

Uma Avaliação Experimental de Tecnologias de Comunicação Sem Fio de Baixo Custo para uma Aplicação IoT de Medição Pluviométrica

Sofia C. Santos, Diogo M. F. Mattos e Dianne S. V. Medeiros

Resumo— Estações meteorológicas monitoram constantemente o clima utilizando sensores para coletar dados que permitam desenvolver um plano adequado para o ordenamento e planejamento das áreas de uma cidade. A transferência dos dados para o centro de dados normalmente é feita manualmente ou remotamente através de rede celular ou satelital, aumentando os custos operacionais do sistema. Assim, é necessário desenvolver uma estação meteorológica, de baixo custo e independente de infraestrutura terceirizada para transmissão dos dados. Este artigo compara o uso de duas tecnologias de comunicação sem fio de baixo custo, Wi-Fi e LoRa, e propõe uma arquitetura híbrida para a aplicação de monitoramento de chuvas. Os resultados mostram que as tecnologias exercem papéis distintos na arquitetura, já que Wi-Fi provê maior banda à curta distância, enquanto LoRa provê comunicação resiliente à longa distância.

Palavras-Chave— Monitoramento de chuvas, Wi-Fi, LoRa, Internet das Coisas

Abstract— Meteorological stations constantly monitor the climate using sensors to collect data that allow developing an adequate plan for the ordering and planning of city areas. Usually, collected data is transferred to the data center manually or using cellular or satellite networks, which increases the operating cost of the system. Thus, it is necessary to develop a meteorological station that is low-cost and independent of outsourced infrastructure for data transmission. This paper compares the use of two low-cost wireless communication technologies, Wi-Fi and LoRa, and proposes a hybrid architecture for a rain monitoring application. The results show that technologies play different roles in the architecture, as Wi-Fi provides higher bandwidth over a short distance, while LoRa provides resilient communication over a long distance.

Keywords— Rain monitoring, Wi-Fi, LoRa

I. INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto habilita a obtenção de informações sobre uma Região de Interesse (*Region of Interest* - RoI) [1], sem a necessidade de contato direto, agilizando processos de tratamento, armazenamento e monitoramento dos dados coletados. A Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) viabiliza a implantação dessas aplicações, permitindo a transmissão de dados entre dispositivos antes incapazes de se comunicarem. Por ser um fator crítico, é essencial investigar o desempenho das tecnologias de comunicação para orientar

a decisão sobre qual é a mais adequada para o sensoriamento remoto de cada RoI. O interesse no monitoramento de chuvas nas RoIs consiste em coletar dados que permitam desenvolver estratégias para o ordenamento e planejamento das áreas de uma cidade. O objetivo é reduzir riscos de desastres e mitigar problemas sociais e econômicos resultantes de chuvas intensas. As chuvas devem ser cuidadosamente caracterizadas para evitar a agregação errônea de RoIs diferentes [2]. No entanto, a caracterização se baseia majoritariamente em séries antigas, usando dados mistos de pluviômetros e pluviógrafos, em escala de tempo diária ou subdiária. Além disso, a densidade da rede de coleta de dados pluviométricos é insuficiente para permitir a separação adequada das RoIs.

Em diversas estações governamentais responsáveis pela medição hidrometeorológica, a coleta dos dados é feita presencialmente, de forma manual ou semi-automatizada. Muitas estações permitem a coleta remota dos dados monitorados, porém a transmissão é feita através da rede celular ou por satélite¹. A desvantagem desse método de transmissão é a dependência de infraestrutura terceirizada e os custos operacionais incorridos. O desenvolvimento de sistemas de sensoriamento remoto requer a implantação de uma infraestrutura IoT unificada e escalável que permita um crescimento sustentável e que seja adequada para modelar, medir, otimizar, controlar e monitorar sistemas complexos interdependentes [3].

