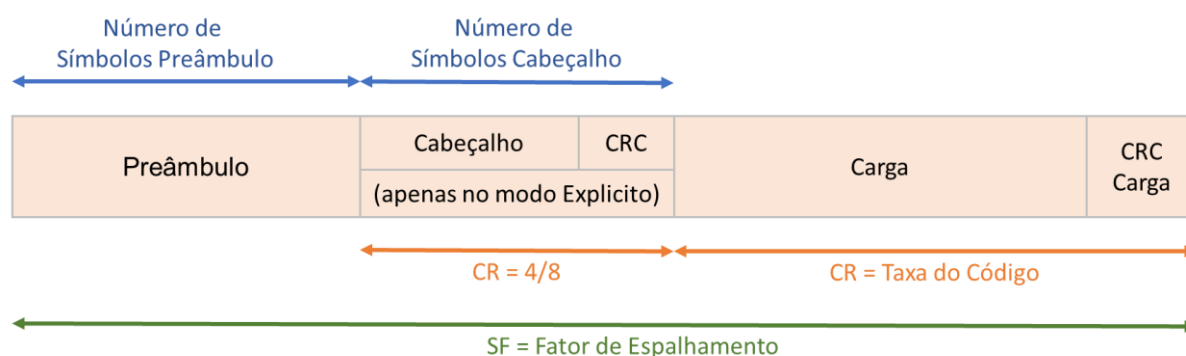
Tabela 2 – Taxa de transmissão LoRa®

Largura de Banda ( $BW$ ) (kHz)	Fator de Espalhamento ( $SF$ )	Fator de Correção ( $F_{CR}$ )	Taxa nominal de Transmissão ( $R_b$ ) (b/s)
125	7	1	5468,75
125	10	1	976,56
125	12	1	292,97
250	7	1	10937,50
250	10	1	1953,12
250	12	1	585,94
500	7	1	21875,00
500	10	1	3906,25
500	12	1	1171,87

Fonte: Elaborado pelo autor.

A taxa nominal de transmissão cresce com a largura de banda e decresce com o aumento do fator de espalhamento, sendo atingida a maior taxa de transmissão para a configuração em que o fator de espalhamento é 7 e a largura de banda é 500 kHz. Outro fator que influencia na transmissão dos dados é o tamanho do pacote a ser transmitido. Um pacote LoRa® é composto por três elementos: um preâmbulo, um cabeçalho opcional e a carga dos dados conforme apresentado na figura 9 (SEMTECH, 2013).

Figura 9 – Estrutura do Pacote LoRa®



Fonte: Adaptado de (SEMTECH, 2013).

O preâmbulo é usado para sincronizar o receptor com o fluxo dos dados enviados pelo transmissor. Esta variável é programada de 6 a 65535 símbolos, quanto

maior a taxa de dados necessária, menor o *duty cycle* do receptor e maior o número de símbolos enviados. Após o preâmbulo há um cabeçalho opcional que quando está presente é transmitido com uma taxa de código CR de 4/8. Isso indica a quantidade de *bytes* da carga útil, a taxa de código usada para o final da transmissão e se um CRC (*Cyclic Redundancy Check*) de 16 *bits* para a carga útil está ou não presente no final do quadro. O cabeçalho também inclui um CRC que indica o tamanho da carga útil para permitir que o receptor descarte pacotes com cabeçalhos inválidos, ele pode ser desativado quando o comprimento da carga útil e a taxa de codificação são conhecidos e configurados com antecedência. O tamanho máximo da carga útil é de 255 *bytes*. O tempo do preâmbulo pode ser calculado pela equação (2.7).

$$T_{preâmbulo} = (n_{preâmbulo} + 4,25) * T_S \quad (2.7)$$

Onde  $n_{preâmbulo}$  é o tamanho programado do preâmbulo.

A quantidade de símbolos da carga é obtida pela equação (2.8).

$$SimbCarga = 8 + \max\left(\text{ceiling}\left(\frac{8PL - 4SF + 28 + 16 - 20H}{4(SF - 2DE)}\right)(CR + 4), 0\right) \quad (2.8)$$

Onde:

PL é o número de *bytes* da carga útil;

H = 0 quando o cabeçalho está habilitado e 1 quando desabilitado;

DE = 1 quando a otimização de baixa taxa de dados está habilitada e 0 quando desabilitada;

CR é a taxa de codificação de 1 a 4.

O tempo da transmissão dos símbolos da carga é obtida pela equação (2.9).

$$T_{carga} = SimbCarga * T_S \quad (2.9)$$

O tempo que o pacote a ser transmitido fica no ar, é a soma da duração da carga mais o tempo de transmissão do preâmbulo conforme equação (2.10).

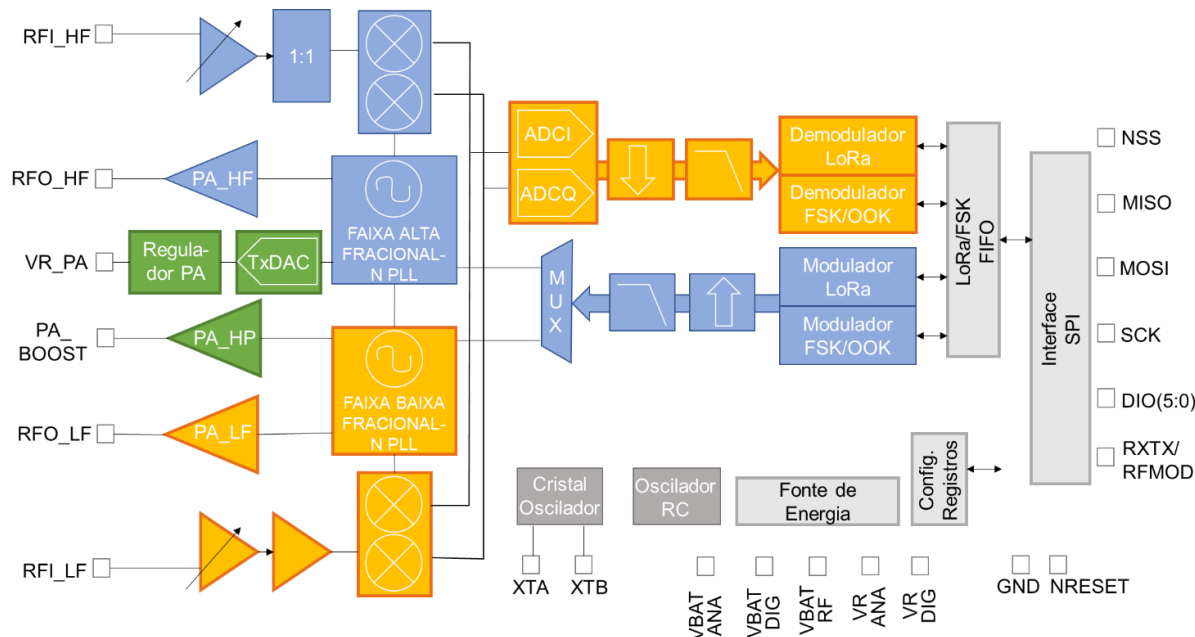
$$T_{pacote} = T_{preâmbulo} + T_{carga} \quad (2.10)$$

Os transceptores LoRa® da Semtech possuem um modem sem fio e são capazes de alcançar distâncias maiores que sistemas de modulação baseados em FSK ou OOK (*On-Off Keying*). Esta técnica de modulação permite que estes transceptores atinjam alta sensibilidade e potência. A família de transceptores SX1276/77/78 da Semtech conseguem uma amplificação de potência de mais de +20 dBm e sensibilidade de -148 dBm usando um cristal de baixo custo o que torna este transceptor ideal para aplicações que requerem alcance e robustez sem amplificador externo. É possível definir a largura de banda, o fator de espalhamento e o fator de correção. Outro benefício da modulação por espalhamento espectral é que cada fator é ortogonal permitindo que múltiplos sinais transmitidos ocupem o mesmo canal sem interferência, isto permite que outros sistemas baseados em FSK coexistam com sistemas LoRa®. Padrões de modulação como GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*), FSK, OOK e GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*) também são fornecidos com os *chips* da família SX12XX para permitir a compatibilidade com sistemas padrões como *Meter-Bus* (MBUS) e IEEE 802.15.4g (SEMTECH, 2016).

#### 2.4.1 Arquitetura do Sistema LoRa® SemTech

Cada fabricante de transceptor baseado em LoRa®, tem sua própria estrutura. A figura 10 mostra o diagrama de blocos simplificado para a arquitetura LoRa® Semtech.

Figura 10 – Diagrama de blocos da arquitetura LoRa® Semtech



Fonte: Adaptado de (SEMTECH, 2016).

O SX1276/77/78 da Semtech é um transceptor bi-direcional onde o sinal de Rádio Frequência é sintonizado para uma frequência intermediária, baixa ou moderada diferente de zero e vai para um amplificador de baixo ruído (LNA) que possui entradas únicas para minimizar a BOM (*Bill off Material*) e facilitar o design do projeto. Após entrar pela LNA, a conversão para um sinal diferencial é feita para melhorar a linearidade de segunda ordem e a rejeição harmônica. O sinal é então convertido para os componentes em fase e em quadratura (I&Q) na frequência intermediária (IF) pelo estágio do *mixer*. Um par de conversores digital para analógico (ADC) realiza a conversão de dados, fazendo com que o processamento do sinal e posterior demodulação seja feito no domínio digital. Todo o processo é controlado de forma a fazer a correção automática de frequência (AFC), o controle automático de ganho (AGC) e medir o indicador de intensidade de sinal recebido (RSSI). Ele também apresenta criptografia de camadas superiores de pacote e nível de protocolo do sequenciador TLS (SEMTECH, 2016).

Dois sintetizadores de frequência são utilizados para gerar as frequências do oscilador local (LO) para o receptor e o transmissor, um cobrindo as bandas UHF mais baixas de até 525 MHz e o outro cobrindo as bandas UHF superiores a 860 MHz. Os sistemas de controle que geram um sinal de saída cuja fase está relacionada ao sinal de entrada PLL (*Phase Locked Loop*) são otimizados para tempo de bloqueio baixo e



transparente para o usuário de modo a poder se calibrar este parâmetro. Na transmissão, a modulação de frequência é realizada digitalmente dentro da largura de banda de PLL, que também possui pré filtragem opcional do fluxo de *bits* para melhorar o espectro do sinal.

O transceptor SX12XX possui três amplificadores de potência de RF distintos, dois deles são conectados as entradas RFO\_LF e RFO\_HF que fornecem até +14 dBm reguladas para alta eficiência de energia, podendo ser conectadas diretamente a suas respectivas entradas do receptor RF através de um par de componentes passivos para formar uma porta de antena única (transmissão e recepção) de alta eficiência. O terceiro amplificador é conectado ao pino PA\_BOOST que é capaz de fornecer até +20 dBm de potência por meio de uma rede dedicada. Ao contrário dos amplificadores de alta eficiência, este de alta estabilidade cobre todas as bandas de frequência que o sintetizador de frequência aborda.

A partir de SPI (*Serial Peripheral Interface*), os registros de configuração dos principais parâmetros de RF e da máquina de estados digital que controla o transceptor podem ser configurados. Além disso, pode-se alterar um sequenciador automático que supervisiona a transição e a calibração do transceptor entre modos intermediários de operação no tempo mais rápido possível. Esta calibração é feita por duas referências de temporização, um oscilador RC e um oscilador de cristal de 32 MHz (SEMTECH, 2016).

#### 2.4.2 Camada Física LoRa®

A comunicação *Wireless LoRa*® é baseada em uma modulação proprietário derivada da técnica CSS (*Chirp Spread Spectrum*) que utiliza o espalhamento do espectro do sinal (VANGELISTA, 2015). A tecnologia suporta taxa de dados variáveis, onde pode-se alternar a velocidade da transferência de dados de forma a se conseguir maior cobertura, robustez ou menor consumo de energia mantendo uma largura de banda constante. A continuidade de fase entre diferentes símbolos *chips* na introdução do pacote da camada física permite uma sincronização de frequência mais simples e precisa que não exige gasto com um *clock* estável no nó LoRa®.

O *chip* foi projetado para bandas centradas nas frequências de 169, 433, 868 e 915 MHz. Os regulamentos especificados em (ALLIANCE, 2017) exigem que os emissores de rádio adotem um *duty cycle* de transmissão de 1% ou 0,1%, dependendo

da Sub-banda, ou o chamado LBT (*Listen Before Talk*) e AFA (*Adaptive Frequency Agility*), que é um tipo de mecanismo de detecção de portadora que deve impedir a interferência severa entre os dispositivos que operam na mesma banda.

Conforme apresentado, a taxa de transmissão nominal da modulação LoRa® é especificada pelos coeficientes BW, FS e RC. Um símbolo *chip* carrega *bits* codificados no fator de espalhamento, vindos do intercalador, e cada *bit* transporta *bits* de informação da taxa de código. Portanto, a taxa de dados efetiva de uma carga útil nitidamente longa é dada pela equação (2.6).

Considerando que cada pacote é prefixado com uma "apresentação" para permitir a frequência sincronizada de tempo no receptor, a taxa de dados real da técnica utilizada pelo LoRa® varia de aproximadamente 0,3 kb/s a 11 kb/s, com o tamanho de banda de 250 kHz. Porém o sistema LoRa® tem maior capacidade pois pode detectar transmissões simultâneas de diferentes nós por utilizar a ortogonalidade do espalhamento sequencial. Os *gateways* LoRa® permitem o processamento paralelo de até 9 canais LoRa®, onde um canal é identificado pela Sub-banda e pelo índice SF específico.

#### 2.4.3 MAC LoRa®

A camada MAC (*Medium Access Control*) para o LoRa® é definida pela LoRa Alliance™ e é chamado de LoRaWAN™. Segundo (ALLIANCE, 2017a), é basicamente um protocolo *ALOHA* controlado principalmente pelo *LoRaNetServer*. Uma das principais características do LoRaWAN™ é a readequação da taxa de dados que permite ao *NetServer* adaptar a taxa de transmissão de um dispositivo final mudando o índice SF de modo a encontrar a melhor relação entre eficiência energética e ligação robusta.

O MAC LoRa® foi projetado de forma similar ao MAC IEEE 802.15.4 utilizado em 6LoWPAN, ZigBee e CoAP (*Constrained Application Protocol*). Isso facilita o alojamento no topo do MAC LoRa®. Uma analogia clara é o mecanismo de autenticação que é obtido diretamente do IEEE 802.15.4, padrão que usa o código de integridade de mensagem de 4 octetos. Outra importante característica é o forte mecanismo de segurança que implicam uma chave de rede e aplicação que são

configuradas através de um procedimento personalizado de ativação e definidos no dispositivo no momento de sua produção (ALLIANCE, 2017a).

## 2.5 Análise de Mercado

Há várias tecnologias LPWAN em desenvolvimento pelo mundo. Consórcios são formados de forma a padronizar as tecnologias e deixa-las compatível com as já existentes. No Brasil, o desenvolvimento destas tecnologias caminha devagar por processos de homologação na Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) e por questões de cobertura em redes que dependem de operadora. O mercado brasileiro é constituído principalmente pelas redes LoRa® e SigFox®, onde há uma distinção muito grande entre o modelo de negócio adotado (GARCIA, 2017).

Redes SigFox® são operadas no Brasil pela operadora WND Brasil no formato Naas (*Network as a Service*) como se fosse uma operadora de telefonia móvel. Tem baixo custo de implantação, porém, cada dispositivo operado tem taxa anual que depende do plano contratado onde o valor aumenta com a quantidade de dispositivos geridos. Este modelo de negócio torna a tecnologia barata e fácil em sua implantação com o apoio de empresas conveniadas, no entanto, seu custo se torna elevado a médio e longo prazo. Já a tecnologia LoRaWAN™ é disposta no Brasil através de uma comunidade de usuários evangelizadores da tecnologia que implementam e gerem a rede por conta própria disseminando sua utilização. Este modelo de negócio tem alto custo de projeto, mas não há cobrança e nem restrição por dispositivos utilizados, tornando a manutenção do sistema barata (GARCIA, 2017). A tabela 3 faz um comparativo das principais características destas redes LPWA.

