

ARTIGO ORIGINAL

Análise experimental da comunicação LoRa em ambientes subterrâneos para aplicações IoT

Experimental analysis of LoRa communication in underground environments for IoT applications

Andréa Willa Rodrigues Villarim ¹, Cícero da Rocha Souto ¹, Mariana Rodrigues Villarim ²

¹Universidade Federal da Paraíba, ²Universidade Federal do Rio Grande do Norte

*andrea.villarim@cear.ufpb.br; cicerosouto@cear.ufpb.br; mariana.villarim@cear.ufpb.br

Recebido: 16/04/2023. Revisado: 26/10/2023. Aceito: 16/11/2023.

Resumo

Nesse artigo, é apresentado um estudo do comportamento da comunicação subterrânea via LoRa entre dois dispositivos, um deles posicionado sob a superfície do solo e outro acima dela. Foi analisado o desempenho da tecnologia LoRa em ambiente subterrâneo avaliando a interferência da profundidade e de outras variáveis como a distância, fator de espalhamento e características do ambiente na qualidade da comunicação. Este estudo foi realizado para verificar a adequação da tecnologia LoRa para monitoramento de variáveis físicas em ambientes subterrâneos, visando a aplicação de detecção de vazamentos em tempo real em tubulações de sistemas de distribuição de água ou outras aplicações subterrâneas.

Palavras-Chave: Cidades Inteligentes; Internet das Coisas; Redes de Sensores Sem Fio Subterrâneas; Tecnologia LoRa.

Abstract

This paper presents an evaluation of underground communication using LoRa technology between two devices, one of them located underground and the other above the surface. The performance of LoRa communication technology in different underground environments was analyzed evaluating the interference of transmitter depth and other parameters, such as distance, spreading factor and characteristics of the environment. This study was performed to verify the suitability of using LoRa technology for monitoring physical variables in underground environments, aiming at the application of real-time leakage detection in pipes of water distribution systems or other underground applications.

Keywords: Internet of Things; LoRa Technology; Smart Cities; Wireless Underground Sensor Networks.

1 Introdução

A Indústria 4.0 utiliza soluções nas áreas de automação inteligente (Chen et al., 2017), geração/troca de dados (Schmidt et al., 2015) e análise do processo produtivo (Rojko, 2017), introduzindo tecnologias de comunicação e sensori-

amento, o que possibilita uma supervisão em tempo-real do processo industrial, resultando em uma grande quantidade de dados gerados e analisados (Schmidt et al., 2015).

A rápida evolução da eletrônica, das tecnologias da informação e do processo produtivo possibilitou a inserção de sistemas de medição e tecnologia de Internet das Coi-

sas (*Internet of Things* - IoT) em quase todas as áreas da indústria. Uma das principais características da tecnologia IoT é que ela permite a conexão entre equipamentos por meio de componentes eletrônicos embarcados conectados à Internet (Da Costa et al., 2019; Frank et al., 2019).

Uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) consiste em dispositivos eletrônicos, chamados nós sensores, distribuídos em um ambiente e usados para monitorar determinadas variáveis de interesse, como distância, umidade, temperatura, entre outras (Nayak e Stojmenovic, 2010). Podem ser utilizadas para monitoramento em larga escala com nós sensores distribuídos e interligados por comunicação sem fio (Frisis et al., 2010). Alguns dos motivos para introduzir as RSSFs nas diversas áreas da Indústria 4.0 são a eficiência no monitoramento de parâmetros e o baixo custo de implementação e manutenção quando comparadas com as redes cabeadas (Fertig et al., 2022).

Algumas das principais características a serem analisadas no desenvolvimento de Redes de Sensores Sem Fio são o alcance de comunicação da rede e seu consumo de energia. Esses dois parâmetros estão fortemente relacionados à tecnologia de transmissão utilizada. Quando comparada às etapas de processamento e sensoriamento, a comunicação geralmente é responsável por um consumo de energia consideravelmente maior (Olatinwo e Joubert, 2019).

Portanto, os requisitos das aplicações IoT impulsionaram o surgimento de uma nova tecnologia de comunicação sem fio, denominada LPWAN (*Low Power and Wide Area Network*), que é uma tecnologia de comunicação que apresenta longo alcance e baixo consumo de energia. As redes LPWAN conseguem reduzir o consumo de energia adotando algumas técnicas, como novas estratégias de modulação e adaptação de *duty-cycle*. (Mekki et al., 2019). É possível citar a modulação LoRa (*Long Range*) como uma das principais soluções nesta área.

Considerando as particularidades das principais tecnologias classificadas como LPWAN, a tecnologia LoRa é muito utilizada para comunicação entre dispositivos em diversas aplicações de RSSF devido às suas características de alcance, consumo de energia, taxa de transmissão e robustez, além de possuir um protocolo de código aberto (Almarzoqi et al., 2022).

Algumas aplicações de Redes de Sensores Sem Fio requerem a realização do monitoramento de variáveis em sistemas que se localizam abaixo do solo, como é o caso da maioria dos sistemas de distribuição de água e tratamento de esgotos.

A tecnologia LoRa, apesar de bastante explorada na literatura, necessita de estudos complementares quando se trata da sua utilização em ambientes subterrâneos, pois o ambiente de transmissão é um dos fatores que influenciam na qualidade da comunicação. É necessário ampliar os estudos do comportamento da tecnologia LoRa com transmissão de dados provenientes de sistemas abaixo do solo para verificar sua aplicabilidade em determinadas situações.

Em sistemas de distribuição de água, por exemplo, o transporte de água é realizado principalmente por dutos subterrâneos. Devido à extensão da tubulação e às condições de instalação, o sistema pode ter vazamentos que causarão grandes quantidades de perda de água (Gomes, 2019). Para fornecer uma resolução mais rápida desse tipo

de problema, novas tecnologias para automatizar o sistema podem ser utilizadas. A RSSF subterrânea pode ser usada para a detecção de vazamentos, monitorando diferentes parâmetros de interesse, como pressão ou fluxo na rede de distribuição.

Este artigo apresentará o desempenho da tecnologia de comunicação LoRa em ambientes subterrâneos, avaliando como seus diversos parâmetros se comportam nesse cenário. Este estudo foi realizado para avaliar a adequação da tecnologia LoRa em redes de sensores sem fio subterrâneas para monitoramento de variáveis de interesse, visando principalmente a aplicação na detecção de vazamentos em tubulações de sistemas de distribuição de água ou outras aplicações no conceito de cidades inteligentes.

O artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta trabalhos relacionados com o tema, a Seção 3 aborda alguns conceitos fundamentais para a compreensão do projeto, a Seção 4 detalha o desenvolvimento do experimento e as características técnicas mais relevantes, os resultados são analisados e discutidos na Seção 5 e, por fim, as conclusões obtidas estão descritas na Seção 6.

