

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REDES LORA EM ÁREAS SUBURBANAS**PERFORMANCE ANALYSIS OF LORA NETWORKS IN SUBURBAN AREAS**

Caio Tascheti Mello^{1, i}
Paulo Lucas da Silva^{2, ii}
Leandro Poloni Dantas^{3, iii}
Marcones Cleber Brito da Silva^{4, iv}
Luiz Carlos Canno^{5, v}
Fernando Simplicio de Sousa^{6, vi}

Data de submissão: (26/05/2023) Data de aprovação: (24/07/2023)

RESUMO

Os equipamentos conhecidos como dispositivos IoT – *Internet of Things* estão contribuindo de forma significativa para o desenvolvimento de diversos segmentos tecnológicos, pois são capazes de enviar, receber e controlar informações remotamente a qualquer lugar do mundo, sendo esses os grandes responsáveis pelo aumento exponencial de informações disponíveis na internet atualmente. Entretanto, com a rápida evolução da internet das coisas, cria-se a necessidade de novas tecnologias sem fio, capazes de suportar muitos dispositivos, que operam a longas distâncias, com baixo consumo de energia e em diversos ambientes. É nesse contexto que novas redes surgem para preencher lacunas deixadas pelas redes convencionais, como por exemplo as redes LPWAN - *Low Power Wide Area Networks*. Essas redes têm se destacado por proporcionarem grandes flexibilidades, baixo custo de manutenção, gerenciamento de muitos dispositivos, além de apresentarem um baixo consumo de energia e ampla área de cobertura. O presente artigo se propõe a fornecer um estudo sobre a análise de desempenho de redes LoRa em áreas suburbanas, por ser umas das tecnologias LPWAN mais implementadas atualmente. Foram realizados estudos dessa tecnologia, focando na análise de elevação do solo, potência do sinal recebido, relação sinal ruído e taxa de dados em função da distância, nos quais optou-se pela utilização do modelo de propagação de shadowing para se estimar a potência do sinal recebido num raio de 600 m. De acordo com os resultados obtidos, é possível verificar que o comportamento dos sinais amostrados e teóricos das retas são semelhantes, sendo as obstruções e a topografia alguns dos principais problemas.

Palavras-chave: LoRa; LoRaWAN; LPWAN; Shadowing.

ABSTRACT

¹ Pós-Graduado na Faculdade de Tecnologia SENAI São Paulo – Campus “Anchieta”. E-mail: caio.tascheti@senaisp.edu.br.

² Pós-Graduado na Faculdade de Tecnologia SENAI São Paulo – Campus “Anchieta”. E-mail: paulo.silva73@senaisp.edu.br.

³ Professor Dr. na Faculdade de Tecnologia SENAI São Paulo – Campus “Anchieta”. E-mail: leandro.poloni@sp.senai.br.

⁴ Professor Me. na Faculdade de Tecnologia SENAI São Paulo – Campus “Anchieta”. E-mail: marcones.silva@sp.senai.br.

⁵ Professor Especialista na Faculdade de Tecnologia SENAI São Paulo – Campus “Anchieta”. E-mail: luis.canno@sp.senai.br.

⁶ Professor Me. na Faculdade de Tecnologia SENAI São Paulo – Campus “Anchieta”. E-mail: fernando.simplicio@sp.senai.br.

The equipment's known as IoT (Internet of Things) devices are contributing significantly to the development of many technological segments, as they are capable of send, receive, and control information anywhere in the world, which are the most responsible for the increase in information available on internet today. However, with the rapid evolution of the internet of things, there is a need for new wireless technologies capable of supporting many devices operating over long distances, low power consumption and operating in several environments. On this context that new networks emerge to fill gaps left by conventional networks, such as LPWAN – Low Power Wide Area Networks. These networks have been distinguished for providing great flexibility, low maintenance cost, management of many devices, low energy consumption and wide coverage area. This article aims to provide a study on the performance analysis of LoRa networks in suburban areas, as it is one of the most implemented LPWAN technologies today. Studies of this technology were carried out, focusing on the analysis of ground elevation, received signal strength, signal-to-noise ratio, and data rate in function of distance. The shadowing propagation model was used to estimate the signal power received within a radius of 600 m. According to the results obtained, it is possible to verify that the behavior of sample and theoretical signals of the straight lines are similar, with obstructions and topographic being one of the main problems.

Keywords: LoRa; LoRaWAN; LPWAN; Shadowing.

1 INTRODUÇÃO

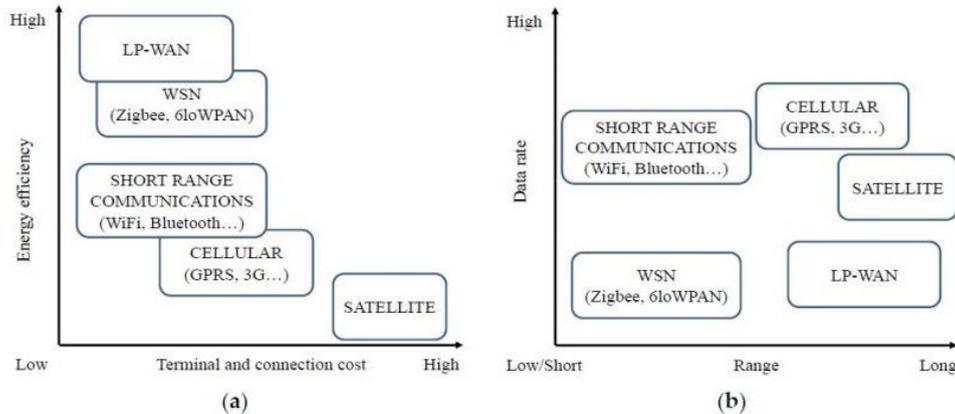
Nos últimos anos houve uma enorme expansão da Internet e com ela o desenvolvimento de tecnologias responsáveis por conectar diversos dispositivos à rede. Esses equipamentos, conhecidos como dispositivos IoT (Internet das Coisas), são capazes de enviar, receber e controlar informações remotamente a qualquer lugar do mundo, são os grandes responsáveis pelo aumento exponencial do tráfego de informações disponíveis na internet atualmente (COSTA; OLIVEIRA; MOTA, 2018). Esses dispositivos vêm sendo utilizados em larga escala de aplicação para monitoramento industrial, casas inteligentes, segurança, cidades inteligentes, agricultura, entre outros (EL CHALL; LAHOUD; EL HELOU, 2019).

É estimado que em 2025 todo tipo de objeto contará com algum tipo de conexão à internet (SHAFIQUE et al., 2020). De acordo com a Cisco, em 2020, existiam mais de 50 bilhões de dispositivos conectados via rádio frequência (EL CHALL; LAHOUD; EL HELOU, 2019). Com rápida evolução da internet das coisas, cria-se a necessidade de novas tecnologias sem fio, capazes de suportar muitos dispositivos, que operam a longas distâncias, com baixo consumo de energia e em diversos tipos de ambientes, como por exemplo debaixo d'água e solos (GREGORA; VOJTECH; NERUDA, 2016).

Assim como existem diversas possibilidades de aplicações de IoT, também existe uma variedade de tecnologias capazes de satisfazer esses requisitos, como por exemplo as soluções tradicionais, redes sem fio de curto alcance (*Zigbee*, *Z-Wave* e *Bluetooth*), rede local sem fio (*Wi-Fi*), identificadores de rádio frequência (*RFID*) e redes de celulares (*GSM*) (FERNANDES et al., 2019). Embora esses dispositivos façam partes de redes IoT, eles não atendem completamente todos os requisitos, como por exemplo cidades inteligentes, uma vez que

essas tecnologias são caracterizadas pelo alto custo, alta complexidade, alto consumo e baixo alcance (GREGORA; VOJTECH; NERUDA, 2016), conforme pode ser visto na Figura 1 em (OLAYA, 2019).

Figura 1 – Análise da eficiência energética, custos, taxa de dados e alcance dos diferentes tipos de redes.



Fonte: Adaptado de (OLAYA, 2019).

É nesse contexto que novas redes surgem para preencher lacunas deixadas pelas convencionais, como por exemplo as redes LPWAN (*Low Power Wide Area Networks*). Elas têm se destacado por proporcionarem grande flexibilidade de instalação e manutenção, um baixo custo de implantação, gerenciamento de muitos dispositivos, além de apresentarem um baixo consumo de energia e ampla área de cobertura (MENDES; Renan, 2020), conforme Quadro 1. Cidades inteligentes, *smart grid* e sensoriamento urbano são aplicações que ilustram bem o cenário de comunicação a longas distâncias e que requerem baixo consumo de energia (MOLANO ORTIZ et al., 2019).

Quadro 1 – Análise comparativa entre as redes LP-WAN, WSN e Short Range Communications.

	ZigBee	Wi-Fi	Bluetooth	SigFox	NB-IoT	LoRa
Frequência	Sub-GHz/2.4GHz	2.4/ 5GHz	2.4GHz	Sub-GHz	Licenciada Banda GSM/LTE	Sub-GHz
ISM (Freq)	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim
Distância	100 m	50 m	100-400 m	50 Km	15 Km	15 Km
Taxa de dados	250 Kbps	600 Mbps	<25 Mbps	1 Kbps	250 Kbps	50 Kbps
Consumo	Baixo	Médio	Baixo	Baixo	Médio	Baixo
Custo	Médio	Médio	Baixo	Baixo	Médio	Médio

Fonte: Adaptado de (OLAYA, 2019).