Tabela 3 – Comparação entre Redes LoRaWAN™ e SigFox®

<b>Característica</b>	<b>LoRa®</b>	<b>SigFox®</b>
Tempo de implantação	Alto	Baixo
Investimento Inicial	Alto	Baixo
Alteração do serviço/ <i>hardware</i>	Independente	Dependente de Operadora
Flexibilidade na alteração da aplicação	Grande	Baixo
Precisão do Geoposicionamento	Boa	Boa
Custo da Rede pós implantação	Baixa	Alta
Cobertura no Brasil	Não	Sim
Adaptação do serviço com consumo de energia	Sim	Não
Mensagens <i>uplink</i>	Ilimitada	Até 140/dia
Mensagens <i>downlink</i>	Ilimitada	Até 4/dia
<i>Payload</i> máximo mensagens	255 <i>bytes</i>	12 <i>bytes</i>
Mensagens com confirmação	Sim	Não
Alcance dos <i>gateways</i> nas cidades	2 a 5 km	3 a 10 km
Alcance dos <i>gateways</i> nas áreas rurais	Até 45 km	Até 50 km

Fonte: Adaptado de (GARCIA, 2017).

No geral, a rede SigFox® possui mais limitações devido sua gestão por operadora própria, porém, possui toda uma rede estruturada e acompanhamento da aplicação para redes *IoT*. Já a rede LoRaWAN™ se caracteriza por ser flexível e adaptável pelo usuário da aplicação. As duas redes possuem características LPWA muito boas, a escolha de qual utilizar vai depender principalmente da quantidade de dados a ser transmitida ou recebida, do tempo de implementação e do conhecimento do usuário da aplicação.

### 2.5.1 Redes LoRaWAN™ no Brasil

Apesar da tecnologia LoRa® já ter sido usado a bastante tempo por áreas militares e bases de pesquisa, as redes LoRaWAN™ são relativamente recentes. Sua expansão se deu em março de 2015 a partir do consórcio de grandes empresas

entusiastas na criação de uma rede comum e adaptável com as redes utilizadas atualmente. A LoRa Alliance™ é uma associação aberta sem fins lucrativos que atualmente é a maior e mais crescente aliança no setor de tecnologia no mundo (ALLIANCE, 2018). Seus membros compartilham experiências e promovem o impulsionamento e o sucesso do protocolo LoRaWAN™ como padrão global aberto. No Brasil, não existem redes que operam a tecnologia LoRaWAN™ com o mesmo modelo de negócio da SigFox®, no entanto, há comunidades e membros do LoRa Alliance™ que operam redes e fornecem suporte e soluções para as mais diversas aplicações, podendo ser citados as operadoras *The Things Network Foundation* e *Everynet*. Estas redes possuem seus membros cadastrados que podem ser consultados por outros membros da rede de forma a prover a troca de experiência e resolução de problemas (THE THINGS NETWORK, 2018). A figura 11 mostra os gateways e redes que são suportadas pela *The Things Network Foundation* no Brasil e pelo mundo.

Figura 11 - Gateways LoRaWAN™ registrados pela The Things Network Foundation



Fonte: The Things Network Foundation.

Há inúmeros pontos registrados pelo mundo. O Brasil possui apenas alguns pontos de gateways geridos pela *The Things Network Foundation*. Apesar de não podermos levar em conta apenas uma operadora, com a comparação entre países norte americanos e europeus é possível demonstrar a imensa oportunidade de implementação de redes *IoT* e principalmente *IIoT* a partir da tecnologia LoRa®.

## 2.5.2 Aplicações de Redes LoRaWAN™ no Brasil

Recentemente a Associação Brasileira de Internet das Coisas (ABINC) entrou para a LoRa Alliance™. O movimento é uma resposta à regulamentação de tecnologias de radiação restrita no Brasil pela ANATEL. O novo regulamento passou a valer a partir de abril de 2018, com isso será permitido a padronização e interconectividade entre os dispositivos de *IoT*, estimular a produção e desenvolvimento de tecnologia nacional e ajudar na popularização do uso das tecnologias por todos os setores da economia e para o usuário final com custos mais acessíveis (TELESINTESE, 2018).

Nenhuma tecnologia servirá a todas as diferentes aplicações da *IoT* igualmente. Os requisitos da aplicação, modelos de implementação, custos com dispositivos e cronograma de implantação irão influenciar na escolha da tecnologia a ser utilizada (ALLIANCE, 2016). O Brasil não tem grandes casos de negócio utilizando redes LoRa® em grande escala, mas podem ser aplicados em diversos ramos como:

**Agricultura de precisão:** As técnicas associadas à agricultura de precisão despertam interesse daqueles que se dedicam à atividade agropecuária no Brasil, sendo eles os produtores rurais, fabricantes de equipamentos, prestadores de serviços e consultores agrícolas (EMBRAPA, 2010). Para a agricultura, sensores de baixo custo com longa vida útil da bateria são desejados. LoRa® é ideal para os casos em que os sensores precisam atualizar suas informações apenas algumas vezes por hora ou quando as condições climáticas mudam radicalmente. Outro ponto é que muitas fazendas não têm acesso a cobertura celular e necessitam de uma rede própria (ALLIANCE, 2016);

**Construções inteligentes:** Com a tecnologia nos chamados edifícios inteligentes é possível se conectar com uma variedade de sistemas integrados e compartilhar informações com objetivo de otimizar o desempenho das construções, proporcionando segurança, economia e redução de impactos ambientais com a redução de desperdícios de recursos (RODRIGUES, 2018). Monitoramento de temperatura, umidade, segurança, ocupação, fluxo de água, entre outros, podem fornecer alertas diretamente para o dispositivo móvel conectado, evitando danos por falta de monitoramento do edifício. A limpeza também pode ser feita de forma mais eficiente com o monitoramento de lixeiras e pontos de coleta. O requisito para os

sensores utilizados é de baixo custo com uma boa duração da bateria, pois não exigem comunicação frequente e precisão da informação (ALLIANCE, 2016).

**Logística:** A logística funciona para muitas empresas do setor como a principal maneira de otimizar a gestão da cadeia de suprimentos por meio de tecnologias e sistemas inteligentes, que tem a capacidade de reunir dados e funcionar de forma automática. Isto resulta em menor número de erros humanos em atividades de controle e diminuem, ou até eliminam, os desperdícios de tempo. Os transportes e acondicionamentos podem ser gerenciados em tempo real e acontecer de forma integrada (TRANSPONBRASIL, 2018). *Gateways* de baixo custo podem ser facilmente implantados para cobrir as instalações de triagem e também utilizados em veículos como *gateways* móveis. LoRa® tem boas propriedades técnicas que tornam a comunicação mais confiável ao mover-se em altas velocidades por ter sinal de banda larga, podendo uma rede LoRaWAN™ ser aproveitada quando produtos estiverem em movimento fora das instalações ou quando a mercadoria chegar no cliente (ALLIANCE, 2016);

**Pecuária:** Cada vez mais as margens do segmento ficam estreitas, fazendo com que produtividade e corte de gastos sejam necessários. As novas tecnologias *IoT* auxiliam as questões de redução de custo. Um sistema de *IoT* pode servir para o monitoramento de cada animal de um rebanho. Com um *microchip*, eles podem ser acompanhados individualmente sendo possível saber seu peso, estado de saúde e localização (CRYPTOID, 2018). Esta aplicação é ideal para LoRa® uma vez que grandes fazendas necessitam de muitos dispositivos de baixo custo para monitoração de cada animal e a vida útil da bateria deve durar o tempo necessário até o abate;

**Fábricas automatizadas:** Apesar da grave crise econômica, o Brasil necessita investimentos no setor para não ficar para trás na chamada era da produção 4.0. Neste modelo de mercado formado por “fábricas inteligentes”, a tecnologia é fundamental. A combinação de robôs automatizados capazes de interagir com outras máquinas e com seres humanos interligados a sistemas e a *IoT* são fundamentais (SCRIVANO, 2016). O monitoramento em tempo real das máquinas da fábrica pode evitar custos com manutenção e permitir um melhor controle e eficiência dos equipamentos. Há muitos diferentes tipos de sensores ou requisitos em automação de fábrica. Muitas implementações requerem redes de baixo custo para rastrear

equipamentos, monitorar status e condições, o que torna LoRa® uma boa alternativa (ALLIANCE, 2016).

Neste contexto de fábricas inteligentes, a indústria de papel e celulose também se inclui, sendo necessário avaliar a melhor solução de acordo com a necessidade do processo. Uma indústria que requer a análise de parâmetros de processos não necessita que os dados sejam transmitidos ininterruptamente para saber a situação do dispositivo ou conjunto de monitoramento, mas é necessário que havendo uma condição anormal de trabalho, esta possa ser identificada para rápida solução do problema antes que ela possa impactar na qualidade do produto, ou pior, danificar o equipamento tornando a produção inviável.

### 2.5.3 Dispositivos LoRa®

Desde o surgimento da tecnologia LoRa® a nível comercial e a baixo custo, várias soluções estão sendo disponibilizadas no mercado, sendo estes dispositivos de aquisição de dados, *gateways*, sensores, roteadores, entre outros. O *hardware* utilizado dependerá de cada aplicação. Para a utilização de redes sem fio que requerem pouca ou nenhuma manutenção e adaptação, alguns requisitos de *hardware* como tecnologia de rádio robusta, processador eficiente e de baixo consumo, entradas e saídas múltiplas, fonte de energia de longa duração, e plataforma de desenvolvimento de código aberto e com uma grande comunidade são necessários.

Para a aplicação destes dispositivos no Brasil, deve-se levar em consideração questões legais de utilização de radiofrequência. Apesar da banda ISM em que dispositivos LoRa® operam não requererem autorização pela ANATEL, estes não podem gerar interferências prejudiciais em sistemas terrestres e espaciais (ANATEL, 2016). Uma grande variedade de produtos certificados disponíveis para atender as mais diversas aplicações da *IoT* utilizando LoRaWAN™ e que podem ser aplicados a indústria de papel e celulose são apresentados a seguir.

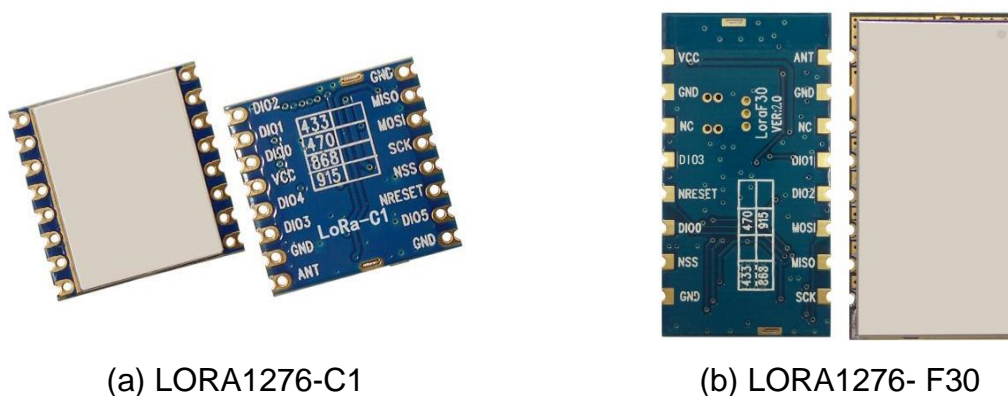
#### 2.5.3.1 LORA1276-C1 e LORA1276-F30

O LORA1276-C1 e LORA1276-F30 da NICERF apresentados na figura 12, possuem o chip transceptor Semtech SX1276 e podem ser integrados a um



controlador e a sensores para formar uma solução completa. O módulo C1 tem 100 mW de potência, pequena dimensão e alcance de até 4 km. Já o módulo F30 tem 500 mW de potência e alcance de até 8 km. São amplamente utilizados em assistência médica regional e automação industrial (NICERF, 2018).

Figura 12 – Dispositivos LORA1276



(a) LORA1276-C1

(b) LORA1276- F30

Fonte: (NICERF, 2018).

### 2.5.3.2 LoPy

O LoPy da Lopycom apresentado na figura 13, pode atuar como um nano *gateway* LoRa® e uma plataforma de desenvolvimento multiportadora habilitada para operar com redes LoRa®, *Wi-Fi* e BLE (*Bluetooth Low Energy*). É uma plataforma de *IoT* com o mais recente *chipset* da Espressif ESP32, que oferece uma combinação de poder e flexibilidade (LOPYCOM, 2018).

Figura 13 – Dispositivo LoPy



Fonte: (LOPYCOM, 2018).

### 2.5.3.3 RAK831 LoRa® Gateway

O módulo concentrador RAK831 da Rakwireless apresentada na figura 14, é direcionado para uma enorme variedade de aplicações de medição, *IoT* e *M2M*. É um transmissor e receptor multicanal de alto desempenho projetado para receber vários pacotes LoRa® simultaneamente usando diferentes canais. Este módulo pode ser integrado a um *host* para compor um *gateway* LoRa® de forma a permitir uma comunicação robusta entre uma enorme quantidade de nós finais LoRa® espalhados em uma grande área (RAKWIRELESS, 2018).

Figura 14 - RAK831 LoRa® Gateway

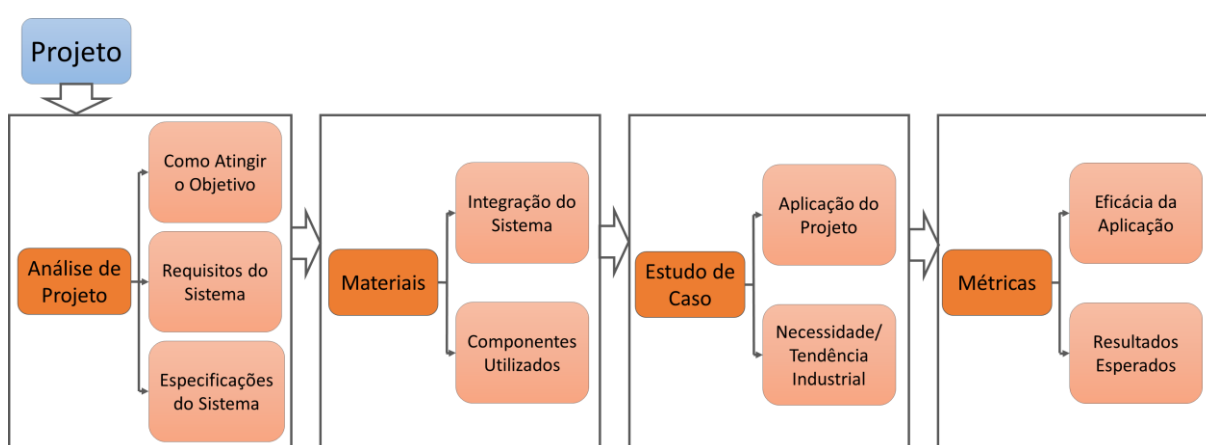


Fonte: (RAKWIRELESS, 2018).

### 3 METODOLOGIA

Nesta seção são analisados os passos que serão tomados para a implementação do projeto, assim como os tipos de materiais utilizados e a forma como se dará a avaliação dos resultados. Também é feita uma comparação com projeto semelhante de forma a avaliar a forma de aplicação da tecnologia e resultados esperados. Para a elaboração do projeto será utilizada a metodologia apresentada na figura 15.

Figura 15 – Metodologia do projeto



Fonte: Elaborado pelo autor.

A primeira etapa consiste em analisar as atividades, requisitos e especificações do projeto, em seguida, tem-se a etapa de definição de materiais que irão integrar o sistema. Nesta etapa é mostrado o comportamento do sistema, porém sua construção é deixada para tópico posterior. A etapa de estudo de caso mostra o contexto da aplicação e a necessidade do projeto de forma a validar o real ganho da aplicação. Uma vez definidos os requisitos, materiais e validada sua aplicação, a eficácia dos resultados será avaliada.

