

Avaliação da Comunicação LoRa no Controle de um Robô Móvel

Otávio Augusto Rocha da Cruz* Daniel Costa Ramos*

*Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Campus Patos de Minas,
CEP 38701-002, Brasil (e-mail: otavio.cruz@ufu.br, danielramos@ufu.br)

Abstract: LoRa (Long Range) is a communication technology that stands out due to its long range, low cost and low energy consumption, but on the other hand, it has a low transmission rate. In many situations, communication is an essential requirement for a robot, where the choice of technology depends on several factors, such as the implemented resources and the operation location. Since LoRa presents interesting characteristics for applications that do not require a large amount of data and require communication distances greater than those conventionally delivered. Therefore, in this work, a study is carried out to investigate the performance of LoRa communication for application in mobile robotics. As LoRa presents changeable parameters, which impact on its performance, these were initially evaluated to achieve a satisfactory practical response in terms of delays, distances and failures in communication. Finally, a configuration was adopted to control a mobile robot, where the manipulation of the robot proved to be satisfactory for a teleoperation task.

Resumo: LoRa (*Long Range*) é uma tecnologia de comunicação que se destaca devido ao seu longo alcance, baixo custo e pouco consumo de energia, mas que, em contrapartida, apresenta uma baixa taxa de transmissão. Em muitas situações a comunicação é um requisito essencial para um robô, onde a escolha da tecnologia depende de vários fatores, como dos recursos implementados e do local de operação. Sendo que LoRa apresenta características interessantes para aplicações que não necessitem de grande quantidade de dados e requerem distâncias de comunicação maiores que as convencionalmente entregues. Logo, neste trabalho é realizado um estudo para averiguar o desempenho da comunicação LoRa para a aplicação na robótica móvel. Como LoRa apresenta parâmetros alteráveis, que impactam em seu desempenho, estes foram inicialmente avaliados para uma resposta prática satisfatória, em termos de atrasos, distâncias e falhas nas mensagens. Por fim, adotou-se uma configuração para controle de um robô móvel, onde a manipulação do robô se mostrou satisfatória para tarefa de teleoperação.

Keywords: LoRa; Robotics; ESP32; Robot Control; Mobile Robot.

Palavras-chaves: LoRa; Robótica; ESP32; Controle de Robô; Robô Móvel.

1. INTRODUÇÃO

O LoRa (*Long Range*) é uma tecnologia de comunicação que tem tido destaque, principalmente devido ao seu reduzido consumo de energia, baixo custo, longo alcance e fácil implementação. Essas características proporcionam a LoRa um grande potencial em aplicações de IoT (*Internet of Things*), especialmente em aplicações agrícolas, nas quais, geralmente requerem comunicação à longas distâncias (Yim et al., 2018).

A comunicação é vital não só em IoT, mas também na robótica, visto que possibilita, dentre diversas tarefas, a de monitoramento e de controle remoto (Ribeiro and Lopes, 2020). E como existem diversas tecnologias de comunicação disponíveis, a escolha de qual utilizar depende, por exemplo, do contexto no qual o robô está inserido e o tipo de tarefa (Garzón et al., 2017).

Apesar da flexibilidade supracitada, as tecnologias sem fio mais usadas na robótica são geralmente Bluetooth e Wi-Fi (Pashkin et al., 2019). Na Tabela 1 é apresentada uma síntese

dos estudos de Feng et al. (2019) e Glória et al. (2017) sobre as principais características de Bluetooth, Wi-Fi e LoRa, no qual, comparativamente, LoRa apresenta uma baixa taxa de dados e um maior alcance em relação às demais tecnologias.

Logo, ao considerar uma aplicação robótica com requisitos de longas distâncias e que não necessite transmitir grandes quantidades de dados, é concebível a proposição de que a utilização de LoRa pode ser uma boa alternativa.

Pesquisas recentes exploraram a utilização desta comunicação com robôs, nos quais destaca-se o trabalho realizado por Lin et al. (2020), onde é projetado e testado um controlador portátil para um braço robótico, usando LoRa como forma de comunicação em um ambiente *indoor*. O mecanismo de teleoperação proposto permitiu que o braço robótico atingisse 93,33% dos movimentos projetados, em um ambiente com obstáculos e distância média de 45,19 m.