Muitas dessas tecnologias vêm sendo estudadas, padronizadas e desenvolvidas por consórcios industriais, dentre elas (Sigfox, NB-IoT, Weighless e LoRa). Em particular, a rede LoRa (*Long Range*) é uma das tecnologias LPWAN mais implementadas e que vem ganhando interesse da comunidade científica e industrial por atender muitos requisitos da indústria 4.0 (EL CHALL; LAHOUD; EL HELOU, 2019). Por usar uma técnica de modulação conhecida por CSS

(*Chirp Spreading Spectrum*), que varia a frequência sem mudar a fase entre símbolos adjacentes (GOURSAUD; GORCE, 2015), e por operar na faixa de frequência de sub GHz (915 MHz), representa uma faixa menos congestionada se comparada a rede 2,4 GHz, a LoRa apresenta uma ótima imunidade a ruídos e um bom desempenho (MENDES; Renan, 2020). Caracteriza-se pela baixa complexidade em termos de hardware, diminuição do tamanho dos cabeçalhos e da complexidade da rede em termos de saltos e endereçamento, viabilizando uma comunicação bidirecional simples, com o uso de uma infraestrutura mínima e com baixo consumo de energia (MOLANO ORTIZ et al., 2019).

O estudo de viabilidade do uso da tecnologia LoRa em aplicações como cidades inteligentes, *smart grid* e sensoriamento urbano é de grande importância. Diversos trabalhos têm sido publicados na literatura científica visando analisar o comportamento do LoRa, do ponto de vista de eficiência energética, imunidade a ruídos, confiabilidade e segurança, em diferentes cenários (MENDES; Renan, 2020). Por exemplo, no artigo de El Chall, Lahoud e El Helou (2019), foram conduzidos testes com a tecnologia LoRa (SX1272) em ambientes internos e externos em localidades urbanas e rurais, para comparar a performance dos diversos modelos de propagação de ondas de rádio. No artigo de Molano Ortiz et al. (2019), são comparados os resultados de experimentos práticos usando dispositivos físicos LoRa e simulações usando o software NS-3. Os resultados mostram que existe uma forte correlação entre as métricas avaliadas *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), *Signal to Noise Ratio* (SNR) e *Packet Delivery Ratio* (PDR) em cada um dos ambientes.

De acordo com Mendes e Renan (2020), foi apresentado um estudo do desempenho de um sistema de comunicação LoRa, na faixa de 915 MHz para aplicações IoT em ambientes industriais para monitoramento e controle de processos em ambientes *indoor* e *outdoor* até 300 m. O desempenho do sistema foi estimado nas medidas de *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), *Signal to Noise Ratio* (SNR) e *Packet Delivery Ratio* (PDR). No artigo Silva et al. (2018), foi apresentada a importância das redes LPWAN para rastreamento de frota de veículos, pois é uma aplicação que demanda conexão com grande cobertura de sinal e poucas falhas de comunicação durante o trajeto do veículo, no qual o uso de poucos dados e grandes distâncias são recorrentes para essas aplicações.

O artigo de Costa, Oliveira e Mota (2018), trata-se da importância da IoT no campo da agricultura, fornecendo uma visão abrangente das aplicações existentes, tecnologias e os principais desafios futuros, sendo que as áreas mais abordadas são as cadeias de suprimentos, monitoramento e metrologia, no qual almeja-se que a IoT através das redes LPWAN seja uma poderosa ferramenta para transformar o agronegócio em redes inteligentes de objetos conectados, podendo identificar, detectar e controlar dispositivos remotamente. E ao mesmo tempo, suprir a carência de mão de obra no campo.

No estudo de Carlsson et al. (2018), é realizado um estudo no desempenho de uma rede LoRa com base na distância, qualidade do sinal (RSSI) e a relação de pacotes com erros (PER), mostrando ao leitor as vantagens e desvantagens do comportamento da tecnologia em diferentes cenários (espaços abertos, florestas, urbanizações e elevações) analisando o desempenho de *end-devices* e *gateways* de uma série de perspectivas diferentes. Os experimentos realizados fornecem informações sobre como o desempenho da tecnologia LoRa é afetado por diferentes tipos de fatores e como varia de um ambiente para o outro.

Este trabalho se diferencia dos descritos acima pelo fato de terem sido realizadas medições em campo para determinar o desempenho do uso da tecnologia LoRa em aplicações suburbanas (*Outdoor*), onde o parâmetro chave para a otimização da performance das redes

LPWAN é fazer a previsão mais próxima da realidade da cobertura da rede para se ajustar à posição e altura das antenas no ambiente em questão (EL CHALL; LAHOUD; EL HELOU, 2019). Devido a isso, o estudo de propagação de sinais para as redes LPWAN são muito úteis para se obter uma melhor eficiência nos projetos de cobertura de redes sem fio. Este estudo permite a obtenção de informações sobre a intensidade e qualidade de sinais de rádio ao longo do ambiente, e quanto mais elaborado e completo for realizado, a princípio, melhor poderá ser o planejamento para a implantação da rede sem fio. Neste trabalho optou-se pela utilização do modelo de propagação de shadowing para se estimar a potência do sinal em ambientes suburbanos, pelo fato de se diferenciar dos demais, já que considera a atenuação sofrida pelo sinal através de seu percurso por diferentes ambientes suburbanos.

As análises realizadas foram baseadas nos valores medidos de RSSI (dBm), SNR (dB), taxa de dados em (bit/s), atraso no recebimento de pacotes (s), pacotes recebidos com erro em relação aos pacotes efetivamente recebidos (%), pacotes recebidos em relação aos pacotes transmitidos (%), pacotes efetivamente recebidos em relação ao total de mensagens recebidas (%) e a elevação do receptor RX em relação ao transmissor TX em (m). Além da introdução (I), no desenvolvimento (II), é apresentada uma descrição da tecnologia LoRa. Na metodologia (III), são apresentados detalhes do protótipo utilizado, funcionamento do sistema e cenário escolhido. Nos resultados e discussões (IV), são mostrados os resultados obtidos para o modelo de propagação utilizado. Finalmente, na conclusão (V), é apresentado o desfecho do trabalho, mostrando ao leitor aspectos positivos e negativos da tecnologia LoRa em ambientes suburbanos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O rádio LoRa é uma tecnologia proprietária e licenciada pela empresa Semtech Corporation (SEMTECH CORP., 2021), sendo esta a única fabricante de chips para todos os dispositivos LoRa (OLAYA, 2019).

A LoRa é a especificação da camada física desenvolvida e comercializada pela Semtech para redes de baixa potência e longo alcance (MOLANO ORTIZ et al., 2019). Essa tecnologia é derivada do espalhamento espectral por CSS, que usa pulsos de *chirp* modulados em frequência, a fim de codificar a informação. Além disso, é integrado com correção antecipada de erros (*Forward Error Correction – FEC*).

A técnica de CCS permite aumentar a sensibilidade, assim aumentando a comunicação a longas distâncias. Ela permite decodificar corretamente transmissões com 19.5 dB abaixo do ruído de fundo (EL CHALL; LAHOUD; EL HELOU, 2019). Originalmente, esse tipo de modulação foi utilizado em radares por terem imunidade a ruídos e alta segurança (OLAYA, 2019).

Normalmente, LoRa permite a configuração de cinco parâmetros: frequência da portadora (*carrier frequency - CF*), *spreading fator (SF)*, *bandwidth (BW)*, *transmission power (PTX)* e *code rate (CR)* do (*FEC*), que traz confiabilidade à transmissão de dados. Esses parâmetros podem ser ajustados de acordo com a característica desejada: robustez a ruído, consumo de energia, alcance e taxa de dados (EL CHALL; LAHOUD; EL HELOU, 2019). O LoRa pode operar nas faixas de frequência não-licenciadas de 430 MHz (Asia), 433 MHz (EUA), 869 MHz (Europa) e em 915 MHz (Brasil) (MENDES; Renan, 2020). A largura de banda (*bandwidth - BW*) pode ser 125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz, sendo que, quanto maior o BW, maior será a taxa de transmissão de dados, o que acarretará, contudo, uma menor sensibilidade. O SF representa a razão entre a taxa de símbolo e taxa de bit. O intervalo de valores suportados

pelo SF é entre 7 e 12, o que permite formar canais ortogonais, possibilitando que múltiplos sinais sejam transmitidos no mesmo, sem que colidam entre si. Quanto maior o spreading factor (*SF*), maior será a sensibilidade e o alcance do rádio, contudo estará mais exposto ao ruído (EL CHALL; LAHOUD; EL HELOU, 2019), maior será o tempo de propagação e menor a taxa de transmissão (MOLANO ORTIZ et al., 2019).

Para uma melhor explicação de como a mudança do *Spreading Factor (SF)*, *Bandwidth (BW)* e *Code Rate (CR)* pode afetar a taxa de bits, serão apresentadas a seguir equações que contribuem para um melhor entendimento.