Este artigo avalia o desempenho de duas tecnologias de comunicação sem fio de baixo custo e propõe uma arquitetura para um sistema de monitoramento de chuvas em uma RoI, com baixo custo e independente de infraestrutura terceirizada para transmissão de dados desde a estação de monitoramento até o centro de dados. Assim, reduz-se o custo operacional e viabiliza-se o aumento da densidade da malha pluviométrica. A ideia-chave é integrar um pluviômetro a um módulo de comunicação, permitindo automatizar a leitura e envio dos dados para um servidor de processamento e armazenamento. A escolha da tecnologia de comunicação usada na arquitetura proposta é feita com base em resultados obtidos em um estudo de caso. Os experimentos são realizados na cidade de Petrópolis na região serrana do Rio de Janeiro, e investigam-se

Sofia C. Santos, Diogo M. F. Mattos, Dianne S. V. Medeiros, Departamento de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ, e-mail: sofiacorrea@id.uff.br; menezes@midia.com.uff.br; diannescherly@id.uff.br. Este trabalho foi parcialmente financiado por CNPq, CAPES, FAPERJ, FAPESP (2018/23062-5), Prefeitura de Niterói/FEC/UFF (Edital PDPA 2020) e RNP.

¹Informação retirada do sítio *web* do Instituto Estadual do Ambiente, disponível em <http://www.inea.rj.gov.br/Portal/MegaDropDown/Monitoramento/Monithidrometeorologico/TiposEstacoes/index.htm?lang=PT-BR>. Último acesso em 20/05/2020.

as tecnologias Wi-Fi² e LoRa³. O desempenho é avaliado em termos de taxa de perda de pacotes, vazão e atraso na chegada de pacotes. Os resultados mostram que a tecnologia Wi-Fi se destaca por prover maior banda à curta distância, enquanto LoRa provê comunicação resiliente à longa distância.

O artigo está organizado como segue. A Seção II contextualiza o monitoramento de chuvas em RoIs e discute trabalhos relacionados. A Seção III apresenta a arquitetura proposta para a aplicação de monitoramento de chuvas. A Seção IV discute a metodologia experimental. A Seção V discute os resultados dos experimentos. Por fim, a Seção VI conclui o artigo.

II. MONITORAMENTO DE CHUVAS

Aplicações de sensoriamento remoto são essenciais para monitorar RoIs. Um dos obstáculos enfrentados para desenvolvê-las é a necessidade de prover uma taxa de transmissão adequada para transferência dos dados ao mesmo tempo em que se fornece longo alcance consumindo pouca energia dos dispositivos [4]. Com o desenvolvimento de protocolos IoT [5], como Sigfox, LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*) e NB-IoT (*Narrow-Band IoT*), e a redução no custo de sensores e microcontroladores, os dispositivos IoT estão cada vez mais acessíveis. Porém, ainda é necessário implantar uma infraestrutura de comunicação de ampla cobertura.

Este artigo foca em aplicações de monitoramento de chuvas, que são úteis na mitigação dos efeitos de desastres naturais, na previsão do tempo, além de serem importantes para a pesquisa de profissionais da área. O monitoramento é feito principalmente com uso de pluviômetros ou pluviógrafos. Radares ou imagens de satélites também são utilizados para medir a precipitação, sendo esse método usado em análises da distribuição espacial da chuva⁴. No Estado do Rio de Janeiro, por exemplo, o monitoramento hidrometeorológico é feito pelo INEA. As estações podem ser convencionais, automáticas ou telemétricas. As telemétricas são as únicas que realizam monitoramento remoto, devido ao uso de pluviômetros digitais e da infraestrutura de comunicação celular ou por satélite. O uso dessa infraestrutura de comunicação incorre em elevado custo operacional, os equipamentos usados são proprietários, de elevado custo, com código fonte fechado e sem interoperabilidade com equipamentos de outros fabricantes [6]. Por essa razão, é importante desenvolver um sistema aberto e implantar uma infraestrutura para transmissão dos dados.