Em Loukatos et al. (2021) é descrito um veículo autônomo capaz de acompanhar o agricultor durante as atividades de colheita e transportar a produção da área de plantio até o local

do caminhão. Foram realizados testes com Wi-Fi e LoRa, onde os alcances máximos estavam entre 100 e 150 m, e 800 e 1200 m, respectivamente.

Tabela 1. Características das comunicações Wi-Fi, Bluetooth e LoRa (Feng et al., 2019) (Glória et al., 2017).

	Wi-Fi IEEE802.11	Bluetooth IEEE802.1 5.1	LoRa
Distância (m)	100	Indoor: 20 Outdoor: 100	Urbana: 2000-5000 Suburbano: 15000
Complexidade	Alto (802.11b)	Médio	Baixa
Consumo de Energia	Baixo	Muito Alto	Médio
Taxa de Dados (Mbps)	150	1	0.05

Maneekittichote e Chanthasopeephan (2020) desenvolveram um algoritmo para controlar o movimento de um grupo de robôs móveis, nos quais, utilizavam LoRa para se comunicar com um controlador central. Os experimentos mostraram que os robôs podem funcionar em tempo real, se comunicando com sucesso por meio do LoRa, além disso, os resultados indicam que LoRa pode ajudar a estender o tempo de uso de um robô, dado seu baixo consumo de energia.

Em (Loukatos and Arvanitis, 2019) é usado um veículo robótico *Do It Yourself* (DIY) como forma de aprendizagem baseada em problemas para alunos de engenharia agrícola. Onde a plataforma robótica possui *hardware* genérico e incorpora, inicialmente, funcionalidade básicas de controle automático. Durante o processo, modificações foram realizadas no robô, sendo adicionado funcionalidades de reconhecimento de voz e comunicação LoRa, usada entre a unidade de controle e o robô. Os testes com LoRa forneceram uma alternativa aos *links* Wi-Fi, sendo a única desvantagem a baixa taxa de comunicação, no entanto, as taxas de dados de 2-3 kbps foram suficientes para atender às necessidades. Além disso, distâncias de controle de 500 m foram facilmente alcançadas com LoRa, enquanto que com Wi-Fi foi atingido cerca de 150 m.

Em suma, estes trabalhos indicam que LoRa apresenta características interessantes para algumas aplicações robóticas. Além disso, um fator chave para a construção de um robô é a escolha adequada de componentes de *hardware* e *software* dentre os vários disponíveis no mercado (Loukatos et al., 2021). Desta forma, a contribuição deste trabalho consiste na análise experimental da comunicação LoRa a partir da alteração de seus parâmetros, determinando na prática uma configuração que possua bom desempenho ao considerar as necessidades básicas do sistema de comunicação de um robô, sendo esta configuração validada em um experimento de teleoperação de um robô móvel utilizando o ESP32.

2. COMUNICAÇÃO LORA

O LoRa é uma tecnologia de longo alcance da Semtech Corporation, no qual, em termos topológicos, trata-se de uma

implementação da camada física baseada em *Chirp Spread Spectrum* (CSS). Essa tecnologia possui parâmetros alteráveis que afetam o seu desempenho, nos quais destacam-se (Liando et al., 2019; Yim et al., 2018):

- *Spreading Factor* (SF): refere-se ao número de *Compressed High Intensity Radar Pulse* (CHIRP) por símbolo, onde os valores disponíveis são: 6, 7, 8, 9, 10, 11, e 12. Os SFs são considerados ortogonais entre si, ou seja, sinais transmitidos com SFs diferentes não interferem um no outro. Em síntese, ao aumentar SF tem-se um aumento do alcance e diminuição da taxa de transmissão.
- *Bandwidth* (BW): é a largura da banda de transmissão, as bandas suportadas são: 7.8, 10.4, 15.6, 20.8, 31.2, 41.7, 62.5, 125, 250, e 500 kHz. Um BW maior oferece uma taxa de dados mais alta, em contrapartida, o receptor tem sua sensibilidade de recepção prejudicada.
- *Coding Rate* (CR): permite a recuperação de bits de informação errôneos e está diretamente relacionado com o FEC (*Forward Error Correction*). Pode assumir os valores: 4/5, 4/6, 4/7, e 4/8. Um CR maior oferece mais confiabilidade, melhorando a resiliência a bits corrompidos, o que ocasiona em um aumento da distância máxima de transmissão, no entanto, provoca um decréscimo da taxa de dados.