A taxa de bits é dada por:

$$R_b = SF \times \frac{BW}{2^{SF}}, \quad \text{com } SF \in \{7, 8, 9, 10, 11, 12\} \quad (1)$$

CR define a quantidade de bits utilizada para redundância na mensagem, para permitir a recuperação de erros na mesma. A taxa de codificação T_c como:

$$T_c = \frac{4}{4 + CR}, \quad \text{com } CR \in \{1, 2, 3, 4\} \quad (2)$$

A taxa de transmissão R_b teórica é definida em função do fator de espalhamento e da taxa de código, como pode ser visto na equação 3.

$$R_b = SF \times \frac{T_c \times BW}{2^{SF}}, \quad \text{com } SF \in \{7, 8, 9, 10, 11, 12\} \quad (3)$$

A tabela 2 exibe os valores teóricos de taxa de transmissão de diferentes fatores de espalhamento para uma largura de banda 125 kHz.

Tabela 2 - Taxa de dados e sensibilidade para diferentes parâmetros de largura de banda (BW) e spreading factor (SF).

Taxa de dados	SF	BW (kHz)	Taxa de bits (kbps)	Sensibilidade (dBm)
DR0	12	125	0,293	-137
DR1	11	125	0,537	-134.5
DR2	10	125	0,976	-132
DR3	9	125	1,757	-129
DR4	8	125	3,125	-126
DR5	7	125	5,4680	-123
DR6	7	125	10,936	-122

Fonte: Adaptado de (EL CHALL; LAHOUD; EL HELOU, 2019).

2.1 Protocolo LoRaWAN

O protocolo *Long Range Area Network* (LoRaWAN) define as regras das camadas superiores da rede LoRa, sendo desenvolvida e mantida pelo grupo LoRa Alliance. O LoRaWAN (LoRaTM-Alliance, 2016) é baseado no protocolo de comunicação ALOHA e o padrão aberto da camada *Media Access Control* (MAC), para reduzir a complexidade dos *end-devices* em acessar o canal (EL CHALL; LAHOUD; EL HELOU, 2019). A Tecnologia LoRa é utilizada na camada física, como pode ser visto na Figura 2.

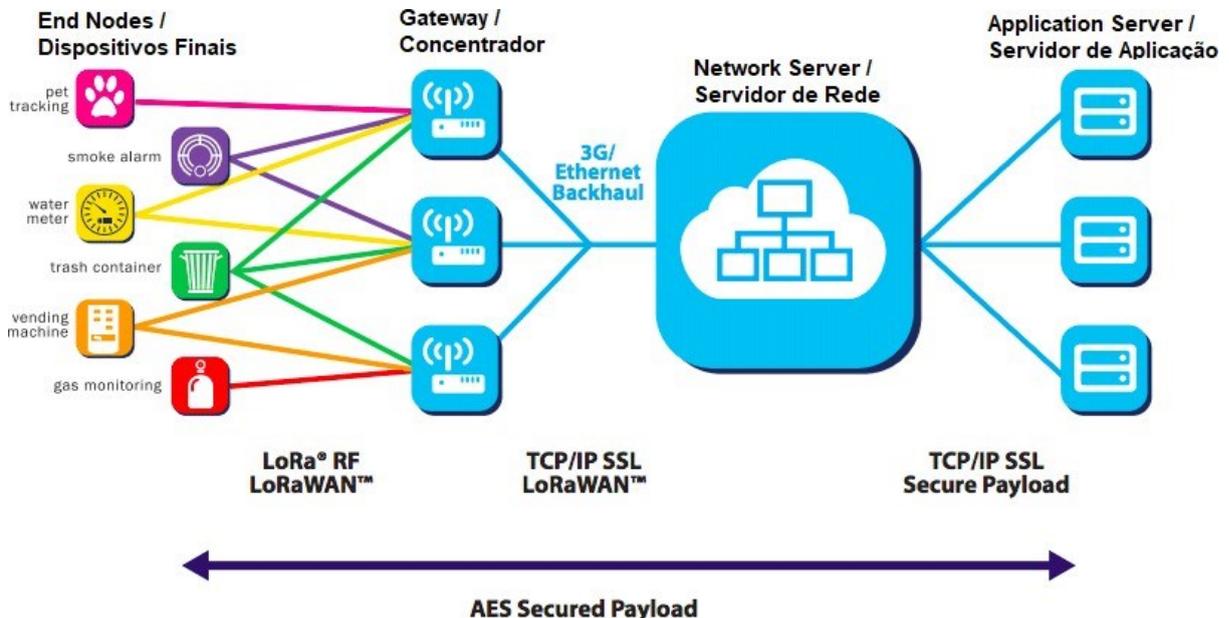
Figura 2 – Camada Física LoRa.



Fonte: Adaptado de (OLAYA, 2019).

A arquitetura da rede é baseada na topologia estrela, muito utilizada por ter alta performance e baixo consumo (OLAYA, 2019), consiste em basicamente três entidades: dispositivos finais *end-devices* (EDs), *gateways* (GWs) e um servidor central, como ilustra a Figura 3. Os EDs são responsáveis por coletar e processar dados dos sensores e enviá-los para os GWs por meio da tecnologia LoRa. O *Gateway* simplesmente direciona a mensagem recebida para um servidor central via IP (*Internet Protocol*) conectado à internet (EL CHALL; LAHOUD; EL HELOU, 2019). O servidor é o responsável pela autenticação, gerenciamento e encaminhamento dos pacotes de dados às aplicações (GREGORA; VOJTECH; NERUDA, 2016).

Figura 3 – Representação dos end-devices, gateways e servidor central.



Fonte: Adaptado de (OLAYA, 2019).

A rede LoRaWAN trabalha em três diferentes classes: Classe A (baixo consumo), Classe B (Baixa Latência) e Classe C (Sem Latência) (OLAYA, 2019).

2.2 Modelo de Propagação de Shadowing

A degradação da potência de um sinal de rádio entre um par de antenas transmissora e receptora pode ser ocasionada por objetos (edifícios, vegetações e montanhas) que interferem na livre propagação do sinal eletromagnético causando, geralmente, efeitos de reflexão, difração e espalhamento no sinal de rádio (RAPPAPORT; REED; WOERNER, 1996).

Existem diversos modelos de propagação que podem ser utilizados para estimar a potência da recepção de um sinal em diferentes ambientes. Muitos desses modelos levam em consideração a perda no espaço livre, os desvanecimentos, interferências do ambiente e tempo de resposta. Um desses modelos é o modelo de Shadowing, que será o adotado neste trabalho por sua simplicidade, flexibilidade e utilização de medidas práticas.

O Modelo de Propagação de Shadowing (MPS) é baseado no Modelo de Propagação de Espaço Livre modificado para adicionar uma variável aleatória log-normal gaussiana (XdB), que representa o efeito *shadowing* no ambiente, que pode ser quantificado pelo valor do seu desvio padrão σ_{sh} , dado em dB, para representar a incerteza de $P_r(d_0)$ para os diferentes ambientes em uma mesma distância d . A potência recebida $P_r(d)$ é dado pela equação 4 (MENDES; Renan, 2020).

$$P_r(d) = P_r(d_0) - 10 \beta \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_{dB} \quad (4)$$

onde, β é o fator de perda de percurso, d é a distância entre transmissor e o receptor e d_0 a distância de referência, $P_r(d_0)$ é a potência recebida a uma distância d_0 de TX. Na Tabela 3, são apresentados alguns valores típicos de β que foram calculados por meio de ensaios em campo por Rappaport, Reed e Woerner (1996).

Tabela 3 – Valores típicos de β calculados por meio de ensaios em campo.

Ambiente	β
Espaço Livre	2,0
Área Urbana	2,7 a 3,5
Área Urbana com Shadowing	3 a 5
Linha de Visada em Edifícios	1,6 a 1,8
Obstrução em Fábrica	2 a 3

Fonte: Adaptado de (RAPPAPORT; REED; WOERNER, 1996).

3 METODOLOGIA

Os experimentos realizados para análise da tecnologia LoRa consistem em medições práticas. Os protótipos foram posicionados a 2,75 m do solo. Foram utilizados dois dispositivos ESP32 com LoRa integrado, baseados no chip SX1276, para transmissão (TX) e recepção (RX) dos sinais, dos quais foram avaliados: RSSI (dBm), SNR (dB), taxa de dados em (bits/s), atraso no recebimento de pacotes (s), pacotes recebidos com erro em relação aos pacotes efetivamente recebidos (%), pacotes recebidos em relação aos pacotes transmitidos (%), pacotes efetivamente recebidos em relação ao total de mensagens recebidas (%) e a elevação do receptor (RX) em relação ao transmissor (TX) em (m). Todas as métricas foram avaliadas em função da variação do spreading factor (SF) e da distância. As medições práticas foram realizadas através de um protótipo em hardware conforme pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Protótipo de hardware Transmissor (TX) e receptor (RX) montados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os ajustes das configurações dos módulos serão descritos na tabela 4. A comunicação consiste na transmissão de dados pela unidade transmissora para os valores de spreading factor (SF) 7 e 12. Para cada ponto avaliado foram transmitidos cerca de 1000 pacotes. Em cada pacote foram enviados dados contendo variável contadora, número de pacotes recebidos, RSSI (dBm), SNR (dB), SF, distância aproximada entre TX/RX (m), potência do transmissor (dBm) e o tempo de envio dos pacotes (s). O tamanho total do pacote enviado é de 26 bytes.

