

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO  
Programa de Pós-Graduação em  
Computação Aplicada

Dissertação de Mestrado

**ANÁLISE DE TÉCNICAS DE  
MACHINE LEARNING APLICADAS  
PARA GEOLOCALIZAÇÃO LORA**

DARLAN TOMAZONI CAVALLI



**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA**

**ANÁLISE DE TÉCNICAS DE MACHINE  
LEARNING APLICADAS PARA  
GEOLOCALIZAÇÃO LORA**

**Darlan Tomazoni Cavalli**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Computação Aplicada na Universidade de Passo Fundo.

**Orientador: Prof. Carlos Amaral Hölbig**

Passo Fundo  
2021

CIP – Catalogação na Publicação

---

C377a Cavalli, Darlan Tomazoni  
Análise técnica da machine learning aplicadas para  
geolocalização LoRa [recurso eletrônico] / Darlan  
Tomazoni Cavalli. – 2021.  
11 MB ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Amaral Hölbig.  
Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) –  
Universidade de Passo Fundo, 2021.

1. Computação. 2. Protocolo LoRaWAN. 3. Sistemas  
de comunicação sem fio. 4. Redes neurais (Computação).  
5. Sistema de Posicionamento Global. I. Hölbig, Carlos  
Amaral, orientador. II. Título.

CDU: 004.738.5

---

Catalogação: Bibliotecária Juliana Langaro Silveira – CRB 10/2427

## ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DO ACADÊMICO

### DARLAN TOMAZONI CAVALLI

Aos dezenove dias do mês de março do ano de dois mil e vinte e um, às 14 horas, realizou-se, de forma on-line, por meio de videoconferência, a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso “Análise de Técnicas de Machine Learning Aplicadas para Geolocalização LoRa”, de autoria de Darlan Tomazoni Cavalli, acadêmico do Curso de Mestrado em Computação Aplicada do Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada – PPGCA. Segundo as informações prestadas pelo Conselho de Pós-Graduação e constantes nos arquivos da Secretaria do PPGCA, o aluno preencheu os requisitos necessários para submeter seu trabalho à avaliação. A banca examinadora foi composta pelos doutores Carlos Amaral Hölbig (orientador), Alexandre Lazaretti Zanatta (UPF), Willingthon Pavan (UPF) e Paulo Sérgio Sausen (UNIJUÍ). Concluídos os trabalhos de apresentação e arguição, a banca examinadora considerou o candidato **APROVADO**. Foi concedido o prazo de até quarenta e cinco (45) dias, conforme Regimento do PPGCA, para o acadêmico apresentar ao Conselho de Pós-Graduação o trabalho em sua redação definitiva, a fim de que sejam feitos os encaminhamentos necessários à emissão do Diploma de Mestre em Computação Aplicada. Para constar, foi lavrada a presente ata, que vai assinada pelos membros da banca examinadora e pela Coordenação do PPGCA.



Prof. Dr. Carlos Amaral Hölbig – UPF  
Presidente da Banca Examinadora  
(Orientador)



Prof. Dr. Alexandre Lazaretti Zanatta – UPF  
(Avaliador Interno)



p.p.  
Prof. Dr. Willingthon Pavan – UPF  
(Avaliador Interno)



p.p.  
Prof. Dr. Paulo Sérgio Sausen – UNIJUÍ  
(Avaliador Externo)



Prof. Dr. Carlos Amaral Hölbig  
Coordenador do PPGCA

# ANÁLISE DE TÉCNICAS DE MACHINE LEARNING APLICADAS PARA GEOLOCALIZAÇÃO LORA

## RESUMO

LoRa é um sistema de comunicação wireless de longo alcance e de baixa potência que suporta geolocalização nativa, por meio da análise dos metadados da rede, sem a necessidade de outras tecnologias de geolocalização (e.g. GPS). Uma solução comercial dessa funcionalidade é oferecida pelo serviço proprietário *LoRa Cloud Geolocation*, baseado em algoritmos convencionais de multilateração, cujo pré-requisito é a recepção das transmissões de cada dispositivo por, no mínimo, três gateways simultaneamente. Entretanto, a baixa acurácia é a principal limitação inerente à geolocalização LoRa nativa, que pode variar entre 20 m e 2.000 m. O mapeamento sistemático realizado neste trabalho revelou que 40% dos estudos utilizaram algum tipo de técnica de machine learning com o intuito geral de melhorar os níveis de acurácia, das quais as redes neurais artificiais destacam-se pela afinidade com as não linearidades e demais complexidades de propagação do sinal LoRa. Observou-se, porém, uma escassez de estudos que validem a abordagem de redes neurais com dados provenientes de redes LoRaWAN reais. Tendo isso em vista são testados uma série de modelos básicos de redes neurais densas (DNN), baseados no conceito de geolocalização por *fingerprinting*, valendo-se de metadados provenientes de dispositivos estacionários de uma rede LoRaWAN profissional-privada, que cobre a área urbana de uma cidade de aproximadamente 200 mil habitantes. A implementação é caracterizada por uma série de adversidades típicas para a geolocalização nativa, tais como baixa quantidade de gateways, grande parcela de uplinks com menos de três gateways receptores, e parâmetro *Adaptive Data Rate* (ADR) habilitado. Como resultado constata-se que, apesar desse conjunto de adversidades e da arquitetura básica dos modelos de redes neurais utilizados, foi possível estimar as coordenadas geográficas dos dispositivos com uma acurácia média equivalente à do serviço proprietário *LoRa Cloud Geolocation*, inclusive para dispositivos com menos de três gateways receptores, o que aponta para uma vantagem em relação à multilateração convencional.

Palavras-Chave: LoRa, geolocalização, machine learning, redes neurais.

# ANALYSIS OF MACHINE LEARNING TECHNIQUES APPLIED TO THE LORA GEOLOCATION

## ABSTRACT

LoRa is a long-range, low-power wireless communication system that supports native geolocation, by analysis of the network metadata, without other geolocation technologies (e.g. GPS). A commercial solution for this functionality is offered by the proprietary service LoRa Cloud Geolocation, based on conventional multilateration algorithms, whose prerequisite is the reception of transmissions from each device by at least three gateways simultaneously. However, the low accuracy is the main limitation inherent to native LoRa geolocation, which can vary between 20 m and 2.000 m. The systematic mapping realized in this work revealed that 40% of papers used some type of machine learning technique with the general aim to improve the accuracy, in which the artificial neural networks stand out for their affinity to the non-linearities and other propagation complexities of LoRa signal. Still, there is a scarcity of studies that validate the neural network approach with data from real LoRaWAN networks. With this in mind, a series of basic models of Dense Neural Networks (DNN) are tested, based on the concept of geolocation by fingerprinting, using metadata from stationary devices of a private-professional LoRaWAN network, that covers the urban area of a city of approximately 200 thousand inhabitants. The implementation is characterized by several typical adversities to native geolocation, such as the low number of gateways, the large share of uplinks with less than three receiving gateways, and the enabled Adaptive Data Rate (ADR) parameter. As result, it is verified that, despite this set of adversities and the basic architecture of the neural network models used, it was possible to estimate the geographical coordinates of the devices with an average accuracy equivalent to that of the proprietary service LoRa Cloud Geolocation, even for devices with less than three receiving gateways, which points to an advantage over conventional multilateration.

Keywords: LoRa, geolocation, machine learning, neural networks.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Número de dispositivos conectados mundialmente . . . . .	16
Figura 2.	Contexto de operação das redes LPWAN . . . . .	17
Figura 3.	Pilha de protocolos IoT . . . . .	17
Figura 4.	Modulações em espectro estreito e em espectro disperso . . . . .	20
Figura 5.	Modulação do sinal LoRa . . . . .	20
Figura 6.	Comparação entre <i>spreading factors</i> . . . . .	21
Figura 7.	Arquitetura da rede LoRaWAN . . . . .	21
Figura 8.	Comparação entre as modulações OFDMA e SC-FDMA . . . . .	22
Figura 9.	Opções de uso do espectro para NB-IoT . . . . .	23
Figura 10.	Pilha de protocolos da tecnologia NB-IoT . . . . .	23
Figura 11.	Fluxo de comunicação da tecnologia NB-IoT . . . . .	24
Figura 12.	Distribuição dos canais de uplink Sigfox . . . . .	24
Figura 13.	Arquitetura de rede Sigfox . . . . .	25
Figura 14.	Perfil técnico das tecnologias Sigfox, NB-IoT e LoRa . . . . .	26
Figura 15.	Perspectiva de mercado das principais tecnologias LPWAN . . . . .	27
Figura 16.	Camadas do protocolo LoRaWAN . . . . .	27
Figura 17.	Fluxo de comunicação das classes A, B e C . . . . .	28
Figura 18.	Canais de frequência LoRa para AU-915 . . . . .	29
Figura 19.	Perfil da comunicação entre end-device e Network Server . . . . .	31
Figura 20.	Formato dos frames LoRa . . . . .	33
Figura 21.	Princípio da geolocalização por multilateração . . . . .	35
Figura 22.	Comparativo entre tecnologias de geolocalização . . . . .	36
Figura 23.	Relação fundamental entre RSSI e distância . . . . .	36
Figura 24.	Demonstração gráfica do SNR positivo . . . . .	37
Figura 25.	Princípio da geolocalização por TDoA . . . . .	38
Figura 26.	Efeito de 10% de incerteza nas medições de TDoA . . . . .	39
Figura 27.	Número de estudos <i>versus</i> ano de publicação . . . . .	47
Figura 28.	Distribuição dos níveis de acurácia obtidos nos estudos . . . . .	50
Figura 29.	Contexto hierárquico das redes neurais . . . . .	56
Figura 30.	Arquitetura típica de uma rede neural DNN . . . . .	56
Figura 31.	Funções de ativação mais utilizadas em redes neurais . . . . .	57

Figura 32.	Rede LoRaWAN implantada na cidade de Passo Fundo – RS . . . .	65
Figura 33.	Aspecto visual do hardware implantado . . . . .	65
Figura 34.	Diagramas de irradiação da antena <i>Yagi-Array</i> . . . . .	66
Figura 35.	Número de mensagens por end-device . . . . .	69
Figura 36.	Plano cartesiano definido para os modelos DNN-2 . . . . .	73
Figura 37.	Malha discreta definida para os modelos DNN-3 . . . . .	74
Figura 38.	MAE de validação dos modelos DNN-1 e DNN-2 . . . . .	77
Figura 39.	MAE de validação dos modelos DNN-3 e DNN-4 . . . . .	78



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Principais parâmetros e restrições da tecnologia Sigfox . . . . .	25
Tabela 2.	Resumo técnico sobre as tecnologias LoRa, NB-IoT e Sigfox . . . . .	26
Tabela 3.	<i>Data rates</i> em AU-915 . . . . .	30
Tabela 4.	Tamanho máximo de bytes para AU-915 . . . . .	33
Tabela 5.	Planos de assinatura para o serviço <i>LoRa Cloud</i> . . . . .	40
Tabela 6.	Protocolo de mapeamento sistemático adotado . . . . .	43
Tabela 7.	Total de estudos resultantes do mapeamento sistemático . . . . .	45
Tabela 8.	Mapa sistemático das técnicas de geolocalização LoRa . . . . .	46
Tabela 9.	Mapa sistemático das técnicas de machine learning . . . . .	51
Tabela 10.	Informações de instalação e de funcionamento dos end-devices . .	66
Tabela 11.	Informações de instalação dos gateways . . . . .	66
Tabela 12.	Visão geral das variáveis e do conteúdo do dataset . . . . .	68
Tabela 13.	Número de mensagens <i>versus</i> número de gateways receptores . .	68
Tabela 14.	Fluxo de trabalho para deep learning proposto . . . . .	70
Tabela 15.	Modelos de redes neurais abordados . . . . .	71
Tabela 16.	Datasets de treinamento/validação e de teste . . . . .	72
Tabela 17.	Resultados da geolocalização <i>LoRa Cloud</i> . . . . .	75
Tabela 18.	Níveis de acurácia resultantes dos modelos de redes neurais . . . .	75

## LISTA DE SIGLAS

3GPP – *3rd Generation Partnership Project*  
ABP – *Activation by Personalization*  
ACK – *Acknowledgment*  
ADR – *Adaptive Data Rate*  
AES – *Advanced Encryption Standard*  
ANN – *Artificial Neural Network*  
AOA – *Angle of Arrival*  
API – *Application Programming Interface*  
AWS – *Amazon Web Services*  
BPSK – *Binary Phase Shift Keying*  
BW – *Bandwidth*  
CNN – *Convolutional Neural Network*  
CRC – *Cyclic Redundancy Check*  
CSS – *Chirp Spread Spectrum*  
DL – *Deep learning*  
DR – *Data Rate*  
DNN – *Dense Neural Network ou Deep Neural Network*  
EIRP – *Effective Isotropically Radiated Power*  
ETSI – *European Telecommunications Standards Institute*  
FP – *Fingerprinting*  
GFSK – *Gaussian Frequency Shift Keying*  
GNSS – *Global Navigation Satellite System*  
GPS – *Global Positioning System*  
GSM – *Global System for Mobile Communications*  
IDE – *Integrated Development Environment*  
IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers*  
IOT – *Internet of Things*  
ISM – *Industrial, Scientific and Medical*  
KNN – *k-Nearest Neighbors*  
LCG – *LoRa Cloud Geolocation*  
LORA – *Long Range*

LORAWAN – *Long Range Wide Area Network*  
LOS – *Line-of-sight*  
LPWAN – *Low Power Wide Area Network*  
LSTM – *Long Short Term Memory*  
LTE – *Long Term Evolution*  
LTE-M – *Long Term Evolution for Machines*  
M2M – *Machine-to-machine*  
MAC – *Medium Access Control*  
MAE – *Mean Absolute Error*  
M-BUS – *Meter-Bus*  
ML – *Machine learning*  
MSE – *Mean Squared Error*  
NA – *Not available*  
NB-IOT – *Narrowband-Internet of Things*  
OFDMA – *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*  
OTAA – *Over-the-Air Activation*  
PLM – *Path-Loss Model*  
POA – *Phase of Arrival*  
QPSK – *Quadrature Phase Shift Keying*  
RELU – *Rectified Linear Unit*  
RMSE – *Root Mean Square Error*  
RNN – *Recurrent Neural Network*  
RSSI – *Received Signal Strength Indicator*  
SC-FDMA – *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*  
SF – *Spreading Factor*  
SGD – *Stochastic Gradient Descent*  
SNR – *Signal-to-Noise Ratio*  
SVR – *Support Vector Regression*  
TDOA – *Time Difference of Arrival*  
TOA – *Time of Arrival*  
WSN – *Wireless Sensor Network*