#### 3.1 Método de Análise de Projeto

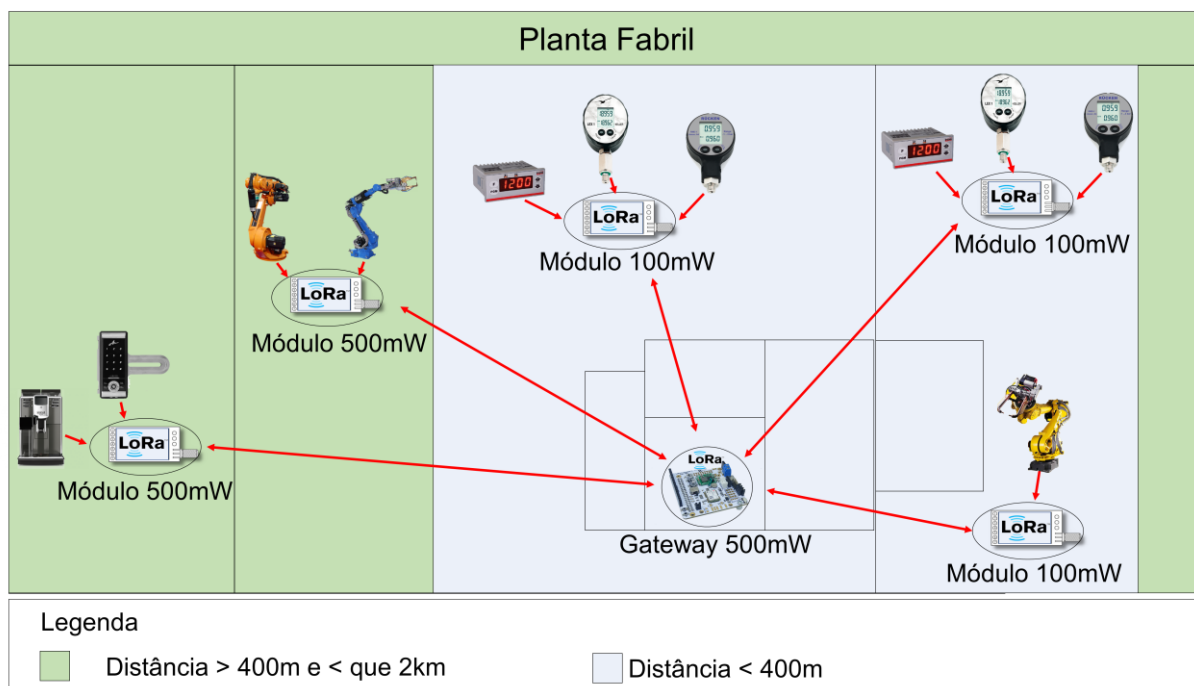
As informações a serem transmitidas serão coletadas a partir de dispositivos com saída digital ou analógica como sensores de temperatura, pressão, vácuo, velocidade, sensibilidade e vazão. Estas informações serão enviadas a um microcontrolador que irá se comunicar com o módulo LoRa® fornecendo a informação

do dispositivo. O sinal será enviado a um módulo receptor (*gateway*), também provido de módulo LoRa® e microcontrolador para depuração dos dados. Estes dados serão disponibilizados em uma rede interna da companhia podendo ser acessados por qualquer *desktop* ligado a ela. A informação dos parâmetros de processo, também será disponibilizada a dispositivos *mobile* através de *Bluetooth* que também estará disponível no *gateway*. Funções e modos de operação dos dispositivos serão programadas por linguagem de computador.

O *gateway* irá receber mensagens de vários módulos transmissores, cada qual podendo transmitir informações de vários dispositivos limitados as entradas disponíveis do controlador. Como será utilizado *gateway* com um único canal, os módulos transmissores deverão estar sincronizados de forma a não enviar as informações ao mesmo tempo, o que pode gerar perda das informações pela ocupação do *gateway*. Deverá ser constituído de microcontrolador para processar a informação e deixá-la gravada em um *host* a fim de se ter histórico dos parâmetros de processo de cada dispositivo controlado. Será utilizado módulo transceptor de 500 mW que possibilita atingir distâncias superiores a 1 km de maneira a cobrir toda uma planta industrial.

O módulo transmissor poderá ser constituído de um transceptor de 100 mW quando a distância do dispositivo até o *gateway* for menor que 400 m. Se a distância for maior que 400 m e menor que 2 km, deverá ser constituído de um módulo de 500 mW para compensar empecilhos ao sinal de RF como estruturas metálicas ou de alvenaria e ruídos que possam existir devido aos vários equipamentos eletromecânicos, garantindo o recebimento do maior número de pacotes possíveis. Os módulos transmissores e *gateway* deverão operar em RF 915 MHz. A figura 16 mostra a aplicação em uma planta fabril.

Figura 16 – Aplicação em planta fabril



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura mostra vários dispositivos conectados a um módulo transceptor LoRa® de 100 mW ou de 500 mW mandando ou recebendo informações de um *gateway* localizado em uma sala onde os dados possam ser visualizados e tratados. Vários dispositivos estão ligados ao mesmo módulo transceptor, ilustrando a possibilidade de que dispositivos próximos possam usar o mesmo módulo para a transmissão dos dados. A tabela 4 apresenta as principais características esperadas para a rede *wireless* industrial utilizando LoRa®.

Tabela 4 – Rede Wireless industrial LoRa®

Projeto	Descrição
Componentes	Módulo transmissor <i>Gateway</i> Dispositivos sensor/atuador
Propósito	Consulta de parâmetros de processos das máquinas
Entradas	Parâmetros de processos
Saídas	Informações disponibilizada em rede interna da companhia Informações disponibilizada em dispositivos <i>mobile</i> Aviso de evento anormal Automação do processo
Desempenho	Transmissão de informações de até 255 <i>bytes</i> Distância de até 2 km Processamento de 20 mensagens de 10 <i>bytes</i> a cada segundo (50 ms por transmissão) Duração da bateria de 2 anos
Alimentação	<i>Gateway</i> – USB e fonte externa Módulo transmissor – Bateria 9 V e fonte externa
Dimensões	<i>Gateway</i> – 80 x 80 x 40 mm Módulo transmissor – 120 x 130 x 40 mm

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela apresenta um resumo dos componentes da rede e da parte física do projeto servindo de referência à lista de materiais necessários apresentada na seção 3.2.

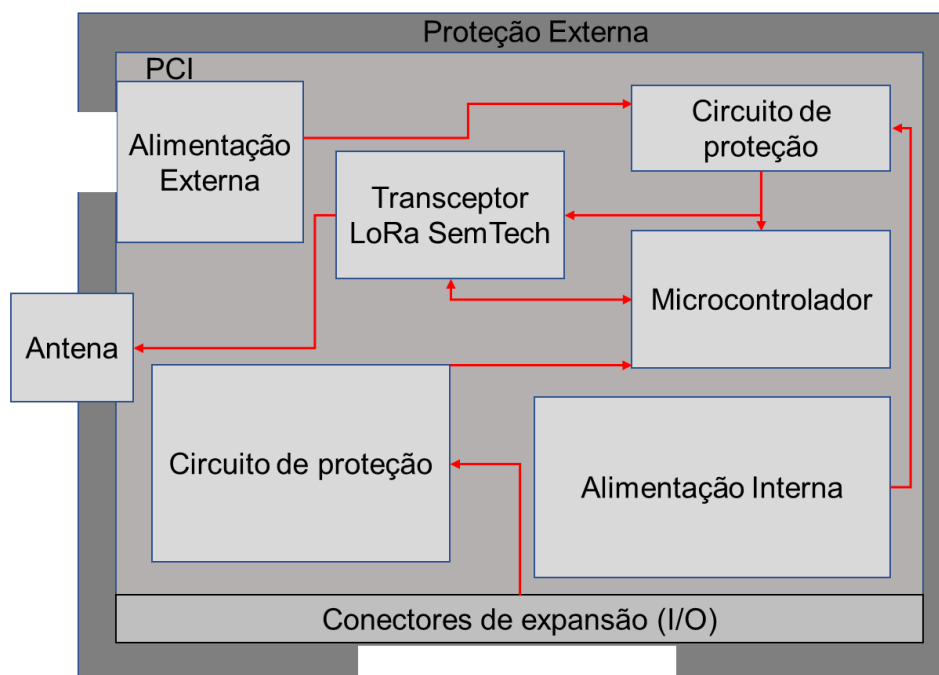
### 3.2 Materiais

Nesta seção serão descritos com mais detalhes os componentes do sistema que serão necessários para atingir os requisitos apresentados anteriormente. Os módulos transmissores e o *gateway* serão compostos por microcontrolador para processamento das mensagens e automação. Ele será responsável por controlar a comunicação pelas entradas e saídas digitais (DIO), dispositivos conectados e executar os comandos. Através da Interface SPI ele irá configurar o módulo LoRa®. Poderá ser usado para implementar outras funcionalidades de comunicação síncrona e assíncrono pelo receptor/transmissor universal (UART) assim como o tratamento de

sinais digitais e analógicos. Os módulos transmissores utilizados serão o LoRa® SX1276 da SemTech de 100 mW e 500 mW, operando na frequência de 915 MHz.

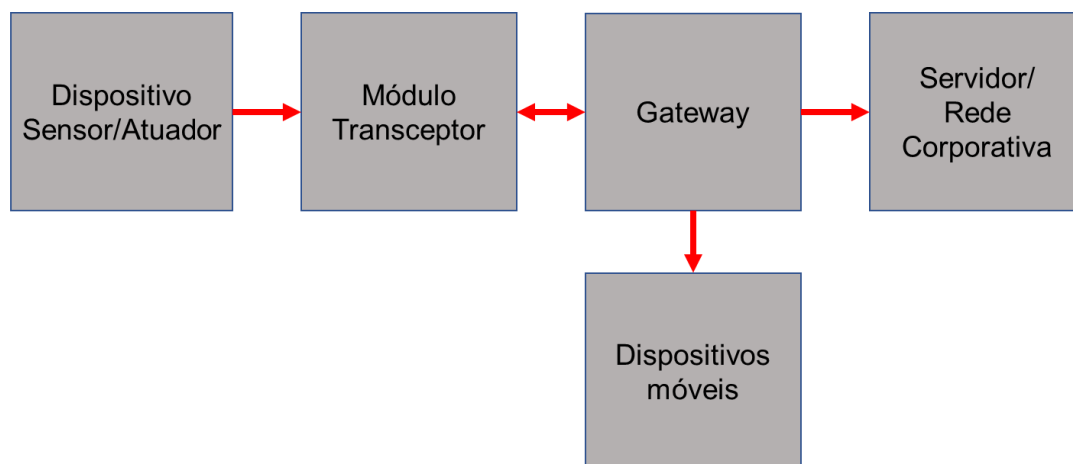
Ligados ao microcontrolador do módulo transmissor, conectores de expansão com identificação de portas analógicas e digitais serão responsáveis por prover entrada e saída de sensores e atuadores ao microcontrolador. Dispositivo de segurança contra sobretensão e inversão de polaridade na alimentação também serão projetados, tudo sob placa de circuito impresso (PCI). A alimentação interna será provida por bateria, porém, será colocada entrada para alimentação externa. Todos os periféricos serão envolvidos por um case de forma a tornar o projeto um produto. A figura 17 mostra um esboço do produto transmissor.

Figura 17 – Protótipo do transmissor



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura apresenta os componentes básicos do transmissor de forma simplificada sem detalhes da implementação. A comunicação entre dispositivos, módulo transmissor, *gateway* e servidor de rede corporativa, é apresentado na figura 18.

Figura 18 – Aplicação *Top Level*

Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura apresenta o fluxo de dados da rede, onde cada dispositivo disponibilizará a informação ao módulo transceptor que enviará e receberá dados de um *gateway* conectado a um servidor da companhia que disponibilizara os dados para consulta. O *gateway* também possibilitará a comunicação com dispositivos móvel dentro do alcance do sinal *Bluetooth* disponível em seu microcontrolador.

### 3.3 Estudo de Caso

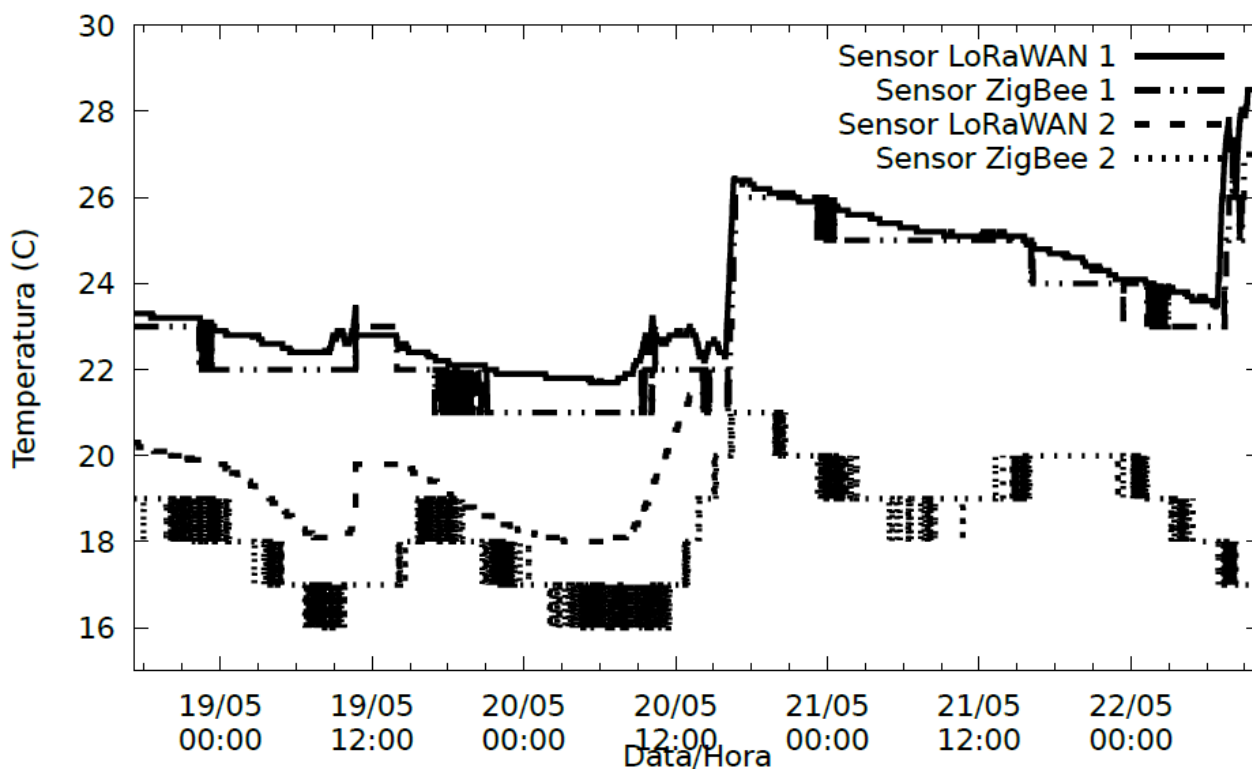
Como mencionado na análise de mercado, redes LoRaWAN™ não são comumente encontradas no Brasil em grande escala e principalmente aplicado o *IIoT* devido à dificuldade que o país encontra em seguir as tendências tecnológicas do mercado. Porém, há vários estudos nas áreas científicas mostrando sua aplicabilidade em diversos ramos.

Em (SARAIVA, 2017), é mostrada a aplicação de redes LoRaWAN™ em um projeto de monitoramento do aquecimento de uma caixa de água no campus do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC). O experimento mostra a criação de uma rede LoRaWAN™ constituída de um dispositivo final para coleta e transmissão dos dados e um dispositivo *gateway* para recepção, tratamento e disponibilização das informações em servidor. No experimento a rede LoRaWAN™ foi comparada com uma rede ZigBee existente. Os resultados concluíram que para atingir a mesma distância que redes LoRaWAN™, foi necessário repetidores para a rede ZigBee.



Quanto aos dados transmitidos, não foram observadas perdas de pacotes pelas duas redes. A figura 19 mostra os resultados obtidos no experimento.