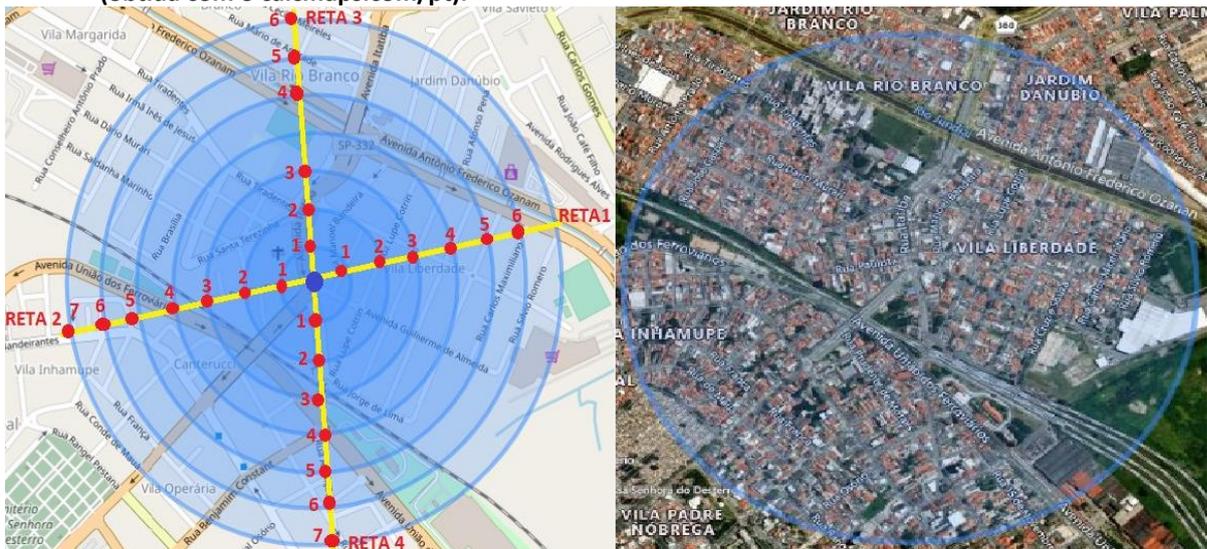
Tabela 4 - Parâmetros de configuração dos experimentos práticos.

Frequência	915 MHz
Potência do transmissor	20 dBm
Spreading Factor - SF	7 e 12
Bandwidth - BW	125 kHz
Code Rate - CR	4/5

Fonte: Adaptado de (MOLANO ORTIZ et al., 2019).

Os ensaios em campo foram realizados em ambientes suburbanos, mais precisamente localizados na região de Jundiaí-SP, selecionados de forma a obter resultados diferentes devido aos azimutes traçados. Foi utilizado um ponto central fixo estratégico para a unidade transmissora (TX). Já a unidade receptora (RX) foi posicionada em vinte e seis pontos pré-definidos a aproximadamente 100, 200, 300, 400, 500 e 600 m de distância para 4 retas distintas com elevações variadas de solo. A Figura 5 mostra o local dos experimentos.

Figura 5 - Mapa da região central de Jundiaí-SP, cenário dos experimentos práticos (obtida com o calcmaps.com/pt).



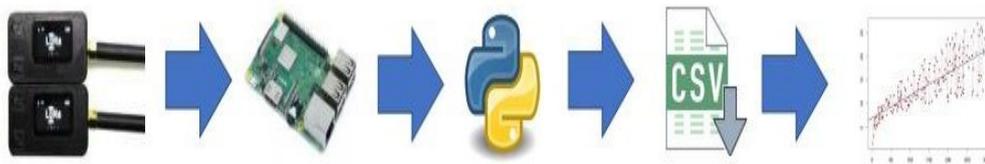
Fonte: Elaborado pelo autor.

O protótipo transmissor (TX) é constituído por uma placa ESP32 – LoRa e bateria de

lítio de 500 mAh. Foi feito um ajuste na unidade transmissora, na qual fixamos a potência de transmissão em 20 dBm, também foi utilizada uma chave do tipo *push-button* para facilitar a mudança do SF de 7 para 12 respectivamente. Após os ajustes, a unidade transmissora envia um contador crescente para a unidade receptora.

Já o protótipo receptor (RX) é constituído por uma placa ESP32 – LoRa, Raspberry Pi Modelo Zero W e bateria de lítio de 5000 mAh. Na unidade receptora ocorrerá o recebimento dos pacotes, entretanto, esses dados são enviados via MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) através de comandos do tipo JSON (*JavaScript Object Notation*) para a Raspberry Pi, que armazena esses dados numa planilha por meio de um *script* em Python. Na Figura 6, é apresentado de forma simplificada o passo a passo de funcionamento do sistema.

Figura 6 - Diagrama de blocos, descritivo de funcionamento do sistema.



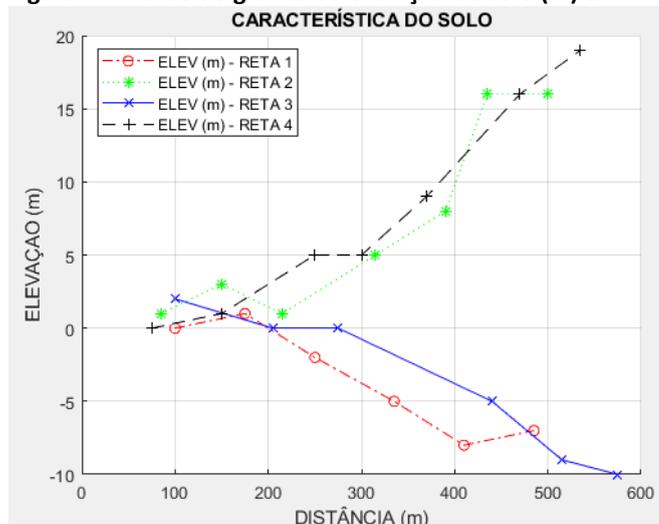
Fonte: Elaborado pelo autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir das configurações implementadas nos experimentos práticos descritos no capítulo 3, foram comparados os diferentes resultados das quatro retas analisadas. Em todos os cenários foram realizadas cerca de 1000 medições para cada ponto medido e SF, no caso SF7 e SF12.

Na Figura 7, é apresentado o perfil de elevação da área em estudo separado pelas retas, onde as medições foram realizadas. Os dados foram obtidos através do *software* MATLAB. Pode-se verificar que o terreno é inclinado e há uma diferença máxima de elevação entre TX e RX de aproximadamente 20 m.

Figura 7- Análise do gráfico da elevação do solo (m) em função da distância (m).



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1 Análise da potência do sinal recebido

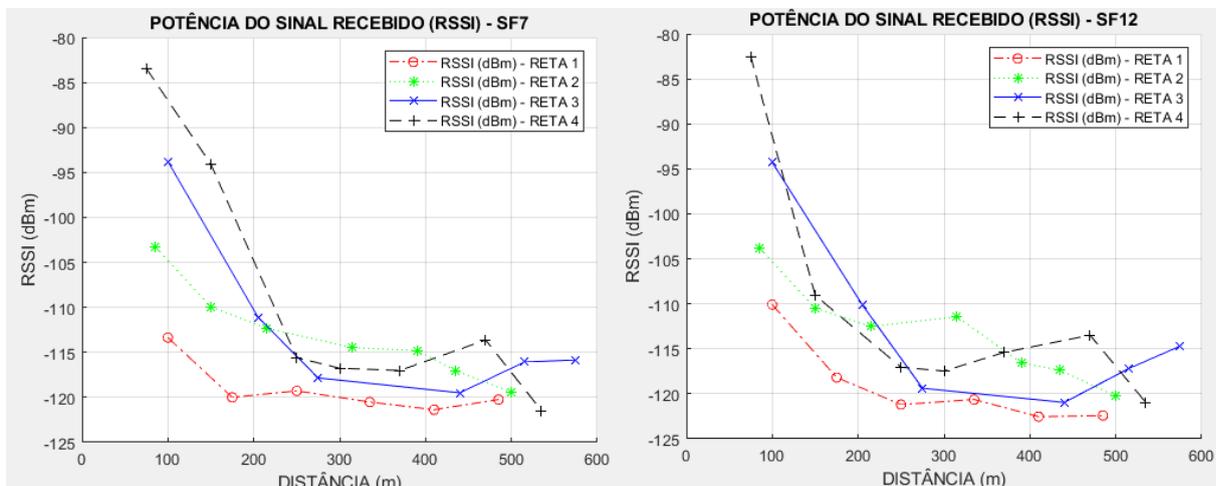
Na Figura 8, são apresentadas as curvas referentes às medidas de RSSI para as diferentes distâncias (d) para cada reta. É possível verificar que a potência do sinal vai caindo exponencialmente, conforme descrito na introdução. Já a partir dos 300 m, a potência do sinal fica limitada entre -115 dBm e -120 dBm aproximadamente para todas as retas. Observa-se que a reta 1 inicia com valores baixos de RSSI, o que é condizente com o número de residências nesse trecho, maior do que nos demais. A atenuação do sinal ocorre devido à penetração em materiais sólidos como o concreto, que pode chegar a -22 dBm (CARLSSON et al., 2018). De acordo com o fabricante, a sensibilidade de recepção do rádio LoRa é de -148 dBm, sendo assim possível a correta operação do sistema dentro da faixa analisada. A única reta que mostrou um comportamento diferente foi a reta 3, tanto para o SF7 quanto para o SF12, no ponto de 450 m, onde houve uma melhora na potência do sinal em relação aos pontos anteriores. O que pode ter causado essa melhora na qualidade da potência de sinal recebido é o declive do solo de aproximadamente 10 m entre transmissor (TX) e receptor (RX), conforme pode ser observado na Figura 7.