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTOS DA TECNOLOGIA LORA</b> .....	<b>16</b>
2.1	TECNOLOGIAS LPWAN .....	16
2.1.1	<b>Principais propriedades</b> .....	18
2.1.1.1	Longo alcance .....	18
2.1.1.2	Baixa potência .....	18
2.1.1.3	Baixa taxa de dados .....	18
2.1.1.4	Baixo custo .....	19
2.1.2	<b>Principais implementações</b> .....	19
2.1.2.1	LoRa .....	19
2.1.2.2	NB-IoT .....	22
2.1.2.3	Sigfox .....	24
2.1.3	<b>Comparativo entre LoRa, NB-IoT e Sigfox</b> .....	25
2.2	PROTOCOLO LORAWAN .....	27
2.2.1	<b>Classes de operação</b> .....	28
2.2.2	<b>Parâmetros regionais</b> .....	29
2.2.3	<b><i>Data Rate e Adaptive Data Rate</i></b> .....	30
2.2.4	<b>Tipos de ativação</b> .....	31
2.2.4.1	Ativação ABP .....	31
2.2.4.2	Ativação OTAA .....	32
2.2.5	<b>Formato dos frames</b> .....	32
2.3	GEOLOCALIZAÇÃO LORA PROPRIETÁRIA .....	34
2.3.1	<b>Fundamentos da multilateração</b> .....	35
2.3.1.1	Multilateração por RSSI .....	35
2.3.1.2	Multilateração por TDoA .....	37
2.3.2	<b>Aplicabilidade</b> .....	38
2.3.3	<b><i>LoRa Cloud Geolocation</i></b> .....	39
<b>3</b>	<b>TÉCNICAS DE GEOLOCALIZAÇÃO PARA TECNOLOGIA LORA: UM MA- PEAMENTO SISTEMÁTICO</b> .....	<b>42</b>
3.1	RESUMO .....	42

3.2	INTRODUÇÃO .....	42
3.3	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO .....	43
3.3.1	<b>Questão de pesquisa</b> .....	43
3.3.2	<b>Execução da pesquisa</b> .....	44
3.3.3	<b>Triagem dos artigos</b> .....	44
3.3.4	<b>Classificação e mapeamento</b> .....	45
3.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	45
3.4.1	<b>Técnicas de geolocalização</b> .....	46
3.4.2	<b>Modelos e abordagens computacionais</b> .....	48
3.4.2.1	Abordagens principais .....	48
3.4.2.2	Abordagens complementares .....	49
3.4.3	<b>Tipos de experimentação e níveis de acurácia</b> .....	50
3.4.4	<b>Técnicas de machine learning</b> .....	51
3.5	CONCLUSÃO .....	52
4	<b>GEOLOCALIZAÇÃO LORA UTILIZANDO TÉCNICAS DE MACHINE LEARNING</b> .....	<b>53</b>
4.1	RESUMO .....	53
4.2	INTRODUÇÃO .....	53
4.3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	54
4.3.1	<b>RSSI-<i>fingerprinting</i></b> .....	54
4.3.2	<b>Redes neurais</b> .....	55
4.3.2.1	Princípio de funcionamento .....	55
4.3.2.2	Função de ativação .....	57
4.3.2.3	Tipos de redes .....	57
4.3.2.4	Algoritmo de otimização e funções de perda .....	58
4.3.2.5	Pré-processamento e métricas de sucesso .....	59
4.3.2.6	Hiperparâmetros .....	60
4.4	TRABALHOS RELACIONADOS .....	61
4.4.1	<b>Trabalhos simulados ou em ambientes restritos</b> .....	61
4.4.2	<b>Trabalhos em ambientes reais de aplicação</b> .....	62
4.5	MATERIAL E MÉTODOS .....	64
4.5.1	<b>Rede LoRaWAN utilizada</b> .....	64
4.5.2	<b>Dataset utilizado</b> .....	67
4.5.3	<b><i>Baseline</i></b> .....	69

4.5.4	<b>Modelos de redes neurais utilizados</b>	70
4.5.4.1	Modelos DNN-1	72
4.5.4.2	Modelos DNN-2	72
4.5.4.3	Modelos DNN-3	73
4.5.4.4	Modelos DNN-4	73
4.6	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	74
4.6.1	<b>Resultados da <i>baseline</i></b>	74
4.6.2	<b>Resultados dos modelos DNN</b>	75
4.7	<b>CONCLUSÃO</b>	79
5	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	80
	<b>REFERÊNCIAS</b>	82



## 1. INTRODUÇÃO

*Long Range* (LoRa) é um sistema de comunicação wireless de baixa potência e longo alcance que, além das suas funções principais de conectividade, possui suporte nativo para geolocalização. Isso significa que a posição dos dispositivos pode ser obtida por meio da análise dos metadados produzidos pela própria rede, sem a necessidade de outras tecnologias, tais como *Global Positioning System* (GPS) ou *Global Navigation Satellite System* (GNSS). A principal vantagem dessa funcionalidade extra é a sua natural compatibilidade com os requisitos de baixa potência e baixo custo que caracterizam as redes *Low Power Wide Area Network* (LPWAN), porém, a sua desvantagem mais marcante é a baixa acurácia – nominalmente, de 20-200 m, mas que pode ser maior que 1 km, dependendo da técnica utilizada, das características da rede e do ambiente de propagação do sinal. Apesar das limitações, a geolocalização LoRa nativa possui um importante potencial de aplicação, especialmente quando a precisão geográfica e as atualizações em tempo real não são exigências críticas, e.g., na supervisão técnica de dispositivos estacionários e em alguns tipos de rastreamento e logística.

A principal solução disponível atualmente é o serviço *LoRa Cloud Geolocation* (LCG), desenvolvido pela Semtech Corporation, que também é a proprietária da tecnologia LoRa. Esse serviço utiliza técnicas e modelos tradicionais de multilateração do sinal para o cálculo das coordenadas geográficas. O pré-requisito obrigatório é que cada mensagem transmitida pelo dispositivo a ser localizado seja recebida simultaneamente por, no mínimo, três gateways, caso contrário o cálculo da geolocalização não é possível. Além disso, o serviço depende de uma alta concentração de gateways, equipados com relógios de alta precisão, para que os níveis de acurácia se aproximem do limiar inferior de 20 m. Não há, portanto, um atendimento satisfatório desse serviço para infraestruturas LoRaWAN que não apresentam essas características, como é o caso de redes privadas de pequeno porte e de redes em que a instalação de gateways adicionais não é economicamente justificável.

Esse contexto, associado ao complexo padrão de propagação do sinal LoRa nos ambientes típicos de operação, levam à proposta da utilização de redes neurais artificiais como uma das técnicas de machine learning mais promissoras e como uma alternativa à multilateração convencional. A geolocalização por *fingerprinting*, baseada em mapeamento e caracterização empíricos da área de cobertura, pode ser automatizada por meio de aprendizado computacional, onde o “mapa” resultante é armazenado no interior de redes neurais, com a vantagem de ser facilmente atualizado a partir de novas rodadas de treinamento. O propósito central é melhorar os níveis de acurácia sem aumentar a complexidade da infraestrutura de gateways.

Neste trabalho são testadas uma série de redes neurais densas (DNN) como solução proposta para a geolocalização LoRa nativa, valendo-se de metadados obtidos de uma rede LoRaWAN profissional-privada implantada na área urbana da cidade de Passo Fundo – RS. Trata-se de uma proposta relevante, principalmente diante da escassez de trabalhos acadêmicos que validem a abordagem de redes neurais com metadados reais, sobretudo levando em consideração as adversidades típicas resultantes de uma implementação LoRaWAN real. A finalidade é comparar os níveis de acurácia resultantes de cada modelo testado, tendo como *baseline* o serviço LCG, além de constatar se a localização de dispositivos com menos de três gateways receptores é possível.

O restante deste documento está estruturado da forma a seguir. No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica da tecnologia LoRa, das redes LoRaWAN e da geolocalização LoRa proprietária (LCG); no Capítulo 3 é apresentado o mapeamento sistemático realizado sobre as principais técnicas de geolocalização utilizadas em LoRa; e no Capítulo 4 são relatados a metodologia e os resultados obtidos da aplicação dos modelos de redes neurais propostos no problema. Ambos os capítulos 3 e 4 são elaborados em formato de artigo científico. Por fim, as considerações finais são apresentadas no Capítulo 5.

## 2. FUNDAMENTOS DA TECNOLOGIA LORA

Na última década, o crescimento acelerado do mercado de internet das coisas (IoT) tem impulsionado o desenvolvimento de uma série de tecnologias disruptivas no campo das telecomunicações digitais. Em 2020, pela primeira vez, estima-se que o número de conexões IoT superou o número de conexões convencionais (smartphones, laptops e computadores) no mundo [1]. São 11,7 bilhões de dispositivos IoT ativos, e a expectativa é que essa marca ultrapasse os 30 bilhões em 2025 (Figura 1). Vale ressaltar que as comunicações IoT seguem a concepção *machine-to-machine* (M2M), ou seja, não são orientadas para a interação humana, mas para a comunicação de toda sorte de dispositivos, equipamentos e serviços que possuem a alcunha de “inteligentes”.

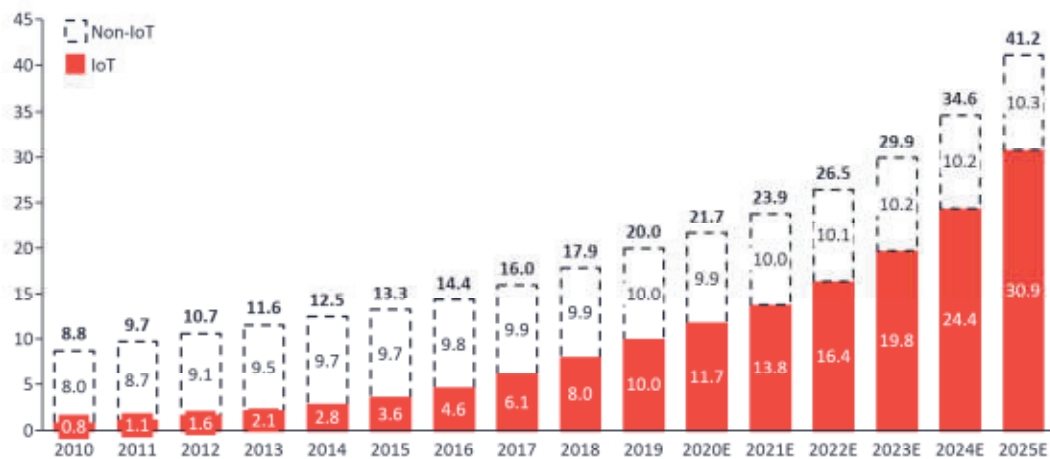


Figura 1. Número de dispositivos conectados mundialmente.  
Fonte: Adaptado de [1].

Tendo isso em vista, este capítulo é estruturado da seguinte forma: na Seção 2.1 é apresentada uma breve contextualização das tecnologias *Low Power Wide Area Network* – *LPWAN*; na Seção 2.2 são apresentadas as principais características técnicas do protocolo LoRaWAN; e na Seção 2.3 as principais propriedades do serviço proprietário de geolocalização LoRa.

### 2.1 TECNOLOGIAS LPWAN

Com o expressivo desenvolvimento das comunicações digitais, várias tecnologias wireless adquiriram escala comercial, tais como Bluetooth, ZigBee, celular (3G/4G), Wi-Fi, entre outras [2]. No entanto, nenhuma dessas tecnologias mostram-se satisfatórias diante dos requisitos da comunicação IoT. Aproveitando-se desse nicho, as redes *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) passaram a integrar o rol de tecnologias wireless a partir de 2013,

ano em que o próprio termo “LPWAN” foi cunhado [3], dando origem a uma categoria totalmente nova de comunicações sem fio. Na Figura 2 é apresentada uma contextualização das tecnologias LPWAN no campo das telecomunicações digitais, destinada especificamente para comunicações de longo alcance e de baixa taxa de transferência de dados.

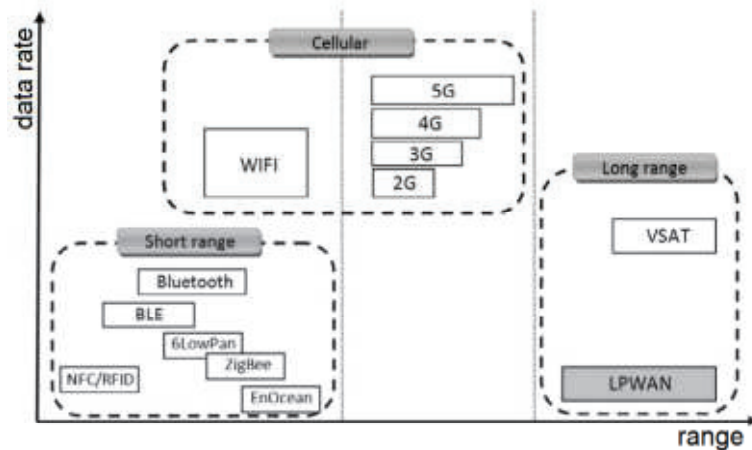


Figura 2. Contexto de operação das redes LPWAN.  
Fonte: Adaptado de [2].

A pilha de protocolos IoT é apresentada na Figura 3. Na camada física, as redes LPWAN são compostas por estações base denominadas “gateways” e por dispositivos denominados “end-devices”. As mensagens que trafegam dos end-devices para os gateways são chamadas de uplinks, e as que trafegam no sentido contrário, de downlinks. Na camada mais abstrata operam tanto as aplicações IoT quanto o protocolo de gerenciamento da rede.

<i>TCP/IP</i>	<i>IOT applications</i>	<i>Device Management</i>
<i>Data Format</i>	<i>Binary, JSON, CBOR</i>	
<i>Application Layer</i>	<i>CoAP, MQTT, XMPP, AMPQP</i>	
<i>Transport Layer</i>	<i>UDP, DTLS</i>	
<i>Internet Layer</i>	<i>IPv6/IP Routing</i>	
	<i>6LOWPAN</i>	
<i>Network/Link Layer</i>	<i>IEEE 802.15.4 MAC</i>	
	<i>IEEE 802.15.4 PHY / Physical Radio</i>	

Figura 3. Pilha de protocolos IoT.  
Fonte: Disponível em <https://nicolaswindpassinger.com/iot-stack-heading>.

## 2.1.1 Principais propriedades

As tecnologias LPWAN são caracterizadas por quatro propriedades principais e interdependentes: longo alcance, baixa potência, baixa taxa de transferência de dados e baixo custo [2]. Os itens a seguir apresentam uma breve explicação de cada uma dessas propriedades.

### 2.1.1.1 Longo alcance

Via de regra, dispositivos LPWAN podem transmitir sinais em até 15 km em áreas rurais e 5 km em áreas urbanas densas [4]. O longo alcance é devido, principalmente, à grande sensibilidade de recepção dos módulos, possível devido à reduzida largura de banda desse tipo de sinal. Enquanto a sensibilidade máxima de receptores Wi-Fi, por exemplo, é de -95 dBm [5], a sensibilidade de módulos LPWAN ultrapassa -130 dBm [6].

### 2.1.1.2 Baixa potência

Os módulos LPWAN são projetados para consumir uma quantidade ultra baixa de energia. São destinados para dispositivos alimentados a bateria, cuja autonomia deve ser, convencionalmente, da ordem de dez anos, sem recarga ou substituição [2]. Para que isso se cumpra, a aplicação embarcada no dispositivo deve gerenciar cuidadosamente a sua atividade, mantendo-se em modo ocioso na maior parte do tempo. Um critério típico é utilizar um ciclo de trabalho máximo de 1% (para cada 36 segundos de atividade, 1 hora em modo ocioso).