2 Trabalhos Relacionados

Vários projetos estão sendo desenvolvidos, tanto na área acadêmica quanto fora dela, utilizando a tecnologia LoRa. Algumas das principais aplicações são em cidades inteligentes, monitoramento ambiental, monitoramento de parâmetros da saúde humana e agricultura de precisão (Wu et al., 2019; Wildan et al., 2020; Villarim et al., 2021).

Em Wu et al. (2019), é desenvolvido um sistema que monitora condições corporais e ambientais e envia os dados coletados utilizando as tecnologias LoRa e Bluetooth, para análise e possível detecção de anormalidades, visando promover maior segurança no ambiente industrial. Nesse artigo, é apresentado um sistema com dois sensores que ficam acoplados a cada indivíduo e realizam o sensoriamento de variáveis do ambiente, como temperatura, umidade e concentração de gás carbônico no ar, e variáveis físicas do indivíduo, como temperatura corporal e frequência cardíaca. O projeto utiliza comunicação híbrida, utilizando as tecnologias LoRa e Bluetooth, para enviar os dados coletados para análise e possível detecção de alguma anormalidade que apresente risco à saúde dos trabalhadores.

O estudo apresentado por Wildan et al. (2020) aplicou a tecnologia LoRa para o desenvolvimento de uma casa inteligente, onde os dispositivos inteligentes são conectados via LoRa com um servidor, que recebe informações, como temperatura do ambiente, e envia comandos para controle de aparelhos como lâmpadas, ares-condicionados e TVs. Esse servidor se conecta com o usuário através de um servidor WEB, que pode ser acessado de diversos dispositivos portáteis.

O trabalho de Villarim et al. (2021) realizou a medição de material particulado utilizando sensor óptico para medição da concentração de partículas e monitoramento de outras variáveis ambientais, como temperatura, umidade e pressão, para verificar a qualidade do ar em ambiente urbano. Essas informações foram enviadas utilizando a comunicação LoRa para uma central de controle onde os

dados eram processados e analisados.

Em [Ferrigo e da Silva \(2021\)](#) é apresentado um estudo do comportamento da tecnologia LoRa instalada na rede pública de um ambiente urbano. Foi analisada a influência de algumas variáveis como distância entre os sensores e fator de espalhamento. Foi observado nesse trabalho, que a altitude dos sensores influencia a comunicação, que se torna mais eficiente à medida que a altura aumenta.

A tecnologia LoRa tem sido amplamente explorada em diversos projetos devido às suas características de alcance, consumo de energia, taxa de transmissão e robustez. De acordo com [Liando et al. \(2019\)](#), dois dispositivos utilizando a tecnologia LoRa conseguem estabelecer uma comunicação a distâncias maiores que 15 km em ambientes sem obstáculos e utilizando o fator de espalhamento (*spreagind factor* – SF) igual a 12 e alcança distâncias pouco inferiores a 10 km no mesmo ambiente com SF = 7. Já em ambiente com obstáculos, esses valores de distância alcançada caem para, aproximadamente, 7 e 3 km, respectivamente.

Porém, o estudo apresentado em [Liando et al. \(2019\)](#), bem como a maior parte dos projetos que utilizam a tecnologia LoRa disponíveis na literatura, implementam essa tecnologia para estabelecer a comunicação entre dispositivos posicionados em determinada altura sobre o solo. Porém, em alguns projetos, como no monitoramento de variáveis de interesse em um sistema de distribuição de água, é necessário realizar a comunicação utilizando dispositivos que estão localizados abaixo do solo.

Até o momento, poucos trabalhos estudaram o desempenho da tecnologia LoRa em ambientes subterrâneos. Em [Gehani et al. \(2021\)](#) e em [Lin e Hao \(2020\)](#), é apresentado o desempenho da comunicação via LoRa entre um dispositivo abaixo do solo e um sobre a superfície e são avaliados diferentes parâmetros dessa tecnologia. Porém, nesses estudos, a profundidade, principal parâmetro a ser avaliado, atinge apenas alguns cm. Nesse artigo, a profundidade é analisada em maior escala para ampliar o conhecimento sobre o comportamento subterrâneo da tecnologia LoRa e sua aplicabilidade em diferentes cenários.

3 Conceitos fundamentais

3.1 Indústria 4.0

O período industrial da história foi dividido de acordo com seus avanços em novas eras, alcançando recentemente a Quarta Revolução Industrial, também denominada de Indústria 4.0 ([Lele, 2019](#)). Esse novo período traz aspectos de conectividade, informação e inteligência para a manufatura. Essas tecnologias permitem uma abordagem industrial automatizada e interconectada que envolve máquinas, produtos e seres humanos para atingir um maior desempenho industrial ([Müller et al., 2018](#)).

Um sistema IoT é responsável pela conexão entre os sistemas físicos e as informações virtuais que integram muitas áreas das tecnologias modernas ([Mittal et al., 2019](#)). Uma das principais características da tecnologia IoT é que permite a conexão entre os equipamentos da indústria através de componentes eletrônicos embutidos conectados à Internet ([Da Costa et al., 2019](#); [Frank et al., 2019](#)). Ou

seja, com a tecnologia IoT os equipamentos físicos podem fazer parte de redes de informação, tornando-se partes do processo como dispositivos inteligentes ([Müller et al., 2018](#); [Rossit et al., 2019](#)).

Os sistemas IoT são utilizados para integrar a capacidade de sensoriamento, interconexão e geração de dados aos equipamentos da indústria ([Chen et al., 2017](#)). Devido à utilização desses sistemas, a Indústria 4.0 possui o necessário para obter uma grande quantidade de informações das diversas etapas do processo industrial. Em termos gerais, a Indústria 4.0 visa aumentar o desempenho industrial utilizando tecnologias emergentes para alcançar produtividade, flexibilidade, interoperabilidade e sustentabilidade na produção ([Dalenogare et al., 2018](#); [Tortorella e Fettermann, 2018](#); [Nara et al., 2021](#)).

3.2 Rede de Sensores Sem Fio

Uma Rede de Sensores Sem Fio é constituída por nós sensores distribuídos em um ambiente e utilizados para monitorar determinadas variáveis de interesse, como por exemplo, monitoramento de distância, umidade, temperatura, atividade sísmica, peso, pressão, dentre outras ([Nayak e Stojmenovic, 2010](#)).

Os nós sensores são dispositivos eletrônicos distribuídos no ambiente, são responsáveis pela medição da variável desejada e pela transmissão dos dados coletados para outros nós sensores da rede ou para um nó sorvedouro. Esses dados são, em seguida, transmitidos a uma central de controle para análise e processamento. A central de controle deve ser capaz de, após manipular os dados recebidos, executar tarefas de gerenciamento e controle pré-determinadas ([Sousa e Lopes, 2011](#)).