Trabalhos relacionados propõem o uso da tecnologia LoRa para desenvolvimento de sistemas de monitoramento de RoIs. Helal *et al.* [6] propõem o EstAcqua, uma solução integrada de *hardware* e *software* de baixo custo que visa monitorar dados ambientais e oceanográficos de sensores de superfície e submersos. Diferentemente, este artigo foca no monitoramento de chuvas em ambientes urbanos e propõe uma arquitetura

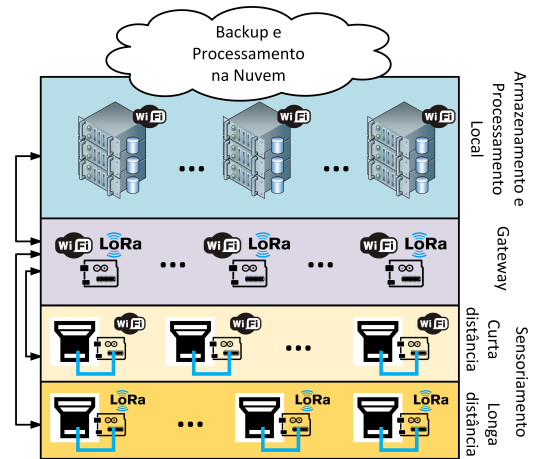


Fig. 1. A arquitetura proposta vislumbra a comunicação de uma rede pluviométrica densa para monitoramento preciso de RoIs. A arquitetura é dividida em uma camada de sensoriamento, uma de *gateway* e outra de armazenamento e processamento local.

híbrida para comunicação. Reddy *et al.* [7] propõem um sistema de monitoramento que usa LoRa. O foco é a poluição do ar, temperatura, umidade do ar e do solo e detecção de chuvas. Este artigo se diferencia ao propor uma arquitetura com comunicação híbrida para o monitoramento de chuvas e não apenas para a sua detecção. Kama *et al.* [8] desenvolvem um protótipo de estação para monitoramento de chuvas utilizando as tecnologias de comunicação LPWAN (*Low Power Wide Area Networks*) e de rede celular. Neste artigo, a arquitetura proposta não utiliza a rede celular, evitando custos operacionais adicionais. Este artigo compara, ainda, o uso da tecnologia LoRa ao da tecnologia Wi-Fi, que é apontada como a principal tecnologia viabilizadora da IoT devido ao baixo custo de implantação e de desenvolvimento de aplicações [5].

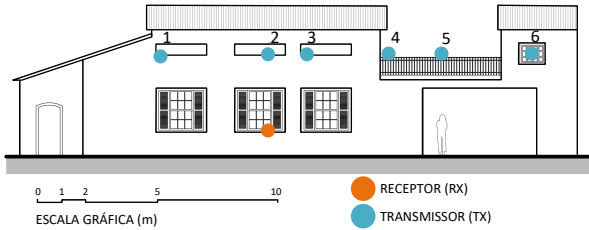
III. ARQUITETURA PARA MONITORAMENTO DE CHUVAS

Este artigo investiga o uso das tecnologias Wi-Fi e LoRa em uma aplicação de medição pluviométrica. Para tanto, avalia-se o desempenho das duas tecnologias através de um estudo de caso e propõe-se uma arquitetura híbrida que vislumbra a comunicação de uma rede pluviométrica densa, conforme ilustra a Figura 1. A arquitetura divide-se em três camadas: sensoriamento, *gateway* e armazenamento e processamento local. Na camada de sensoriamento estão os pluviômetros digitais, que realizam a coleta dos dados. Outros sensores podem coexistir para compor uma estação meteorológica desde que seja possível conectá-los a um microcontrolador. O monitoramento pode ocorrer em distâncias curtas, utilizando uma tecnologia de WLAN (*Wireless Local Area Network*), como Wi-Fi; e em distâncias longas, utilizando uma tecnologia de LPWAN, como o LoRa. A Wi-Fi exige maior consumo de energia, porém considera-se que o monitoramento em curta distância ocorre em RoIs providas de energia, uma vez que o servidor de armazenamento e processamento local deve estar próximo e necessita de alimentação permanente. A tecnologia LoRa é considerada para o monitoramento em longa distância porque apresenta baixo consumo de energia e é capaz de transmitir dados a longas distâncias. A camada de *gateway* deve implementar ao menos duas tecnologias distintas, para

²Padrão disponível em https://standards.ieee.org/standard/802_11-2016.html. Último acesso em 29/06/2020.