Figura 19 – Comparação entre Rede LoRaWAN™ e ZigBee



Fonte: SARAIVA, 2017

Foram feitas medições durante 5 dias com intervalo de 1 minuto, os sinais das linhas contínua e tracejada correspondem aos dados dos sensores da rede LoRa®, enquanto os sinais das linhas pontilhada e tracejada correspondem aos dados do módulo ZigBee, a proximidade das linhas demonstrou a correta transmissão dos dados (SARAIVA, 2017). Estas análises se assemelham a proposta do projeto de redes LPWA em uma máquina industrial porque visa a viabilidade de aplicação. A tabela 5 apresenta uma comparação entre as aplicações das redes LoRaWAN™ desenvolvida e da rede proposta neste projeto.

Tabela 5 – Comparação entre LoRaWAN™ aplicada e proposta

Proposta do Projeto	Coleta de dados de sistema de aquecimento solar	Coleta de parâmetros de processos de uma máquina industrial
Tecnologia LPWA	LoRaWAN™/ZigBee	LoRaWAN™
Entradas	Parâmetros de Temperatura/ Umidade/Acelerômetro	Parâmetros de Pressão/ Vácuo/Sensibilidade
Saídas	Acionamento de atuadores	Informação de parâmetros Aviso de exceção do processo
Componentes	Gateway LoRa® Transceptor LoRa® Sensores	Gateway LoRa® Transceptores LoRa® Sensores
Alcance necessário	20 m	Até 2 km
Disponibilidade dos dados	Servidor na nuvem	Servidor Corporativo Rede <i>Bluetooth</i> local
Intervalo nas medições	1 minuto	50 ms

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.4 Métricas

Com a aplicação proposta espera-se obter os requisitos apresentados na seção 3.1. Quanto ao desempenho, serão transmitidas informações de até 10 *bytes* a cada 50 ms e será feita a análise do tempo que esta mensagem leva para ser transmitida, tanto para o módulo de 100 mW quanto para o de 500 mW. Serão alteradas as distâncias de análise, assim como configurações internas do transmissor como SF, BW e CR. Também será avaliada a distância que cada módulo atinge, para isso, serão transmitidas informações em pontos de distância cada vez maiores até que não haja mais presença de sinal. Também será avaliada a quantidade de pacotes recebidos em relação à distância. As equações apresentadas na seção 2.4 serão utilizadas para os cálculos.

De modo a prover um consumo ainda menor de energia e menos interferência de outros dispositivos, será definida banda separada para cada módulo transceptor para evitar que o espectro de frequência seja varrido de 902 MHz a 928 MHz para captar os dados transmitidos.

Quanto a duração da bateria, um dispositivo será deixado para transmitir mensagens ininterruptas. Quando acabar a bateria, será coletada a informação de

quantas mensagens foram enviadas/recebidas no tempo de operação e será feita uma estimativa do tempo de duração da bateria para a quantidade de mensagens prevista no projeto. O recebimento e armazenamento de parâmetros de processo serão disponibilizados e testados em dispositivos *mobile*, que também farão teste de transmissão *Bluetooth* pelo módulo *gateway*, e em servidor da companhia. Os dispositivos transmissor e *gateway* serão colocados em sobre tensão de forma a validar o circuito de proteção. Serão simuladas e analisadas as condições de anormalidade nos parâmetros de processo para validar os avisos ou automação dos dispositivos.

## 4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Neste capítulo será utilizada a metodologia apresentada no capítulo 3 para criação de *hardware*, *software* e integração do projeto ao sistema corporativo existente.

### 4.1 Desenvolvimento de *Hardware*

O ponto inicial do projeto se dá pela escolha do dispositivo LoRa®, conforme apresentado na seção 2.5.3, há vários dispositivos que podem ser utilizados. Visando baixo custo e flexibilidade de implementação, o dispositivo LORA1276-C1 foi escolhido para o transmissor de 100 mW e o dispositivo LORA1276-F30 para o transmissor e o *gateway* de 500 mW, ambos os módulos utilizam o chip SX1276 da Semtech. A partir de comunicação SPI, as características do protocolo LoRaWAN™ como SF, BW, CR entre outros, podem ser alteradas com linguagem de programação. A comunicação com cada módulo LORA1276 é feito com um microcontrolador, sendo utilizado o Arduino NANO compatível para os módulos transmissores e um DOIT ESP32 para o *gateway*. Para os diagramas esquemático, PCI e *Gerber* de confecção de cada placa foi utilizado programa EDA (*Electronic Design Automation*) EasyEDA.

#### 4.1.1 Transmissor LoRa®

O apêndice A e D apresentam o diagrama esquemático para os transmissores de 100 mW e 500 mW respectivamente. Neles é possível verificar o *pinout* dos módulos LoRa® e microcontrolador e como são feitas suas ligações. Cada módulo transmissor possui 12 entradas disponíveis para leitura de dados, onde 4 entradas são digitais para verificar nível lógico alto ou baixo e 8 entradas são analógicas para leitura de dispositivos com saída analógica. As entradas digitais são utilizadas para leitura de sensores de presença, abertura de portas ou qualquer outro dispositivo que altere o nível lógico com alguma operação realizada. As entradas analógicas são utilizadas para leitura de dispositivos com saída de tensão de 0 a 5 V, e que possam ser convertidas para a sua respectiva unidade de medida apresentada em cada dispositivo. Por exemplo, sensores de vácuo e pressão do modelo SPAB da fabricante

Festo retornam uma saída de 1 a 5 V que representa o valor analógico de leitura do equipamento (FESTO, 2017) e serão utilizados neste projeto.

Cada entrada analógica e digital dos transmissores possui circuito de proteção contra sobretensão de até 32 V. Com a utilização de amplificadores operacionais LM324 utilizados como *buffer*, sua tensão de saída é limitada pela tensão referência (TEXAS INSTRUMENTS, 2015), que neste caso é um diodo *Zener* de 6,8 V subtraído da tensão de *offset* do operacional, o que resulta em saída máxima de 5,2 V aplicada à entrada do microcontrolador. Em cada entrada dos amplificadores operacionais é colocada resistência para limitação de corrente, o que evita que equipamentos defeituosos prejudiquem o controlador e o módulo LoRa®.

Para alimentação externa dos módulos transmissores pode ser aplicada uma tensão de até 28 V. Um diodo na entrada faz a proteção em cada módulo contra a inversão de polaridade. Um regulador de tensão LM7809 provê alimentação aproximada de 9 V ao microcontrolador que pode operar entre 7 a 12 V com alimentação externa (ARDUINO, 2018). O módulo LORA1276-F30 opera com tensão de entrada entre 3 a 6,5 V com corrente máxima de 450 mA, o que requer a utilização de outro regulador que não seja o disponível no microcontrolador, assim, um regulador de 5 V é utilizado. Já o módulo LORA1276-C1 tem alimentação entre 3,3 a 3,8 V com corrente máxima de 120 mA, sendo possível a utilização do regulador disponível de 3,3 V do microcontrolador que suporta corrente máxima de 200 mA.

Em cada entrada ADC do controlador há resistores de *pull down* utilizados para que quando não haja sinal para leitura, as entradas não fiquem “flutuando”, o mesmo procedimento é realizado nas entradas de cada amplificador operacional, o que evita que ele fique em nível lógico alto sem a leitura de dispositivos. Os diagramas esquemáticos e as PCIs dos módulos de 100 e 500 mW são apresentados nos apêndices B e E respectivamente.

#### 4.1.2 Gateway LoRaWAN™

O apêndice G apresenta o diagrama esquemático para o *gateway* de 500 mW. Nele é possível verificar o *pinout* do módulo LoRa®, microcontrolador e suas ligações. Da mesma forma que os módulos transmissores, o *gateway* pode ser alimentado externamente com até 28 V para consulta de parâmetros via aplicativo *mobile* (APP), ou por computador através de cabo USB para consulta via planilha de Excel e APP.

Um regulador de tensão LM7805 provê alimentação aproximada de 5V ao módulo LORA1276-F30 e ao microcontrolador que pode operar entre 4,5 a 12 V com alimentação externa. Também há proteção contra inversão de polaridade com diodo de entrada. No apêndice H e I são apresentados as respectivas PCI e a BOM do módulo *gateway*.

## 4.2 Desenvolvimento de *Software*

O desenvolvimento do *software* começa pela integração do módulo LoRa® com o microcontrolador. Arduino NANO e ESP32 são programados em linguagem de programação C. A visualização dos dados pode ser feita a partir de planilha Excel utilizando macro e programação VBA (*Visual Basic for Applications*) ou via APP desenvolvido.

### 4.2.1 Transmissor LoRa®

A integração do módulo transmissor LoRa® e microcontrolador é feita a partir de SPI. O código foi separado em duas partes bem definidas onde a primeira implementa todas as funcionalidades para o correto funcionamento do módulo LoRa® e a segunda parte implementa apenas a aplicação. Nas funcionalidades do módulo LoRa® devem ser informados todos os registradores conforme apresentados no *datasheet* do fabricante do chip. Nesta etapa também são informados o SF, BW e CR utilizados que podem ser alterados de acordo com as necessidades da aplicação. Na segunda parte é feita a leitura das entradas analógicas e digitais, cada um representando a leitura de um equipamento. Estes dados são tratados e atribuída identificação de acordo com a máquina e equipamento, após o módulo LoRa® envia as informações. Cada parâmetro é lido a cada 50 ms dando uma informação bem precisa da variação do equipamento, esse tempo se torna maior com o aumento da quantidade de parâmetros lidos. A tabela 6 apresenta o tempo de leitura de acordo com a quantidade de parâmetros para cada módulo transmissor.

Tabela 6 – Tempo de leitura dos parâmetros

Qtd. Parâmetros	Intervalo de leitura (ms)
1	50
2	100
3	150
6	300
9	450
12	600

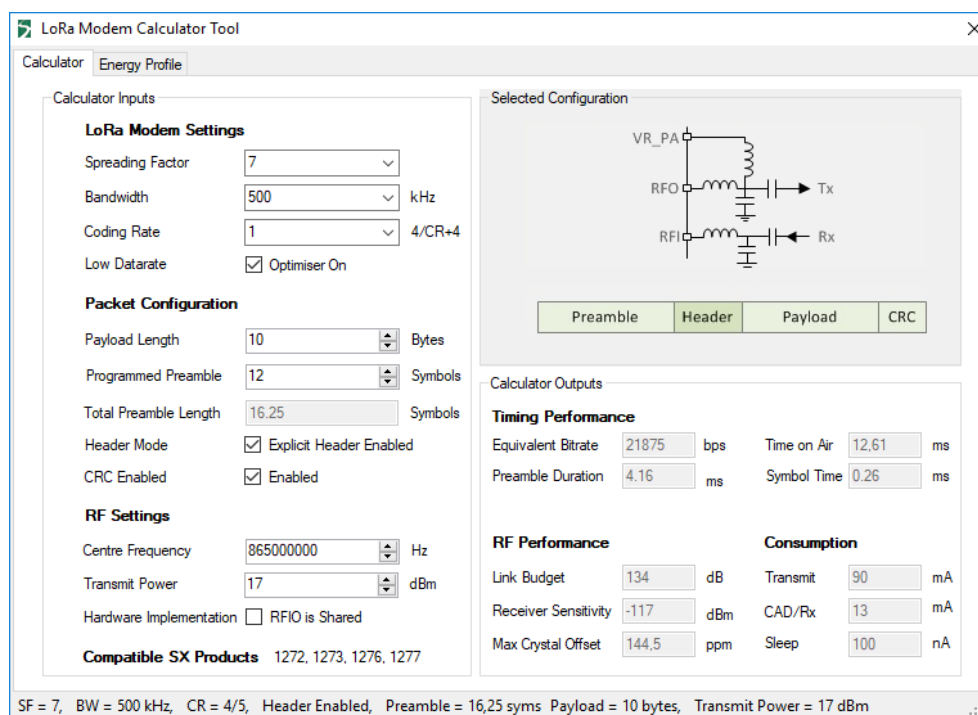
Fonte: Elaborado pelo autor.

A quantidade de parâmetros que cada módulo irá ler, dependerá da precisão de leitura da aplicação. Um único parâmetro pode ser lido em 50 ms, enquanto a leitura das 12 possíveis entradas do módulo transmissor pode levar até 600 ms. O tempo de envio de cada parâmetro é definido de acordo com o SF, BW e CR utilizados conforme apresentado na seção 2.4. Considerando SF = 7, BW = 500 kHz e CR = 4/5 (Fc=1), podemos obter o tempo mínimo necessário para o envio de uma informação de 10 *bytes*:

$$T_{pacote} = 12,61 \text{ ms}$$

Utilizando o *software LoRa Modem Calculation Tools*, disponibilizado pela Semtech, podemos validar o cálculo do tempo em que a informação fica no ar e apresenta-la na figura 20.

Figura 20 – Cálculo do tempo do pacote no ar



Fonte: LoRa Modem Calculator Tool.

No campo “*LoRa Modem Settings*” inserimos as informações do protocolo LoRaWAN™, no campo “*Packet Configuration*” inserimos as informações da mensagem a ser transmitida e o campo “*Timing Performance*” apresenta os resultados de tempo do pacote no ar.

#### 4.2.2 Gateway LoRa®

Da mesma forma que os transmissores, a comunicação do módulo *gateway* LoRa® e microcontrolador é feita a partir de SPI, separando o código em funcionalidades do módulo SX1276 e aplicação. O *gateway* desenvolvido possui apenas um canal, o que não limita a quantidade de dispositivos conectados a ele ou a quantidade de parâmetros lidos, mas sim, o tempo dessas leituras. Desta forma, deve ser configurado com os mesmos valores de SF, BW,  $n_{preâmbulo}$  e frequência dos transmissores. O sincronismo (ou não sincronismo) dos parâmetros enviados é muito importante já que parâmetros que são recebidos ao mesmo tempo podem ser perdidos. Como *gateway* e transmissor atuam em classe B, depois que um parâmetro é recebido, o canal de comunicação entra em *standby mode* para tratamento da

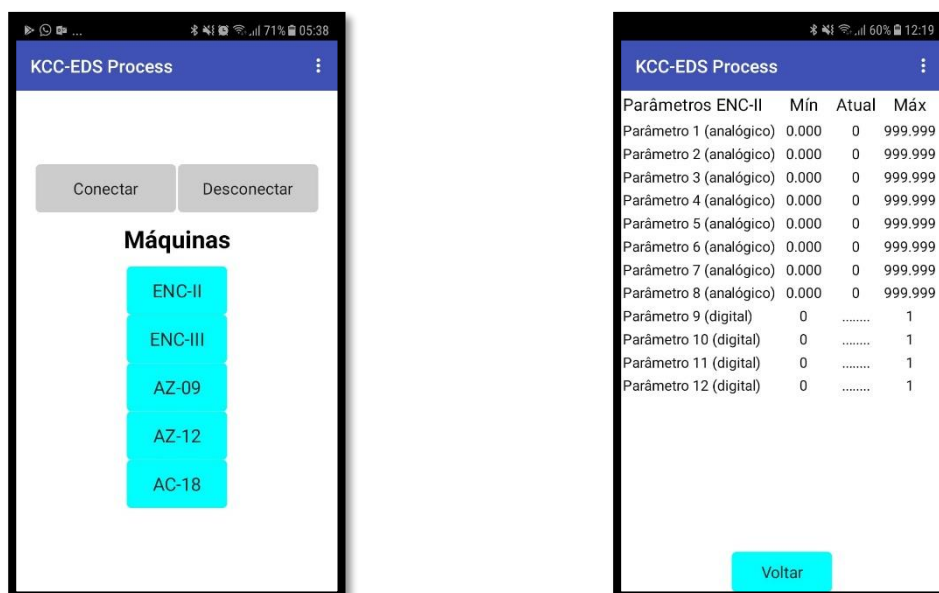


informação. O *gateway* provê comunicação de duas formas, via aplicativo *mobile* para Android e via planilha Excel para computadores.