### 2.1.1.3 Baixa taxa de dados

Para que o longo alcance e a baixa potência sejam possíveis, conseqüentemente a taxa de dados é reduzida: entre 100 bps e 200 kbps, dependendo do tipo de tecnologia [2]. Por essa razão, as comunicações LPWAN são destinadas ao envio de pacotes com poucos bytes de tamanho, ou seja, são próprias para dados de sensores, beacons e alguns tipos de comandos remotos. A baixa taxa de dados resulta em largura de banda mais estreita, o que permite uma densidade maior de canais no espectro de frequências.

#### 2.1.1.4 Baixo custo

O hardware, também chamado de módulo ou *transceiver* LPWAN, assim como o custo anual de operação por dispositivo, custa poucos dólares [2]. O baixo custo é imprescindível no mercado LPWAN, que normalmente pressupõe conexões em massa e escalabilidade dos dispositivos. Aqui, estabelece-se a relação antagônica entre custo e escala como um dos fatores mais importantes no projeto de dispositivos LPWAN.

### 2.1.2 Principais implementações

As principais implementações LPWAN existentes no mercado são três: LoRa, NB-IoT e Sigfox. São tecnologias concorrentes, todas com suas vantagens e desvantagens que dependem do tipo de aplicação. Os itens a seguir abordam as principais características de cada uma.

#### 2.1.2.1 LoRa

LoRa, acrônimo para *Long Range*, é marca registrada da Semtech Corporation<sup>1</sup>. Utiliza uma técnica de modulação em espectro disperso, derivada da modulação *Chirp Spread Spectrum* (CSS), cuja origem remonta às aplicações militares da década de 1940, muito empregada em razão de suas propriedades de longo alcance e de robustez à interferências, sendo LoRa a sua primeira implementação de baixo custo para uso comercial [3]. Ao contrário do tipo de modulação em banda estreita, caracterizada por um sobressalto na forma de um pico (Figura 4), na modulação em espectro disperso a mesma densidade de potência está distribuída em uma faixa maior de frequências, podendo estar totalmente abaixo da linha de ruído. As vantagens são a possibilidade de coexistência com outros sinais e maior imunidade à interferências, enquanto as desvantagens são maior ocupação de banda e maior complexidade.

A tecnologia LoRa utiliza faixas de frequência não licenciadas, gratuitas, também conhecidas como bandas de uso industrial, científico e médico (ISM), reservadas internacionalmente para este fim. O sinal LoRa consiste em uma sequência de pulsos de frequência (*chirps*), similares à forma de onda dente-de-serra (Figura 5). São rampas periódicas cuja frequência percorre linearmente o intervalo entre uma frequência mínima  $f_{low}$  e uma frequência máxima  $f_{high}$ . A modulação dos símbolos de informação ocorre por variações nas discontinuidades desses pulsos.

Cada pulso pode codificar entre 7 e 12 bits, parâmetro este denominado *Spreading Factor* (SF), ou fator de espalhamento [7]. Trata-se de um dos principais parâmetros da

<sup>1</sup><https://www.semtech.com/>



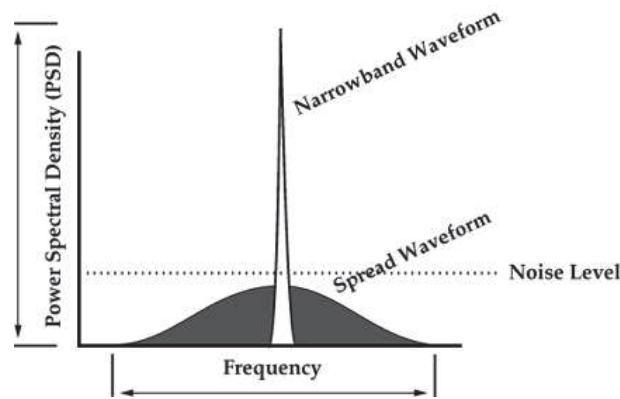
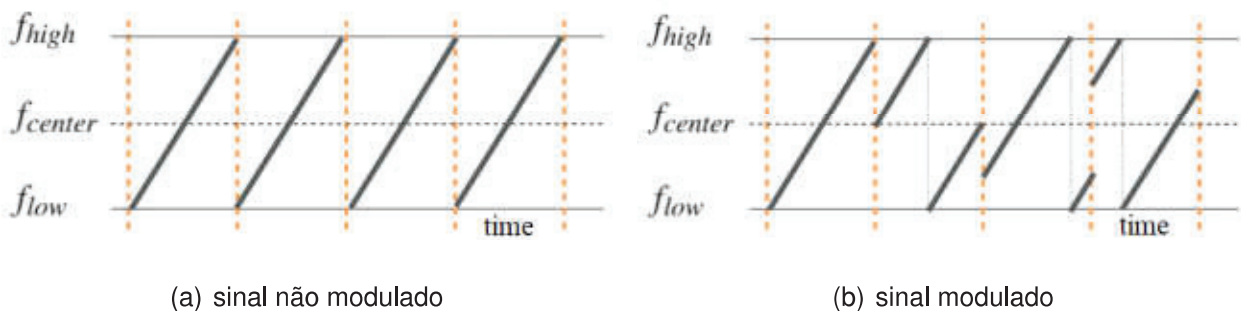


Figura 4. Modulações em espectro estreito e em espectro disperso.

Fonte: Disponível em <https://www.qsl.net/n9zia/ss.qexss.html>.



(a) sinal não modulado

(b) sinal modulado

Figura 5. Modulação do sinal LoRa.

Fonte: Disponível em <https://lora.readthedocs.io/en/latest/>.

modulação LoRa, pois impacta diretamente na dinâmica de comunicação: quanto maior, mais longos e menos íngremes são os *chirps*, menor é a taxa de dados e maior é o alcance do sinal.

Outro parâmetro básico é a largura de banda (ou *bandwidth* – BW), que pode ser de 125, 250 ou 500 kHz. Trata-se do intervalo de variação dos chirps ( $f_{high} - f_{low}$ ). Na Figura 6, é apresentada uma comparação entre fatores de espalhamento combinados com diferentes larguras de banda.

A taxa de transferência de dados  $R_b$ , portanto, depende de SF, BW, e de um terceiro parâmetro, denominado taxa de código  $N_{CR}$  (Equação 1) [9]. Este último corresponde ao número de bits de redundância enviados, que pode variar de 0 a 4, mas cujo valor padrão no plano AU-915<sup>2</sup> é 1.

$$R_b = (SF)(CR) \left( \frac{BW}{2^{SF}} \right) = SF \left( \frac{4}{4 + N_{CR}} \right) \left( \frac{BW}{2^{SF}} \right) \text{ bps} \quad (1)$$

As redes LoRaWAN possuem topologia do tipo estrela-de-estrelas, onde os gateways funcionam como encaminhadores de pacotes entre os end-devices e um Network Server central no *backend* (Figura 7) [7]. A conexão entre os gateways e o Network Ser-

<sup>2</sup>Ver Seção 2.2.2.

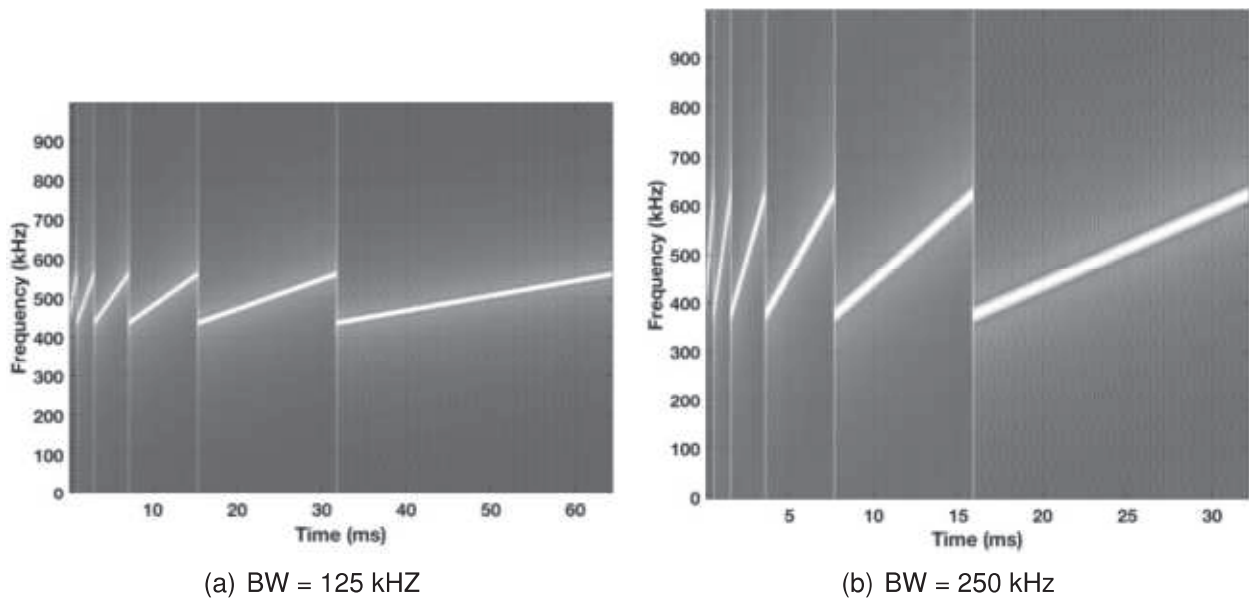


Figura 6. Comparação entre *spreading factors*.  
Fonte: Adaptado de [8].

ver é via conexão IP comum. Nota-se que os end-devices não estão associados a um gateway em específico, em vez disso, um uplink transmitido normalmente é recebido por vários gateways. Os end-devices podem transmitir em qualquer canal de frequência disponível e a qualquer momento, desde que observados os parâmetros regionais e a mudança pseudo-aleatória de canais e da periodicidade de cada transmissão. O Network Server é o elemento central, responsável por gerenciar a rede LoRaWAN de maneira otimizada, por estabelecer a troca de pacotes com os respectivos servidores de aplicação, e por controlar automaticamente parâmetros como fator de espalhamento, largura de banda e potência de transmissão em cada end-device individualmente.

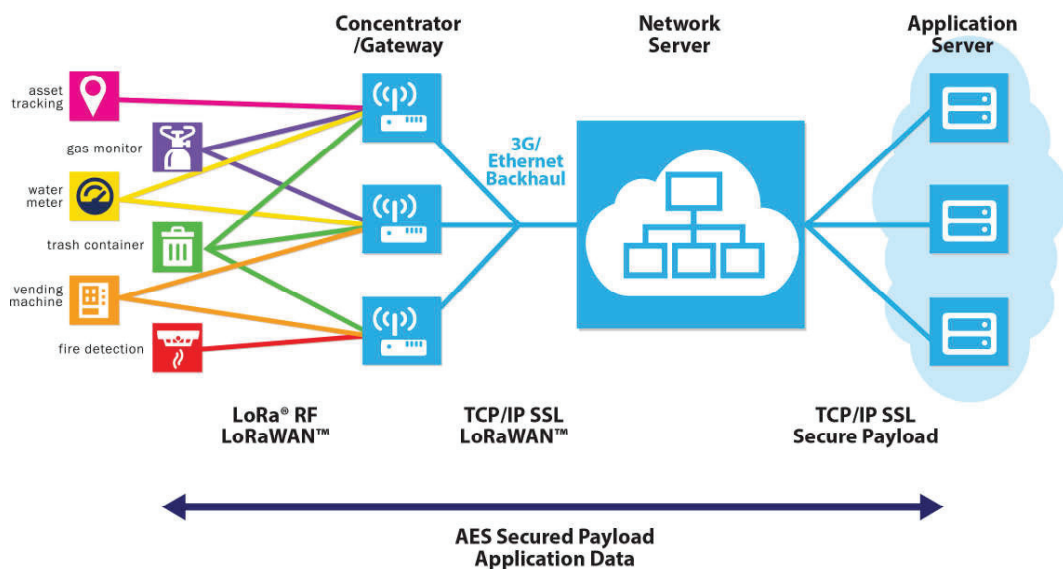


Figura 7. Arquitetura da rede LoRaWAN.  
Fonte: Adaptado de [10].

O protocolo de comunicação LoRaWAN é o algoritmo que estabelece a conectividade entre o Network Server e os end-devices. Será abordado com maiores detalhes na Seção 2.2.

### 2.1.2.2 NB-IoT

NB-IoT (*Narrowband Internet of Things*) é uma tecnologia desenvolvida pelo *3rd Generation Partnership Project (3GPP)*, comitê que define as padronizações das comunicações móveis. Teve origem em junho de 2016, como parte do seu 13º lançamento. Deriva da remoção de uma série de funcionalidades do padrão 4G *Long Term Evolution (LTE)*, e pode coexistir com a tecnologia legada 2G – ou *Global System for Mobile Communications (GSM)* [3].

A tecnologia NB-IoT opera em faixas de frequência licenciadas, não gratuitas, com modulação *Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)*. Utiliza uma única portadora com banda estreita de 200 kHz, daí a designação “*narrowband*”. Cada portadora possui um total de 12 subportadoras de 15 kHz para uplink e downlink, com a alternativa de até 48 subportadoras de 3,75 kHz para uplink em casos específicos. As subportadoras de uplink são multiplexadas por *Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)*, e as subportadoras de downlink são multiplexadas por *Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)*, cujo princípio de funcionamento está apresentado na Figura 8.

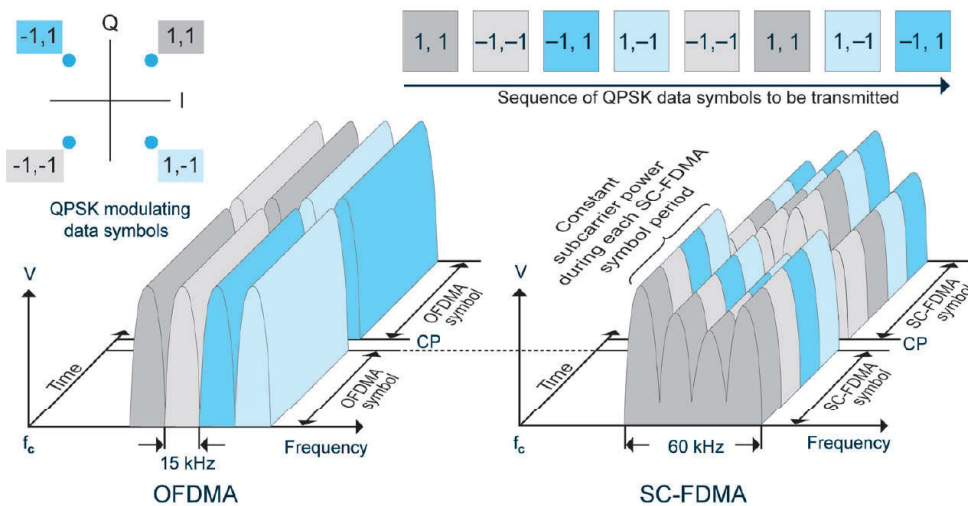


Figura 8. Comparação entre as modulações OFDMA e SC-FDMA [11].