³Especificação disponível em <https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawanr-specification-v11>. Último acesso em 29/06/2020.

⁴Informação retirada do sítio *web* da Agência Nacional de Águas, disponível em https://capacitacao.ead.unesp.br/dspace/bitstream/ana/66/4/Unidade_2.pdf. Último acesso em 20/05/2020.



(a) Cenário 1: receptor no primeiro andar e pontos de transmissão no segundo andar, todos externos. Nos pontos 5 e 6 não há visada direta com o receptor.



(b) Cenário 2: receptor e pontos de transmissão no primeiro andar, todos com visada. (c) Cenário 3: receptor e pontos de transmissão no primeiro andar, todos sem visada.

Fig. 2. Cenários experimentais. Os pontos laranjas indicam a posição do receptor, enquanto os pontos azuis numerados são os locais de transmissão. A distância entre os pontos é de aproximadamente 3 metros. (a) O Cenário 1 representa um ambiente de propagação externo, mas com pontos muito próximos a paredes. (b) O Cenário 2 representa um ambiente de propagação externo com visada direta. (c) O Cenário 3 consiste em um ambiente de propagação interno sem visada direta.

que os sensores possam se comunicar com os servidores locais. Os *gateways* não se comunicam entre si, sendo responsáveis apenas por permitirem a comunicação dos sensores com os servidores. Na camada de armazenamento e processamento local encontram-se os servidores locais, nos quais são armazenados os dados históricos coletados nas respectivas RoIs. A integração entre os dados das diferentes RoIs é feita na nuvem. Dessa forma, os servidores locais devem se conectar à Internet para transferir os dados para a nuvem. Os *gateways* também podem transmitir os dados diretamente para a nuvem. O processamento dos dados referentes a um conjunto de RoIs pode ser realizado na nuvem, que apresenta maior poder computacional quando comparada aos servidores locais, além de possuir capacidade elástica. A nuvem também serve como *backup* para os servidores locais.

IV. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este artigo avalia as tecnologias LoRa e Wi-Fi, implementadas nos módulos de comunicação E32 e ESP32, respectivamente. São utilizados dois módulos de cada tipo para definir pares transmissor-receptor de uma mesma tecnologia. Os experimentos reais são realizados em um ambiente urbano residencial, mas com vegetação densa, na cidade de Petrópolis,

região serrana do Estado do Rio de Janeiro. Um primeiro experimento verifica o alcance de ambas as tecnologias. As condições de propagação são desfavoráveis, devido à vegetação no entorno das residências e à localização dos dispositivos transmissor e receptor, fixados em altura inferior a 2 m. A transmissão LoRa alcança distância de aproximadamente 200 m, enquanto a transmissão Wi-Fi alcança 50 m. Nos experimentos seguintes, o receptor é fixado em um local e a posição do transmissor varia de acordo com os três cenários estudados, ilustrados na Figura 2. Os pontos numerados são os pontos de transmissão, enquanto o não numerado é o receptor. No Cenário 1, Figura 2(a), os pontos de transmissão estão no segundo andar e os pontos 5 e 6 não possuem visada com o receptor. O Cenário 2, Figura 2(b), conta com pontos de transmissão no primeiro andar e comunicação com visada. Já no Cenário 3, Figura 2(c), o receptor está dentro de um cômodo e os pontos de transmissão não têm visada.

Destaca-se que cada cenário apresenta particularidades, como transmissão em ambiente externo (*outdoor*) e interno (*indoor*), com visada e sem visada. Essa diferença entre os cenários é importante para que a comunicação seja analisada sob influência de diferentes mecanismos de propagação. As antenas dos protótipos transmissor e receptor têm ganho de 3 dBi e são mantidas na vertical (perpendicular ao módulo). Em cada cenário, o transmissor envia para o receptor uma estrutura de dados que contém campos para variáveis de interesse para a aplicação, como data, hora e identificação da estrutura. A estrutura é compreendida como um pacote de dados, enviado para o receptor através do módulo de comunicação. O desempenho da LoRa e da Wi-Fi em cada cenário é avaliado através de métricas comuns de rede, como vazão, atraso na chegada de pacotes e taxa de perda de pacotes.