#### 4.2.2.1 Aplicativo

O aplicativo desenvolvido para este projeto foi criado na plataforma *MIT APP inventor*. Com ele, pode-se conectar ao dispositivo *bluetooth* do ESP32 e receber as informações enviadas dos transmissores ao *gateway*. A figura 21 (a) apresenta a tela inicial do aplicativo onde é selecionada conexão e máquina de consulta e a figura 21 (b) apresenta os parâmetros da máquina.

Figura 21 – Telas do aplicativo



(a) Tela inicial

(b) Tela de parâmetros

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tela inicial apresenta as máquinas disponíveis para seleção e consulta de parâmetros do processo. Após selecionada, são mostradas as informações lidas a partir das entradas analógicas e digitais dos módulos transmissores instalados em cada máquina. A informação recebida pelo aplicativo possui a indicação de qual máquina que o parâmetro foi lido, o tipo de informação (digital ou analógica) e o valor de leitura. Este dado é separado e mandado a tela de sua respectiva máquina e parâmetro. O tempo de leitura do equipamento físico e o valor apresentado na tela do APP são muito próximos, havendo apenas o atraso na transmissão definido por *delay*

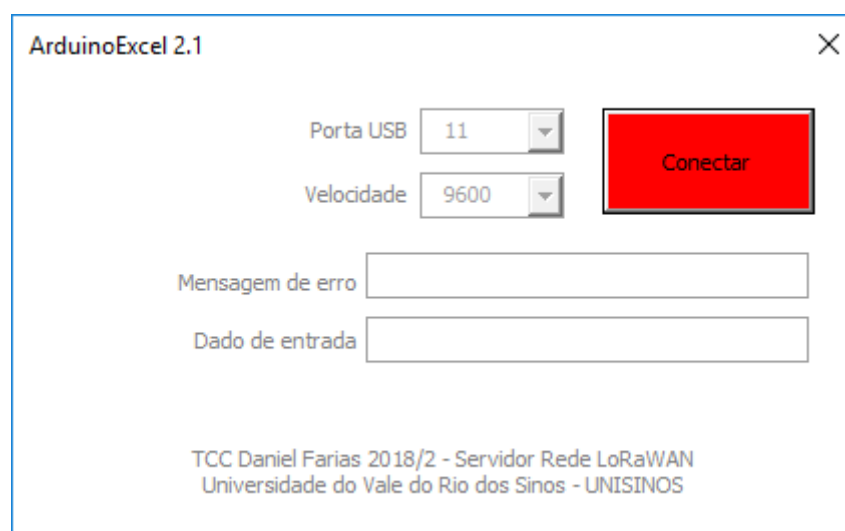
de 50 ms por parâmetro, além do tempo de leitura, tratamento do dado pelo *gateway* e transmissão *bluetooth*. Quanto a distância atingida pelo *bluetooth* disponível no *gateway*, análises práticas mostram uma distância de transmissão da informação de até 15 m, distância suficiente para a consulta de parâmetros dentro de uma sala onde fica disponível o *gateway*, trazendo comodidade aos usuários que preferem fazer a consulta via APP.

No aplicativo é possível definir os limites inferior e superior de atuação do parâmetro, assim, quando ele não atende aos limites estipulados pelos engenheiros de processo, sua identificação e tratamento são mais fáceis. Conforme o limite de entrada de cada módulo transmissor, é possível o envio de 8 leituras analógicas e 4 digitais. O diagrama do apêndice J apresenta a programação em blocos para elaboração do APP.

#### 4.2.2.2 VBA Excel

A macro desenvolvida para este projeto foi criada em linguagem VBA. Suas funcionalidades incluem a consulta de parâmetros recebidos pelo *gateway* a partir da UART do microcontrolador ESP32 e a disponibilidade da informação através de banco de dados para consulta em computadores locais ligados ao servidor corporativo. A figura 22 apresenta a tela de seleção da porta USB e taxa de recebimento da informação.

Figura 22 – Tela de seleção de porta USB



The image shows a software window titled "ArduinoExcel 2.1" with a close button (X) in the top right corner. The interface contains two dropdown menus: "Porta USB" with the value "11" selected, and "Velocidade" with the value "9600" selected. To the right of these menus is a prominent red button labeled "Conectar". Below the dropdowns are two empty text input fields labeled "Mensagem de erro" and "Dado de entrada". At the bottom of the window, there is a footer with the text: "TCC Daniel Farias 2018/2 - Servidor Rede LoRaWAN Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS".

Fonte: Elaborado pelo autor.

O campo “dado de entrada” mostra a informação recebida pela serial e o campo “mensagem de erro” mostra possíveis erros devido a transmissão dos dados. Da mesma forma que o aplicativo, é recebido a informação da identificação da máquina, o tipo de informação e o valor de leitura. O tempo de leitura do equipamento físico e o valor na planilha Excel são muito próximos havendo apenas o atraso na transmissão definida a cada 50 ms por parâmetro, tempo de leitura, tratamento do dado pelo *gateway* e tempo da comunicação serial. A figura 23 mostra como as informações são disponibilizadas ao usuário.

Figura 23 – Tabela de visualização de parâmetros

ENC-II			
Descrição	Limite Inferior	Valor Atual (UM)	Limite Superior
Parâmetro 1 (analógico)	0,000	-	999,999
Parâmetro 2 (analógico)	0,000	-	999,999
Parâmetro 3 (analógico)	0,000	-	999,999
Parâmetro 4 (analógico)	0,000	-	999,999
Parâmetro 5 (analógico)	0,000	-	999,999
Parâmetro 6 (analógico)	0,000	-	999,999
Parâmetro 7 (analógico)	0,000	-	999,999
Parâmetro 8 (analógico)	0,000	-	999,999
Parâmetro 9 (digital)	0	-	1
Parâmetro 10 (digital)	0	-	1
Parâmetro 11 (digital)	0	-	1
Parâmetro 12 (digital)	0	-	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Exceto a exclusão e posição das células utilizadas para apresentar os dados, não há restrição da utilização da planilha, podendo ser gerados gráficos estatísticos, células com formatação condicional e demais funções disponíveis no Excel, o que facilita bastante a análise dos parâmetros de processo.

### 4.3 Integração do Sistema

O sistema de monitoramento de parâmetros de processos utilizando a tecnologia LoRa®, foi implantada em uma fábrica que atua no ramo de papel e celulose na cidade de Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul. A máquina em que foi instalado um transmissor de 100 mW fica aproximadamente 80 metros distante da sala onde foi disposto o *gateway* da aplicação. O módulo transmissor faz a leitura de 4 parâmetros de vácuo a partir de sensores de modelo SPAB da Festo com saída analógica de 1 a

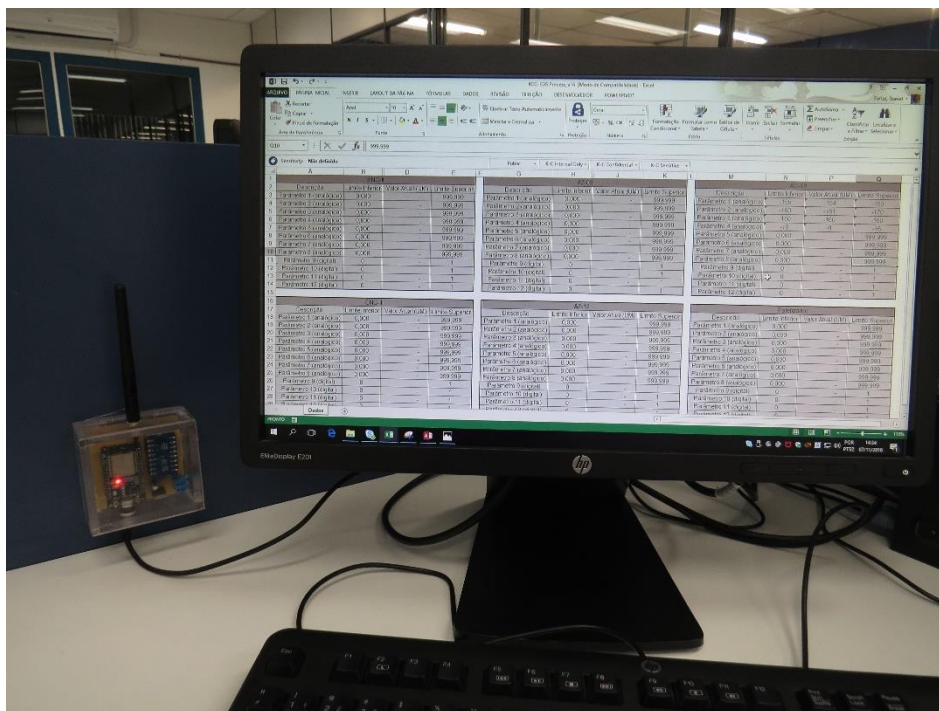
5 V que são convertidas linearmente de 0 a -1 bar. Os sensores e o módulo transmissor são alimentados por tensão de 24 V disponível em máquina. Proteções contra sobre tensão e corrente, assim como inversão de polaridade, foram testados em bancada antes da instalação dos módulos e não apresentaram problemas para a tensão disponível. Com à pouca distância, a transmissão do sinal até o *gateway* não apresentou perda de pacotes considerável, mesmo com ruído e interferências eletromecânicas geradas por dispositivos da máquina. Também foi instalado módulo transmissor de 500 mW em final de linha a uma distância de aproximadamente 120 m para monitorar 2 sensores de vácuo instalados em robô. Estes também tiveram bom desempenho em relação as informações enviadas e recebidas. A figura 24 mostra a instalação do transmissor de 100 mW em máquina e a figura 25 mostra a instalação do *gateway* no setor de engenharia de processo da planta.

Figura 24 – Local de instalação do módulo transmissor de 100 mW



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 – Local de instalação do gateway



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da disponibilização das informações de parâmetros da máquina em *host* conectado à rede corporativa interna, o acesso as informações da planilha Excel foram disponibilizadas aos demais computadores por meio de atalho de rede, sendo possível a consulta dos parâmetros a partir de outros computadores ligados à rede. Muitas características da rede implementada não puderam ser testadas na fábrica e serão apresentadas na seção 5 para validação da tecnologia aplicada.

## 5 TESTES E VALIDAÇÕES

A fim de testar a tecnologia LoRa®, seu protocolo LoRaWAN™ e o produto, esta seção apresenta os testes desenvolvidos com o intuito de validar sua aplicação na indústria de papel e celulose e demais áreas afins. Para os testes, foi definido o tamanho de 10 *bytes* da informação a ser transmitida, e tamanhos de parâmetros fixos de  $n_{preâmbulo} = 12$ , e  $CR = 4/5$ . De acordo com a equação 2.10, a tabela 7 apresenta uma relação do tempo no ar de pacotes variando-se o SF e BW.

Tabela 7 – Relação do tempo de pacote no ar com BW e SF

Largura de Banda (kHz)	Fator de Espalhamento	Tempo de Transmissão do pacote (ms)
125	7	50432
125	10	321536
125	12	1122304
250	7	25216
250	10	160768
250	12	561152
500	7	12608
500	10	80384
500	12	280576

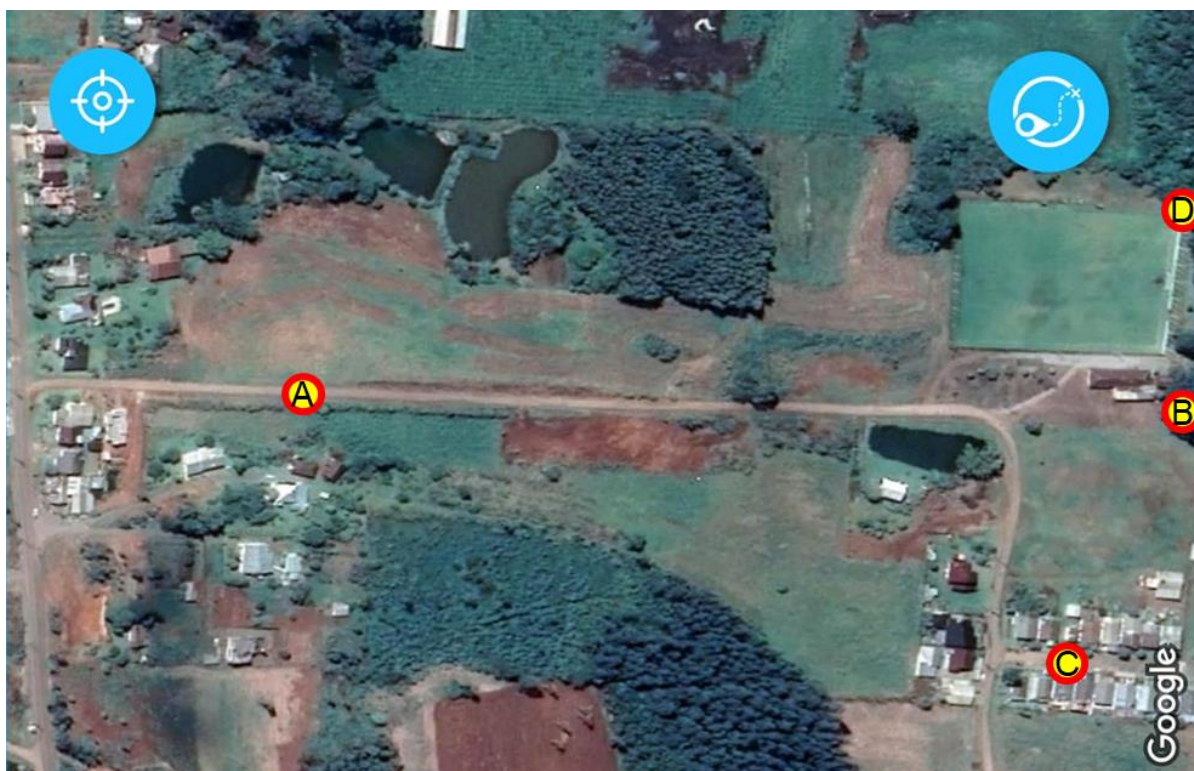
Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela mostra que quanto menor o BW, maior o tempo que a informação fica no ar e maior a distância que a informação percorre. O mesmo ocorre com SF, quanto maior, mais distância a informação percorre. Isto indica que se a aplicação requer ser transmitida em longo alcance, maior deverá ser o SF e menor o BW. Se a aplicação requer altas taxas de transmissão, menor o SF e maior o BW.

### 5.1 Perda de Pacotes

A figura 26 apresenta o local e os pontos onde transmissores e *gateway* foram dispostos para verificação de resultados.

Figura 26 – Área de testes da tecnologia



Fonte: Google Earth.

Na imagem são observadas marcações de A a D que representam os pontos de análise. A perda de pacote foi verificada de acordo com o incremento da distância considerando  $BW = 500$  kHz e  $SF = 7$  utilizados neste projeto. O ponto de partida para o teste é a verificação de quantos pacotes de 10 bytes são transmitidos em uma distância de poucos centímetros. Os testes mostram que em 1 minuto são transmitidos 905 pacotes, valor que será considerado 100% dos pacotes enviados. Variando-se distâncias e pontos de análise são obtidos os resultados apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Relação da perda de pacote com o incremento da distância

Pontos	Distância (m)	Pacotes recebidos transmissor 100 mW	Pacotes recebidos transmissor 500 mW
A→B	100	905	905
A→B	200	905	905
A→B	400	905	905
C→D	40	905	905
C→D	80	735	905
C→D	160	0	905
C→D	240	0	9

Fonte: Elaborado pelo autor.

O ponto A fica localizado em cima de um morro e a transmissão até o ponto B é feita de forma retilínea e sem nenhum obstáculo ao sinal, a distância de análise foi medida de 100 em 100 metros. Já o ponto C fica localizado no interior de uma residência e a transmissão até o ponto D não é feita de forma retilínea e requer passar barreiras como paredes de alvenaria, desníveis de relevo e árvores, a distância entre os pontos foi estimada pelo aplicativo *Google Earth*. A análise dos pontos A até B mostra que não houve nenhuma perda de pacote para os transmissores de 100 e 500 mW para envio direto do sinal, o que demonstra excelente aplicação da tecnologia para pontos sem obstáculos. Já a transmissão do ponto C até D mostra que os módulos transmissores utilizados não têm bom desempenho quanto a taxa de dados quando há barreiras ao sinal. Uma forma de superar estas barreiras e aumentar a distância de alcance do sinal é aumentar o SF e/ou diminuir o BW, fazendo com que o sinal fique no ar por mais tempo utilizando maior potência na transmissão.