Dessa forma, pode-se afirmar que SF, BW e CR podem ser configurados para favorecer a distância ao custo de uma menor taxa de dados ou beneficiar a taxa de dados ao sacrifício da distância (Ameloot and Rogier, 2020).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A Tabela 2 especifica os principais materiais utilizados neste trabalho.

Tabela 2. Matérias utilizados.

Material	Descrição
Chassi	Duas rodas, estrutura circular Diâmetro de 7,5 cm
Antena	31 cm, 12 dBi
ESP32	Heltec V2 Chip LoRa SX1276
TB6612FNG	Ponte H, controle para 2 motores
Bateria	Li-Po 9V, 400 mAh
Conversor de Tensão	3.3 ou 5V
Módulo Joystick	Usado para teleoperação

Dentre os matérias, destaca-se o ESP32, *hardware* utilizado para realizar a comunicação via LoRa. Essa escolha se deve a sua boa versatilidade e praticidade, já que possibilita a visualização de resultados em seu display; possui baixo custo; suporte para comunicação LoRa, Wi-Fi e BLE; possibilita o uso de bateria externa; e tem tamanho relativamente pequeno (Kodali et al., 2018).

Como expresso anteriormente, o desempenho de LoRa é alterado conforme alguns parâmetros, isso implica que o desempenho do robô está diretamente ligado a configuração desses parâmetros. Dessa forma, foram estabelecidos alguns procedimentos, que serão especificados a seguir.

3.1 Indicadores de Desempenho

A fim de encontrar uma boa combinação para a investigação deste trabalho, foram estabelecidas prioridades para o controle do robô, sendo elas:

- Distâncias maiores que as convencionalmente entregues por Bluetooth e Wi-Fi;
- Entrega adequada dos comandos enviados, ou seja, idealmente sem erros;
- Baixa latência de comunicação.

A partir das prioridades estabelecidas, definiu-se o conjunto de indicadores a serem avaliados, sendo eles: recepção de pacotes corretos; *Received Signal Strength Indication* (RSSI), que indica a intensidade de sinal recebido pelo receptor; e o *delay*, que corresponde ao tempo que a mensagem leva para chegar ao destino e ser recuperada.

Dessa forma, foi possível relacionar cada indicador com os parâmetros do LoRa, ou seja, os parâmetros escolhidos para variar e examinar o impacto (SF, BW e CR) possuem influência nas qualidades que se deseja potencializar. A Tabela 3 apresenta mais detalhes, com os parâmetros e valores selecionados para este trabalho.

Tabela 3. Especificações técnicas do LoRa.

Parâmetros	Valores
Frequência	915 MHz
Cyclic Redundancy Check	Sem
Modo de Cabeçalho	Explícito
Potência de Transmissão	20 dBm
<i>Bandwidth</i>	7,8, 41,7, 62,5 e 250 (kHz)
<i>Spreading Factor</i>	7, 8 e 10
<i>Coding Rate</i>	4/5 e 4/8

3.2 Experimentos

Foram planejados três experimentos, onde dois são para explorar a qualidade da comunicação na prática, a partir da variação dos parâmetros descritos na Tabela 3. No primeiro experimento, considerou-se um cenário urbano com maior densidade de obstáculos em uma distância de 155 m, onde as configurações que não alcançaram certos critérios foram excluídas dos demais testes.