A. Montagem do Protótipo LoRa

O protótipo LoRa utiliza um módulo transceptor EByte E32-433T20DC⁵, que emite na frequência de 433 MHz, conectado a uma placa Arduino Uno. Esse módulo possui 512 B de *buffer* e algumas limitações de *hardware* que impedem medições ou modificações em parâmetros, como o fator de espalhamento igual a 12 (*Spreading Factor* – SF), sendo necessário alterar diretamente o microcontrolador, o que está fora do escopo deste artigo. O pacote enviado pelo transmissor LoRa tem 55 Bytes de carga útil e possui um identificador único para verificação dos pacotes recebidos. Os dados recebidos são armazenados utilizando o *software* Processing⁶ e os dados armazenados são analisados posteriormente utilizando um *script* Python.

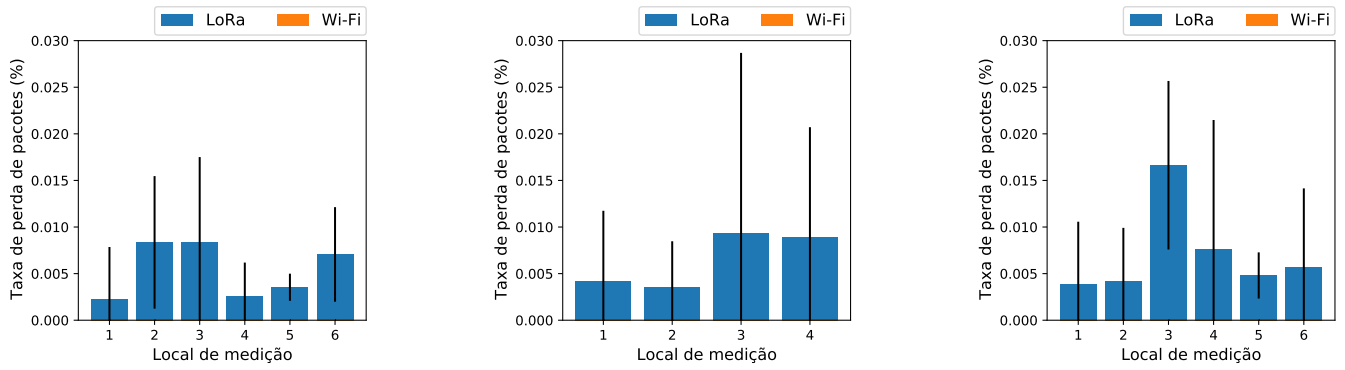
B. Montagem do Protótipo Wi-Fi

O protótipo Wi-Fi utiliza a Placa de Desenvolvimento DOIT Wi-Fi/Bluetooth modelo ESP32-devkit-v1 (ESP-WROOM-32)⁷, que tem memória *flash* integrada de 4MB. As placas

⁵Especificações disponíveis em <http://ebyte.com/en/product-view-news.aspx?id=130>. Último acesso em 29/06/2020

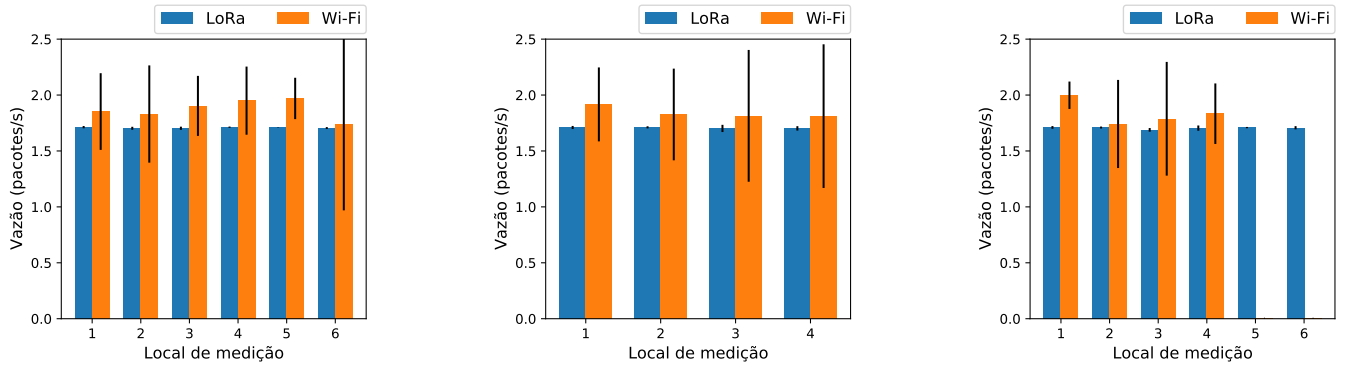
⁶Disponível em <https://processing.org/>. Último acesso em 29/06/2020.