## 5.2 Alcance

O teste de alcance visa a análise da tecnologia para distâncias superiores a aquelas apresentadas na tabela 8, onde a quantidade de pacotes enviados e recebidos não é prioridade. De forma prática, algumas das configurações apresentadas na tabela 7 foram avaliadas e apresentadas na tabela 9.

Tabela 9 – Relação da distância alcançada com alteração de BW e SF

BW (kHz)	SF	Distância LoRa® 500 mW (m)	Distância LoRa® 100 mW (m)
125	12	1380	1260
250	7	680	590
250	12	900	790
500	7	650	520

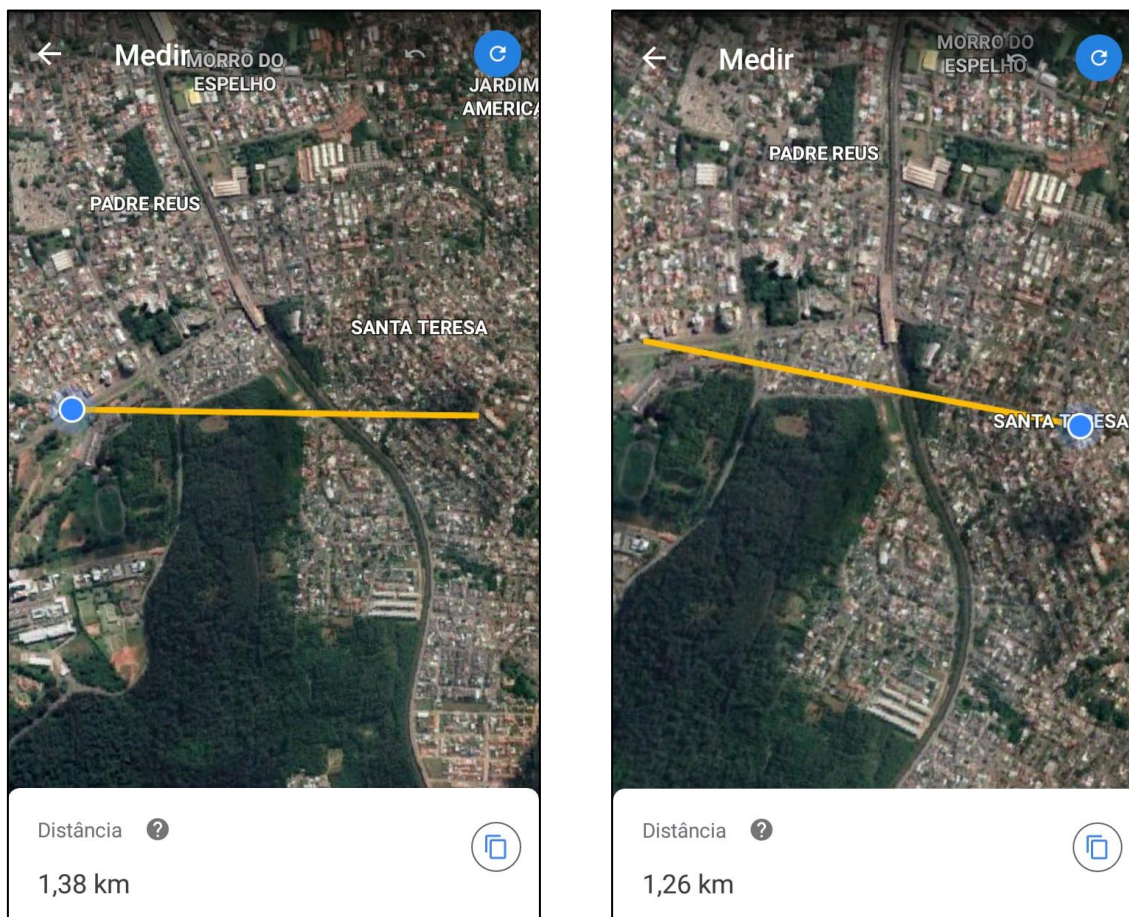
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pacotes de 10 *bytes* foram enviado pelos transmissores a cada 1 segundo. O *gateway* foi configurado para aceder um *led* cada vez que recebia um pacote, com isso, observou-se a maior distância de 1,38 km para o transmissor de 500 mW e de 1,26 km para o transmissor de 100 mW, ambos configurados para um SF de 12 e BW de 500 kHz. Os resultados das distâncias atingidas são coerentes com o tempo em



que o sinal a ser propagado fica no ar. A figura 27 apresenta a área e os pontos em que foram atingidas as maiores distâncias.

Figura 27 – Área para teste de distância



(a) Transmissor 500 mW

(b) Transmissor 100 mW

Fonte: Google Earth.

Para a realização dos testes os transmissores foram colocados em área externa e de fácil distribuição do sinal. Com o *gateway*, a região apresentado na figura 28 foi percorrida aumentando-se a distância até que não houve mais sinal. É importante observar que nem em todo o caminho houve o recebimento de sinal pelo *gateway* e que os pontos em que os sinais atingiram maior distância estavam localizados em pontos mais altos da região, assim como o transmissor.

## 6 CONCLUSÃO

Esta pesquisa levantou traços gerais de tecnologias aplicadas a *IoT* e discorre sobre suas limitações e utilização. Na etapa de definição da pesquisa, surgiram várias possibilidades que puderam cumprir com o objetivo do projeto, porém, analisando a tecnologia LoRa® e após bastante pesquisa, pude notar o potencial e as oportunidades que este trabalho poderia gerar, tanto no âmbito acadêmico como profissional. LoRa® é uma tendência mundial (e fascinante) de *IoT* que pode ser aplicado em diversas áreas como: médica, logística, segurança, cidades inteligentes e também na indústria com a comunicação *M2M*.

Todas as tecnologias LPWA estudadas tem como premissa o baixo consumo de energia, mas nem todas conseguem grande alcance ou infraestrutura robusta como SigFox® e LoRa®. Redes SigFox® são patenteadas, tem maior alcance e baixo custo de implementação, porém, cada dispositivo deve ser gerido por operadora e essa operação tem custo fixo que pode onerar o projeto, além de limitações de mensagens transmitidas e recebidas de acordo com o pacote contratado. A tecnologia LoRa®, também tem grande alcance, e com a vantagem de que seu protocolo LoRaWAN™ é aberto a comunidade, não possui limitação na quantidade de mensagens transmitidas e recebidas podendo ser “moldada” de acordo com a necessidade do usuário. Pode-se alterar fatores que influenciam na sensibilidade da transmissão e recepção do dado, taxa de envio, modo de operação e quantidade de transmissores ligados a um mesmo *gateway*.

Oportunizado pela aplicação prática da tecnologia LoRa® na própria área de atuação, com a criação de um protótipo de rede contendo transmissores, *gateway*, e sensores de vácuo, pude mostrar a viabilidade da aplicação em uma fábrica que atua na área de papel e celulose controlando e analisando parâmetros de processo. Foram realizados alguns testes onde se verificou a transmissão de dados de até quatro sensores. Em todos os testes foi utilizado a classe A de operação com o diferencial de alterar-se os modos de operação na classe para *standby mode* e *sleep mode* obtendo-se maior eficiência do sistema. Isto traz benefícios financeiros para a empresa, pois com o maior controle do processo evitamos custos por paradas e desgaste de um equipamento que poderia estar rodando fora das especificações de parâmetros, proporcionou-se aumento na qualidade do produto pela padronização do

processo e diminui-se a perda de tempo ao encontrar mais rapidamente um parâmetro que poderia alterar o comportamento da máquina. Isto mostrou a aplicabilidade do projeto na indústria em geral podendo ser adaptada de acordo com as necessidades da aplicação como alcance, taxa de dados e consumo de energia, o que traz um diferencial para esta tecnologia em comparação a tantas outras disponíveis para a Indústria 4.0.

Outro aspecto positivo foi a implantação da tecnologia a baixo custo. A partir da BOM apresentada nos apêndices C, F e I, podemos verificar o custo total dos módulos transmissores de 100 e 500 mW e *gateway* de 500 mW. Para uma rede com dois módulos transmissores com até 8 leituras analógicas e 4 digitais cada, podemos criar uma rede *wireless* totalmente funcional com menos de R\$ 500,00 em gastos com materiais, além de que toda a confecção e testes puderam ser feitos fora da máquina sem atrapalhar o processo produtivo.

Pontos negativos que podem ser citados da aplicação são a frequência utilizada e a perda de pacote em ambientes com obstrução do sinal. No Brasil, equipamentos que utilizam a tecnologia por espalhamento espectral devem utilizar as faixas de frequência entre 902 a 907,5 MHz e 915 a 928 MHz. Operando nestas faixas estão a comunicação de telefonia celular e de diversos outros equipamentos, isto torna LoRa® susceptível a interferências destes dispositivos. Além disso, por análises práticas, foi observado que com algum obstáculo os módulos transceptores da fabricante NICERF não tem bom desempenho nesta frequência.

Por fim, oportunidades de melhoria da aplicação foram observadas no decorrer do projeto. Algumas entradas no *hardware* dos transmissores tiveram que ser alterados devido à alta impedância dos sensores de vácuo utilizados nos testes práticos, havendo divisão de tensão com resistores de *pull down* na entrada dos módulos transmissores, o que poderia ser resolvido com chaves de seleção para leitura de equipamento de alta ou baixa impedância. Outra melhoria seria a utilização de *gateway* com mais canais, assim, a tecnologia não fica limitada ao sincronismo de dispositivos. Outro ponto é utilizar controladores com taxa de amostragem superior a 10 bits que foi utilizado nos transmissores, com isso a leitura seria mais precisa para aplicações críticas além de poder ler valores de tensão superiores. Os testes com alimentação por bateria de 9 V não puderam ser realizados, pois na implantação do projeto houve vários testes que alteram potência e consumo de energia, além do mais, uma definição final da instalação demorou para ocorrer.

## REFERÊNCIAS

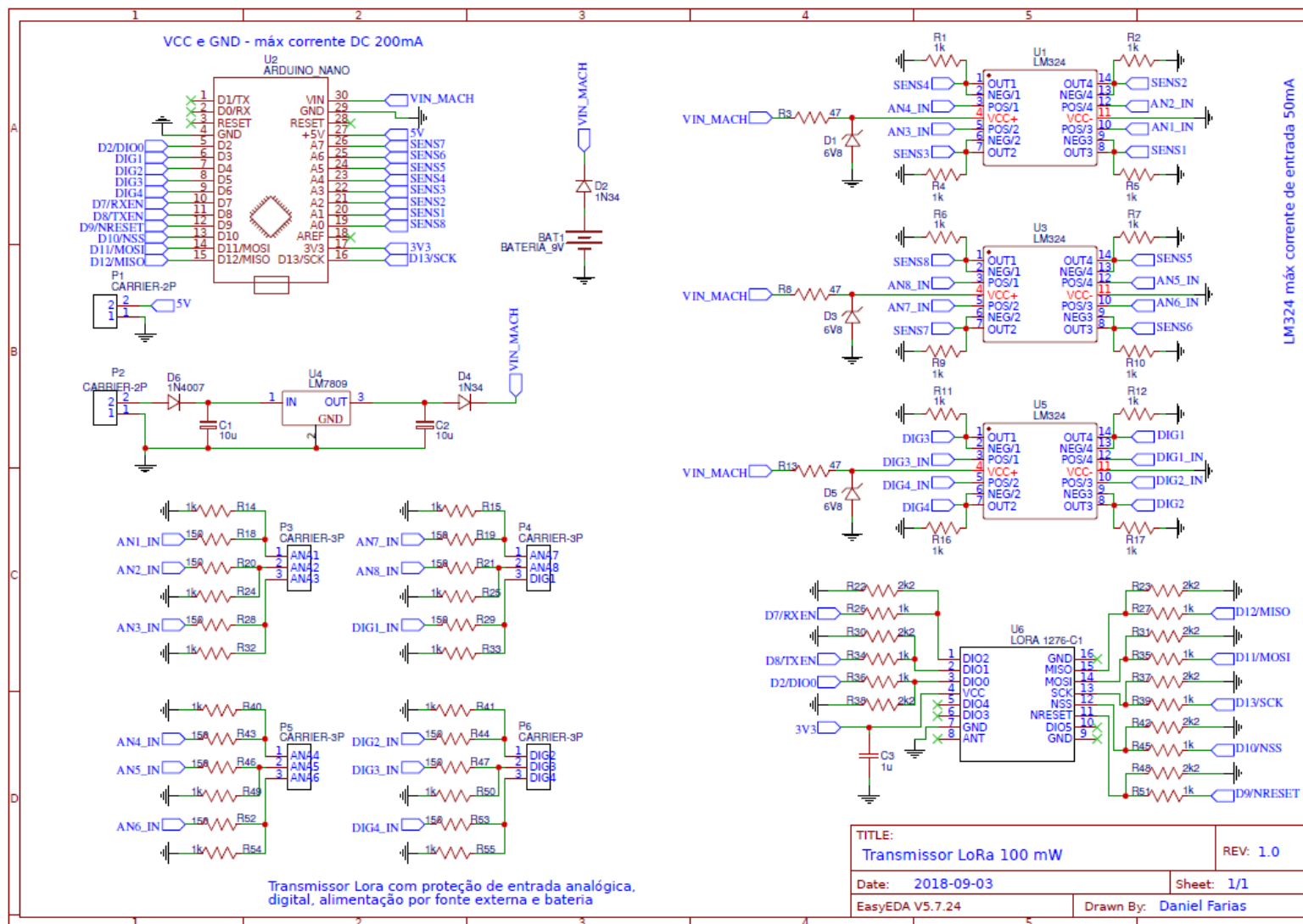
- [1] 1M2M. *Products*. 2018. Disponível em: <https://www.1m2m.eu/>. Acesso em: Junho de 2018.
- [2] ADELANTADO, F.; VILAJOSANA, X.; TUSET-PEIRO, P.; MARTINEZ, B.; Melia, J. *Understanding the limits of LoRaWANTM*, CoRR, vol. abs/1607.08011, 2016. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1607.08011>. Acesso em: Maio de 2018.
- [3] ALLIANCE, L. *LoRaWANTM 1.1 Specification*. 2017a: Disponível em: <https://LoRa-alliance.org/resource-hub/LoRaWAN™tm-specification-v11>. Acesso em: Abril de 2018.
- [4] ALLIANCE, L. *LoRaWANTM Regional Parameters v1.1rB* 2017b. Disponível em: <https://LoRa-alliance.org/resource-hub/LoRaWANtm-regional-parameters-v11rb>. Acesso em: Maio de 2018.
- [5] ALLIANCE, L. *LoRaWANTM SECURITY*. 2017: Disponível em: [https://docs.wixstatic.com/ugd/eccc1a\\_cc44304714c14f80a6ce50fc9fcee2a.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/eccc1a_cc44304714c14f80a6ce50fc9fcee2a.pdf). Acesso em: Março de 2018.
- [6] ALLIANCE, L. *LoRaWANTM What is it?*. 2015. Disponível em: [https://docs.wixstatic.com/ugd/eccc1a\\_ed71ea1cd969417493c74e4a13c55685.pdf](https://docs.wixstatic.com/ugd/eccc1a_ed71ea1cd969417493c74e4a13c55685.pdf). Acesso em Março de 2018.
- [7] ALLIANCE, L. *NB-IoT vs. LoRa® Technology*. 2016. Disponível em: <https://www.lora-alliance.org/portals/0/documents/whitepapers/LoRa-Alliance-Whitepaper NBloT vsLoRa.pdf>. Acesso em: Março de 2018.
- [8] ALLIANCE, L. *Organization*. 2018. Disponível em: <https://lora-alliance.org/>. Acesso em: Abril de 2018.
- [9] ANATEL. ATO Nº 14448, DE 04 DE DEZEMBRO DE 2017. Disponível em: <http://www.ncc.org.br/img/Ato%2014448.pdf>. Acesso em: Junho de 2018.
- [10] ANATEL. RESOLUÇÃO Nº 671, DE 3 DE NOVEMBRO DE 2016. Disponível em: <http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2016/911-resolu%C3%A7%C3%A3o-671>. Acesso em: Junho de 2018.
- [11] ARDUINO. Arduino NANO. 2018. Disponível em: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano>. Acesso em: Agosto de 2018.
- [12] 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: Junho de 2018.
- [13] CRYPTOID. Pecuária adere à Internet das Coisas. 2018. Disponível em: <https://cryptoid.com.br/banco-de-noticias/pecuaria-adere-internet-das-coisas/>. Acesso em: Junho de 2018.