As RSSF podem ser utilizadas com diferentes objetivos e devem atender a questões específicas, de acordo com as necessidades da aplicação. Alguns dos principais desafios a serem abordados em projetos são eficiência energética, baixo custo, tolerância a falhas, escalabilidade, segurança dos dados e amplo alcance de comunicação ([Patel e Kumar, 2018](#)).

Algumas características importantes no desenvolvimento de Redes de Sensores Sem Fio são o alcance de comunicação da rede e o seu consumo de energia. Esses dois parâmetros estão fortemente relacionados com a tecnologia de transmissão utilizada. Quando comparada às etapas de processamento e sensoriamento, a comunicação geralmente é responsável por um consumo de energia consideravelmente superior ([Olatinwo e Joubert, 2019](#)).

As redes LPWAN estão sendo foco de diversas pesquisas e estudos devido às suas características de comunicação de baixo consumo de energia e longo alcance. Algumas das principais tecnologias de comunicação que se enquadram na definição de LPWAN são Sigfox, NB-IOT e LoRa. A tecnologia LoRa foi a escolhida para a comunicação nesse projeto devido às suas características de alcance, consumo de energia, taxa de transmissão e robustez.

3.3 Modulação LoRa

O protocolo de comunicação LoRaWAN define a arquitetura da rede e garante a interação entre dispositivos IoT

sem a necessidade de uma infraestrutura complexa. A estrutura da rede utiliza uma topologia em estrela e pode ser dividida em duas partes: a *front-end*, composta pelos dispositivos finais e *gateways*, os primeiros transmitirão os dados através da modulação LoRa para os *gateways*, que servirão de ponte entre essa parte e a segunda, denominada de *back-end* e constituída pelos servidores da rede, que receberão os dados através de um endereço de IP (Lauric e Popa, 2017).

LoRa é a camada física utilizada e que usa a banda ISM (*Industrial, Scientific and Medical* – banda de frequência reservada para fins industriais, científicos e médicos) não-licenciada para comunicação. Para alcançar os objetivos propostos para ser considerada uma LPWAN, a tecnologia LoRa usa a modulação CSS (*Chirp Spread Spectrum*) para comunicação dos dados. Nessa modulação, o sinal transmitido é composto por chirps (*Compressed High Intensity Radar Pulse*), sinais senoidais com amplitude constante e frequência crescente ou decrescente (denominados *up-chirps* ou *downchirps*, respectivamente) que varre uma largura de banda predefinida.

LoRa utiliza uma variação da modulação CSS, em que alguns parâmetros podem ser modificados para definir as configurações da rede, dentre os principais tem-se o fator de espalhamento, a largura de banda, a potência de transmissão e a taxa de código. Teoricamente, a tecnologia LoRa alcança baixas taxas de transmissão de dados, mas que são suficientes em aplicações LPWAN, nas quais geralmente é priorizado o alcance de comunicação à taxa de transmissão (Liando, 2019).

4 Metodologia

O experimento foi realizado utilizando os microcontroladores Feather M0, desenvolvidos pela fabricante Adafruit. Esses dispositivos contêm um processador de alta eficiência energética e um módulo de rádio LoRa RFM95, que pode operar nas frequências de 915MHz, frequência que se encontra na banda ISM do Brasil e dos Estados Unidos da América, ou na frequência de 868MHz, que corresponde a banda ISM da Europa. Esses rádios não são indicados para transmissões de áudio ou vídeo, mas são apropriados para transmissões de pequenos pacotes de dados.

A utilização da tecnologia LoRa para comunicação torna necessária a definição de parâmetros relacionados a essa tecnologia. Os valores escolhidos para os principais parâmetros estão descritos na Tabela 1.

Nos experimentos realizados, o transmissor (TX) foi alimentado inicialmente por uma bateria e acoplado a uma antena omnidirecional de frequência 915Mhz e ganho 2 dB. Esses componentes foram inseridos em uma caixa plástica com nível de proteção IP65, que garante que o seu interior esteja selado contra poeiras e protegido contra jatos de

Tabela 1: Parâmetros utilizados no experimento para configurar a modulação LoRa

Parâmetros	Valores
Frequência (f)	915 MHz
Fator de espalhamento (SF)	7 ou 12
Largura de banda (BW)	250 kHz
Taxa de Código (CR)	4/5

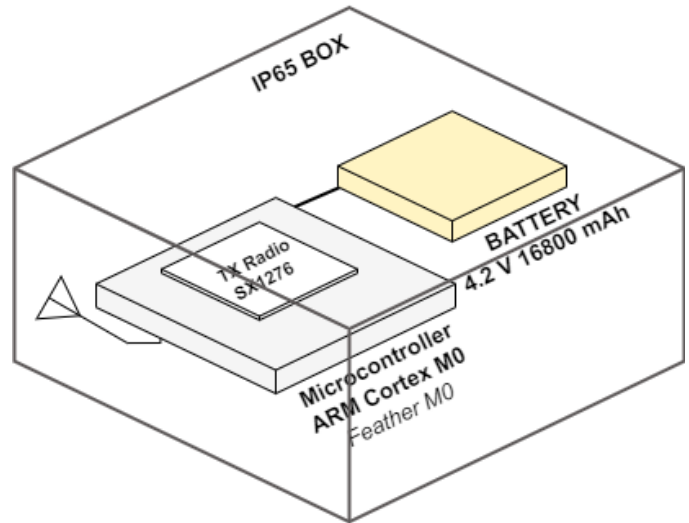


Figura 1: Estrutura física desenvolvida para transmissão de pacotes.

Tabela 2: Cenários utilizados para realização dos experimentos

Cenário 1	Ambiente com linha de visada direta
Cenário 2	Ambiente Florestal
Cenário 3	Ambiente urbano denso com obstáculos

água. A estrutura desenvolvida pode ser observada na Fig. 1

O sistema desenvolvido foi posicionado sob o solo, sendo responsável por realizar a transmissão em ambiente subterrâneo, enquanto o receptor (RX) estava conectado a um computador via cabo USB, por onde era alimentado energeticamente e tornava possível uma análise imediata dos resultados obtidos. Os testes foram realizados em ambiente com linha de visada direta, ambiente urbano e florestal para avaliar a transmissão em três diferentes cenários, conforme listado na Tabela 2.

A metodologia do experimento consiste em posicionar a estrutura que contém o transmissor abaixo do solo e o receptor sobre a superfície, inicialmente a uma distância de 5 m dessa estrutura. O transmissor deve enviar uma quantidade específica de mensagens durante um período de 5 minutos e, após esse período, é acrescentada uma distância de 5 m na posição do receptor com relação a sua localização anterior. Esse procedimento se repete, incrementando essa variação de 5 m até que a comunicação não possa mais ser estabelecida ou de acordo com as limitações do ambiente.