⁷Especificações disponíveis em https://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet_ESP8266_esp32_en.pdf. Último acesso em 29/06/2020



(a) Cenário 1: a taxa não segue um padrão dependente da distância, sendo maior no ponto 4, um dos mais próximos. (b) Cenário 2: a menor taxa de perda de pacotes é obtida para o ponto 2, o segundo mais próximo. (c) Cenário 3: a taxa no ponto 2 é a maior devido, possivelmente, à interferências provocadas por mecanismos de propagação.

Fig. 3. Taxa de perda de pacotes. O protótipo Wi-Fi apresenta taxa de zero perda de pacotes, enquanto que para o protótipo LoRa, a taxa varia de acordo com o cenário. Em nenhum dos cenários a taxa de perda de pacotes segue o padrão esperado de crescer com o aumento da distância. Os diversos mecanismos de propagação agem mais fortemente sobre a transmissão LoRa comparada à transmissão Wi-Fi.



(a) Cenário 1: há uma pequena diferença no número de pacotes transmitidos em cada ponto do Wi-Fi, resultando em variação na vazão. (b) Cenário 2: a variação da vazão entre os pontos é imperceptível. (c) Cenário 3: não há registros nos pontos 5 e 6 para o protótipo Wi-Fi porque o sinal do ESP32-AP não alcança esses pontos.

Fig. 4. Vazão total. Os protótipos apresentam valores médios de vazão semelhantes em todos os cenários. A variação da vazão para o protótipo Wi-Fi ocorre, provavelmente, devido a tentativas de retransmissão que modificam o número de pacotes de fato transmitidos em um mesmo intervalo de tempo.

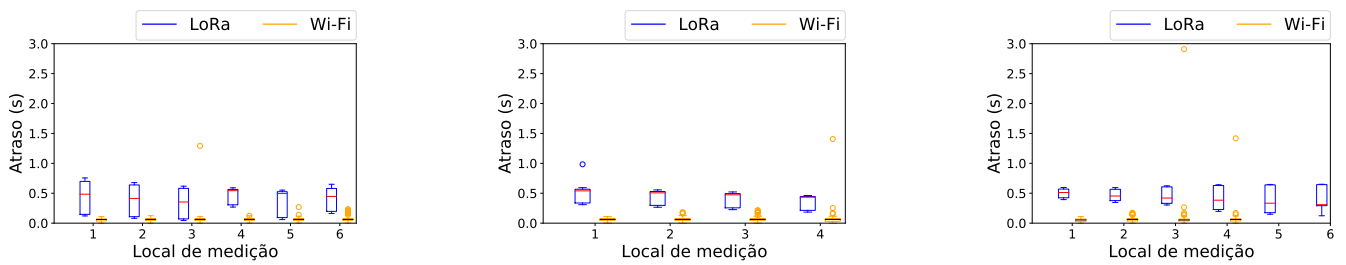
são configuradas para que uma atue como cliente (ESP32-STA), enquanto a outra atua como ponto de acesso (ESP32-AP). Um computador pessoal se conecta à ESP32-AP, servindo como servidor de dados para a ESP32-STA. A conexão com o servidor é feita através de um *socket* TCP e os dados são transmitidos no formato *JSON* (*JavaScript Object Notation*). O encapsulamento aumenta a carga útil do pacote transmitido de 55 B para aproximadamente 350 B. A diferença na abordagem se deve a limitações encontradas no desenvolvimento.