- [14] DOIT, DOIT ESP32. 2017. Disponível em: <http://www.doit.am/>. Acesso em Setembro de 2018.
- [15] EMBRAPA. Agricultura de precisão no Brasil: avanços, dificuldades e impactos no manejo e conservação do solo, segurança alimentar e sustentabilidade. 2010. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/870646/agricultura-de-precisao-no-brasil-avancos-dificuldades-e-impactos-no-manejo-e-conservacao-do-solo-seguranca-alimentar-e-sustentabilidade>. Acesso em: Junho de 2018.
- [16] FESTO. *SPAB DATASHET*. 2017. Disponível em: [https://www.festo.com/cat/en-gb/data/doc\\_ENUS/PDF/US/SPAB\\_ENUS.PDF](https://www.festo.com/cat/en-gb/data/doc_ENUS/PDF/US/SPAB_ENUS.PDF). Acesso em: Agosto de 2018.
- [17] FINNEGAN, J.; BROWN, S. 2018. *A Comparative Survey of LPWA Networking*. 2018. Cornell University Library. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1802.04222>. Acesso em: Maio de 2018.
- [18] GARCIA, P; KLEINSCHMIDT, J. Tecnologias Emergentes de Conectividade na IoT: Estudo de redes LPWAN. Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2017. Disponível em: <http://www.sbrt.org.br/sbrt2017/anais/1570361881.pdf> Acesso em: Junho de 2018.
- [19] GILCHRIST, A. *Industry 4.0: The Industrial Internet of Things*. Apress, New York, 2016.
- [20] LOPYCOM. PoLy. 2018. Disponível em: <https://pycom.io>. Acesso em: Junho de 2018.
- [21] MACKAY, S; WRIGHT, E; REYNDERS, D; PARK, J. *Practical industrial data networks: design, installation & troubleshooting*, Lavoisier, France, 2003.
- [22] MAHMOUD, M. S.; MOHAMAD, A. A. et al. *A study of efficient power consumption wireless communication techniques/modules for internet of things (IoT) applications. Advances in Internet of Things*. 2016.
- [23] NEUMANN, P; MONTAVONT, J; NOEL, T. "Indoor deployment of lowpower wide area networks (LPWAN): A LoRaWAN™ case study," in Proc. IEEE 12th Int. Conf. Wireless Mobile Comput. Netw. Commun. (WiMob), New York, NY, USA, Oct. 2016, pp. 1–8.
- [24] NICERF. LoRa 1276-C1. 2018. Disponível em: <http://www.nicerf.com/>. Acesso em: Janeiro de 2018.
- [25] RAKWIRELESS. *Base on SX1301 LoRaWan Gateway Module*. 2018. Disponível em: <http://www.rakwireless.com/en/>. Acesso em: Maio de 2018.
- [26] RAZA, U.; KULKARNI, P.; SOORIYABANDARA, M. *Low power wide area networks: An overview*. IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 19, no. 2, pp. 855–873, 2nd Quart., 2017, doi: 10.1109/COMST.2017.2652320.
- [27] RODRIGUES, A. A nova geração das construções Inteligentes. 2018. Disponível em: <http://alertsystm.com.br>. Acesso em: Junho de 2018.

- [28] SARAIVA, L. Projeto de *hardware* e *software* para dispositivos finais em uma rede LoRaWAN™. 2017. Disponível em: [https://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/index.php/Projeto\\_de\\_hardware\\_e\\_software\\_para\\_dispositivos\\_finais\\_em\\_uma\\_rede\\_LoRaWAN](https://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/index.php/Projeto_de_hardware_e_software_para_dispositivos_finais_em_uma_rede_LoRaWAN). Acesso em: Março de 2018.
- [29] SCHNEIDER ELECTRIC. Redes de Comunicação Industrial. 2007. Disponível em: [https://www.schneider-electric.pt/documents/product-services/training/doctecnico\\_redes.pdf](https://www.schneider-electric.pt/documents/product-services/training/doctecnico_redes.pdf). Acesso em: Abril de 2018.
- [30] SCRIVANO, R. Grande indústria já adota fábrica inteligente. 2016. O Globo. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/grande-industria-ja-adota-fabrica-inteligente-20461261>. Acesso em: Junho de 2018.
- [31] SEMTECH. *AN1200.13 LoRa™ modem Designer's Guide*, Revision 1, July 2013. Disponível em: [https://www.semtech.com/uploads/documents/LoraDesignGuide\\_STD.pdf](https://www.semtech.com/uploads/documents/LoraDesignGuide_STD.pdf). Acesso em: Outubro de 2018.
- [32] SEMTECH. *AN1200.22 LoRa™ modulation basics*, Revision 2, May 2015a. Disponível em: <https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>. Acesso em: Maio de 2018.
- [33] SEMTECH. *SX1276 DATASHEET*. 2016. Disponível em: [https://www.semtech.com/uploads/documents/DS\\_SX1276-7-8-9\\_W\\_APP\\_V5.pdf](https://www.semtech.com/uploads/documents/DS_SX1276-7-8-9_W_APP_V5.pdf). Acesso em: Janeiro de 2018.
- [34] SEMTECH. *What is LoRa?* 2018. Disponível em: <https://www.semtech.com/technology/LoRa/what-is-LoRa>. Acesso em: Abril de 2018.
- [35] SONG, Y.; LIN, J.; TANG, M.; DONG, S. *An Internet of Energy Things Based on Wireless LPWAN*. Engineering. 2017; 3: 460-466. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.04.011>. Acesso em: Março de 2018.
- [36] TELECINTESE. Associação Brasileira de IoT se junta a LoRa Alliance. 2018. Disponível em: <http://www.telesintese.com.br/associacao-brasileira-de-iot-se-junta-lora-alliance/>. Acesso em: Junho de 2018.
- [37] TEXAS INSTRUMENTS. *LM324 DATASHEET*. 2015. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ds/snosc16d/snosc16d.pdf>. Acesso em: Agosto de 2018.
- [38] THE THINGS NETWORK FOUNDATION. *You are the network*. 2018. Disponível em: <https://www.thethingsnetwork.org/>. Acesso em: Junho de 2018.
- [39] TRANSPBRASIL. Logística 4.0: principais avanços e mudanças. 2018. Disponível em: <http://www.transpobrasil.com.br/2018/03/16/o-que-a-internet-das-coisas-muda-na-logistica/>. Acesso em: Junho de 2018.
- [40] VANGELISTA, L.; ZANELLA, A.; ZORZI, M. *Long-range IoT technologies: The dawn of LoRa, in Future Access Enablers for Ubiquitous and Intelligent Infrastructures*. Cham, Switzerland: Springer, 2015, pp. 51–58.

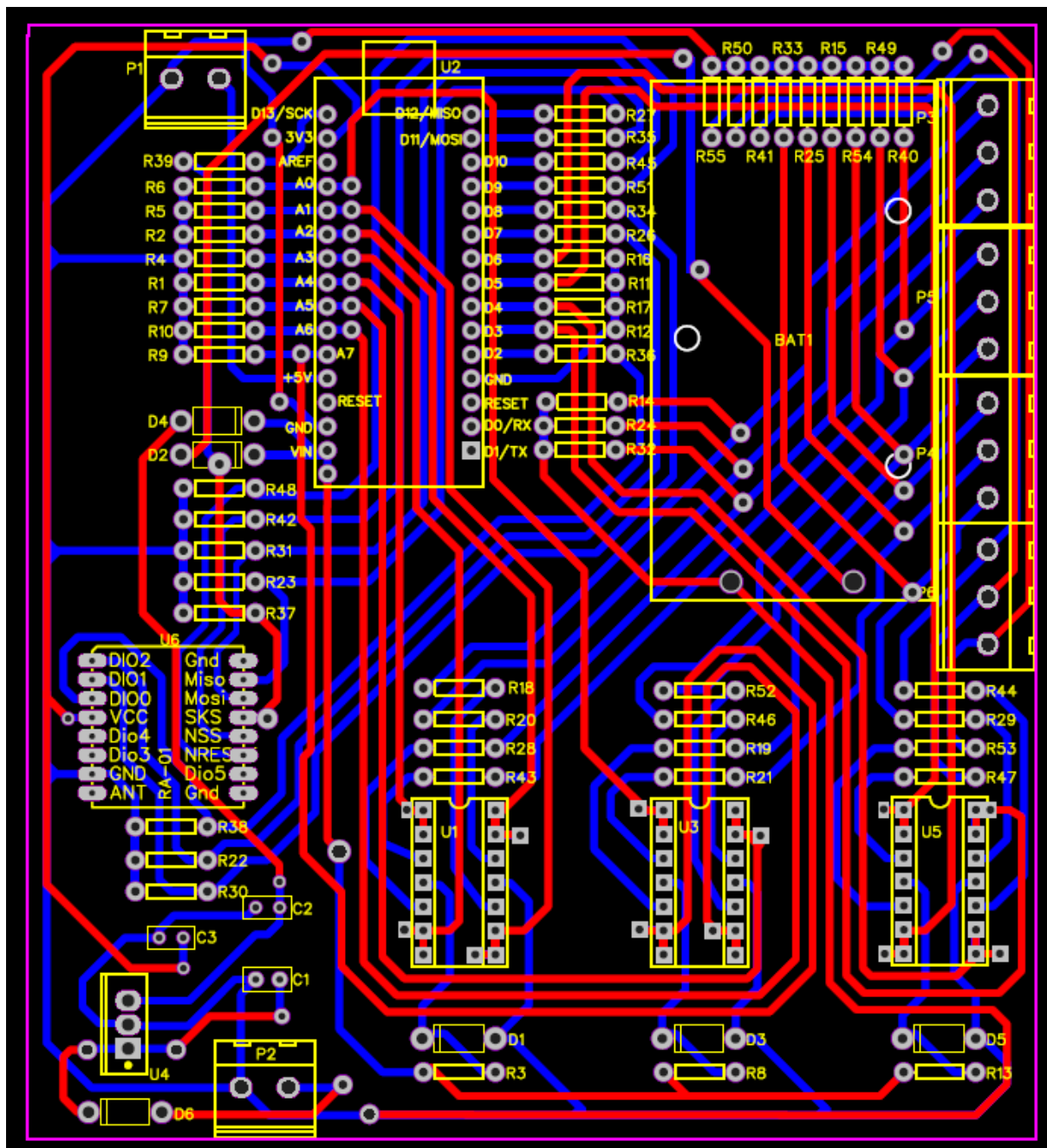
[41] WILLING, A.; MATHEUS, K.; WOLISZ, A. *Wireless technology in industrial networks*. Proc. IEEE, vol. 93, no. 6, pp. 1130–1151, Jun. 2005. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1435743/>. Acesso em: Abril de 2018.

## APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO DO *HARDWARE* DESENVOLVIDO PARA TRANSMISSOR 100 MW





APÊNDICE B – PCI DO *HARDWARE* DESENVOLVIDO PARA TRANSMISSOR  
100 MW

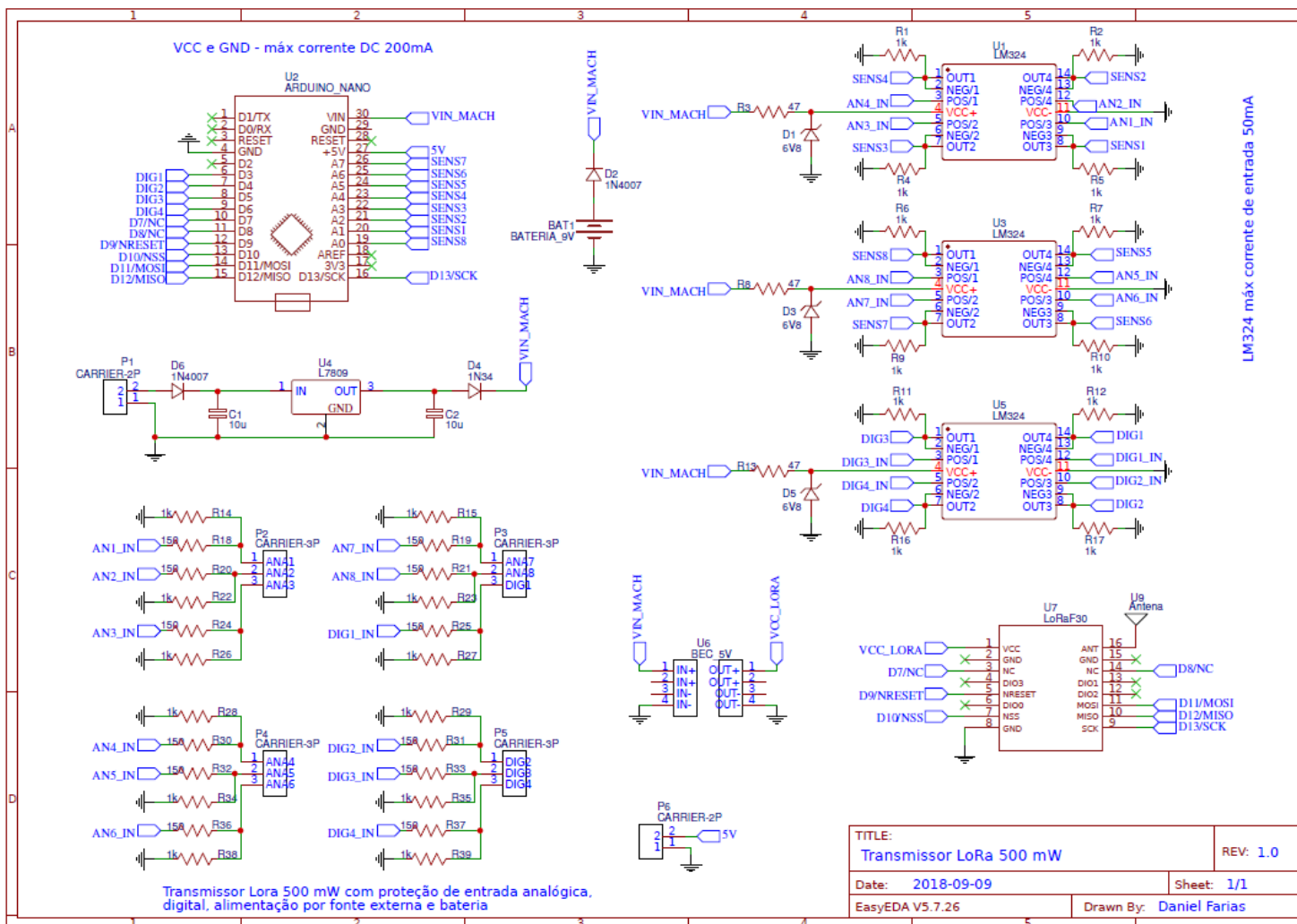


### APÊNDICE C – BOM DO *HARDWARE* DESENVOLVIDO PARA TRANSMISSOR 100 MW

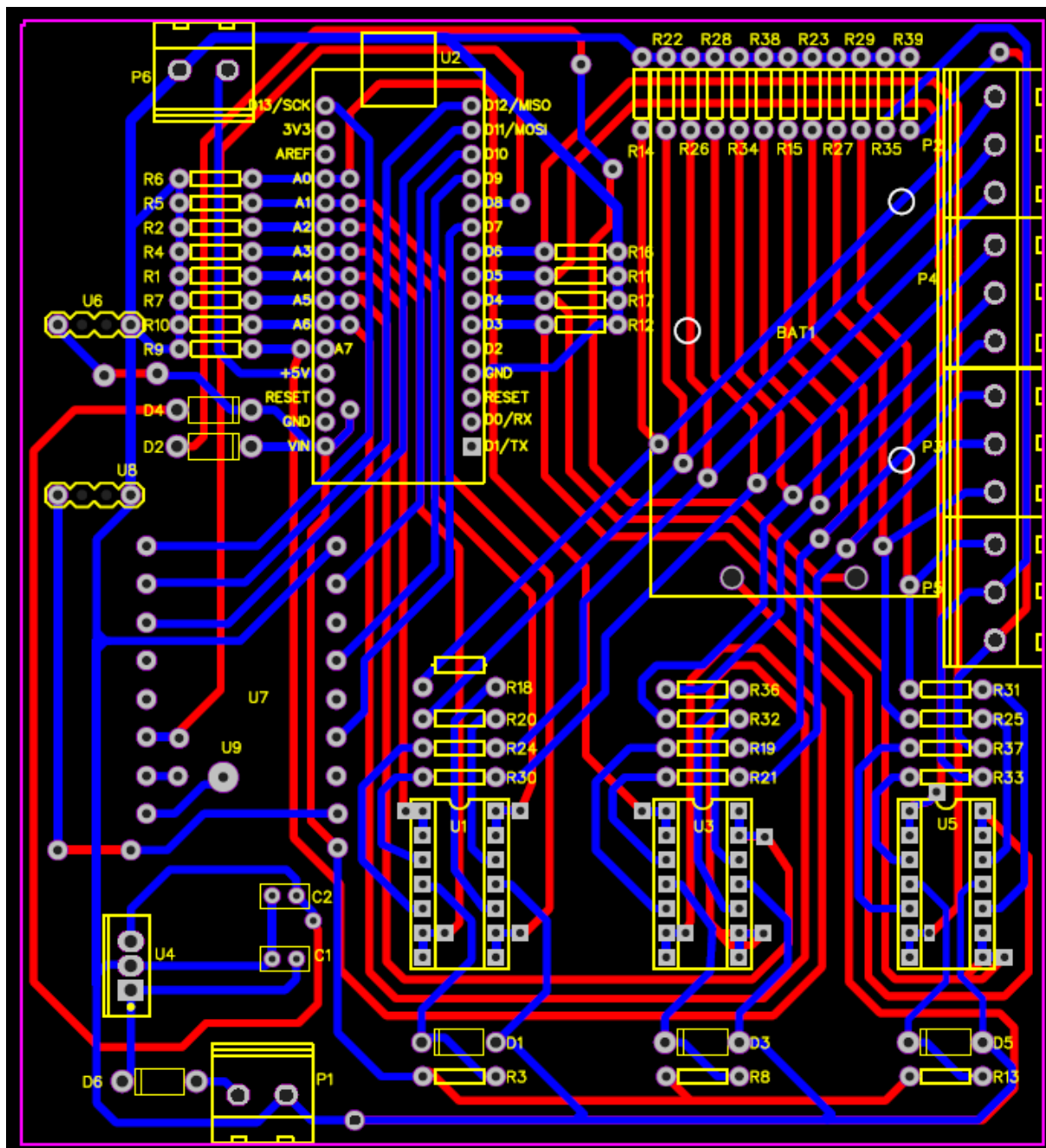
ID	Descrição	Referência	Quantida	Valor Unitário	Subtotal
1	NANO_COMPAT	U2	1	R\$ 8,42	R\$ 8,42
2	LORA 1276-C1	U6	1	R\$ 58,66	R\$ 58,66
3	Resistor 1k $\Omega$	R26,R34,R36,R27,R35,R39,R51,R45,R1,R2,R6,R7,R11, R12,R16,R17,R9, R10,R5,R4,R14,R32,R24,R15, R25,R33,R40,R49,R54,R41,R50,R55	32	R\$ 0,07	R\$ 2,24
4	Resistor 2k2 $\Omega$	R30,R22,R38,R23,R31,R37,R42,R48	8	R\$ 0,07	R\$ 0,56
5	LM7809	U4	1	R\$ 1,45	R\$ 1,45
6	CARRIER-2P	P2,P1	2	R\$ 0,55	R\$ 1,10
7	Capacitor 10uF	C2,C1	2	R\$ 0,09	R\$ 0,18
8	BATERIA_9V	BAT1	1	R\$ 28,03	R\$ 28,03
9	LM324	U1,U3,U5	3	R\$ 0,38	R\$ 1,14
10	Diodo Zener 6V8	D3,D1,D5	3	R\$ 0,10	R\$ 0,30
11	Resistor 47 $\Omega$	R8,R3,R13	3	R\$ 0,07	R\$ 0,21
12	Diodo Germânio 1N34	D2,D4	2	R\$ 7,41	R\$ 14,82
13	Capacitor 1uF	C3	1	R\$ 0,09	R\$ 0,09
14	CARRIER-3P	P5,P4,P6,P3	4	R\$ 0,77	R\$ 3,08
15	Resistor 150 $\Omega$	R18,R20,R28,R43,R46,R52,R44,R47,R53,R19,R21,R29	12	R\$ 0,07	R\$ 0,84
16	Diodo 1N4007	D6	1	R\$ 0,07	R\$ 0,07
17	CASE POLICARB		0,0546	R\$ 168,00	R\$ 9,17
18	PCI		1	R\$ 5,00	R\$ 5,00
				Total	R\$ 135,36

Fonte: Elaborado pelo autor

## APÊNDICE D – ESQUEMÁTICO DO *HARDWARE* DESENVOLVIDO PARA TRANSMISSOR 500 MW



APÊNDICE E – PCI DO *HARDWARE* DESENVOLVIDO PARA TRANSMISSOR  
500 MW

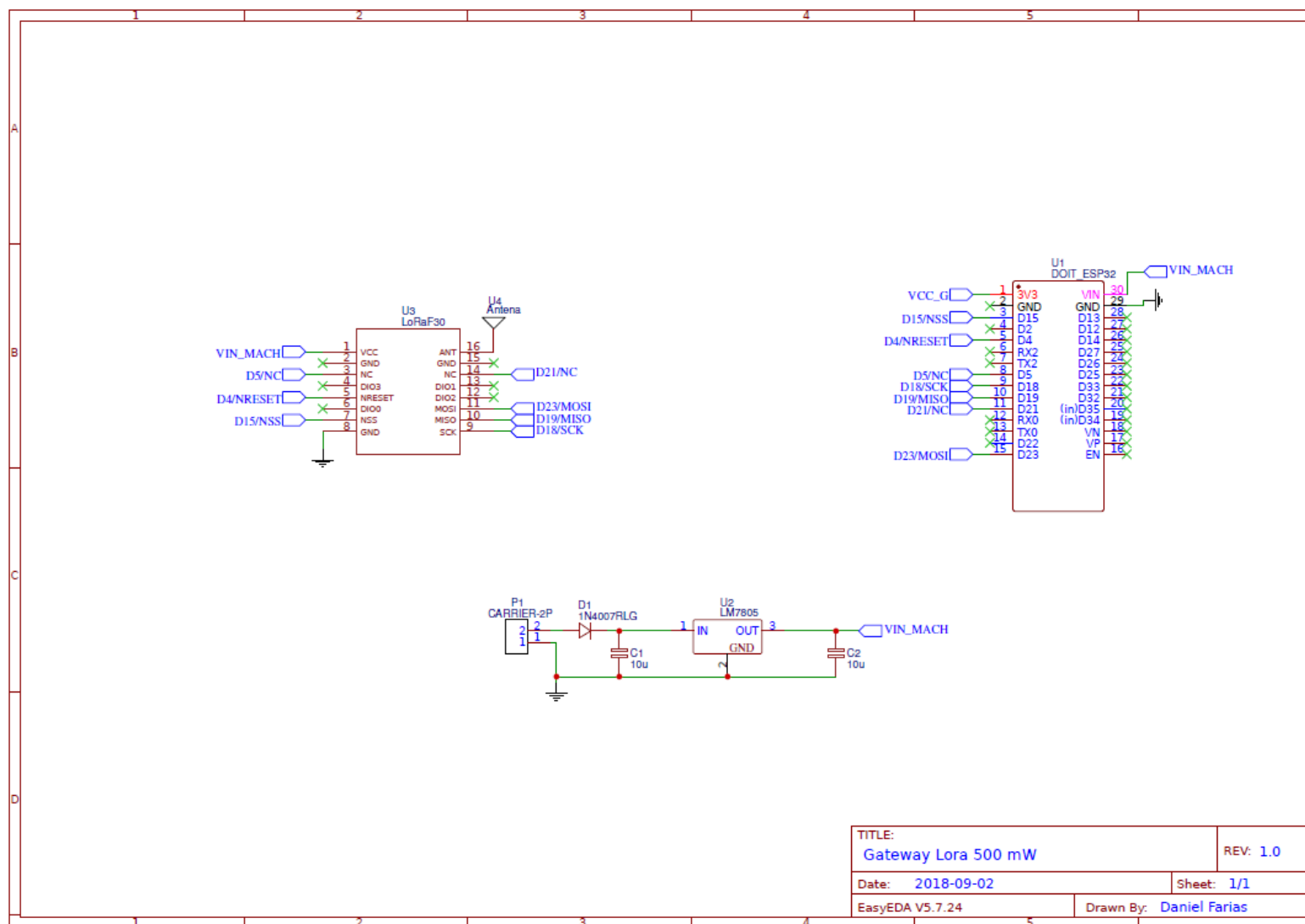


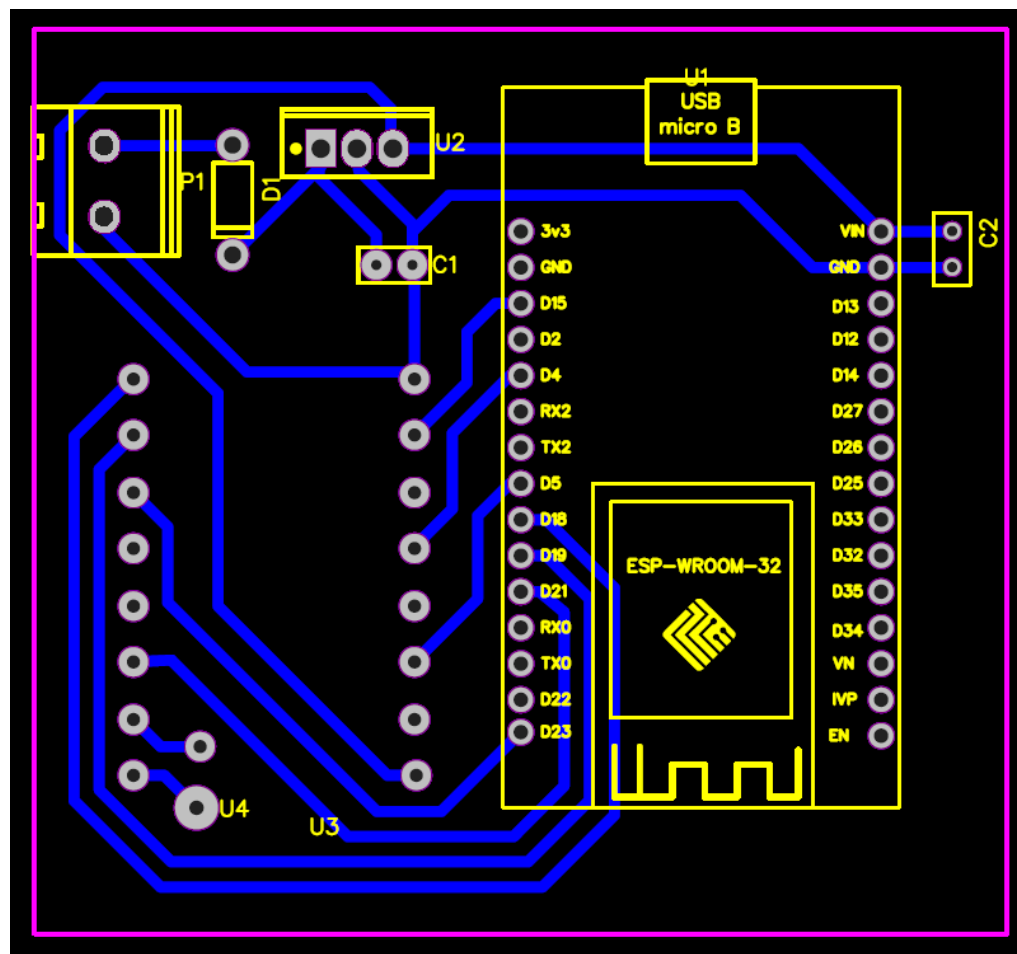
## APÊNDICE F – BOM DO *HARDWARE* DESENVOLVIDO PARA TRANSMISSOR 500 MW

ID	Descrição	Referência	Quantidade	Valor Unitário	Subtotal
1	CARRIER-3P	P4,P3,P5,P2	4	R\$ 0,77	R\$ 3,08
2	LM7809	U4	1	R\$ 1,45	R\$ 1,45
3	CARRIER-2P	P1,P6	2	R\$ 0,55	R\$ 1,10
4	Capacitor 10uF	C2,C1	2	R\$ 0,09	R\$ 0,18
5	BATERIA_9V	BAT1	1	R\$ 28,03	R\$ 28,03
6	LM324	U1,U3,U5	3	R\$ 0,38	R\$ 1,14
7	Resistor 150Ω	R18,R20,R24,R30,R32,R36,R31,R33,R37,R19,R21,R25	12	R\$ 0,07	R\$ 0,84
8	Diodo Zener 6V8	D3,D1,D5	3	R\$ 0,10	R\$ 0,30
9	Resistor 47Ω	R8,R3,R13	3	R\$ 0,07	R\$ 0,21
10	Diodo 1N4007	D2,D6	2	R\$ 0,07	R\$ 0,14
11	Diodo Germânio1N34	D4	1	R\$ 7,41	R\$ 7,41
12	Resistor 1kΩ	R1,R2,R6,R7,R11,R12,R16,R17,R9,R10,R5,R4,R14, R26,R22,R15,R23,R27,R28,R34,R38,R29,R35,R39	24	R\$ 0,07	R\$ 1,68
13	NANO_COMPAT	U2	1	R\$ 8,42	R\$ 8,42
14	LoRaF30	U7	1	R\$ 84,76	R\$ 84,76
15	PINHEADER1X4	U8	1		R\$ -
16	Regulador BEC_5V	U6	1	R\$ 10,39	R\$ 10,39
17	Antena 915MHz	U9	1		R\$ -
18	CASE POLICARB		0,0546	R\$ 168,00	R\$ 9,17
19	PCI		1	R\$ 5,00	R\$ 5,00
				Total	R\$ 163,30

Fonte: Elaborado pelo autor

## APÊNDICE G – ESQUEMÁTICO DO *HARDWARE* DESENVOLVIDO PARA GATEWAY 500 MW



APÊNDICE H – PCI DO *HARDWARE* DESENVOLVIDO PARA GATEWAY 500 MW

**APÊNDICE I – BOM DO *HARDWARE* DESENVOLVIDO PARA GATEWAY 500 MW**

ID	Descrição	Referência	Quantidade	Preço Unitário	Subtotal
1	DOIT_ESP32	U1	1	R\$ 21,41	R\$ 21,41
2	LM7805	U2	1	R\$ 0,89	R\$ 0,89
3	CARRIER-2P	P1	1	R\$ 1,10	R\$ 1,10
4	Capacitor 10uF	C2,C1	2	R\$ 0,09	R\$ 0,18
5	LoRaF30	U3	1	R\$ 84,76	R\$ 84,76
6	Diodo 1N4007	D1	1	R\$ 0,07	R\$ 0,07
7	Antena 915 MHz	U4	1	R\$ -	R\$ -
8	CASE POLICARB		0,0096	R\$ 168,00	R\$ 1,61
9	PCI		1	R\$ 5,00	R\$ 5,00
				<b>Total</b>	<b>R\$ 115,02</b>

Fonte: Elaborado pelo autor



## APÊNDICE J – DIAGRAMA DE BLOCOS DO APP DESENVOLVIDO