Com base no artigo de Carlsson et al. (2018), o estudo mostra que com os dispositivos a 400 m de distância na mesma altura, os valores de RSSI estavam ligeiramente abaixo de -100 dBm, já nos primeiros 10 m de elevação do solo foi observado um aumento em RSSI para cerca de -95 dBm, ou seja, é de se notar que com o aumento de 10 m na elevação do solo houve uma melhora de 5 dBm na potência do sinal recebido.

4.2 Análise de relação sinal ruído (SNR)

Através da Figura 9 pode ser observado o comportamento das quatro retas para as duas configurações de SF. Para o SF7 é possível observar que mesmo com o SNR negativo, a partir dos 200m, o rádio consegue decodificar a mensagem recebida com poucos erros, devido à boa qualidade do sinal. Porém, para esse mesmo SF, aos 500 m, ele apresenta um baixo desempenho do SNR de aproximadamente -8dB, apresentando um percentual de erro nas mensagens recebidas maior que 50%, conforme Figura 11.

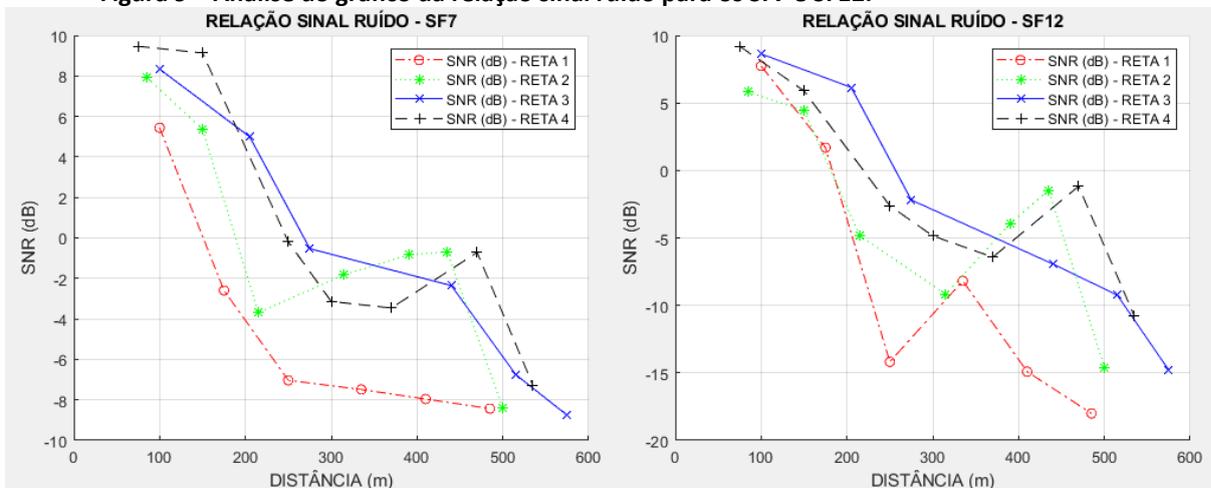
Figura 8- Análise do gráfico da potência do sinal recebido (RSSI) para os SF7 e SF12.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com o fabricante, o rádio LoRa pode receber e decodificar com sucesso o sinal com um SNR de até -20 dB quando configurado com o SF12, o que resulta em uma sensibilidade do receptor de no máximo -137 dBm. Como pode ser observado para o SF12, o sinal recebido apresenta um SNR negativo alto para as medidas acima de 500 m, porém demonstra um desempenho relativamente bom com apenas 20 % de erro nos pacotes recebidos, conforme Figura 11. Outro fato a se observar é que quanto maior o SF, maior será a limitação da taxa de bits devido ao maior atraso médio entre os pacotes, pelo aumento do tempo de propagação no ar e diminuição da taxa de transmissão do enlace (RAZA et al. 2017).

Figura 9 – Análise do gráfico da relação sinal ruído para os SF7 e SF12.

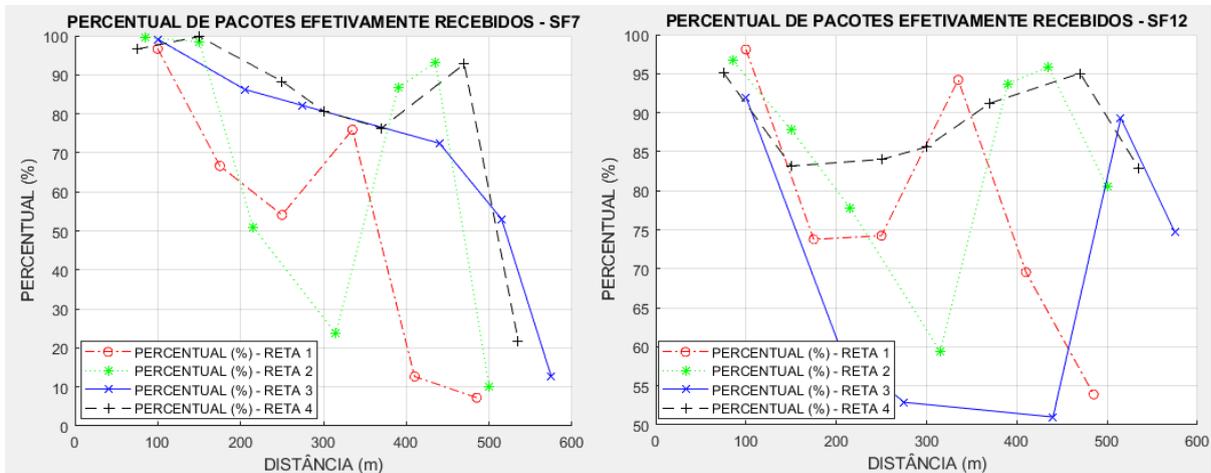


4.3 Relação percentual da quantidade de pacotes transmitidos pela quantidade de pacotes efetivamente recebidos.

Na Figura 10, são exibidos os gráficos que trazem a relação entre a quantidade de pacotes transmitidos (TX) pela quantidade de pacotes efetivamente recebidos (RX). Através dessa análise é possível compreender qual é a relação da quantidade de pacotes que efetivamente foram recebidos pelo rádio receptor. A taxa de pacotes efetivamente recebidos pode ser vista na Equação 5.

$$Tx_{pacotes_efetivamente_recebidos} = \frac{P_{efetivamente_recebidos}}{P_{transmitidos}} \times 100 \quad (5)$$

Figura 10 - Relação percentual da quantidade de pacotes transmitidos pela quantidade de pacotes efetivamente recebidos para os SF7 e SF12.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a Figura 10, para o SF7 a partir dos 500 m aproximadamente, o número dos pacotes efetivamente recebidos diminui drasticamente chegando a uma média 10% para as retas 2, 3 e 4. É de se notar que para a reta 1 essa média é ainda menor devido ao grande número de residências e estruturas ao longo do percurso. Já para o SF12, inicialmente há um aumento da perda de pacotes, entretanto após 250 m aproximadamente, há uma diminuição das perdas. É possível notar que as retas 2, 3 e 4, mesmo perto dos 500 m, apresentam uma taxa de perda de pacotes pequena para o SF12, indicando que os rádios conseguem se comunicar nessa faixa por distâncias ainda maiores.

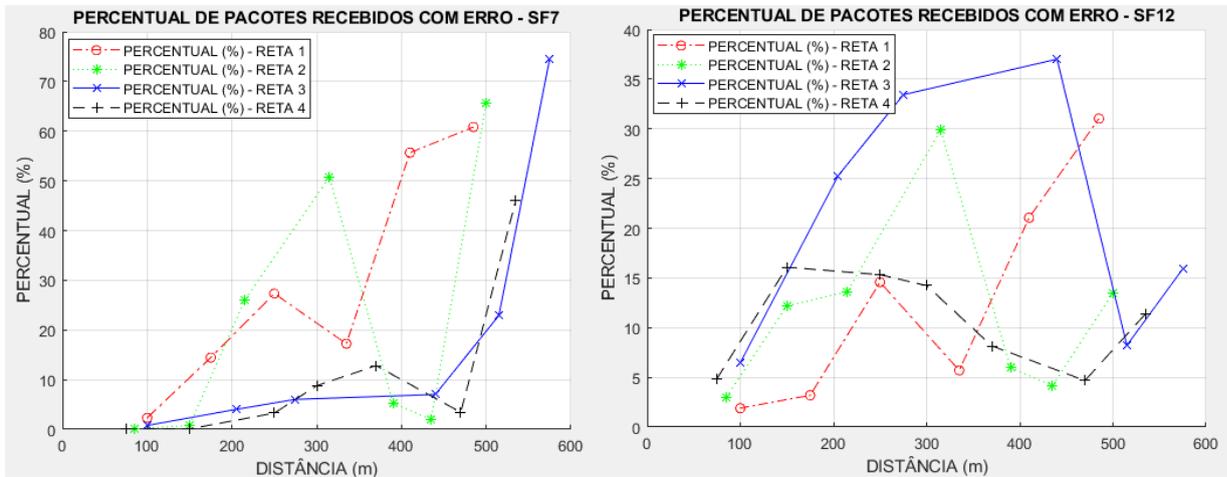
4.4 Relação percentual da quantidade de pacotes recebidos com erros pela quantidade de pacotes efetivamente recebidos.