Há três tipos de implementação da tecnologia: em banda independente (*standalone*), em banda interna (*in-band*) e em banda de guarda (*guard band*), conforme ilustrado na Figura 9. No primeiro tipo ocorre a substituição de uma portadora GSM pela portadora NB-IoT. Na implementação em banda interna, a portadora NB-IoT é sobreposta a uma portadora LTE, e na implementação em banda de guarda, a mesma é alocada entre duas

portadoras LTE. Isso é possível porque a tecnologia NB-IoT é projetada para coexistir com esse padrão.

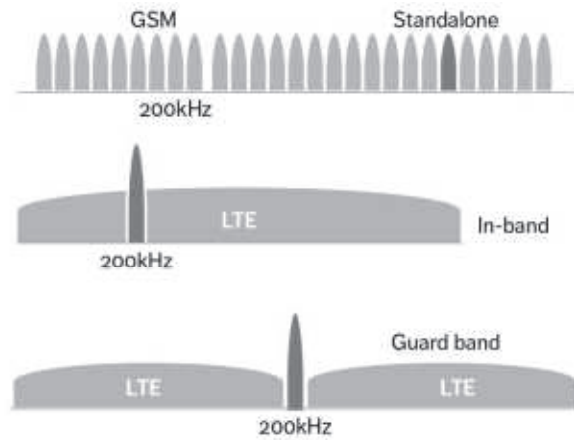


Figura 9. Opções de uso do espectro para NB-IoT.  
Fonte: Ericsson Technology Review 2016, <https://ericsson.com>.

A pilha de protocolos utilizada na tecnologia NB-IoT faz uso da mesma base da pilha de protocolos LTE, simplificada ao máximo (Figura 10). A estrutura se divide em plano de controle e plano de usuário, onde o plano de controle carrega informações de sinalização e gerenciamento da rede, e o plano de usuário carrega dados do usuário. “UE” (*User Equipment*) é equivalente ao end-device, e “eNB” (eNodeB) é o nome dado às estações base, equivalentes aos gateways das redes LoRa.

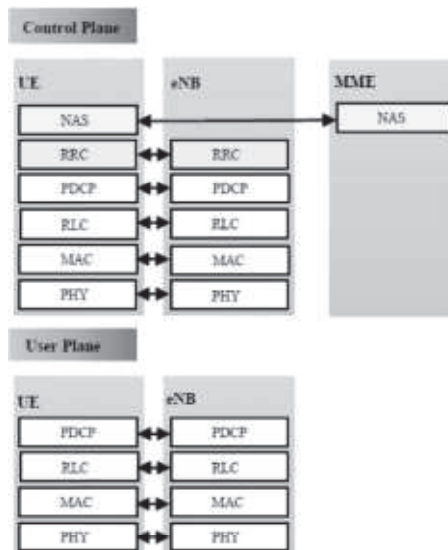


Figura 10. Pilha de protocolos da tecnologia NB-IoT.  
Fonte: Adaptado de [3].

O fluxo de comunicação entre UEs e eNBs é baseado em uma metodologia de contenção, que se dá em quatro tempos (Figura 11). Primeiramente, o UE envia uma mensagem de abertura (*preamble*) para o eNB. Caso recebida com sucesso, uma resposta é

devolvida. Após isso, a mensagem com a informação desejada é enviada, seguida finalmente por um último downlink que finaliza o processo [12].

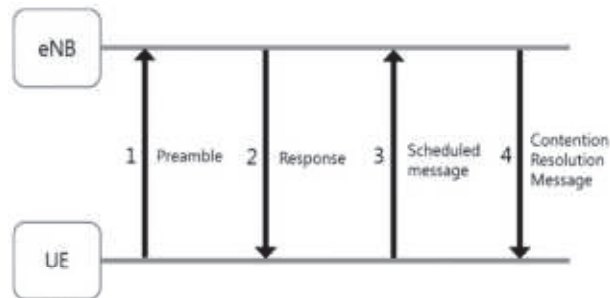


Figura 11. Fluxo de comunicação da tecnologia NB-LoT.  
Fonte: Adaptado de [3].

### 2.1.2.3 Sigfox

Sigfox é uma operadora LPWAN que oferece uma solução de conectividade IoT de ponta a ponta [2]. Fundada em 2009, a empresa francesa ofereceu uma das primeiras soluções de conectividade para o mercado IoT [13]. No Brasil, as redes Sigfox são implantadas com exclusividade pelo Grupo WND desde 2017.

É caracterizada por utilizar largura de banda ultra estreita, payload e taxa de dados ultra baixos, e por operar em faixas de frequência não licenciadas (ISM). Na Europa, por exemplo, a faixa situada entre 868,180 MHz e 868,220 MHz é dividida em 400 canais ortogonais, conforme ilustrado na Figura 12, sendo 40 desses canais reservados e não utilizados (canais 181 a 219).

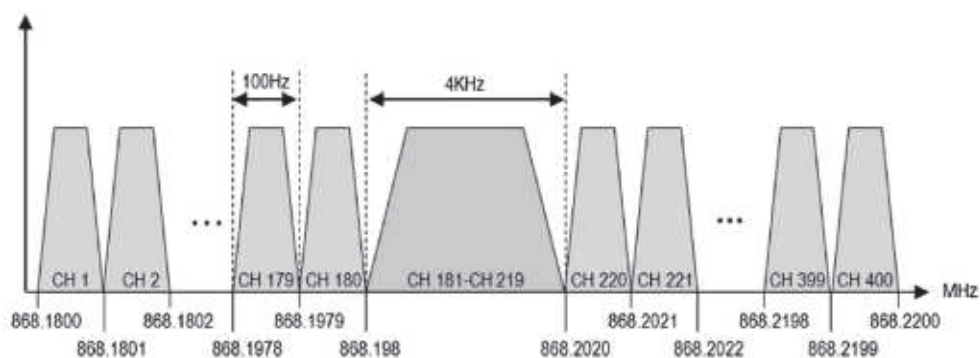


Figura 12. Distribuição dos canais de uplink Sigfox.  
Fonte: Adaptado de [13].

O número de uplinks e downlinks diários é limitado (Tabela 1) e o duty cycle deve ser menor que 1%. Essas limitações são necessárias para maximizar o número de dispositivos suportados pela rede. Embora a confirmação de uplinks (ACK) não seja suportada, a confiabilidade das comunicações é obtida por meio de redundância de pacotes [14]. Cada



uplink é transmitido em múltiplos instantes (três, por padrão) e em diferentes canais de frequência. A modulação do sinal de uplink é em fase (*Binary Phase Shift Keying – BPSK*) e a modulação do sinal de downlink é em frequência (*Gaussian Frequency Shift Keying – GFSK*).

Tabela 1. Principais parâmetros e restrições da tecnologia Sigfox [13].

Parâmetro	Uplinks	Downlinks
Modulação	BPSK	GFSK
Largura de banda (Hz)	100	600
Payload máximo (bytes)	12	8
Taxa de dados máxima (bps)	100	500
Limite diário	140	4

A Sigfox implanta gateways proprietários equipados com rádios cognitivos, que são conectados aos servidores em nuvem (*Sigfox Cloud*) via protocolo IP, com uma arquitetura de rede muito semelhante à LoRaWAN (Figura 13). Os rádios cognitivos são rádios definidos por software, capazes de perceber o ambiente e ajustar a transmissão para pontos do espectro que não estão em uso. Como os gateways Sigfox podem receber mensagens simultaneamente em todos os canais, os end-devices podem escolher aleatoriamente um canal para transmitir suas mensagens, recurso que simplifica projetos e reduz custos [2].



Figura 13. Arquitetura de rede Sigfox [15].

A popularidade e a disseminação da tecnologia Sigfox tem acompanhado o crescimento do mercado LPWAN. Atualmente, o serviço está disponível em 72 países, com mais de 5 milhões de km<sup>2</sup> cobertos, sendo a maioria das redes implantadas na Europa [16]. No Brasil, o serviço já está disponível em praticamente todas as capitais e nas principais cidades.

### 2.1.3 Comparativo entre LoRa, NB-IoT e Sigfox

Neste item é apresentada uma comparação sucinta entre as tecnologias LoRa, NB-IoT e Sigfox, dos pontos de vista técnico e de participação no mercado LPWAN, apenas para fins de contextualização. Na Tabela 2 é apresentado um panorama geral das principais



características, e, na Figura 14, um gráfico de Granovetter com o perfil técnico das três tecnologias. Nota-se que LoRa e Sigfox são similares e que possuem um perfil voltado para flexibilidade de infraestrutura. Por outro lado, NB-IoT é mais voltada para a qualidade do serviço.

Tabela 2. Resumo técnico sobre as tecnologias LoRa, NB-IoT e Sigfox [2] [7] [12].

	LoRa	NB-IoT	Sigfox
Padronização	LoRa-Alliance	3GPP	Sigfox e ETSI
Modulação	CSS	QPSK	BPSK/GFSK
Alcance (urbano/rural)	5/20 km	1/10 km	10/40 km
Espectro de frequência	Não licenciado (ISM)	Licenciado (LTE)	Não licenciado (ISM)
Largura de banda	125/250/500 kHz	200 kHz	100 Hz
Taxa de dados máxima	50 kbps	200 kbps	100 bps
Payload máximo (bytes)	243	1600	12/8 (UL/DL)
Bidirecional	Sim	Sim	Limitado
Mensagens/dia	Ilimitado	Ilimitado	140/4 (UL/DL)
Handover	Não necessário	Necessário	Não necessário
Bit rate adaptativo	Sim (ADR)	Não	Não
Geolocalização	Sim	Não (sob especificação)	Sim
Permite rede privada	Sim	Não	Não
Protocolo aberto	Sim	Não	Não

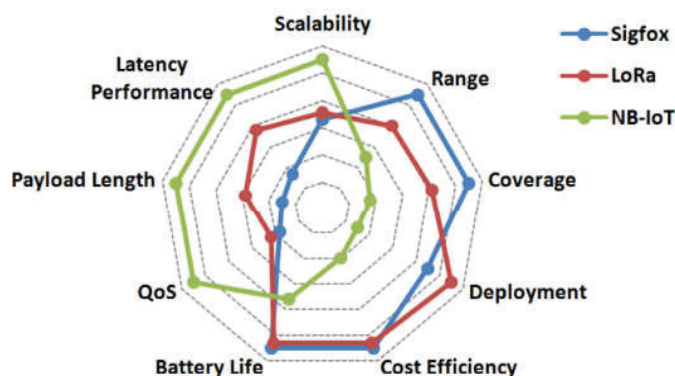


Figura 14. Perfil técnico das tecnologias Sigfox, NB-IoT e LoRa.  
Fonte: Adaptado de [2].

Na Figura 15 é apresentado o cenário recente das tecnologias LPWAN existentes, em número de conexões globais, e a expectativa desse cenário para 2025. Observa-se que LoRa e NB-IoT lideram praticamente empatadas, enquanto a tecnologia Sigfox encontra-se em terceiro lugar, porém em perspectiva de crescimento. A tecnologia *Long Term Evolution for Machines* (LTE-M), omitida neste estudo, é uma tecnologia mobile emergente similar à NB-IoT, no entanto com mais funcionalidades e performance um pouco superior.

Esses comparativos, entretanto, não determinam a superioridade de uma tecnologia em relação a outra, ou seja, não há uma preferência geral que possa ser estabelecida apenas com essa análise. As vantagens e desvantagens de cada tecnologia dependem do tipo de aplicação e dos critérios de tomada de decisão de cada projeto. Há, portanto, uma neutralidade técnica assumida como premissa nesse comparativo.

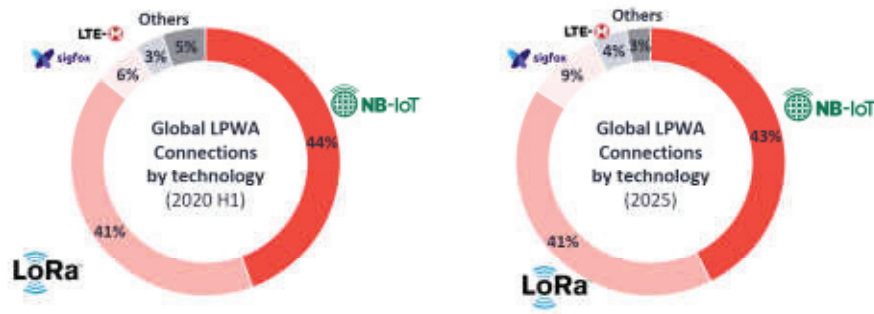


Figura 15. Perspectiva de mercado das principais tecnologias LPWAN.  
Fonte: Adaptado de [1].

O foco deste trabalho recai sobre a tecnologia LoRa devido à disponibilidade preexistente de uma rede LoRaWAN real, sendo a geolocalização nativa um problema de pesquisa derivado da própria operacionalização profissional dessa rede. Estritamente, essa implementação teve como principais fatores determinantes o baixo custo de implantação, a utilização de espectro não licenciado (ISM), a possibilidade de implantação de redes privadas e o desempenho promissor em ambientes urbanos densos.

## 2.2 PROTOCOLO LORAWAN

O protocolo LoRaWAN (Figura 16) é uma camada de Controle Médio de Acesso (MAC), baseada em nuvem, cuja função é gerenciar a comunicação entre os end-devices, os gateways e o Network Server. É um protocolo aberto, mantido pela LoRa Alliance<sup>3</sup>, que define os parâmetros da infraestrutura de rede e da camada física dos dispositivos.

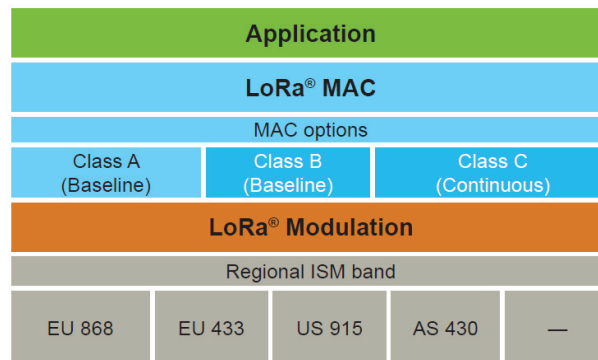


Figura 16. Camadas do protocolo LoRaWAN.  
Fonte: Adaptado de <https://lora-alliance.org>.

Esta seção é baseada no documento *LoRaWAN L2 1.0.4 Specification* [7], exceto quando especificadas outras referências. A seguir, são abordadas as principais propriedades do protocolo: classes de operação, parâmetros regionais, *Data Rate* (DR) e *Adaptive Data Rate* (ADR), tipos de ativação dos end-devices, e formato dos frames de dados.