Em um segundo experimento, as configurações restantes foram testadas em uma área com poucos obstáculos, mas ainda em perímetro urbano. Para esta fase testou-se as distâncias de 200, 300, 400, 600, 900, e 1000 metros, e no final, determinou-se a configuração com melhor desempenho. Então, em um terceiro experimento, foi averiguado o controle de um robô móvel utilizando a melhor configuração, identificada no ensaio anterior.

Para os testes 1 e 2 optou-se por metodologia semelhante a utilizada em (Sanchez-Iborra et al., 2018), onde após a transmissão de um pacote de dados esperasse uma confirmação da estação base, variando um conjunto de parâmetros do LoRa para cada conjunto de transmissão.

A Fig. 1 – a) exemplifica o processo adotado, onde para obtenção de um dado segue-se o procedimento: *Transceiver 1* envia uma mensagem (7-9 bytes) para o *Transceiver 2*, que por sua vez, reenvia a mensagem recebida para 1. Isto se repete 45 vezes, para cada combinação (SF, BW e CR) e distância. Posteriormente, usou-se uma aplicação, denominada PLX-DAQ, para armazenar os resultados a partir da leitura serial do ESP32 (Sreenivas and Shivakumar, 2020).

Ainda, considerando a Fig. 1 – a), foram definidas as seguintes disposições para a aferição dos parâmetros do sinal:

- RSSI: valor medido na recepção do *Transceiver 1*;
- Erro: quando a mesma mensagem enviada pelo *Transceiver 1* não retorna ao mesmo após um intervalo de tempo;
- *Delay*: considera-se que o tempo de ida e volta são iguais, logo, o *delay* de uma transmissão simples, só ida, pode ser estimado dividindo-se o valor total por dois.

Segundo teoria apresentada, é possível atingir distâncias acima de 2000 m utilizando LoRa. Neste contexto, uma configuração que apresenta muitos erros ou RSSI baixo em uma distância de 155 metros (experimento 1) não é satisfatória para este trabalho. Consequentemente, definiram-se critérios para descarte de configurações, sendo que no primeiro experimento as configurações que atingiram mais de 10 erros ou RSSI médio menor ou igual a -120 dBm foram descartadas. Enquanto que, no segundo experimento, a escolha da configuração se dá pela menor quantidade de erros, característica considerada como fundamental para uma boa comunicação.

Por último, no experimento 3, foi montada uma estrutura básica para controle, como mostrado na Fig. 1 – b), onde o ESP32 usa LoRa para enviar comandos de movimento do *Joystick* para o robô, que por sua vez, executa o comando.

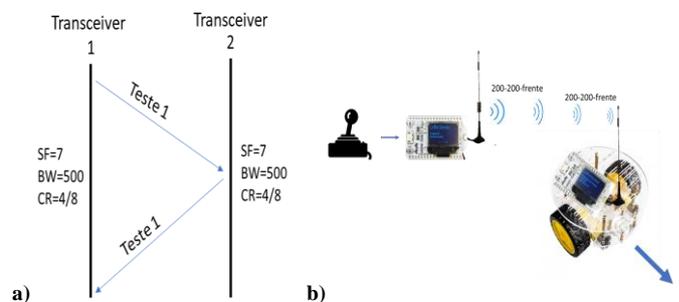


Fig. 1 Procedimento para troca de mensagens no experimento 1 e 2 em a) e em b) para teleoperação do robô.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos a partir da metodologia adotada são apresentados nas subseções a seguir.

4.1 Experimento 1

A Fig. 2 apresenta a quantidade de erros para cada configuração, elas são apresentadas no formato (SF-BW-CR), como (7-7.8-5), que corresponde a $SF = 7$, $BW = 7.8$ kHz e $CR = 4/5$. Segundo avaliação atribuída anteriormente, as configurações que obtivessem mais de 10 erros seriam descartadas, sendo estas as seguintes configurações: (7-62.5-5), (7-250-5), (8-7.8-5), (8-7.8-8), (8-41.7-5), (8-62.5-5), (8-250-5), (10-7.8-5), (10-7.8-8) e (10-41.7-8).