V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os desempenhos dos protótipos são avaliados comparativamente quanto à vazão, à taxa de perda de pacotes e ao atraso na chegada de pacotes, para os três cenários apresentados. As medições em cada ponto são realizadas 3 vezes durante 10 minutos. Uma análise preliminar do conjunto de resultados mostra que o ESP32-AP é alcançado em 14 dos 16 pontos de transmissão, apresentando-se indisponível apenas nos pontos 5 e 6 do Cenário 3, que estão afastados do receptor em aproximadamente 13 e 14,5 m. A elevada atenuação nesses

pontos ocorre devido à quantidade de obstáculos, como paredes e objetos, que atenuam o sinal transmitido em um cenário totalmente sem visada.

A Figura 3 mostra a taxa de perda de pacotes nos três cenários avaliados. O ambiente de propagação variável, influenciado pelas condições climáticas e obstáculos, afeta a taxa de perda de pacotes, que normalmente se relaciona à qualidade do sinal recebido. Em geral, pontos mais distantes sofrem maior atenuação e tendem a apresentar maior taxa de perda de pacotes. Isso é observado no ambiente externo do Cenário 2 (Figura 3(b)), no qual os pontos 3 e 4 apresentam a maior média de taxa de perda. Nos Cenários 1 e 3, no entanto, essa relação não é observada. No Cenário 1 (Figura 3(a)), as maiores médias ocorrem nos pontos 2, 3 e 6. Como a antena usada é omnidirecional e os pontos 2 e 3 encontram-se aproximadamente no centro do diagrama de irradiação, entende-se que há maior probabilidade de ocorrerem perdas. Logo, pontos de transmissão com alturas diferentes do ponto de recepção devem ser posicionados afastados do eixo *z* que passa pelo receptor. O ponto 6 apresenta maior perda por estar



(a) Cenário 1: o ponto 4 apresenta a menor variação para o protótipo LoRa, apesar de não ser o mais próximo ao receptor.

(b) Cenário 2: o protótipo LoRa apresenta variações semelhantes em todos os pontos.

(c) Cenário 3: os pontos 1 e 2 apresentam as menores variações para o protótipo LoRa.

Fig. 5. Atraso na chegada de pacotes. O atraso no protótipo LoRa é mais elevado do que no protótipo Wi-Fi, além de ser mais variável em todos os cenários avaliados. O atraso para o protótipo Wi-Fi é praticamente constante em todos os cenários.

mais distante e sem visada. No Cenário 3 (Figura 3(c)), a maior média ocorre nos pontos 3 e 4, provavelmente devido a mecanismos de propagação como múltiplos percursos e difração, que ocorrem intensamente em ambientes fechados com muitos objetos. Em todos os cenários a taxa de perda é muito baixa, não havendo prejuízo para uma aplicação de monitoramento de chuvas. Ademais, não há perdas para o protótipo Wi-Fi devido à utilização do *socket* TCP. As maiores perdas ocorrem para o ambiente interno do Cenário 3. É notável, portanto, que a tecnologia LoRa apresenta pior desempenho em ambientes de propagação internos.

A Figura 4 mostra a vazão obtida em cada cenário, medida em pacotes por segundo. O protótipo Wi-Fi alcança uma vazão média próxima à do protótipo LoRa. No entanto, a vazão do protótipo LoRa é mais estável do que a do Wi-Fi. Isso ocorre porque o número de pacotes transmitidos de fato no Wi-Fi varia em um mesmo intervalo de tempo, modificando a vazão da comunicação. A variação no número de pacotes transmitidos é justificável devido às estratégias para transmissão confiável implementadas tanto pela subcamada de acesso ao meio da tecnologia Wi-Fi como pelo protocolo TCP. Quanto maior o número de tentativas de retransmissão, menor é o número de pacotes de fato transmitidos em um mesmo intervalo de tempo. A investigação das retransmissões está fora do escopo deste artigo. Por fim, a Figura 5 mostra o atraso na chegada de pacotes. Em todos os cenários, o atraso para o Wi-Fi é muito pequeno e pouco variável. Já o protótipo LoRa apresenta maior variação no atraso e a mediana é mais elevada. Apesar disso, a mediana se mantém aproximadamente constante entre os pontos dos cenários. A mediana maior para o protótipo LoRa comparado ao Wi-Fi se deve ao maior tempo no ar (*time-on-air*) do sinal enviado pelo LoRa.