<sup>3</sup><https://lora-alliance.org/>

## 2.2.1 Classes de operação

O protocolo LoRaWAN possui três classes de operação: classes A, B e C. Basicamente, a escolha de cada opção depende da prioridade do end-device ou do sistema por menor latência ou por eficiência energética. Este trabalho considera apenas a abordagem em classe A por ser a configuração utilizada na rede LoRaWAN estudada, mesmo assim, os parágrafos a seguir trazem uma breve descrição de cada uma das classes.

A classe A é a classe padrão e a de menor consumo de energia, destinada para dispositivos que operam a bateria e que permitem alta latência de downlink, como é o caso das aplicações voltadas apenas para a leitura de sensores. Nessa modalidade, os end-devices permanecem em modo de baixa energia na maior parte do tempo, e os uplinks podem ser enviados a qualquer momento, ou seja, de maneira assíncrona. Quando é necessário o envio de um downlink, este primeiramente é agendado pelo Network Server e permanece em espera até o próximo uplink. Para isso são alocadas janelas de recepção curtas, posicionadas logo após a janela de transmissão de cada uplink (Figura 17a). A primeira janela de recepção (*RxSlot 1*) é ativada após um intervalo de tempo configurável (*Receive Delay 1*) em relação ao término do uplink. Por sua vez, a segunda janela de recepção (*RxSlot 2*) é ativada após o intervalo *Receive Delay 2*. Os valores que podem ser configurados pelo protocolo para *Receive Delay 1* é de 1 a 15 segundos, e para *Receive Delay 2* é de 2 a 16 segundos.

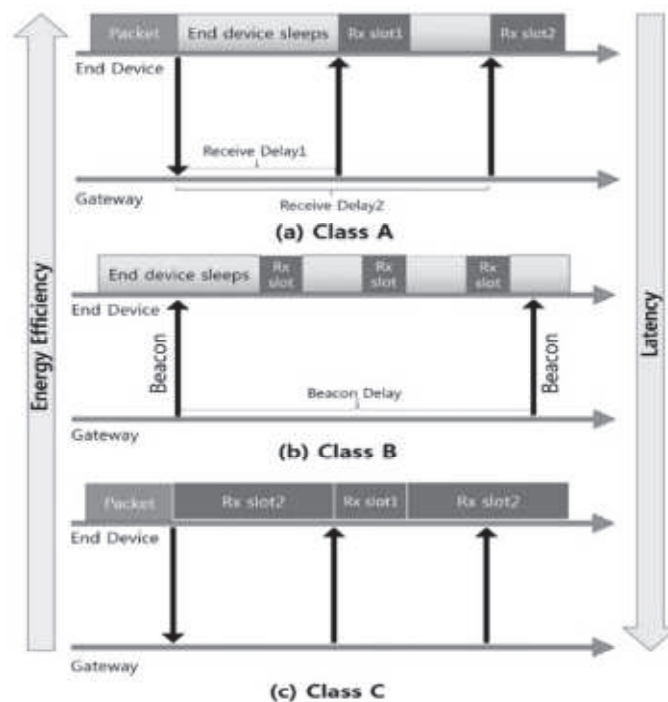


Figura 17. Fluxo de comunicação das classes A, B e C.  
Fonte: Adaptado de [3].

A classe B (Figura 17b) é voltada para downlinks com latência predeterminada, como é o caso de dispositivos atuadores, mas que também são alimentados a bateria, embora o consumo de energia seja superior ao da classe A. O sincronismo com a rede é realizado por meio de sinalizadores (beacons) periódicos, a partir dos quais uma série de janelas de recepção curtas, denominadas *ping slots*, são abertas em intervalos de tempo regulares. A latência programável para a classe B é de até 128 segundos.

Por fim, a classe C (Figura 17c) é a classe de menor latência de downlink, em contrapartida, a que mais consome energia. É designada para dispositivos alimentados por fontes contínuas de energia, como, por exemplo, atuadores que requerem comandos em tempo real. O receptor é mantido o tempo todo ativo, exceto durante a transmissão de uplinks, permitindo com que downlinks possam ser recebidos a qualquer momento. A janela permanente de recepção chama-se *Rx Slot 2*. Há também a presença de *Rx Slot 1*, em posição semelhante à classe A.

## 2.2.2 Parâmetros regionais

As redes LoRaWAN devem operar de acordo com os parâmetros regionais estabelecidos pela entidade internacional LoRa Alliance, disponíveis no documento *LoRaWAN Regional Parameters* [17]. Ao total são 10 planos regionais em vigor. No Brasil são regulamentados os planos da Austrália (AU-915) e da Europa (EU-433).

Para o plano AU-915, mais utilizado, a faixa de frequências estabelecida é de 915 a 928 MHz. Na Figura 18 é apresentada a subdivisão de canais desse espectro. São 64 canais de uplink com BW de 125 kHz (em verde), 8 canais de uplink com BW de 500 kHz (em azul) e 8 canais de downlink com BW de 500 kHz (em amarelo).

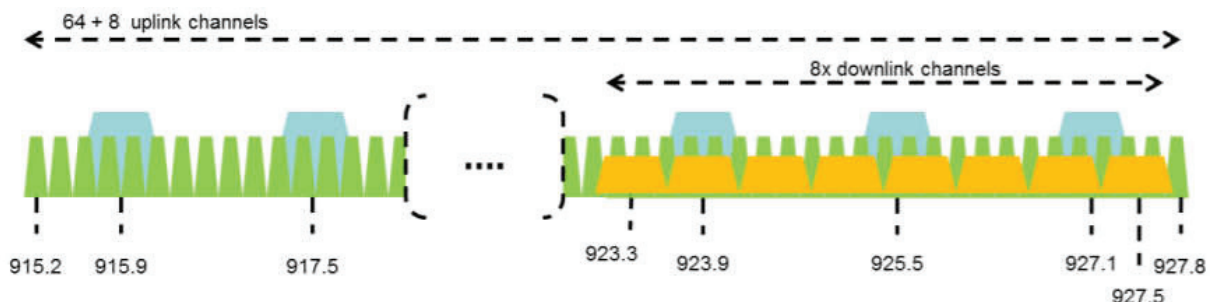


Figura 18. Canais de frequência LoRa para AU-915 [17].

Uma série de outros parâmetros são definidos regionalmente, tais como máxima potência isotrópica radiada equivalente (Max EIRP), *Dwell Time* e *Duty Cycle*. O primeiro diz respeito à máxima potência de rádio que pode ser radiada pelo módulo LoRa, de acordo com os regulamentos locais; o segundo corresponde ao tempo máximo permitido para a transmissão de uma mensagem LoRaWAN; e o último refere-se à máxima fração de tempo em que o dispositivo pode ocupar os canais LoRa. Para o plano AU-915, a máxima EIRP

é de 30 dBm, contudo, não há limitações de *Dwell Time* e *Duty Cycle*. Em outros planos, valores típicos para estes dois últimos são de, respectivamente, 400 ms e 1%.

### 2.2.3 Data Rate e Adaptive Data Rate

Um dos parâmetros mais importantes do protocolo LoRaWAN é denominado *Data Rate* (DR). Trata-se de um índice, numerado de DR0 a DR15, associado a combinações específicas de fator de espalhamento (SF) e de largura de banda (BW), em que cada combinação reflete em taxas de dados diferentes. O DR representa uma negociação entre alcance de transmissão e taxa de dados, como pode ser observado na Tabela 3, que apresenta as definições de DR para o plano AU-915.

Tabela 3. Data rates em AU-915 [17].

<i>Data Rate</i>	Configuração	Taxa de dados (bps)	Uso
DR0	SF12 / 125 kHz	250	Uplinks
DR1	SF11 / 125 kHz	440	Uplinks
DR2	SF10 / 125 kHz	980	Uplinks
DR3	SF9 / 125 kHz	1760	Uplinks
DR4	SF8 / 125 kHz	3125	Uplinks
DR5	SF7 / 125 kHz	5470	Uplinks
DR6	SF8 / 500 kHz	12500	Uplinks
DR7	RFU		
DR8	SF12 / 500 kHz	980	Downlinks
DR9	SF11 / 500 kHz	1760	Downlinks
DR10	SF10 / 500 kHz	3900	Downlinks
DR11	SF9 / 500 kHz	7000	Downlinks
DR12	SF8 / 500 kHz	12500	Downlinks
DR13	SF7 / 500 kHz	21900	Downlinks
DR14	RFU		
DR15	Definido no protocolo		

Sinais com diferentes DR's possuem separação ortogonal entre si. Isso significa que, devido à tecnologia de espalhamento espectral, mensagens LoRa recebidas no mesmo canal, porém com configurações de DR diferentes, não interferem uma na outra, como se fossem recebidas em diferentes canais virtuais. Essa é uma grande vantagem da tecnologia LoRa, pois maximiza a capacidade de atendimento dos gateways.

As configurações de DR nos end-devices podem ser gerenciadas automaticamente pelo protocolo, por meio do recurso *Adaptive Data Rate* (ADR). Quando ativo, o DR de cada end-device é ajustado pelo Network Server a fim de otimizar o consumo de energia. Nesse processo, o ADR também ajusta a potência de transmissão de cada dispositivo. Em casos onde o end-device está próximo a um gateway, o ADR tende a configurá-lo para valores menores de SF e a reduzir a sua potência de transmissão ao mínimo, e vice-versa.



## 2.2.4 Tipos de ativação

Para ser integrado em uma rede LoRaWAN, cada end-device deve ser personalizado e ativado. A personalização diz respeito às chaves de segurança, endereços e identificadores individuais que devem ser previamente armazenados no dispositivo. A ativação, por sua vez, está relacionada à maneira como o dispositivo é integrado na rede. São dois tipos de ativação: *Activation by Personalization (ABP)* e *Over-the-Air Activation (OTAA)*.

### 2.2.4.1 Ativação ABP

Na ativação ABP, como o próprio nome diz, as chaves de segurança e o endereço são definidos de maneira personalizada, no momento do comissionamento, e permanecem as mesmas durante toda a vida útil do dispositivo. Tratam-se de duas chaves de criptografia do tipo *Advanced Encryption Standard* de 128 bits (AES-128), denominadas *Network Session Key (NwkSKey)* e *Application Session Key (AppSKey)*, e do endereço *Device Address (DevAddr)*.

A chave NwkSKey estabelece a segurança e a confidencialidade dos dados entre end-devices e Network Server, e a chave AppSKey estabelece a criptografia de ponta-a-ponta entre end-devices e a aplicação (Figura 19). A principal vantagem desse esquema de dupla criptografia é a implementação de redes com múltiplas aplicações, de diferentes usuários, sem que a operadora tenha visibilidade dos dados. O DevAddr, por sua vez, é um endereço de 32 bits que identifica o end-device na rede. Uma vez configurados esses três itens, o dispositivo está integrado à rede LoRaWAN.

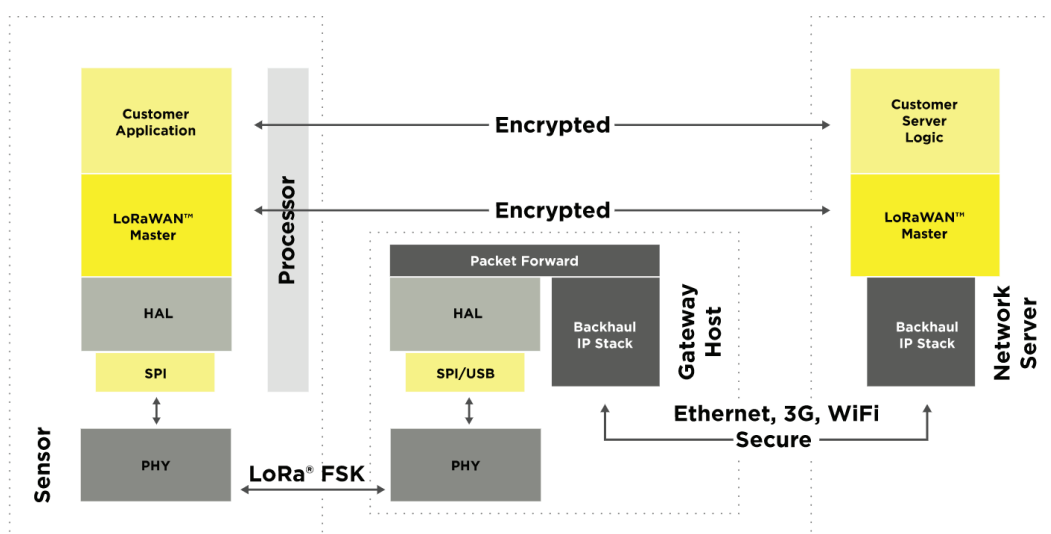


Figura 19. Perfil da comunicação entre end-device e Network Server.  
Fonte: Disponível em <https://lora-alliance.org/about-lorawan>.

O nível de segurança depende principalmente da unicidade, randomicidade e confidencialidade das chaves NwkSKey e AppSKey. A ativação ABP tem a vantagem de ser mais simples, no entanto possui desvantagens relacionadas à segurança, uma vez que as chaves de criptografia são permanentes.

#### 2.2.4.2 Ativação OTAA

Nesse tipo de ativação, os dispositivos são integrados em uma rede por meio de um processo denominado “join”. Os parâmetros NwkSKey, AppSKey e DevAddr não são permanentes, como na ativação ABP, mas gerados automaticamente e redefinidos toda vez que o dispositivo realiza um novo join, sendo assim, não é preciso que sejam pré-configurados. O processo é sempre iniciado pelo end-device, por meio do envio de uma mensagem de *Join Request*. Após a validação pelo Network Server, uma mensagem de *Join Accept* é respondida. Uma vez realizado esse processo, o end-device pode enviar e receber dados. Para a ativação OTAA é necessário que outras três informações permanentes estejam pré-configuradas na memória interna do end-device: *End-Device Identifier* (DevEUI), *Join-Server Identifier* (JoinEUI) e *Application Key* (AppKey).

DevEUI e JoinEUI são identificadores globais de 64 bits que seguem o padrão do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) EUI64. Todos os módulos LoRa possuem um DevEUI único de fábrica, o qual deve ser conhecido pelo Network Server da rede em que o end-device pretende se integrar. O JoinEUI, por sua vez, é um identificador que deve ser configurado durante o comissionamento do dispositivo. Sua função é dupla: identificar a conexão para o processo de join e contribuir para a derivação das chaves NwkSKey e AppSKey. A chave raiz AppKey, do tipo AES-128, também deve ser configurada durante o comissionamento. Sua função é, em conjunto com o identificador JoinEUI, derivar as chaves NwkSKey e AppSKey durante o processo de join.

A ativação OTAA, apesar de mais complexa, tem a vantagem de ser mais segura devido à possibilidade de redefinição das chaves de criptografia. Entretanto, a segurança também depende da unicidade, randomicidade e confidencialidade do identificador JoinEUI e da chave AppKey.

#### 2.2.5 Formato dos frames

O formato dos frames utilizado na comunicação LoRa é apresentado na Figura 20. Nota-se que os payloads são desmembrados de cima para baixo, à medida em que se aproximam da camada de aplicação. Em destaque está o *Frame Payload*, que corresponde aos dados úteis, única parte que permanece criptografada no Network Server.