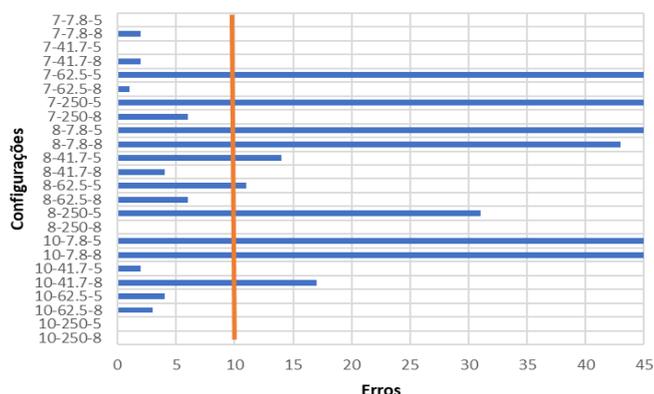


Fig. 2 Erros para cada configuração em 155 m.

Outro critério estipulado foi $RSSI \leq -120$ dBm. Como pode ser averiguado na Fig. 3, as configurações ainda válidas que extrapolaram esse limite foram: (7-7.8-5), (7-7.8-8) e (10-62.5-8).

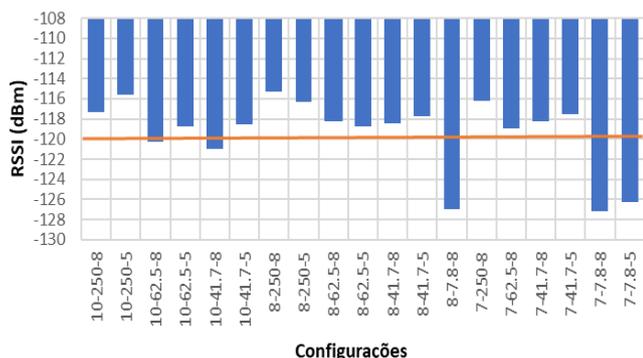


Fig. 3 RSSI médio para cada configuração em 155 m.

Sendo assim, segundo critérios estipulados, as configurações restantes para os demais testes são: (7-41.7-5), (10-41.7-5), (10-62.5-5), (10-250-5), (7-41.7-8), (7-62.5-8), (7-250-8), (8-41.7-8), (8-62.5-8), (8-250-8) e (10-250-8).

Na Fig. 4 são apresentados os *delays* para essa etapa, onde nota-se que os valores apresentam uma variação considerável de uma configuração para outra.

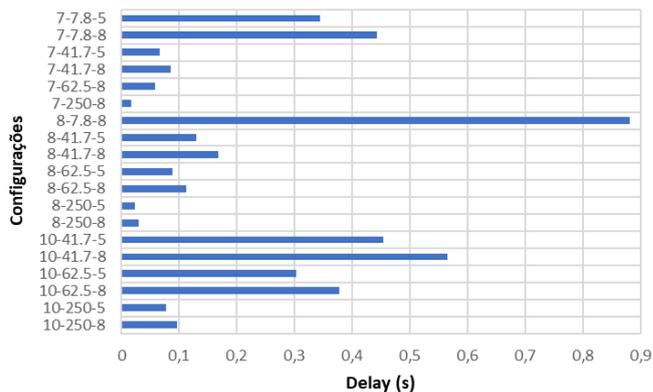


Fig. 4 Delay médio para cada configuração em 155 m.

4.2 Experimento 2

A Fig. 5, apresenta os erros alcançados nesta etapa, no qual, testou-se as configurações restantes nas distâncias de 200, 300, 400, 600, 900 e 1000 metros. Considerando os resultados apresentados, a configuração que obteve menos erros foi (7-62.5-8), apresentado um total de 8 erros, sucedida por (8-62.5-8), com 12 erros, seguida de (8-41.7-8) e (10-250-8), ambos com 13 erros.