O dispositivo transmissor é posicionado inicialmente a uma profundidade de 50 cm sob o solo e, após a realização do procedimento descrito anteriormente, é adicionada uma profundidade de mais 50 cm e o experimento é repetido. Esse procedimento é realizado até que o transmissor atinja 2 m de profundidade, valor no qual a comunicação não conseguiu ser estabelecida em nenhuma das configurações propostas.

O experimento realizado seguiu o processo apresentado pelo fluxograma ilustrado na Fig. 2.

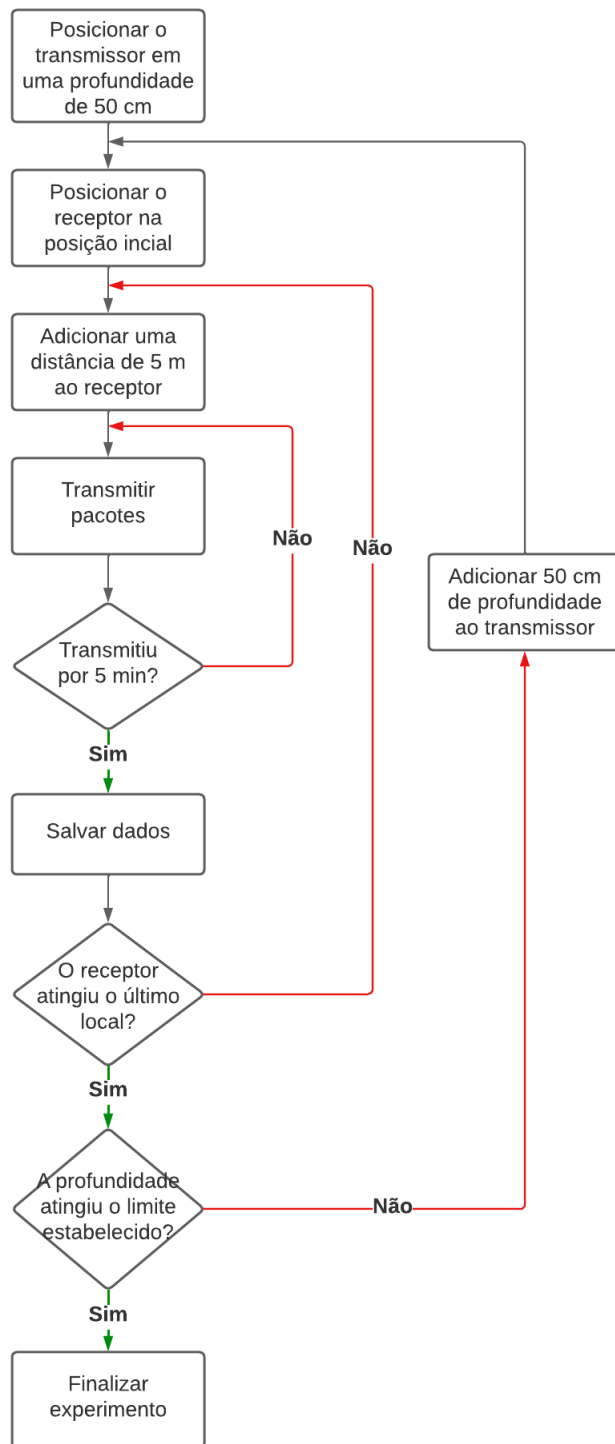


Figura 2: Fluxograma que apresenta a metodologia do experimento realizado.

Foram realizadas as etapas descritas para verificar a influência da profundidade na comunicação via LoRa a partir da análise da taxa de pacotes recebidos (*Packet Delivery Ratio* - PDR). Esse valor representa a relação entre o número

total de pacotes enviados pelo transmissor e o número de pacotes recebidos pelo receptor. Dessa forma, é possível saber quantos pacotes foram entregues corretamente ao destino esperado. O cálculo desse parâmetro é realizado de acordo com a Eq. (1).

$$PDR = \frac{Z_{RX}}{Z_{TX}} * 100 \quad (1)$$

Onde Z_{TX} representa o número total de pacotes transmitidos e Z_{RX} o número total de pacotes recebidos.

A análise da taxa de pacotes recebidos foi realizada comparando parâmetros como fator de espalhamento, distância entre os dispositivos, ambiente de transmissão e, principalmente, a profundidade do transmissor, que é um dos principais critérios a ser avaliado nesse estudo.

5 Resultados e discussões

Nesse artigo, é analisado, de acordo com a metodologia descrita, o desempenho da tecnologia LoRa e a relação da qualidade da comunicação estabelecida entre um sensor subterrâneo e um sobre a superfície, avaliando a interferência de variáveis como a distância, profundidade, fator de espalhamento (*spreading factor* - SF) e características do ambiente em que os dispositivos estão inseridos, parâmetro que guiará a análise das próximas subseções.

5.1 Ambiente com visada direta

Os primeiros experimentos para analisar a influência da profundidade e demais parâmetros citados na comunicação subterrânea via Lora foram realizados em ambiente com linha de visada direta. Esse cenário considera que o ambiente entre o sensor enterrado e o sensor localizado sobre a superfície não possui obstáculos, tornando possível uma comunicação com visada direta entre os dispositivos. Os testes foram realizados em uma área aberta da Universidade Federal da Paraíba (UFPB)/Brasil. Essa área disponibilizou uma distância de 100 m de comprimento para os testes em visada direta, como pode ser observado na Fig. 3.

Ao analisar o transmissor em uma profundidade de 50 cm e SF = 7, como apresentado na Fig. 4, a comunicação consegue se manter com alto desempenho, atingindo taxas de recebimento de pacotes superiores a 85% em todos os pontos de medição até atingir uma distância de 60 m, quando ocorre uma queda significativa no recebimento de dados. A influência da profundidade na comunicação de dispositivos via LoRa fica evidente ao comparar esses resultados com os obtidos para o transmissor em maiores profundidades.

Considerando o transmissor 1 m abaixo do solo, os dispositivos só conseguem manter uma conexão com taxas semelhantes às observadas anteriormente até uma distância de 10 m entre os dispositivos e, para uma profundidade de 1,5 m, os valores de PDR são semelhantes apenas no ponto de medição inicial. Após isso, as taxas de pacotes recebidos caem até que a comunicação não possa mais ser estabelecida em distâncias que diminuem à medida que a

profundidade aumenta. Para o transmissor em uma profundidade de 2 m, a conexão entre os dispositivos não foi obtida em nenhum ponto de medição.

Em seguida, foi analisado o comportamento da comunicação nesse mesmo ambiente e utilizando as mesmas características de transmissão, modificando apenas o valor do fator de espalhamento, nesse caso, definindo SF = 12 para verificar o quanto o valor dessa variável pode influenciar na transmissão LoRa de forma subterrânea.