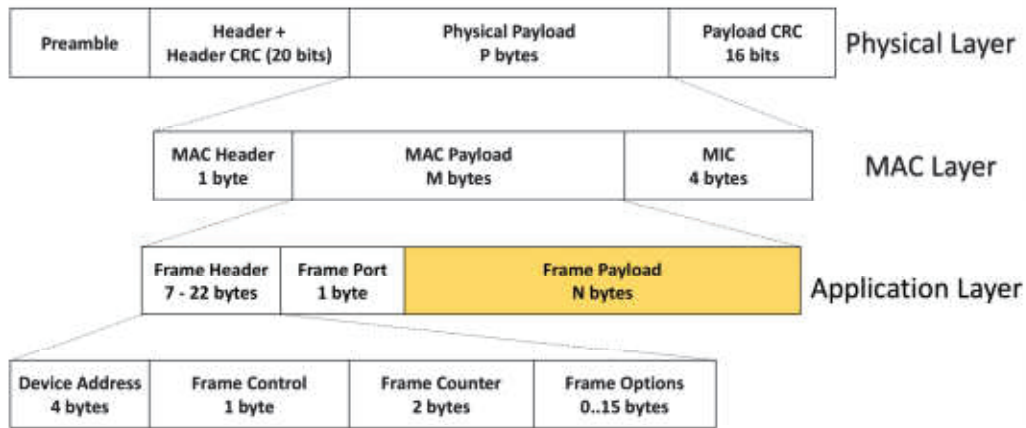


Figura 20. Formato dos frames LoRa [18].

Um frame LoRa inicia com um *preamble* (ou preâmbulo), que consiste em uma sequência codificada de *chirps* cuja finalidade é sinalizar o início de uma transmissão de dados [19]. Se uma janela de recepção LoRa detectar a presença de um preâmbulo válido, a recepção dos dados tem seguimento. Após o preâmbulo há um cabeçalho opcional que, quando presente, contém três informações: tamanho do *Physical Payload*, taxa de codificação (CR) e se há a presença de verificação cíclica de redundância (*Payload CRC*) no final do frame. Os bits de CRC são destinados à verificação da integridade dos dados transmitidos.

O *Physical Payload* é formado por *MAC Header*, *MAC Payload* e MIC (*Message Integrity Code*). O primeiro consiste em um cabeçalho que identifica se o pacote transmitido é de uplink, de downlink, se é confirmado, não confirmado, ou se é mensagem do tipo *Join Request* ou *Join Accept*. O *MAC Payload*, por sua vez, contém os dados e os metadados pertencentes à camada de aplicação. Seu tamanho é definido pelo DR utilizado e pelos parâmetros regionais, conforme exemplificado na Tabela 4. O MIC, ao final, desempenha uma função de verificação da integridade dos dados, similar ao CRC da camada física.

Tabela 4. Tamanho máximo de bytes para AU-915 [17].

<i>Data Rate</i> (DR)	<i>MAC Payload</i>	<i>Frame Payload</i>
0	59	51
1	59	51
2	59	51
3	123	115
4	250	242
5	250	242
6	250	242

Por fim, ainda na Figura 20, o *MAC Payload* é formado por *Frame Header*, *Frame Port* e *Frame Payload*. Sem entrar em detalhes, o *Frame Header* contém uma série de metadados: informações de endereço do dispositivo, controle de ADR, reconhecimento de pacotes (*acknowledgment*, ou ACK), controle de downlinks pendentes, contador de frames



e alguns tipos de comandos MAC. O *Frame Port* indica a porta de comunicação da mensagem, que pode ser de 1 a 223. As demais portas são de uso reservado. Por último encontra-se o já mencionado *Frame Payload*, cujo tamanho também depende do DR e dos parâmetros regionais (Tabela 4).

O *Frame Header* e o *Frame Payload* também são utilizados para o envio de comandos MAC, que consistem em uma série de comandos predefinidos utilizados para a administração automática da rede, trocados exclusivamente entre a camada MAC do Network Server e a pilha LoRaWAN embarcada nos end-devices. Ou seja, não são comandos visíveis para a camada de aplicação. Um único frame pode conter qualquer sequência de comandos MAC, desde que não seja ultrapassado o tamanho disponível no *Frame Header* ou no *Frame Payload*. São dois exemplos de comandos MAC: (1) *LinkCheckReq*, utilizado pelo end-device para validar a sua conectividade com a rede; e (2) *LinkADDRReq*, utilizado pelo Network Server para solicitar a um end-device a alteração de seu DR, potência de transmissão, redundância ou máscara de canal.

## 2.3 GEOLOCALIZAÇÃO LORA PROPRIETÁRIA

O suporte para geolocalização nativa foi divulgado em 2016, tornando LoRa a primeira tecnologia *GPS-free* no mercado LPWAN. Chama-se de geolocalização proprietária a solução “oficial”, oferecida pelo fabricante ou desenvolvedor da tecnologia, no caso, a Semtech. O serviço proprietário de geolocalização LoRa nativa, denominado *LoRa Cloud Geolocation*<sup>4</sup> (LCG), é compatível com todos os end-devices e gateways existentes, porém os resultados mais acurados são restritos aos gateways de segunda geração, que implementam *timestamp* de alta resolução. Isto porque são utilizadas técnicas convencionais de multilateração para o cálculo das coordenadas dos dispositivos.

A geolocalização LoRa herda as características-chave da tecnologia, como baixo custo, alta eficiência energética, e a segurança de dados do protocolo. Não há necessidade de aumento nas listas de materiais e componentes que integram o hardware dos end-devices, nem requer qualquer processamento extra nos mesmos. Além disso, os pacotes não precisam ser especificamente destinados para geolocalização, podendo ser frames de dados típicos [20], os quais não contêm qualquer informação explícita da posição dos dispositivos [21].

A seguir são abordados alguns fundamentos das técnicas de multilateração, bem como um panorama geral da aplicabilidade da geolocalização LoRa nativa e maiores detalhes sobre o serviço proprietário LCG.

---

<sup>4</sup><https://www.loracloud.com/>

### 2.3.1 Fundamentos da multilateração

A posição geográfica de um end-device pode ser determinada por técnicas de multilateração, desde que o sinal seja recebido simultaneamente por, pelo menos, três gateways, a partir de métricas presentes nos metadados, como o tempo de chegada do sinal e a potência de recepção do sinal [20]. Matematicamente, a posição provável de um end-device é modelada por um perímetro circular ou hiperbólico em torno de cada gateway receptor, e a sua posição definida situa-se na interseção desses perímetros (Figura 21) [21].

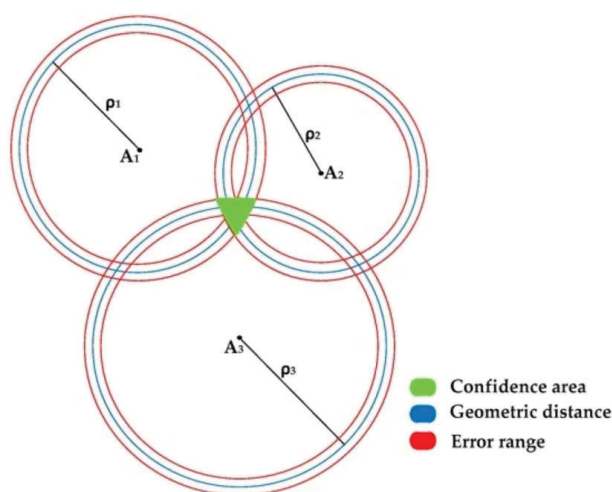


Figura 21. Princípio da geolocalização por multilateração [22].

Na Figura 22 é apresentado um comparativo da geolocalização LoRa nativa em relação a outras tecnologias, em um contexto de custo *versus* eficiência energética. Em LoRa há duas técnicas de geolocalização por multilateração que são dominantes: por *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) e por *Time Difference of Arrival* (TDoA). A acurácia desta última técnica é maior, entre 20 e 200 m, enquanto da multilateração por RSSI é da ordem de 1 a 2 km. Em suma, a acurácia depende de vários fatores: da complexidade do ambiente de propagação do sinal, da geometria e densidade de instalação dos gateways, da precisão na medição dos metadados necessários, do tipo de algoritmo utilizado para calcular a localização, da dinâmica e das configurações dos end-devices [21], entre outros.

#### 2.3.1.1 Multilateração por RSSI

Em LoRa, o indicador RSSI é uma medida da potência do sinal de rádio, aferida no momento da recepção de um pacote, usualmente representada em dBm (decibel-miliwatts). Valores típicos são de -30 dBm a poucos metros do gateway, e de -140 dBm no limiar da sensibilidade de recepção. Para cada uplink, o protocolo LoRaWAN registra sob a forma de metadados o RSSI individual de cada gateway receptor.

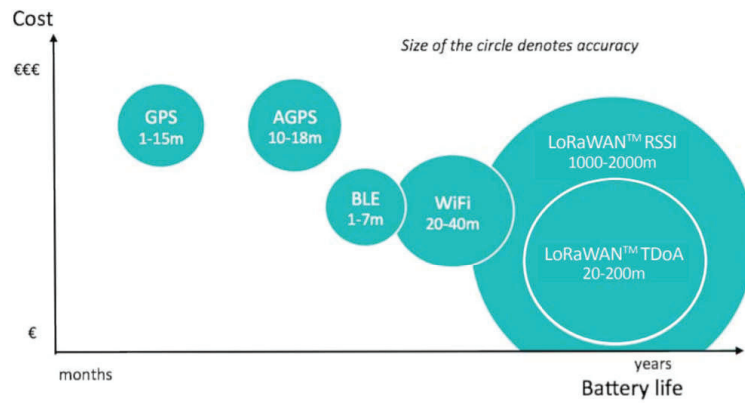


Figura 22. Comparativo entre tecnologias de geolocalização [21].

O RSSI possui relação logarítmica com a distância, como é possível observar na Equação 2, onde  $P_t$  é a potência de transmissão, em dBm,  $f$  é a frequência do sinal, em MHz, e  $d$  é a distância do receptor, em km. Esse modelo é chamado de Atenuação de Percurso em Espaço Livre (PLM), que descreve a propagação eletromagnética em um cenário ideal, sem obstáculos [23]. Na Figura 23 essa mesma equação está plotada para valores  $P_t = 30$  dBm e  $f = 921.5$  MHz, que são a máxima EIRP permitida e o valor médio da faixa de frequências regulamentados pelo plano AU-915. A alta inclinação da curva para distâncias curtas, inferiores a 1 km, é o principal fator limitante para a acurácia da multilateração por RSSI.

$$P_{RSSI} = P_t - 20\log_{10}(f) - 20\log_{10}(d) - 32,45 \quad (2)$$

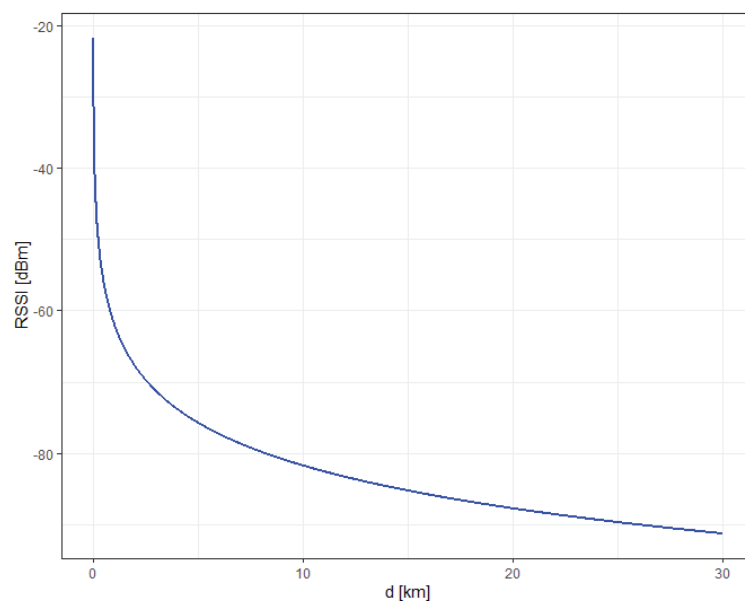


Figura 23. Relação fundamental entre RSSI e distância.

Em um ambiente real, as medições de RSSI são afetadas significativamente pelos efeitos da propagação do sinal em meio a obstáculos, sendo o principal deles o fenômeno

do desvanecimento multipercurso. Devido às múltiplas reflexões do sinal em vários objetos, as ondas eletromagnéticas percorrem diferentes caminhos, com diferentes distâncias. A interação entre essas ondas em um local específico pode ser subtrativa ou aditiva, causando uma flutuação na regularidade e na repetibilidade das medições [24].

Outro indicador, denominado *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), pode ser utilizado em conjunto com o RSSI como uma segunda perspectiva que auxilia os algoritmos de geolocalização. O SNR é a relação entre a potência do sinal  $P_S$  e a potência do ruído de fundo  $P_N$ , em dB (Equação 3). Quando o SNR é positivo, a potência do sinal está acima da potência do ruído de fundo (Figura 24), e quando é negativo, está abaixo. Normalmente, o limiar de ruído é o limite físico da sensibilidade de recepção, porém a tecnologia LoRa pode operar abaixo desse nível. Valores típicos de SNR em LoRa são de -20 a +10 dB [25].

$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{P_S}{P_N} \right) \quad (3)$$

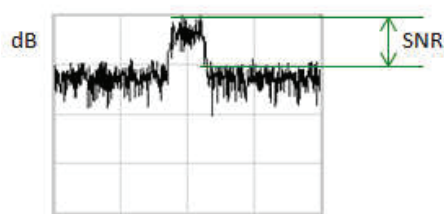


Figura 24. Demonstração gráfica do SNR positivo.

Fonte: Disponível em [https://www.sharetechnote.com/html/RF\\_Handbook\\_SNR.html](https://www.sharetechnote.com/html/RF_Handbook_SNR.html).

### 2.3.1.2 Multilateração por TDoA

Essa técnica utiliza a diferença do instante de recepção de um pacote entre os gateways para estimar a localização do dispositivo. Sendo a velocidade da luz uma constante, que percorre a distância de 3 metros em aproximadamente 10 nanossegundos, gateways em diferentes distâncias recebem o mesmo pacote com diferentes atrasos, que somente podem ser detectados com *timestamps* de alta resolução. Na técnica TDoA não é necessário que os end-devices sejam equipados com relógios precisos e sincronizados, como é o caso da técnica *Time of Arrival* (ToA), mas que apenas os gateways o façam, daí a sua preferência para aplicação em LoRa. Além disso, é necessário que a localização geográfica dos gateways seja conhecida.

A localização e o sincronismo de tempo são normalmente providenciados pelo GPS presente nos gateways. A precisão de sincronia é da ordem de 25 ns (< 10 m) quando o sinal de GPS é de boa qualidade. Somado a isso, fatores relacionados ao ambiente de propagação, como o percurso do sinal por múltiplos caminhos devido às reflexões, impactam diretamente na acurácia da técnica TDoA. Redes implementadas em áreas rurais, com

linha de visão desobstruída e geometria de localização dos gateways favorável, possuem acurácias próximas ao mínimo da escala (20 m). Em áreas urbanas densas, a acurácia tende a se aproximar do fim da escala (200 m) [21].