Na Figura 11, são apresentados os gráficos referentes às medidas de taxa de erro por pacote (PER). A taxa de erro é dada pela Equação 6.

$$PER (\%) = \frac{P_{\text{recebidos_com_erros}}}{P_{\text{Efetivos_recebidos}}} \times 100 \quad (6)$$

Como pode ser observado na Figura 11, para o SF7 a taxa de erro para a reta 3 e 4 se mantém em até 10% de erro dos pacotes recebidos aproximadamente, porém a partir dos 450 m houve um grande aumento de erros nos pacotes recebidos, assim corroborando a literatura do LoRa. Já as retas 1 e 2 apresentam uma maior quantidade de erros nos pacotes recebidos a partir dos 200 m, pelo fato de essas retas se localizarem em uma área mais urbana, com prédios, residências e fábricas.

Figura 11 – Relação percentual da quantidade de pacotes recebidos com erro pela quantidade de pacotes efetivamente recebidos para os SF7 e SF12.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já para o SF12, é possível notar que inicialmente o rádio apresenta uma grande taxa de erro de pacotes, pois o rádio está mais suscetível a ruídos. Após os 250 m aproximadamente, o rádio volta a diminuir a taxa de erro dos pacotes recebidos. A reta que apresentou um comportamento diferente foi a reta 3, pelo fato de existir uma ponte próxima ao rádio receptor, assim aumentando ainda mais o nível de ruído do sinal, ocasionando o aumento da taxa de erros dos pacotes.

4.5 Análise da taxa de dados

A partir da Figura 12 é possível verificar a taxa de dados relativa a cada reta para cada distância. A Taxa de dados é dada pela seguinte Equação 7.

$$Taxa\ de\ dados = \frac{Qtd_bits_{enviado_e_recebido}}{Tempo_total} \quad (7)$$

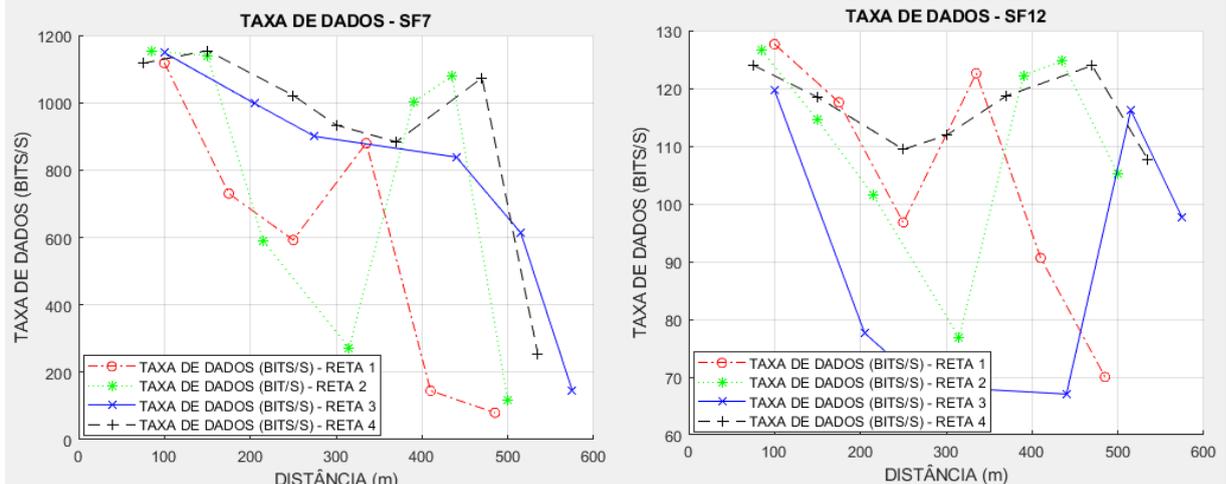
É possível verificar que para o SF7, temos uma taxa de dados de aproximadamente 1,1 Kbit/s até os 200 m. Já a partir dos 500 m, a taxa de dados diminui drasticamente devido à alta perda de pacotes e erros nos mesmos. Já para o SF12, observa-se que a taxa de dados é muito baixa, em torno de 0,12 Kbit/s, a partir dos 100 m de distância devido à arquitetura do rádio. Portanto, é possível concluir que, para comunicação em longas distâncias, é necessário que o rádio seja configurado para um SF maior, e assim terá uma taxa de dados relativamente baixa devido ao número de símbolos, que influenciará significativamente no tempo de envio de pacotes.

4.6 Análise do atraso de pacote

O atraso dos pacotes para cada reta para as diferentes configurações é dado pela Figura 13. Observa-se que para o SF7, o atraso médio das mensagens até os 450 m é de

aproximadamente 0,3 s com exceção da reta 1. Já para o SF12, o atraso inicial para todas as retas é de 1,6 s devido ao espectro de espalhamento do sinal para esse SF, chegando até 3 s para as retas 1 e 3.

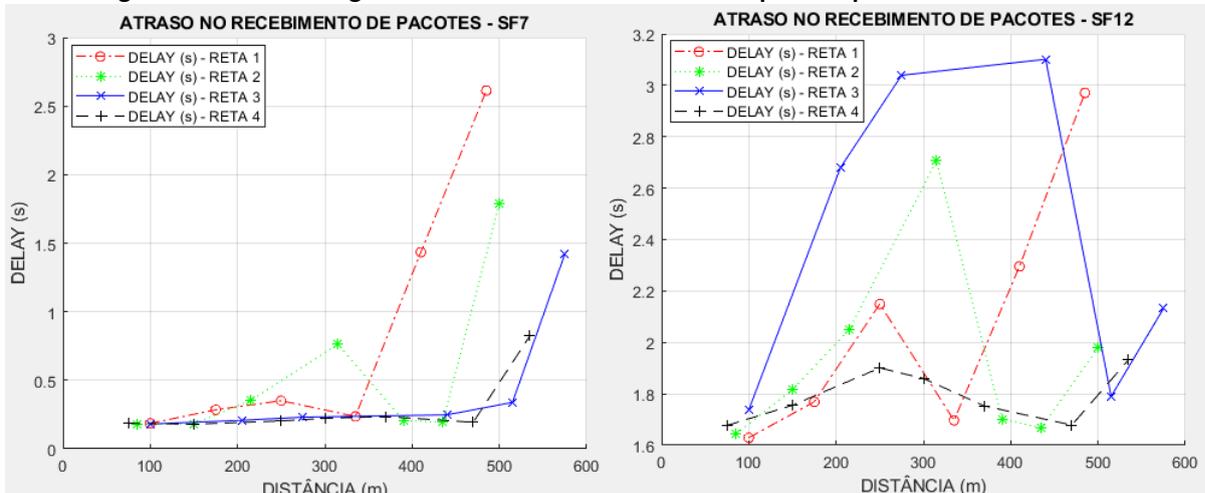
Figura 12 - Análise do gráfico da taxa de dados em bits/s para os SF7 e SF12.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a utilização do SF12, é possível atingir distâncias ainda maiores, porém o tempo de propagação da mensagem no ar ficará ainda maior.

Figura 13 – Análise do gráfico do atraso no recebimento de pacotes para os SF7 e SF12.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.7 Modelo de Propagação de Shadowing

De acordo com a Equação 3 descrita na seção 2, foram obtidos, para cada uma das retas e configurações analisadas, os seguintes valores de β e σ_{sh} .

Tabela 5 – Valores obtidos de β e σ_{sh} para as retas analisadas com base nos SF7 e SF12.