VI. CONCLUSÃO

Esse artigo avaliou o desempenho das tecnologias LoRa e Wi-Fi em um ambiente de sensoriamento remoto para medição pluviométrica, através de experimentos reais. Os experimentos foram realizados em ambientes interno, externo, com visada e sem visada. Os resultados mostram que as duas tecnologias estudadas são relevantes para a coleta de dados para monitoramento remoto da chuva em regiões de interesse. O protótipo LoRa apresentou maior alcance do que o Wi-Fi, enquanto o

Wi-Fi obteve melhor desempenho em termos de perda, vazão e atraso. De acordo com os resultados obtidos, uma arquitetura híbrida foi proposta com o objetivo de aproveitar os benefícios de ambas as tecnologias para implementar uma aplicação de monitoramento de chuvas que utilize uma malha pluviométrica densa. Como trabalhos futuros, pretende-se integrar um pluviômetro digital aos protótipos desenvolvidos e avaliar o desempenho e a resiliência dos protótipos na presença de chuva fraca, moderada e intensa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração de Matheus Gomes Lima na realização dos desenhos técnicos deste artigo.

REFERÊNCIAS

- [1] C. H. [de O.M. André], D. S. Medeiros, and M. E. M. Campista, "Towards participatory sensing of regions of interest with adaptive sampling rate," *Vehicular Communications*, vol. 25, p. 100254, 2020.
- [2] R. N. de Siqueira Braga, M. de Aquino Galeano Massera da Hora, G. B. Lyra, and A. L. Nascentes, "Determinação e interpolação dos coeficientes das equações de chuvas intensas para cidade do rio de janeiro," *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, vol. 13, no. 1, pp. 1–14, 2018.
- [3] J. M. Hernández-Muñoz, J. B. Vercher, L. Muñoz, J. A. Galache, M. Presser, L. A. H. Gómez, and J. Pettersson, "Smart cities at the forefront of the future internet," in *Domingue J. et al. (eds) The Future Internet*, ser. Lecture Notes in Computer Science, vol. 6656. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 447–462.
- [4] K. E. Nolan, W. Guibene, and M. Y. Kelly, "An evaluation of low power wide area network technologies for the Internet of Things," in *Proceedings of the International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 2016, pp. 439–444.
- [5] D. M. F. Mattos, P. B. Velloso, and O. C. M. B. Duarte, "An agile and effective network function virtualization infrastructure for the internet of things," *Journal of Internet Services and Applications*, vol. 10, no. 1, p. 6, Mar. 2019.
- [6] A. A. Helal, R. C. Júnior, F. da Cunha Garcia, G. F. Barroso, and R. da Silva Villaça, "EstAcqua: Proposta de solução integrada de hardware, software e Internet das Coisas para monitoramento ambiental," in *Anais do XLV Seminário Integrado de Software e Hardware*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2018.
- [7] Y. A. K. Reddy, K. Suganthi, P. M. Kumar, A. A. Khan, and K. S. Pavan, "LoRa—pollution and weather monitoring system," in *Artificial Intelligence and Evolutionary Computations in Engineering Systems*, S. S. Dash, C. Lakshmi, S. Das, and B. K. Panigrahi, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2020, pp. 377–387.
- [8] A. Kama, C. M. N. Fall, M. S. Drame, and M. Diallo, "An Internet of Things infrastructure for rainfall monitoring in Dakar," in *Innovations and Interdisciplinary Solutions for Underserved Areas*, C. M. Kebe, A. Gueye, A. Ndiaye, and A. Garba, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 175–186.