Para um determinado valor de TDoA, a posição provável do dispositivo segue uma função hiperbólica entre um par de gateways, e a sua posição definida situa-se na região de interseção entre duas ou mais hipérbolas. Na Figura 25a é apresentado o princípio da geolocalização por TDoA com 3 gateways, onde a localização do dispositivo X corresponde ao ponto de interseção das curvas. Observa-se que o gateway B é tomado como referência para as hipérbolas  $(a, b)$  e  $(c, b)$ . Como se trata de uma função de diferença, o número de hipérbolas é sempre uma a menos do que o número de gateways. Na Figura 25b, por sua vez, é apresentado o caso para 4 gateways, onde a localização estimada do dispositivo encontra-se na área de interseção entre as curvas [26].

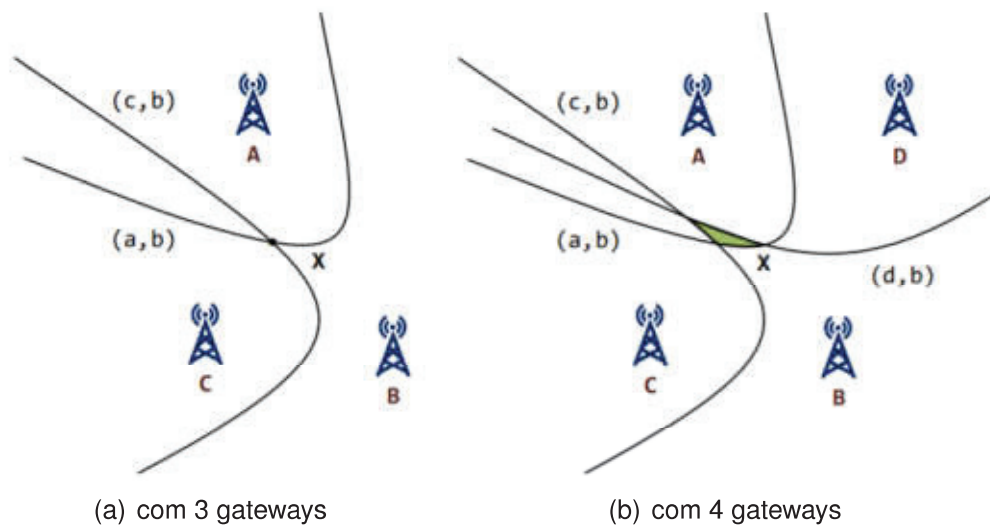


Figura 25. Princípio da geolocalização por TDoA [26].

Diferentemente da geolocalização por RSSI, a relação entre TDoA e distância é linear. No entanto, o erro associado à medição dessa diferença de tempo afeta a curvatura da hipérbole com um efeito pseudo-quadrático à medida em que a curva se afasta do ponto de inflexão. Na Figura 26 é demonstrado esse efeito para um erro de 10% na medição de TDoA, onde o par de gateways é representado pelos dois pontos e a margem de incerteza é representada pelas hipérbolas em vermelho [27].

### 2.3.2 Aplicabilidade

A geolocalização LoRa nativa pode ser aplicada a uma ampla variedade de mercados, porém, seu principal fator limitante é a baixa acurácia. Por essa razão, sua aplicação normalmente é destinada para a supervisão de dispositivos fixos e para o rastreamento de ativos de movimentação lenta. Com relação ao primeiro, é o caso de supervisórios que



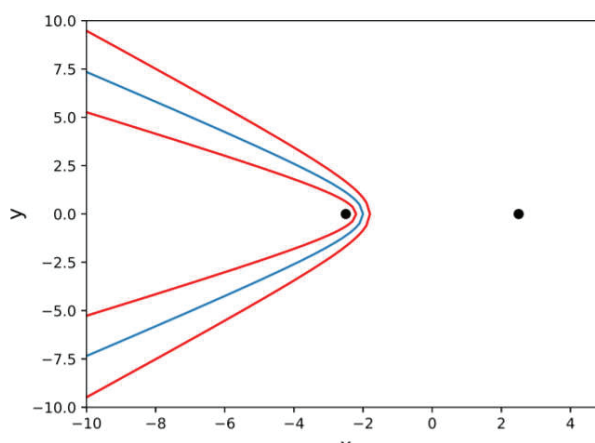


Figura 26. Efeito de 10% de incerteza nas medições de TDoA [27].

detectam se houve a movimentação irregular de bens ou equipamentos, e.g. anti-roubos para canteiros de obras, pátios de serviços públicos ou aeroportos. Ativos de movimentação lenta, por sua vez, são aqueles que não requerem atualizações frequentes de posição, como é o caso da logística de objetos, veículos, pessoas e animais. A geolocalização LoRa não é destinada para posicionamento de alta precisão, rastreamento em tempo real e logística de ativos de alta mobilidade [21].

Em termos energéticos, a melhor eficiência é obtida com dispositivos estacionários, ou dispositivos móveis cuja necessidade de determinação da localização não é frequente. Essas são aplicações típicas para a classe A do protocolo LoRaWAN. Ativos móveis, no entanto, requerem determinação de posição mais frequentes, por essa razão, transmitem uma maior quantidade de frames, consomem mais energia e possuem custo maior. Frequentemente são implementados em classe B ou C.

Dependendo da aplicação, alguns tipos de pós-filtragem podem ser incluídos para melhorar os resultados. No caso de dispositivos estacionários ou com pouca mobilidade, pode ser utilizada a simples média aritmética de várias leituras para a obtenção de coordenadas com menor grau de incerteza. Para dispositivos móveis, o filtro de Kalman pode ser aplicado para inferir a localização e a velocidade, visto que se trata de um método matemático recursivo tipicamente utilizado em problemas de rastreamento. A correspondência de mapas é outro método de filtragem, que restringe a localização a determinados pontos geográficos pré conhecidos, como estradas e endereços. Atualmente, a comunidade acadêmica investiga ativamente técnicas para mitigar as limitações da geolocalização LoRa nativa, a despeito da existência do serviço proprietário.

### 2.3.3 *LoRa Cloud Geolocation*

O serviço LCG é uma API em nuvem desenvolvida pela Semtech, que pode ser integrada com um Network Server LoRaWAN ou com um servidor de aplicação para prover

a geolocalização de end-devices. Os dados de entrada são os indicadores de *timestamp*, RSSI e SNR do dispositivo a ser localizado. A opção de incluir múltiplos pacotes em uma mesma requisição é uma alternativa para melhorar a acurácia do cálculo. O serviço LCG, então, calcula as coordenadas geográficas por meio de uma combinação das técnicas de multilateração TDoA/RSSI.

O serviço é compatível com todos os dispositivos e redes LoRaWAN, e suporta todos os tipos de gateways, mesmo os que não possuem *timestamp* de alta resolução. Para esses casos, são utilizados apenas os algoritmos baseados em RSSI e SNR, com resultados menos acurados. Utiliza um protocolo sem estado, isto é, cada par de requisição e resposta é independente um do outro. Outra característica é a total anonimidade, pois o serviço não exige dados de identificação dos dispositivos.

Seguindo o conceito básico da multilateração, o principal requisito para que o LCG realize os cálculos de geolocalização é o envio de metadados de pelo menos três gateways para cada pacote recebido. Para gateways com múltiplas antenas, devem ser enviados os metadados individuais de cada antena. Outros requisitos que devem ser informados em cada consulta são a geolocalização dos gateways (latitude, longitude e altitude) e o *token* de autenticação do usuário. O *timestamp* de precisão para TDoA é opcional [28].

A utilização do serviço LCG possui um custo associado que deve ser levado em consideração. A título de exemplificação, a Tabela 5 apresenta o custo mensal atual de alguns planos do serviço. Trata-se de uma despesa que deve ser analisada à luz do tipo de aplicação, do tamanho da rede e da vida útil dos dispositivos.

Tabela 5. Planos de assinatura para o serviço *LoRa Cloud* [29].

Limite de consultas mensal	Custo mensal
1.000	Gratuito
500.000	\$ 150,00
1.000.000	\$ 250,00
5.000.000	\$ 1.000,00
20.000.000	\$ 3.500,00
40.000.000	\$ 6.000,00

Para redes LoRaWAN que não possuem compatibilidade com TDoA, como é o caso da rede abordada neste trabalho, a principal restrição do serviço de geolocalização proprietária está nos níveis de acurácia não otimizados, pois os cálculos são realizados de maneira independente a cada requisição, sem levar em consideração o estado anterior dos dispositivos e o seu contexto em relação aos demais dispositivos da rede. Há, portanto, a necessidade de avaliação de novas abordagens que sejam capazes de assimilar, de maneira mais eficiente, as não linearidades inerentes ao problema de geolocalização por RSSI, o que não é possível por meio das técnicas de multilateração convencionais.

As redes LoRaWAN profissionais e de operação privada são um desafio à parte nesse assunto, pois normalmente implementam o mínimo de gateways possível a fim de reduzir custos, o que consiste em uma séria limitação para a geolocalização. Nesse ponto,



as abordagens que utilizam machine learning podem representar um caminho possível para que todos os end-devices de uma rede possam ser localizados de maneira aproximada, com base no aprendizado das características da rede como um todo.

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho constatou-se que modelos de redes neurais densas (DNN) são alternativas aplicáveis para o problema de geolocalização LoRa por RSSI-*fingerprinting*. Testes realizados com metadados produzidos por uma rede LoRaWAN real, com apenas 43 end-devices estacionários e três gateways, demonstraram níveis de acurácia que coincidem com os resultados obtidos pelo mapeamento sistemático realizado e pelo serviço de geolocalização *LoRa Cloud Geolocation*. Em contraste com os métodos tradicionais utilizados em geolocalização por RSSI, foi possível atingir o mesmo nível de precisão com arquiteturas básicas de redes neurais, sem a necessidade de desenvolver modelos matemáticos complexos e de conhecer a posição geográfica dos gateways. O aprendizado computacional dos modelos foi capaz de abstrair, por si, as informações equivalentes ao mapeamento realizado em técnicas de *fingerprinting*. Na prática, uma parcela dos end-devices estacionários instalados podem ser selecionados estrategicamente como dispositivos de referência, com suas coordenadas registradas no momento de comissionamento, possibilitando que os modelos sejam dinamicamente treinados.

O mapeamento sistemático realizado sobre as técnicas de geolocalização utilizadas em LoRa resultaram em um total de 43 estudos, onde cerca de 40% utilizam métodos de machine learning e 16% utilizam deep learning com a aplicação de redes neurais. Esses estudos demonstram que a geolocalização LoRa é um tema recente e um problema em aberto, especialmente no que diz respeito à baixa acurácia. No entanto, nenhum dos trabalhos relacionados aplica métodos de deep learning para redes LoRaWAN em contexto real de operação, com SF variável e potência de transmissão desconhecida, baixa densidade de gateways, infraestrutura com características de instalação não ideais para geolocalização, e com end-devices instalados em baixa altitude, dentro de nichos de equipamentos e em ambientes de propagação desfavorável.

Este trabalho, portanto, satisfaz essa lacuna demonstrando que as redes neurais respondem de maneira satisfatória às não linearidades inerentes à propagação dos sinais LoRa. Esse argumento é corroborado tanto pelas pesquisas publicadas sobre o assunto quanto pelos resultados obtidos em 9 dos 12 modelos de redes DNN testados. Segundo os experimentos realizados, constatou-se que a integração de outras variáveis dos metadados, além das leituras de RSSI e SNR, colaboram na geolocalização dos dispositivos e que dispositivos com menos de três gateways receptores podem ser incluídos. Apesar dos níveis de acurácia relativamente altos para uma aplicação prática ( $\approx 300$  m de validação e  $\approx 2$  km de teste), os modelos testados e os resultados obtidos servem como precursores para estudos mais aprofundados.

Como trabalhos futuros sugere-se quatro linhas de estudo que podem ser tomadas: (1) testes com outras redes LoRaWAN em contexto real de operação, visto que cada

rede é única em termos de características locais; (2) testes mais aprofundados e complexos, com uma maior variedade de arquiteturas de redes DNN e de hiperparâmetros, como a utilização de outros algoritmos otimizadores, funções de ativação e funções de perda; (3) testes com redes convolucionais, recorrentes (LSTM) e com arquiteturas semi-supervisionadas; e (4) a realização de uma revisão sistemática sobre as técnicas de geolocalização LoRa ou a atualização do mapeamento sistemático nos próximos anos, com o intuito de melhor assimilar as dezenas de algoritmos relatados nas publicações e de monitorar o surgimento de novas abordagens.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IOT ANALYTICS. *State of the IoT 2020: 12 billion IoT connections, surpassing non-IoT for the first time*. 2020. Disponível em: <<https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-2020-12-billion-iot-connections-surpassing-non-iot-for-the-first-time/>>. Acesso em: Fev. 11, 2021.
- [2] MEKKI, K. et al. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*, Korean Institute of Communications Information Sciences, v. 5, n. 1, p. 1–7, 2019.
- [3] SINHA, R. S.; WEI, Y.; HWANG, S. H. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. *ICT Express*, Korean Institute of Communications Information Sciences, v. 3, n. 1, p. 14–21, 2017.
- [4] BEHRTECH. *A Deep Dive into Low-Power Wide Area Networks*. 2020. Disponível em: <<https://behrtech.com/blog/what-is-lpwan-a-deep-dive-into-low-power-wide-area-networks/>>. Acesso em: Fev. 04, 2021.
- [5] URBAN, D. J. *The importance of Wi-Fi 6 Technology for Delivery of gbps Internet Service*. 2019.
- [6] LEVEREGE. *LPWAN White Paper*. 2020. Disponível em: <<https://www.leverege.com/research-papers/lpwan-white-paper>>. Acesso em: Fev. 04, 2021.
- [7] LORA ALLIANCE. *LoRaWAN L2 1.0.4 Specification*. 2020. Disponível em: <[https://lora-alliance.org/resource\\_hub/lorawan-104-specification-package/](https://lora-alliance.org/resource_hub/lorawan-104-specification-package/)>. Acesso em: Jan. 31, 2021.
- [8] BOURAS, C.; PAPACHRISTOS, N. Performance evaluation of LoraWan physical layer integration on IoT devices. *2018 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS)*, IEEE, p. 1–4, 2018.
- [9] MIKHAYLOV, K.; PETAJAJARVI, J.; POUTTU, A. Effect of Downlink Traffic on Performance of LoRaWAN LPWA Networks: Empirical Study. In: *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*. [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. v. 2018-Septe.
- [10] ABEELE, F. V. D. et al. Scalability Analysis of Large-Scale LoRaWAN Networks in ns-3. *IEEE Internet of Things Journal*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., v. 4, n. 6, p. 2186–2198, 2017.