A Fig. 5 ilustra essa situação, onde a taxa de pacotes recebidos foi analisada apenas para 1 m de profundidade, pois, em um ambiente com "visada direta", a transmissão apresentou taxas de pacotes recebidos superiores a 90% em todos os pontos medidos até 100 m, que era a distância limite no cenário disponibilizado. Nesse caso, não há necessidade de apresentar os dados para profundidade de 50 cm, pois se apresentaram na mesma faixa de valores.

Porém, ao aumentar a profundidade para 1,5 m, a comunicação é bastante prejudicada, sendo um exemplo explícito da influência da profundidade na comunicação. Com o transmissor em uma profundidade de 1,5 m abaixo do solo, a qualidade da comunicação caiu de forma abrupta após o primeiro ponto de medição, não conseguindo alcançar os 20 m de distância. Ao aumentar a profundidade em mais 50 cm, a comunicação não conseguiu ser estabelecida em nenhum ponto.

5.2 Ambiente Florestal

Os experimentos em ambiente florestal foram realizados no bosque da UFPB, que apresenta uma vegetação densa e diversificada. O teste foi realizado seguindo as mesmas etapas utilizadas no ambiente de visada direta, mas acrescentando agora a análise de um novo parâmetro, o cenário de transmissão.

Ao analisar o gráfico ilustrado na Fig. 6, é possível observar que para uma profundidade de 50 cm e considerando SF = 7, o desempenho da comunicação apresenta variações de acordo com o ambiente de transmissão. No cenário florestal, a comunicação se mantém acima dos 80% apenas até a distância de 20 m entre os dispositivos, caindo a partir desse ponto, de forma gradativa, até perder completamente a conexão entre os dois dispositivos a 35 m de



Figura 3: Distância percorrida para os testes de transmissão de pacotes em ambiente de visada direta.

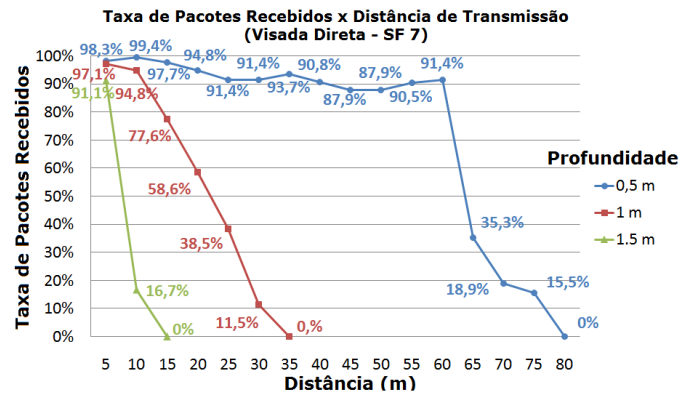


Figura 4: Relação entre a Taxa de Pacotes Recebidos e a Distância de acordo com a profundidade em ambiente com visada direta e SF = 7.

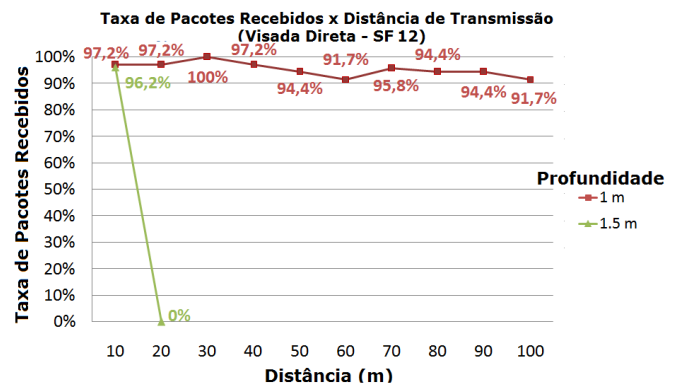


Figura 5: Relação entre a Taxa de Pacotes Recebidos e a Distância de acordo com a profundidade em ambiente com visada direta e SF = 12.

distâncias, diferente do que ocorre em visada direta, que manteve a comunicação dos dispositivos por uma distância aproximadamente 130% maior.

Ao aumentar a profundidade, é possível verificar uma maior similaridade em diferentes cenários, pois em ambiente florestal com o transmissor em 1,5 m de profundidade, a comunicação apresenta uma qualidade considerável apenas no primeiro ponto de medição e em 2 m de profundidade também não consegue ser estabelecida.

Em seguida, o fator de espalhamento foi novamente modificado para 12 e os resultados da taxa de pacotes recebidos podem ser observados na Fig. 7. É possível observar um aumento na distância alcançada mantendo uma boa qualidade de comunicação nas duas primeiras profundidades analisadas. Nesse cenário, os dados foram analisados até a distância de 70 m pela limitação da área florestal na qual foram realizados os experimentos, como pode ser observado na Fig. 8.

Considerando uma profundidade de 50 cm para o transmissor, é notável um aumento na qualidade de comunicação quando utilizado o SF = 12, atingindo uma distância, nesse caso, de 60 m com uma taxa de pacotes recebidos su-

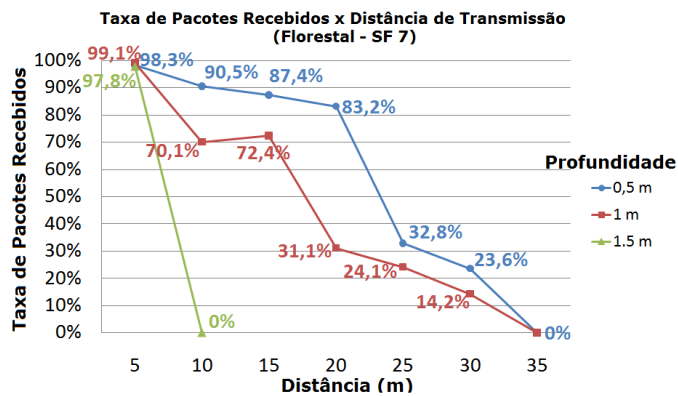


Figura 6: Relação entre a Taxa de Pacotes Recebidos e a Distância de acordo com a profundidade em ambiente florestal e SF = 7.

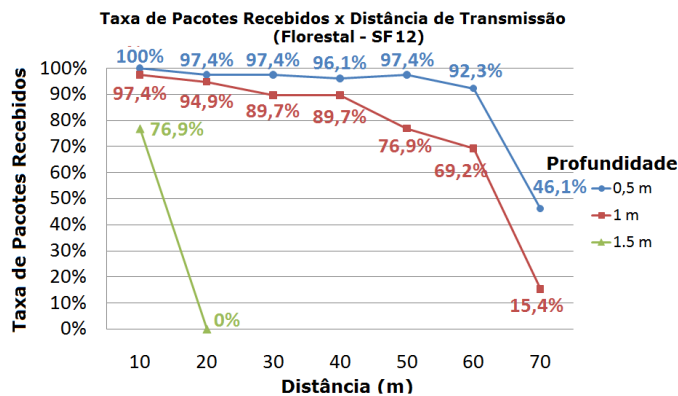


Figura 7: Relação entre a Taxa de Pacotes Recebidos e a Distância de acordo com a profundidade em ambiente florestal e SF = 12.