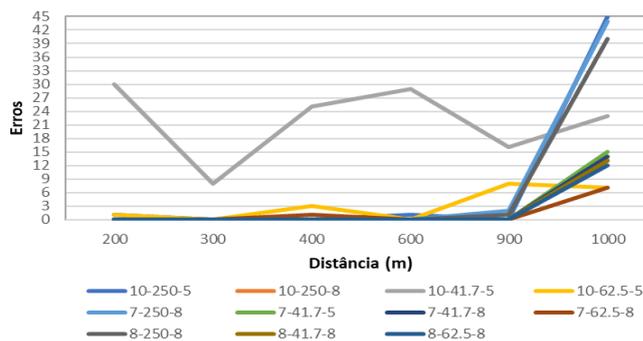


Fig. 5 Erro para cada configuração, experimento 2.

Já na Fig. 6, são mostrados os valores de RSSI adquiridos neste experimento. Considerando que a sensibilidade do rádio utilizado é de aproximadamente -148 dBm (Kodali et al., 2018) e que os experimentos realizados em 1000 m apresentam baixo RSSI, estima-se que o módulo utilizado não consiga atingir 2000 m nas condições de teste deste trabalho.

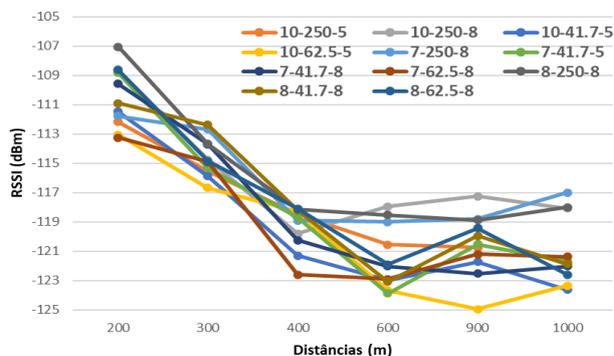


Fig. 6 RSSI médio para cada configuração, experimento 2.

A média de *delay* estimada para uma comunicação simples é mostrada na Fig. 7. Verificou-se que os valores praticamente se mantiveram conforme o aumento da distância, sendo que o melhor desempenho foi de (7-250-8), cujo *delay* foi quase a metade do obtido com a configuração (8-250-8).

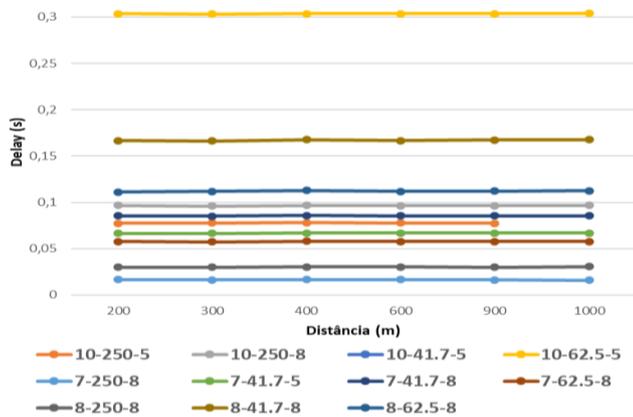


Fig. 7 Delay médio para cada configuração, experimento 2.

Em alguns testes, os valores obtidos parecem ser contraintuitivos, por exemplo, na Fig. 6 esperava-se RSSI menores com o aumento da distância, no entanto, isto não aconteceu em todos os casos. Esses valores incomuns podem ser resultado das condições experimentadas durante os testes, como presença de obstáculos esporádicos entre os *Transceivers* (Sanchez-Iborra et al., 2018) e a altura das antenas (Yim et al., 2018).

Para o controle eficiente de um robô, considerou-se a necessidade da correta transmissão das mensagens, por isso, o maior peso para a escolha da configuração a ser usada no controle do robô é a quantidade de erros. Isto posto, a configuração que apresentou menos erros, considerando o experimento 1 e 2, foi (7-62.5-8), com 9 erros. Outro destaque desta configuração é seu tempo de resposta, terceiro menor valor, em contrapartida, o desempenho de RSSI não se destacou, mas isso pode ser decorrente a sua maior quantidade de acertos. Desse modo, (7-62.5-8) é a escolha de configuração para a próxima etapa.