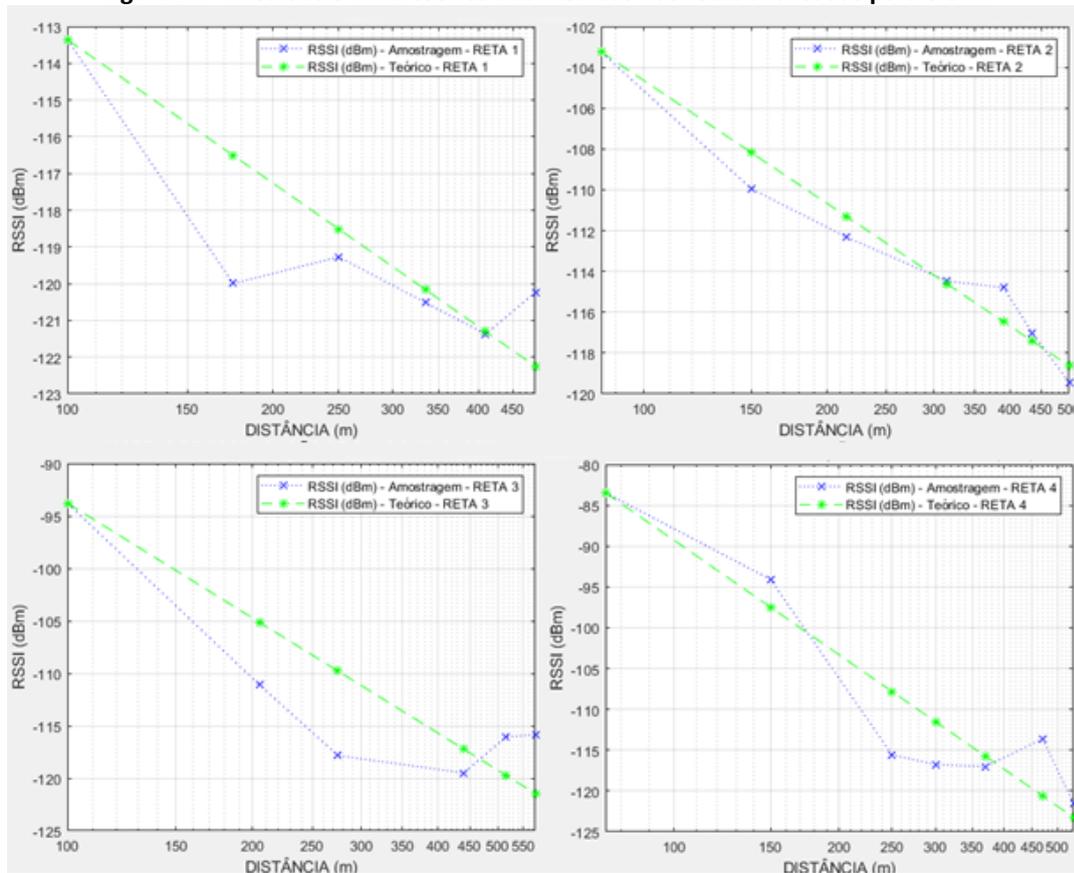
	SF7		SF12	
	β	σ_{sh}	β	σ_{sh}
RETA 1	1.2966	1.6784	2.0923	1.8799
RETA 2	1.9900	1.0565	1.9372	1.6232
RETA 3	3.6432	5.0056	3.6318	5.4031
RETA 4	4.6606	4.6707	4.9500	6.8100

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 5 apresenta os valores obtidos de β e σ_{sh} para as quatro retas analisadas para os SF7 e SF12. Os altos valores de β (fator de perda de percurso) presentes nas retas 3 e 4 se justificam devido às condições do terreno onde foram realizados os testes.

Na Figura 14 e na Figura 15, são representados os gráficos de Pr(d)-RSSI amostrado e de Pr(d)-RSSI teórico através da média obtida pelo Modelo de Propagação de Shadowing (MPS) para as retas analisadas no SF7 e no SF12. Por se tratar de ambientes suburbanos com aclives, declives e diversas obstruções nas proximidades, foi possível verificar que o modelo utilizado (MPS) apresenta um bom desempenho quando comparado com os valores medidos em campo.

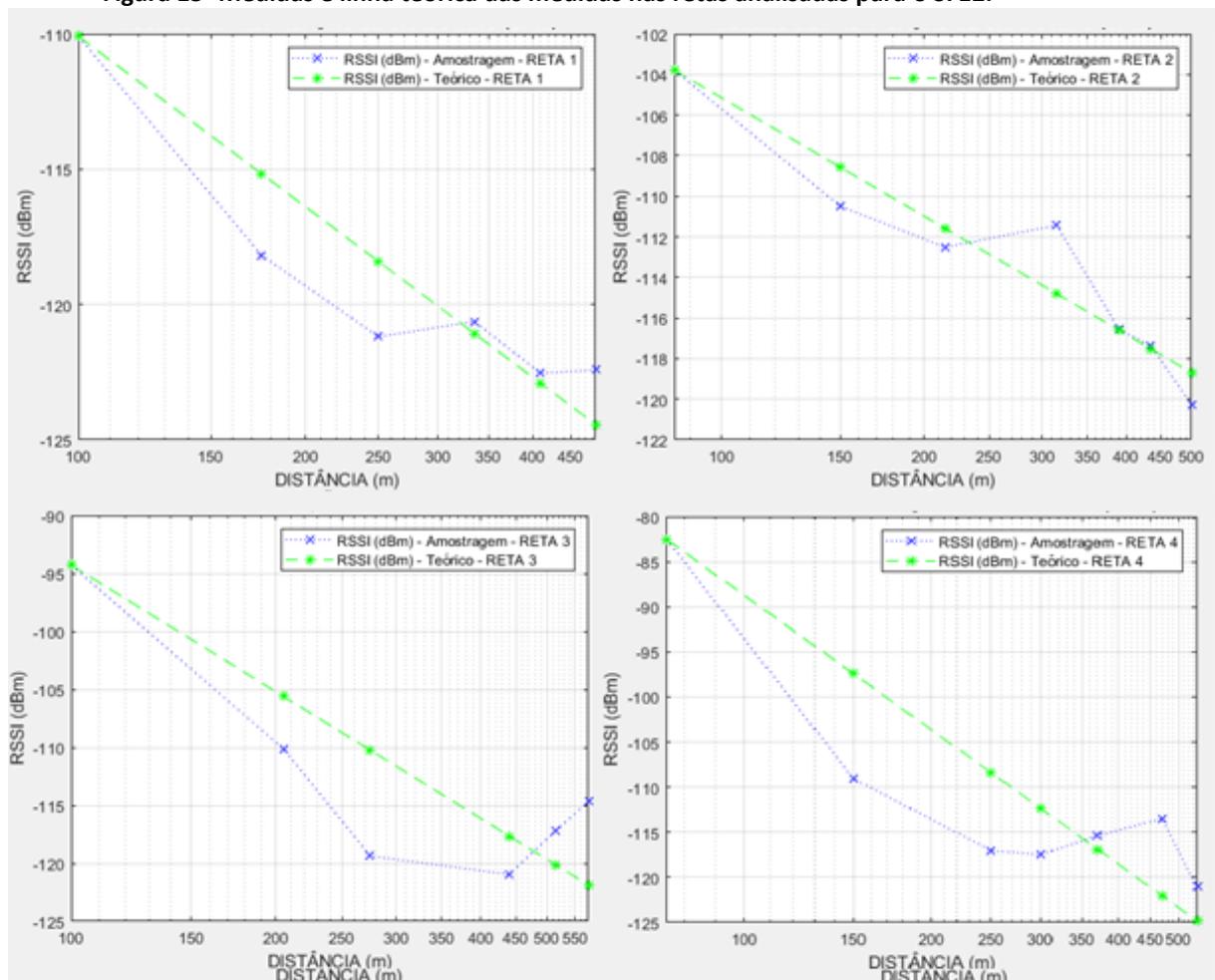
Figura 14 – Medidas e linha teórica das medidas nas retas analisadas para o SF7.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através dos resultados obtidos para o SF7, conforme a Figura 14, é possível verificar que o comportamento dos sinais amostrados e teóricos das retas é semelhante apesar de uma diferença de -3,5 dBm na reta 1 a 175 m de distância, -2 dBm na reta 2 a 150 m de distância, -7 dBm na reta 3 a 265 m de distância e -7 dBm na reta 4 a 250 m de distância. Todavia, os resultados se mostraram eficazes, apesar das variações de potência devido ao cenário onde foi implementado. É de se observar que o RSSI entre as retas teóricas e amostradas é semelhante, decrescendo abaixo dos -120 dBm para os últimos pontos medidos de cada uma das retas, exceto para a reta 3, onde apresentou uma melhora na potência do sinal recebido. Essa melhora pode estar relacionada ao declive do solo que é de aproximadamente 10 m para esse trecho. Contudo, é de se observar que os dispositivos RX e TX perderiam a comunicação para o SF7, pois, de acordo com o fabricante, o RSSI para essa faixa de SF é de no máximo -123 dBm.

Figura 15- Medidas e linha teórica das medidas nas retas analisadas para o SF12.



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com os resultados obtidos para o SF12, conforme a Figura 15, o comportamento dos sinais amostrados e teóricos das retas continua semelhante apesar de uma diferença de -3 dBm na reta 1 a 175 m de distância, -4 dBm na reta 2 a 315 m de distância, -10 dBm na reta 3 a 265 m de distância e -12,5 dBm na reta 4 a 150 m de distância. Todavia os

resultados continuaram eficazes. Observa-se que a tendência do RSSI entre as retas teóricas e amostradas é semelhante, decrescendo abaixo dos -120 dBm, exceto para a reta 3, que apresentou uma melhora na potência do sinal recebido. Entretanto, com base nos dados analisados para o SF7, essa melhora também pode estar relacionada ao declive do solo, que é de aproximadamente 10 m para esse trecho, porém, diferentemente do SF7, a sensibilidade para o SF12 aumenta consideravelmente, fazendo com que os dispositivos RX e TX se comuniquem com o RSSI numa faixa de até -137 dBm.