Figura 8: Distância percorrida para os testes de transmissão de pacotes em ambiente florestal.

perior a 90%, enquanto a comunicação com o menor valor de SF sequer conseguiu alcançar essa distância. Para a profundidade de 1 m, o aumento da qualidade da transmissão



Figura 9: Distância percorrida para os testes de transmissão de pacotes em ambiente urbano denso.

nesse ambiente ao modificar o SF também é considerável e pode ser observada analisando os diferentes pontos ao longo do gráfico, como, por exemplo, analisando a distância de 35 m é possível observar que no menor valor de *spreading factor*, a comunicação não pode ser estabelecida, já com SF = 12, a taxa de pacotes recebidos se mantém próxima dos 90%.

Porém, ao atingir maiores profundidades, o aumento do fator de espalhamento interfere cada vez menos na qualidade da comunicação. Mesmo com o maior valor desse parâmetro, ou seja, SF = 12, o desempenho da comunicação em ambiente florestal para a profundidade de 1,5 m, foi pouco superior ao observado com menor valor de SF e semelhante ao observado em visada direta nas mesmas condições de comunicação. Como ocorreu nos cenários analisados anteriormente, a comunicação para maiores profundidades não conseguiu ser estabelecida nessas condições.

5.3 Ambiente urbano denso com obstáculos

Os últimos testes foram realizados em ambiente urbano denso com obstáculos. Inicialmente, o experimento foi realizado considerando o menor valor de fator de espalhamento. Nesse cenário, a comunicação via LoRa apresentou o pior desempenho dentre os ambientes avaliados. Os testes em ambiente urbano alcançaram uma distância máxima de 25 m e foram realizados em um espaço urbano, conforme ilustrado na Fig. 9.

Analisando a Fig. 10 e considerando o transmissor em uma profundidade de 50 cm, a comunicação só conseguiu ser estabelecida até uma distância de 15 m entre os dispositivos. Considerando esse ponto de medição nos outros cenários analisados, a taxa de pacotes recebidos se manteve superior a 85%, logo o ambiente com obstáculos apresentou grande influência na comunicação subterrânea, limitando ainda mais a conexão estabelecida entre os dispositivos.

O mesmo ocorre para a profundidade de 1 m, na qual a comunicação apresentou um desempenho bem abaixo do apresentado nos demais cenários. Já para maiores profundidades, o comportamento da comunicação subterrânea via LoRa em ambiente urbano se manteve similar ao observado nos cenários anteriores.

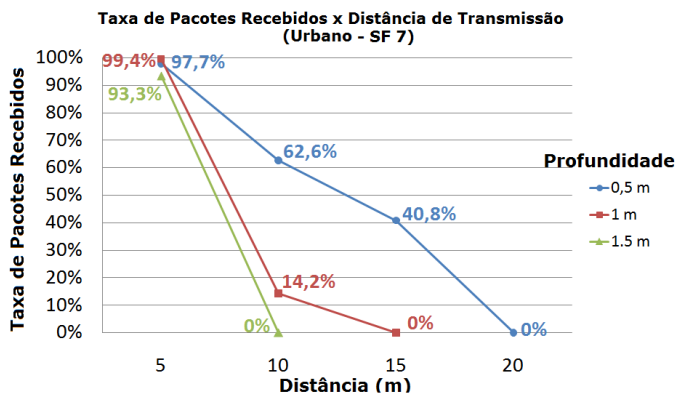


Figura 10: Relação entre a Taxa de Pacotes Recebidos e a Distância de acordo com a profundidade em ambiente urbano denso e SF = 7.

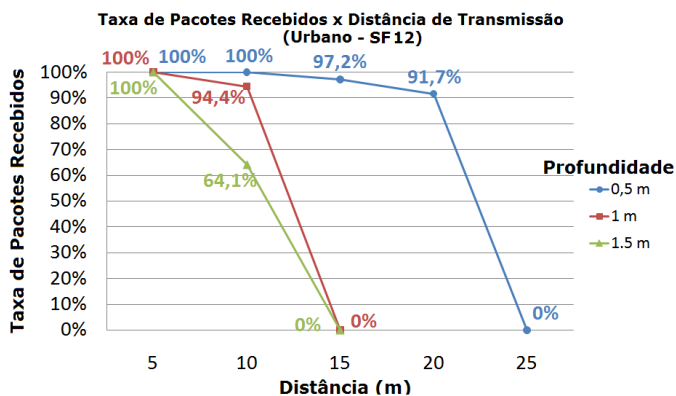


Figura 11: Relação entre a Taxa de Pacotes Recebidos e a Distância de acordo com a profundidade em ambiente urbano denso e SF = 12.

Considerando o SF = 12, como pode ser observado na Fig. 11, a comunicação apresentou melhores resultados, mas pouco influenciou na comunicação subterrânea em ambiente urbano denso, a interferência do solo e dos obstáculos fez com que a comunicação não apresentasse alta qualidade mesmo com o aumento do fator de espalhamento. Com essas características de transmissão, a comunicação apresentou desempenho semelhante ao obtido com SF = 7, alcançando distâncias similares, mas com maiores taxas de pacotes recebidos.

5.4 Análise dos Resultados

Ao analisar os resultados obtidos nos experimentos realizados, é possível verificar a influência de diversos fatores na transmissão subterrânea via LoRa, considerando que um dispositivo está posicionado sob a superfície do solo e outro acima dela. Inicialmente, pode-se observar a influência direta da profundidade do dispositivo transmissor na qualidade da comunicação estabelecida.

Em geral, analisando uma mesma distância e diferen-

tes profundidades, o experimento que considera o transmissor em uma maior profundidade apresenta uma taxa de recebimento de pacotes menor, atingindo uma diferença superior a 90% em alguns casos, como em ambiente urbano, por exemplo. Além disso, na maioria dos casos, os experimentos com os transmissores em maiores profundidades conseguiram estabelecer a comunicação por menores distâncias entre os dispositivos.

À medida que a profundidade aumenta, os demais parâmetros se tornam menos relevantes na comunicação. Em maiores profundidades, a comunicação subterrânea começa a se assemelhar nos diversos cenários considerando diferentes parâmetros, apresentando uma queda na qualidade da comunicação cada vez maior, até que a mesma não possa mais ser estabelecida.