- [11] AGILENT TECHNOLOGIES; RUMNEY, M. *LTE and the Evolution to 4G Wireless: Design and Measurement Challenges*. 2nd. ed. [S.l.]: Wiley Publishing, 2013. ISBN 1119962579.
- [12] SCHWARZ, R. . *Narrowband Internet of Things Whitepaper 1MA266*. 2016. Disponível em: <[https://www.rohde-schwarz.com/br/aplicativos/narrowband-internet-of-things-white-paper\\_230854-314242.html](https://www.rohde-schwarz.com/br/aplicativos/narrowband-internet-of-things-white-paper_230854-314242.html)>. Acesso em: Fev. 04, 2021.
- [13] BEMBE, M. et al. A survey on low-power wide area networks for IoT applications. *Telecommunication Systems*, v. 71, n. 2, p. 249–274, 2019.
- [14] POORTER, E. D. et al. Sub-GHz LPWAN Network Coexistence, Management and Virtualization: An Overview and Open Research Challenges. *Wireless Personal Communications*, Springer New York LLC, v. 95, n. 1, p. 187–213, 2017.
- [15] PURNAMA, A.; NASHIRUDDIN, M. I. Sigfox-based internet of things network planning for advanced metering infrastructure services in urban scenario. In: . [S.l.: s.n.], 2020. p. 15–20.
- [16] SIGFOX. *Sigfox Home Page*. 2021. Disponível em: <<https://www.sigfox.com/en>>. Acesso em: Fev. 04, 2021.
- [17] LORA ALLIANCE. *RP002-1.0.1 LoRaWAN Regional Parameters*. 2020. Disponível em: <[https://lora-alliance.org/resource\\_hub/rp2-101-lorawan-regional-parameters-2](https://lora-alliance.org/resource_hub/rp2-101-lorawan-regional-parameters-2)>. Acesso em: Jan. 28, 2021.
- [18] MENDES, A. S. et al. Multi-agent approach using lorawan devices: An airport case study. *Electronics*, v. 9, n. 9, 2020. ISSN 2079-9292. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2079-9292/9/9/1430>>.
- [19] AUGUSTIN, A. et al. A study of lora: Long range & low power networks for the internet of things. *Sensors*, v. 16, n. 9, 2016. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/16/9/1466>>.
- [20] SEMTECH. *Semtech's LoRa Geolocation Solution for Low Power Wide Area Networks is Now Available*. 2016. Disponível em: <<https://www.semtech.com/company/press/semtechs-lora-geolocation-solution-for-low-power-wide-area-networks-is-now-available>>. Acesso em: Fev. 05, 2021.
- [21] LORA ALLIANCE. *LoRaWAN Geolocation Whitepaper*. 2018. Disponível em: <[https://lora-alliance.org/resource\\_hub/lora-alliance-geolocation-whitepaper/](https://lora-alliance.org/resource_hub/lora-alliance-geolocation-whitepaper/)>. Acesso em: Fev. 05, 2021.

- [22] KAPOOR, R. et al. A novel 3d multilateration sensor using distributed ultrasonic beacons for indoor navigation. *Sensors*, v. 16, n. 10, 2016. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/16/10/1637>>.
- [23] LINKA, H. et al. Path loss models for low-power wide-area networks: Experimental results using lora. In: . [S.l.: s.n.], 2018.
- [24] WU, R.-H. et al. Study of characteristics of rssi signal. In: . [S.l.: s.n.], 2008. p. 1 – 3.
- [25] ERIC. *LoRa Documentation*. 2019. Disponível em: <<https://buildmedia.readthedocs.org/media/pdf/lora/latest/lora.pdf>>. Acesso em: Fev. 06, 2021.
- [26] POSPISIL, J.; FUJDIK, R.; MIKHAYLOV, K. Investigation of the Performance of TDoA-Based Localization Over LoRaWAN in Theory and Practice. *Sensors*, v. 20, n. 19, 2020. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/20/19/5464>>.
- [27] BISSET, D. *Analysing TDoA Localisation in LoRa Networks*. Dissertação (Mestrado) — TU Delft Software Technology, 2018.
- [28] SEMTECH. *LoRa Cloud Geolocation*. 2019. Disponível em: <<https://info.semtech.com/lora-cloud-geolocation-service>>. Acesso em: Fev. 05, 2021.
- [29] SEMTECH. *LoRa Cloud Documentation*. 2020. Disponível em: <<https://www.loracloud.com/documentation/geolocation>>. Acesso em: Fev. 05, 2021.
- [30] ACTILITY. *Actility's IoT geolocation helps to protect workers and assets*. 2018. Disponível em: <<https://www.actility.com/low-power-gps-the-power-of-lpwan-harnessed-for-location-and-tracking/>>. Acesso em: Jan. 19, 2021.
- [31] PETERSEN, K. et al. Systematic mapping studies in software engineering. In: *12th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering, EASE 2008*. [S.l.: s.n.], 2008.
- [32] AERNOUTS, M. et al. Sigfox and LoRaWAN Datasets for Fingerprint Localization in Large Urban and Rural Areas. *Data*, v. 3, n. 2, 2018. ISSN 2306-5729. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2306-5729/3/2/13>>.
- [33] AERNOUTS, M. et al. TDAoA: A combination of TDoA and AoA localization with LoRaWAN. *Internet of Things*, v. 11, p. 100236, 2020. ISSN 2542-6605. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S254266052030069X>>.
- [34] AERNOUTS, M. et al. Simulating a Combination of TDoA and AoA Localization for LoRaWAN. In: BAROLLI, L.; HELLINCKX, P.; NATWICHAJ, J. (Ed.). *Advances on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing*. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 756–765. ISBN 978-3-030-33509-0.



- [35] ANAGNOSTOPOULOS, G. G.; KALOUSIS, A. A Reproducible Comparison of RSSI Fingerprinting Localization Methods Using LoRaWAN. In: *2019 16th Workshop on Positioning, Navigation and Communications (WPNC)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6. ISSN 2164-9758.
- [36] ANJUM, M. et al. RSSI Fingerprinting-Based Localization Using Machine Learning in LoRa Networks. *IEEE Internet of Things Magazine*, v. 3, n. 4, p. 53–59, 2020.
- [37] BAIK, K. J.; LEE, S.; JANG, B. J. Hybrid RSSI-AoA Positioning System with Single Time-Modulated Array Receiver for LoRa IoT. *2018 48th European Microwave Conference, EuMC 2018*, European Microwave Association, p. 1133–1136, 2018.
- [38] BAKKALI, W. et al. Kalman filter-based localization for Internet of Things LoRaWAN™ end points. In: *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.
- [39] BOURAS, C. et al. Real-Time Geolocation Approach through LoRa on Internet of Things. In: *2021 International Conference on Information Networking (ICOIN)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 186–191.
- [40] BOURAS, C. et al. Time Difference of Arrival Localization Study for SAR Systems over LoRaWAN. *Procedia Computer Science*, v. 175, p. 292–299, 2020. ISSN 1877-0509. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050920317233>>.
- [41] BOURAS, C. et al. IoT Geolocation Performance Using LoRaWAN. In: BAROLLI, L. et al. (Ed.). *Advanced Information Networking and Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 229–239. ISBN 978-3-030-44041-1.
- [42] CARRINO, F. et al. LoRaLoc: Machine Learning-Based Fingerprinting for Outdoor Geolocation using LoRa. In: *2019 6th Swiss Conference on Data Science (SDS)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 82–86.
- [43] CHEN, Y. et al. Outdoor Localization for LoRaWans Using Semi-Supervised Transfer Learning with Grid Segmentation. In: *2019 IEEE VTS Asia Pacific Wireless Communications Symposium (APWCS)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–5.
- [44] CHO, J.; HWANG, D.; KIM, K. Improving TDoA Based Positioning Accuracy Using Machine Learning in a LoRaWan Environment. In: *2019 International Conference on Information Networking (ICOIN)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 469–472.
- [45] CHOI, W. et al. Low-Power LoRa Signal-Based Outdoor Positioning Using Fingerprint Algorithm. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, v. 7, n. 11, 2018. ISSN 2220-9964. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2220-9964/7/11/440>>.

- [46] CUI, Z. et al. Research and implementation of network location algorithm based on LoRa system. *ACM International Conference Proceeding Series*, p. 239–245, 2018.
- [47] DARAMOUSKAS, I.; KAPOULAS, V.; PARASKEVAS, M. Using Neural Networks for RSSI Location Estimation in LoRa Networks. In: *2019 10th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications (IISA)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–7.
- [48] DIENG, O.; PHAM, C.; THIARE, O. Outdoor Localization and Distance Estimation Based on Dynamic RSSI Measurements in LoRa Networks: Application to Cattle Rustling Prevention. *International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, IEEE, v. 2019-October, p. 1–6, 2019. ISSN 21619654.
- [49] FARGAS, B. C.; PETERSEN, M. N. GPS-free geolocation using LoRa in low-power WANs. In: *GloTS 2017 - Global Internet of Things Summit, Proceedings*. [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017. ISBN 9781509058730.
- [50] GU, C.; JIANG, L.; TAN, R. LoRa-Based Localization: Opportunities and Challenges. In: *Proceedings of the 2019 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*. USA: Junction Publishing, 2019. (EWSN '19), p. 413–418. ISBN 9780994988638.
- [51] JANSSEN, T.; BERKVEN, R.; WEYN, M. Benchmarking RSS-based localization algorithms with LoRaWAN. *Internet of Things*, v. 11, p. 100235, 2020. ISSN 2542-6605. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542660520300688>>.
- [52] KREMO, H. et al. A method to enhance ranging resolution for localization of LoRa sensors. In: *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.
- [53] KWASME, H.; EKIN, S. RSSI-Based Localization Using LoRaWAN Technology. *IEEE Access*, IEEE, v. 7, p. 99856–99866, 2019. ISSN 2169-3536.
- [54] LAM, K.; CHEUNG, C.; LEE, W. New RSSI-Based LoRa Localization Algorithms for Very Noisy Outdoor Environment. In: *2018 IEEE 42nd Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)*. [S.l.: s.n.], 2018. v. 02, p. 794–799.
- [55] LAM, K. H.; CHEUNG, C. C.; LEE, W. C. LoRa-based localization systems for noisy outdoor environment. *International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, v. 2017-October, p. 278–284, 2017. ISSN 21619654.
- [56] LAM, K. H.; CHEUNG, C. C.; LEE, W. C. RSSI-Based LoRa Localization Systems for Large-Scale Indoor and Outdoor Environments. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, IEEE, v. 68, n. 12, p. 11778–11791, 2019. ISSN 19399359.

- [57] LI, Y. et al. Towards Location Enhanced IoT: Characterization of LoRa Signal For Wide Area Localization. In: *2018 Ubiquitous Positioning, Indoor Navigation and Location-Based Services (UPINLBS)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–7.
- [58] LIN, Q.; ZENG, J. Application of Internet of Things Positioning System Based on LoRa System to Community Correction. In: *2019 IEEE 11th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 133–136.
- [59] LIN, Y. et al. SateLoc: A Virtual Fingerprinting Approach to Outdoor LoRa Localization using Satellite Images. In: *2020 19th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 13–24.
- [60] LIN, Y.; SUN, C.; HUANG, K. RSSI Measurement with Channel Model Estimating for IoT Wide Range Localization using LoRa Communication. In: *2019 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–2. ISSN 2642-3529.
- [61] MACKEY, A.; SPACHOS, P. LoRa-based Localization System for Emergency Services in GPS-less Environments. *INFOCOM 2019 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops, INFOCOM WKSHPs 2019*, IEEE, p. 939–944, 2019.
- [62] PANDANGAN, Z. A.; TALAMPAS, M. C. R. Hybrid LoRaWAN Localization using Ensemble Learning. In: *2020 Global Internet of Things Summit (GloTS)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6.
- [63] PIMPINELLA, A. et al. Machine Learning Based Localization of LoRaWAN Devices via Inter-Technology Knowledge Transfer. In: *2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6.
- [64] PLETS, D. et al. Experimental Performance Evaluation of Outdoor TDoA and RSS Positioning in a Public LoRa Network. *IPIN 2018 - 9th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, IEEE, n. September, p. 1–8, 2018.
- [65] PODEVIJN, N. et al. TDoA-based outdoor positioning in a public LoRa network. *IET Conference Publications*, v. 2018, n. CP741, p. 5–8, 2018.
- [66] PUROHIT, J. et al. Fingerprinting-Based Indoor and Outdoor Localization with LoRa and Deep Learning. In: *GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6.
- [67] RADETA, M. et al. LoRaquatica: Studying Range and Location Estimation using LoRa and IoT in Aquatic Sensing. In: *2020 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1–6.

- [68] SANCHEZ, C. et al. Performance evaluation of RSSI-based positioning system with low-cost LoRa devices. In: *PE-WASUN 2019 - Proceedings of the 16th ACM International Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks*. [S.l.]: Association for Computing Machinery, Inc, 2019. p. 37–44. ISBN 9781450369084.
- [69] SAVAZZI, P. et al. A wiener-based rssi localization algorithm exploiting modulation diversity in lora networks. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 19, n. 24, p. 12381–12388, 2019. ISSN 15581748.
- [70] TUMUHAIRWE, R.; AMANQUAH, N. Determining the Location of a Bus in Real-Time Using LoRa Technology. In: *2019 IEEE AFRICON*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–6.
- [71] VAZQUEZ-RODAS, A. et al. Experimental Evaluation of RSSI-based Positioning System with Low-cost LoRa Devices. *Ad Hoc Networks*, p. 102168, 2020. ISSN 1570-8705. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1570870520301736>>.
- [72] VERBEKE, T.; OLT, E.; MUNTEANU, A. Development and Demonstration of a LoRa TDOA-Based Localisation System: Demo. In: *Proceedings of the 10th International Conference on Distributed Smart Camera*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2016. (ICDSC '16), p. 206–207. ISBN 9781450347860. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/2967413.2974031>>.
- [73] ZHOU, L.; YANG, N.; ZHANG, K. Positioning Improvement Algorithm Based on LoRa Wireless Networks. In: SUN, X.; PAN, Z.; BERTINO, E. (Ed.). *Artificial Intelligence and Security*. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 188–198. ISBN 978-3-030-24271-8.
- [74] FANG, B. T. Simple solutions for hyperbolic and related position fixes. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, v. 26, n. 5, p. 748–753, 1990.
- [75] FOY, W. H. Position-Location Solutions by Taylor-Series Estimation. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-12, n. 2, p. 187–194, 1976. ISSN 1557-9603.
- [76] CHAN, Y. T.; HO, K. C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location. *IEEE Transactions on Signal Processing*, v. 42, n. 8, p. 1905–1915, Aug 1994. ISSN 1941-0476.
- [77] DATA SCIENCE ACADEMY. *Deep Learning Book*. 2021. Disponível em: <<http://deeplearningbook.com.br/>>. Acesso em: Fev. 26, 2021.
- [78] CHOLLET, F. *Deep learning with R*. 1st edition. ed. Shelter Island, NY: Manning Publications, 2018. ISBN 1-61729-554-X.





# UPF

UNIVERSIDADE  
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José  
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900  
(54) 3316 7000 - [www.upf.br](http://www.upf.br)