Destaca-se, ainda, as configurações (10-250-8) e (8-250-8), a primeira conta com 13 erros e baixo RSSI, e a segunda alcançou um bom desempenho de RSSI e *delay*, porém, 41 erros, sendo 40 destes em 1000 m.

Considerando que as respostas para distâncias maiores possuam a mesma tendência observada entre 200 e 1000 m, dada a similaridade dos testes, é possível que os resultados práticos obtidos neste experimento sejam extrapolados para distâncias maiores, sendo, obviamente, necessária uma futura investigação prática para validação de tal hipótese.

4.3 Experimento 3

O robô diferencial utilizado, indicado na Fig. 8, possui o mesmo módulo de comunicação e antena utilizados nos experimentos anteriores, sendo responsável também por aplicar o PWM (*Pulse Width Modulation*) para controle das

velocidades dos motores.

No terminal referente ao controle, o ESP32 recebe os comandos de movimento de um *Joystick*, utilizado para a tarefa de teleoperação. Além disso, o robô foi programado para identificar caso uma mensagem recebida não estivesse no formato adotado, reconhecendo essa situação como falha.



Fig. 8 Robô implementado.

Então, a partir da configuração escolhida (7-62.5-8), avaliou-se o comportamento do robô ao efetuar controle em uma quadra de esportes, de aproximadamente 600 m², com solo regular e sem obstáculos diretos entre o robô e o transmissor. O robô foi controlado e supervisionado pelo operador, sendo conduzido para marcações da quadra, onde procurou-se mensurar a precisão da resposta de movimento e o *delay* dos comandos para cada movimento.

O robô foi movimentado nos diversos extremos da quadra, com distâncias de até 27 m, obtendo resposta de atraso no tempo imperceptíveis ao operador e não apresentando falhas. Os resultados dos experimentos anteriores (1 e 2), para a configuração utilizada, contam com baixa média de *delay* e poucos erros (3,17%), o que condiz com os resultados observados neste experimento.

É importante destacar que o tamanho da mensagem para o controle do robô (10-15 bytes), pode, caso necessário, ser consideravelmente diminuído, através da introdução de outro padrão de mensagem. De toda forma, ainda há espaço para adicionar novas trocas de informação, já que LoRa possui comprimento de *payload* de 255 bytes. Logo, seria possível, por exemplo, acrescentar envio de dados de sensores, o que desencadeia uma série de possibilidades.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A tecnologia LoRa apresenta características interessantes, que podem se ajustar as aplicações robóticas. Nessa perspectiva, este trabalho se propôs a avaliar a comunicação para emprego na teleoperação de um robô móvel.

Como o desempenho de LoRa depende de seus parâmetros, primeiro foram testadas algumas configurações com o intuito de maximizar os critérios de qualidade estabelecidos. A configuração que atingiu o melhor resultado foi de (7-62.5-8), principalmente pela sua baixa quantidade de erros. Com os parâmetros fixados, testou-se o controle de um robô em uma quadra, onde os resultados foram inicialmente satisfatórios, realizando os movimentos enviados quase em tempo real e sem apresentar falhas.

Como os resultados foram satisfatórios e ainda há espaço para mais informações nos *payloads* das mensagens, considera-se que o LoRa pode ser utilizado, sem muitas restrições, para aplicações simplificadas, como o de teleoperação e sensoriamento por exemplo, desde que não demandem elevada taxa de transmissão de dados (como câmeras).