Além disso, também foi verificada a interferência de outras variáveis, como o fator de espalhamento, já que o experimento foi realizado considerando tanto o menor quanto o maior valor possível. Foi observado que, para o maior valor, os dispositivos conseguiram estabelecer uma comunicação de maior qualidade, quando consideradas questões como taxa de pacotes recebidos e alcance de transmissão.

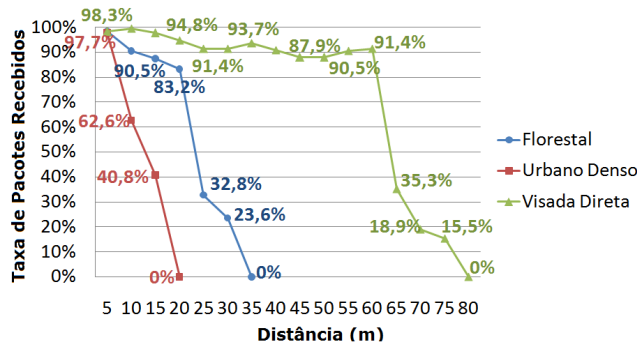
Outro fator que influencia na comunicação subterrânea via LoRa é a distância entre os dispositivos. A comunicação pode manter uma taxa de pacotes recebidos parcialmente estável com o aumento da distância até atingir um ponto, no qual a recepção de pacotes começa a ser reduzida. Esse limiar pode ser dado pelo limite de alcance dos dispositivos em determinado cenário ou por algum obstáculo no caminho.

Por fim, outro parâmetro avaliado foi o ambiente no qual foram realizadas as transmissões. Foi observado o desempenho da comunicação em três cenários distintos e observada a influência dos obstáculos na conexão entre os dispositivos. O ambiente com visada direta apresentou o melhor desempenho, já o ambiente urbano denso, devido aos obstáculos, apresentou o pior, quando comparadas situações com mesmas configurações de comunicação.

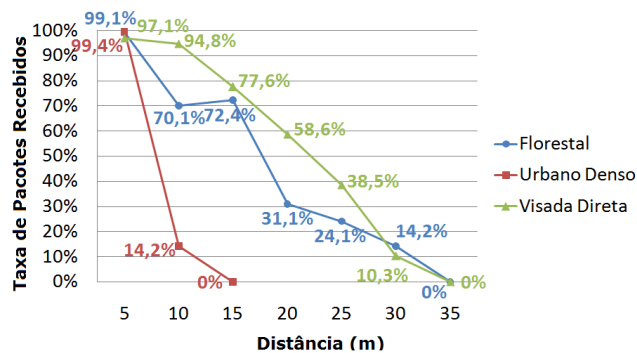
É possível analisar a influência da profundidade em diferentes ambientes e como, à medida que aumenta o valor desse parâmetro, os demais, como ambiente de transmissão, perdem cada vez mais a influência na qualidade da comunicação. A comparação da taxa de pacotes recebidos em relação a distância entre os dispositivos em diferentes cenários para cada valor de profundidade analisado pode ser observada na Fig. 12. Para essa análise, é considerado o menor fator de espalhamento, pois a comparação desse parâmetro já foi realizada nos gráficos analisados anteriormente.

6 Conclusões

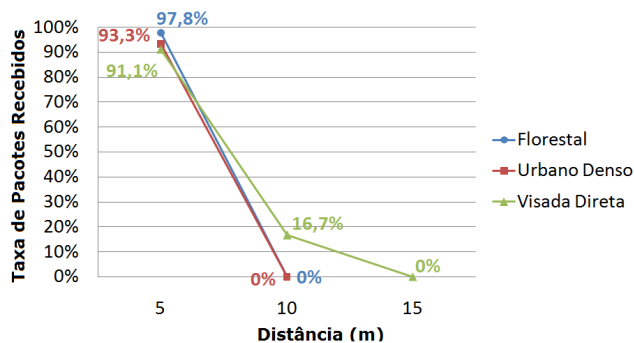
Neste artigo, foi apresentado um estudo sobre o comportamento da tecnologia de comunicação LoRa em um ambiente de transmissão subterrânea. Foram analisados diversos parâmetros envolvidos na comunicação entre dispositivos inteligentes situados abaixo e acima do solo. Muitos desses parâmetros já foram bastante explorados na literatura se aplicados em uma transmissão entre dispositivos sem fio convencional. Porém, para transmissões subterrâ-



(a) Profundidade = 50 cm



(b) Profundidade = 1 m



(c) Profundidade = 1,5 m

Figura 12: Análise da Taxa de Pacotes Recebidos em função da distância entre os dispositivos comparando os diferentes ambientes de transmissão utilizando SF = 7, de acordo com a profundidade do transmissor.

neas, especialmente explorando a influência da profundidade na comunicação sem fio, ainda existem lacunas na literatura.

Considerando isso, os resultados apresentados nesse artigo permitiram verificar a influência de determinados parâmetros na qualidade da comunicação, sendo eles a profundidade do dispositivo transmissor, a distância de transmissão, o fator de espalhamento utilizado e o ambiente no qual está sendo realizada a comunicação.

O melhor desempenho entre todos os cenários comparados foi obtido em um ambiente com visada direta com o transmissor em menor profundidade, utilizando o maior

valor de fator de espalhamento e com menores distâncias entre os dispositivos. Já o que apresentou os piores resultados foi o ambiente urbano denso com SF = 7 e em maiores profundidades. É importante ressaltar que, com o aumento gradativo da profundidade, a comunicação perde a qualidade independente dos valores das demais variáveis envolvidas.

Esse artigo foi desenvolvido com vista à análise da aplicabilidade da comunicação via LoRa em redes de sensores sem fio para monitoramento de ambientes subterrâneos, como para a aplicação em sistemas de distribuição de água, por exemplo. Para sistemas de abastecimento de água, nos quais os canos de distribuição são situados em uma profundidade média de 1 m sob o solo, com esses resultados é possível planejar a distância entre nós sensores para conseguir realizar uma supervisão plena da área de interesse.