5 CONCLUSÃO

Neste artigo foi estudado o uso da tecnologia LoRa em ambientes suburbanos no que se refere a conceitos de cidades inteligentes, limitada a um raio de aproximadamente 600 m. Com base nesse parâmetro, foi analisado o desempenho de redes LoRa tendo como base as medidas de RSSI (dBm), SNR (dB), taxa de dados em (bits/s), atraso no recebimento de pacotes (s), pacotes recebidos com erro em relação aos pacotes efetivamente recebidos (%), pacotes recebidos em relação aos pacotes transmitidos (%), pacotes efetivamente recebidos em relação ao total de mensagens recebidas (%) e a elevação do receptor (RX) em relação ao transmissor (TX) em (m). O objetivo foi analisar cada um dos dados coletados para 4 diferentes retas, no qual foi utilizado o modelo de propagação de *shadowing* (MPS) e calculadas as perdas por desvanecimento do sinal, característicos das redes LPWAN.

Sendo assim foi demonstrado que a reta 1 teve maior atenuação da potência de sinal recebido (RSSI) e alta na SNR devido às obstruções ao longo do trecho, fazendo com que houvesse maior atraso no recebimento de pacotes e menor taxa de dados, diferente da reta 2, que apresentou uma melhora significativa da qualidade do sinal recebido a partir dos 380 m devido à elevação do solo ser de aproximadamente 7 m aumentando ainda a qualidade do sinal na distância de 430 m, no qual a elevação do solo passa a ser de 16 m entre o transmissor (TX) e receptor (RX) LoRa. Esses fatores contribuíram para uma diminuição do atraso no recebimento de pacotes e um aumento na taxa de dados. Na reta 3 é possível verificar também que houve uma melhora na potência do sinal recebido devido à elevação do solo ser de aproximadamente 10 m, entretanto isso não garantiu uma melhora na eficiência da taxa de dados e no atraso de recebimento de pacotes, que caiu consideravelmente ao longo do trecho. A reta 4 obteve bons resultados percentuais em número de pacotes recebidos em relação ao número de pacotes transmitidos, pois ao longo do percurso não houve grandes atenuações referentes a obstruções, garantindo altas taxas de dados, baixo atraso no recebimento de pacotes e baixo percentual de pacotes recebidos com erro em relação aos pacotes efetivamente recebidos. Sendo assim, os resultados de desempenho se mostraram satisfatórios para uso em cidades inteligentes em ambientes suburbanos. Foi analisado que houve uma melhora significativa nos dados analisados quando ocorre a elevação de um dos dispositivos, contribuindo para o aumento da potência do sinal recebido (RSSI) mesmo com alta relação sinal ruído (SNR), garantindo maior eficiência na taxa de dados, menor atraso no recebimento de pacotes e melhor relação percentual dos dados analisados.

Já para as diferentes configurações de SF (SF7 e SF12), a maior diferença se deu no alcance atingido por cada uma das configurações, sendo que o SF7 obteve um melhor desempenho para distâncias menores, até 300 m, já o SF12 para distâncias maiores. Uma das consequências do aumento do SF é um maior atraso no recebimento dos pacotes e menor taxa de dados.

Como pôde ser visto acima, cada reta se comporta diferentemente uma da outra devido à topografia e às diferentes obstruções do ambiente, como a existência de prédios, casas, pontes e parques. Portanto, é possível concluir que, a partir de uma única reta, não é possível prever a cobertura exata do rádio LoRa em ambientes suburbanos. Para se obter uma previsão mais aproximada da realidade, seria necessário aplicar um algoritmo de inteligência artificial, como a rede neural, para prever aproximadamente os valores dos pontos não medidos com uma taxa de erro pequena.

REFERÊNCIAS

- CARLSSON, A. et al. Measuring a LoRa Network: Performance, Possibilities and Limitations. *In: Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems*. Springer International Publishing, 2018. p. 116-128. DOI:[10.1007/978-3-030-01168-0_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01168-0_11) . Acesso em: 24 out. 2021.
- EL CHALL, Rida; LAHOUD, Samer; EL HELOU, Melhem. LoRaWAN network: Radio propagation models and performance evaluation in various environments in Lebanon. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 6, n. 2, p. 2366-2378, 2019.
- FERNANDES, R. et al. On the real capacity of LoRa networks: the impact of non-destructive communications. **IEEE Communications Letters**, v. 23, n. 12, p. 2437–2441, dez. 2019.
- GREGORA, Lukas; VOJTECH, Lukas; NERUDA, Marek. **Indoor signal propagation of LoRa technology**. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONICS - MECHATRONIKA (ME)*, 17, IEEE. 2016, pp. 1–4.
- COSTA, C. L.; OLIVEIRA, Letícia; MÓTA, Léia Michele S. **Internet das Coisas (IoT): um estudo exploratório em agronegócios**. 2018. 10 p. *In: SIMPÓSIO DA CIÊNCIA DO AGRONEGÓCIO*, 6, Faculdade de Agronomia, Porto Alegre, 2018.
- LoRaTM-ALLIANCE. **LoRaTM-alliance technology**. 2016. Disponível em: [https:// www.lora-alliance.org/](https://www.lora-alliance.org/). Acesso em: 24 out. 2021.
- MOLANO ORTIZ, F. et al. Caracterização de desempenho de uma Rede LoRa em ambientes Urbanos: simulação vs. prática. Workshop de Computação Urbana (CoUrb). **Anais...Sociedade Brasileira de Computação - SBC**, 10 set. 2019.
- RODRIGUES MENDES, Renan. **Avaliação de Desempenho da Tecnologia LoRa para Aplicações na Indústria 4.0**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Informação) – Universidade Federal do ABC, Santo André, 2020.
- SILVA, Paulo Renato Câmara da et al. **Tecnologias Low Power Wide Area networks (LPWAN) para monitoramento de frotas**. *In: IV SIINTEC & VIII PTI 2018 - SENAI CIMATEC*, 2018. Disponível em: <https://www.doity.com.br/anais/siintec2018/trabalho/64261>. Acesso em: 24 out. de 2021.

RAPPAPORT, T. S.; REED, J. H.; WOERNER, B. D. Position location using wireless communications on highways of the future. **IEEE Communications Magazine**, v. 34, n. 10, p. 33–41, 1996.

OLAYA, M. J. Q. Methodology for the dimensioning and development of an urban LoRaWAN network. Tese (Doutorado) — Politecnico di Torino, 2019. Disponível em: <http://webthesis.biblio.polito.it/id/eprint/11020>. Acesso em: 11 set. 2021.

SEMTECH CORP. **Lora™ modulation basics an1200.22**. 2015. Disponível em: <https://www.semtech.com/lora>. Acesso em: 11 jun. 2021.

SHAFIQUE, K. et al. Internet of things (IoT) for next-generation smart systems: A review of current challenges, future trends and prospects for emerging 5G-IoT scenarios. **IEEE Access**, v. 8, p. 23022–23040, 2020. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8972389>. Acesso em: 11 set. 2021.

SOBRE O(S) AUTOR(ES)

ⁱ CAIO TASCHETI MELLO



Graduado em Engenharia de Controle e Automação pela Universidade Federal do ABC (UFABC) em 2018. Atualmente trabalha como Engenheiro de Aplicação na Alstom, sendo responsável pelo desenvolvimento, integração e validação de sistemas SCADAs para sinalização ferroviária.

ⁱⁱ PAULO LUCAS DA SILVA



Graduado Engenheiro Eletrônico pela Universidade São Judas Tadeu – USJT (2012- 2017), atuou como projetista de máquinas industriais e atualmente é instrutor de práticas profissionais no SENAI-SP “Alfried Krupp” desde 2019, lecionando matérias para o curso técnico de eletromecânica.

ⁱⁱⁱ LEANDRO POLONI DANTAS



Engenheiro (2004) e Doutor (2018) em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário FEI. Atuou por 15 anos na indústria eletrônica no desenvolvimento de novos produtos. Desde 2009, vem lecionando em cursos de pós-graduação, graduação e de nível técnico em diferentes instituições paulistanas. Atualmente é professor na Faculdade de Tecnologia SENAI e no Insper. <https://orcid.org/0000-0003-3674-336X>

vi **MARCONES CLEBER BRITO DA SILVA**



Tecnólogo em Mecatrônica Industrial (2011), Engenheiro Mecatrônico (2013) e Especialista em Engenharia de Manutenção Industrial pela Centro universitário Eniac (2013). Mestre em Tecnologia Nuclear (2020) pela Universidade de São Paulo. Desde 2011, vem lecionando em cursos de nível técnicos e de graduação. Atualmente é professor da Faculdade de Tecnologia SENAI e na FESA. <https://orcid.org/0000-0002-3690-1682>

v **LUIZ CARLOS CANNO**



Graduado em Tecnologia de Automação Industrial (2009) com Especialização em Gestão Empresarial pela Universidade Nove de Julho (2012), e Especialização em Docência na Educação Profissional e Tecnológica pelo SENAI CETIQT (2015). Professor na Faculdade de Tecnologia SENAI do curso de Tecnologia em Eletrônica Industrial e Pós-graduação em Sistemas Embarcados. <https://orcid.org/0000-0001-9331-9309>

vi **FERNANDO SIMPLICIO DE SOUSA**



Professor da Faculdade SENAI no curso de Pós-Graduação em Sistemas Embarcados. Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do ABC (UFABC) e Pós-Graduado (Lato Sensu) pela Universidade Mackenzie. Graduado em Gestão de Pequenas e Médias Empresas pela UNIP e em Projetos Mecânicos pela Faculdade de Tecnologia de São Paulo (UNESP/FATEC-SP). <http://lattes.cnpq.br/4579382987984065>