Por fim, como trabalhos futuros, sugere-se expandir este estudo, avaliando o LoRa para a mesma aplicação com maiores alcances, mais dados e com outros módulos de comunicação disponíveis comercialmente, que também possuem LoRa, procurando validar os resultados para outros *hardwares*. Ainda, é possível validar os resultados para aplicações cada vez mais complexas, a fim de delimitar e mapear com melhor precisão, as possíveis tarefas clássicas de robótica que podem ser realizadas com este protocolo, inclusive em tarefas de cooperação com comunicação explícita e aplicações reais na agricultura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal de Uberlândia e ao CNPq pelo apoio e incentivo durante a elaboração deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Ameloot, T., Torre, P.V. and Rogier, H (2020). Experimental parameter optimization for adaptive LoRa modulation in body-centric applications. *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1-5. doi: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135413.
- Feng, X., Yan, F. and Liu, X. (2019). Study of wireless communication technologies on internet of things for precision agriculture. *Wireless Pers Commun* 108, 1785-1802. doi: <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06496-7>.
- Garzón, M., Valente, J., Roldán, J.J., Garzón-Ramos, D., León, J., Barrientos, A. and Cerro, J. (2017). Using ROS in multi-robot systems: experiences and lessons learned from real-world field tests. In Koubaa A. (eds) *Robot Operating System (ROS)*. *Studies in Computational Intelligence*, vol 707. Springer, Cham. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-54927-9_14.
- Glória, A., Cercas F. and Souto, N. (2017). Comparison of communication protocols for low cost Internet of Things devices. *2017 South Eastern European Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM)*, pp. 1-6. doi: 10.23919/SEEDA-CECNSM.2017.8088226.
- Kodali, R.K., Yerroju, S. and Sahu, S. (2018). Smart farm monitoring using LoRa enabled IoT. *2018 Second International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT)*, pp. 391-394. doi: 10.1109/ICGCIoT.2018.8753086.
- Liando, J.C., Gamage, A., Tengourtius, A.W. and Li, Mo. (2019). Known and unknown facts of lora: experiences from a large-scale measurement study. *ACM Trans. Sen. Netw.* 15, 2, 35 pages. doi: <https://doi.org/10.1145/3293534>.
- Lin, S., Lan, C., Chen, S. and Li, K. (2020). Design and Development of Portable LoRa-based Teleoperation Controller, *Sensors Materials*, Vol. 32, No. 6, p. 2057-2075. doi: <https://doi.org/10.18494/SAM.2020.2786>.
- Loukatos, D., Petrongonas, E., Manes, K., Kyrtopoulos, I., Dimou, V. and Arvanitis, K.G. (2021). A synergy of innovative technologies towards Implementing an autonomous DIY electric vehicle for harvester-assisting purposes. *Machines*, 9, 82. doi: <https://doi.org/10.3390/machines9040082>.
- Loukatos, Dimitrios and Arvanitis, Konstantinos G. (2019). Extending Smart Phone Based Techniques to Provide AI Flavored Interaction with DIY Robots, over Wi-Fi and LoRa interfaces. *Education Sciences*. 9, no. 3: 224. doi: <https://doi.org/10.3390/educsci9030224>.
- Maneekittichote, T. and Chanthasopeephan, T. (2020). Mobile Robot Swarm Navigation and Communication Using LoRaWan. *2020 6th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE)*, pp. 22-25. doi: 10.1109/ICMRE49073.2020.9064973.
- Pashkin, A., Lavrenov, R., Zakiev, A. and Svinin, M. (2019). Pilot communication protocols for group of mobile robots in USAR scenarios. *2019 12th International Conference on Developments in eSystems Engineering (DeSE)*, pp. 37-41. doi: 10.1109/DeSE.2019.00017.
- Ribeiro, A.F. and Lopes, G. (2020). Learning robotics: a review. *Curr Robot Reports*, 1-11. doi: <https://doi.org/10.1007/s43154-020-00002-9>.
- Sanchez-Iborra, R., Sanchez-Gomez, J., Ballesta-Viñas, J., Cano, Maria-Dolores and Skarmeta, A.F. (2018). Performance evaluation of lora considering scenario conditions. *Sensors*, no. 3: 772. doi: <https://doi.org/10.3390/s18030772>.
- Sreenivas, R.M.V. and Shivakumar M. (2020). PLX-DAQ-based wireless battery monitoring system for obstacle avoidance robot. Shreesh C., Gudi R. (eds) *Control Instrumentation Systems*. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 581. Springer, Singapore. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-13-9419-5_12.
- Yim, D., Chung, J., Cho, Y., Song, H., Jin, D., Kim, S., Ko, S., Smith, A. and Riegsecker, A. (2018). An experimental LoRa performance evaluation in tree farm. *2018 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, pp. 1-6. doi: 10.1109/SAS.2018.8336764.