Acknowledgments

Referências

- Almarzoqi, S. A., Yahya, A., Matar, Z. e Gomaa, I. (2022). Re-learning exp3 multi-armed bandit algorithm for enhancing the massive iot-lorawan network performance, *Sensors (Basel, Switzerland)* 22. <https://dx.doi.org/10.3390/s22041603>.
- Chen, B., Wan, J., Shu, L., Li, P., Mukherjee, M. e Yin, B. (2017). Smart factory of industry 4.0: Key technologies, application case, and challenges, *Ieee Access* 6: 6505–6519. <https://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2783682>.
- Da Costa, M. B., Dos Santos, L. M. A. L., Schaefer, J. L., Baierle, I. C. e Nara, E. O. B. (2019). Industry 4.0 technologies basic network identification, *Scientometrics* 121(2): 977–994. <https://dx.doi.org/10.1007/s11192-019-03216-7>.
- Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayala, N. F. e Frank, A. G. (2018). The expected contribution of industry 4.0 technologies for industrial performance, *International Journal of Production Economics* 204: 383–394. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019>.
- Ferrigo, S. F. e da Silva, J. (2021). Análise do comportamento da rede lorawan pública da cidade de caxias do sul/rs, *Revista brasileira de computação aplicada* 13(2): 38–47. <https://dx.doi.org/10.5335/rbca.v13i2.12348>.
- Fertig, K., Valle, O. T., Silveira, E., Semprebom, T. et al. (2022). Redes sem fio no monitoramento de falhas de máquinas: uma comparação de tecnologias sem fio com baixa densidade de nodos, *Revista Brasileira de Computação Aplicada* 14(3): 115–126. <https://dx.doi.org/10.5335/rbca.v14i3.13128>.
- Frank, A. G., Dalenogare, L. S. e Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies, *International Journal of Production Economics* 210: 15–26. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>.

- Freris, N. M., Kowshik, H. e Kumar, P. (2010). Fundamentals of large sensor networks: Connectivity, capacity, clocks, and computation, *Proceedings of the IEEE* 98(11): 1828–1846. <https://dx.doi.org/10.1109/JPR.OC.2010.2065790>.
- Gehani, A., Shatagopam, S. H., Raghav, R., Sarkar, M. e Paolini, C. (2021). Application of 915 mhz band lora for agro-informatics, *2021 Wireless Telecommunications Symposium (WTS)*, IEEE, pp. 1–4. <https://dx.doi.org/10.1109/WTS51064.2021.9433712>.
- Gomes, H. P. (2019). *Abastecimento de Água*, LENHS UFPB.
- Lavric, A. e Popa, V. (2017). Internet of things and lora™ low-power wide-area networks: a survey, *2017 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, IEEE, pp. 1–5. <https://dx.doi.org/10.1109/ISSCS.2017.8034915>.
- Lele, A. (2019). Industry 4.0, *Disruptive Technologies for the Militaries and Security*, Springer, pp. 205–215. https://dx.doi.org/10.1007/978-981-13-3384-2_13.
- Liando, J. C. (2019). Experience of lora low power wide area network. <https://dx.doi.org/10.32657/10220/47662>.
- Liando, J. C., Gamage, A., Tengourtius, A. W. e Li, M. (2019). Known and unknown facts of lora: Experiences from a large-scale measurement study, *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)* 15(2): 1–35. <https://dx.doi.org/10.1145/3293534>.
- Lin, K. e Hao, T. (2020). Experimental link quality analysis for lora-based wireless underground sensor networks, *IEEE Internet of Things Journal* 8(8): 6565–6577. <https://dx.doi.org/10.1109/JIOT.2020.3044647>.
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F. e Meyer, F. (2019). A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment, *ICT express* 5(1): 1–7. <https://dx.doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005>.
- Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D. e Wuest, T. (2019). Smart manufacturing: Characteristics, technologies and enabling factors, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 233(5): 1342–1361. <https://dx.doi.org/10.1177/0954405417736547>.
- Müller, J. M., Kiel, D. e Voigt, K.-I. (2018). What drives the implementation of industry 4.0? the role of opportunities and challenges in the context of sustainability, *Sustainability* 10(1): 247. <https://dx.doi.org/10.3390/su10010247>.
- Nara, E. O. B., da Costa, M. B., Baierle, I. C., Schaefer, J. L., Benitez, G. B., do Santos, L. M. A. L. e Benitez, L. B. (2021). Expected impact of industry 4.0 technologies on sustainable development: A study in the context of brazil's plastic industry, *Sustainable Production and Consumption* 25: 102–122. <https://dx.doi.org/10.1016/j.spc.2020.07.018>.
- Nayak, A. e Stojmenovic, I. (2010). *Wireless sensor and actuator networks: algorithms and protocols for scalable coordination and data communication*, John Wiley & Sons.
- Disponível em <https://www.https://www.wiley.com/en-us/Wireless+Sensor+and+Actuator+Networks%3A+Algorithms+and+Protocols+for+Scalable+Coordination+and+Data+Communication-p-9780470570500>.
- Olatinwo, S. O. e Joubert, T.-H. (2019). Enabling communication networks for water quality monitoring applications: a survey, *IEEE Access* 7: 100332–100362. <https://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2904945>.
- Patel, N. R. e Kumar, S. (2018). Wireless sensor networks' challenges and future prospects, *2018 International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART)*, IEEE, pp. 60–65. <https://dx.doi.org/10.1109/SYSMART.2018.8746937>.
- Rojko, A. (2017). Industry 4.0 concept: Background and overview, *International Journal of Interactive Mobile Technologies* 11(5). <https://dx.doi.org/10.3991/ijim.v11i5.7072>.
- Rossit, D. A., Tohmé, F. e Frutos, M. (2019). Industry 4.0: smart scheduling, *International Journal of Production Research* 57(12): 3802–3813. <https://dx.doi.org/10.1080/00207543.2018.1504248>.
- Schmidt, R., Möhring, M., Härting, R.-C., Reichstein, C., Neumaier, P. e Jozinović, P. (2015). Industry 4.0-potentials for creating smart products: empirical research results, *International Conference on Business Information Systems*, Springer, pp. 16–27. https://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-19027-3_2.
- Sousa, M. P. e Lopes, W. T. A. (2011). Desafios em redes de sensores sem fio, *revista de Tecnologia da Informação e Comunicação* 1(1): 41–47. <https://dx.doi.org/10.1272/1/2237-5112.v01n01a08>.
- Tortorella, G. L. e Fettermann, D. (2018). Implementation of industry 4.0 and lean production in brazilian manufacturing companies, *International Journal of Production Research* 56(8): 2975–2987. <https://dx.doi.org/10.1080/00207543.2017.1391420>.
- Villarim, M. R., de Farias Medeiros, D., de Sousa Medeiros, L. C., de Souza, C. P., Pontieri, M. H., dos Santos, N. A. e Baiocchi, O. (2021). A calibrated intelligent sensor for monitoring of particulate matter in smart cities, *Sensors & Transducers* 250(3): 1–9. Disponível em <https://www.proquest.com/openview/2f2d4c3be7a46b437583c1100fede1c6/1?pq-origsite=gscholar&cbl=52938>.
- Wildan, F. M., Hamidi, E. A. Z. e Juhana, T. (2020). The design of application for smart home base on lora, *2020 6th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)*, IEEE, pp. 1–6. <https://dx.doi.org/10.1109/ICWT50448.2020.9243648>.
- Wu, F., Wu, T. e Yuce, M. R. (2019). Design and implementation of a wearable sensor network system for iot-connected safety and health applications, *2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, IEEE, pp. 87–90. <https://dx.doi.org/10.1109/WF-IoT.2019.8767280>.