

Monitoramento hidrometeorológico usando redes de sensores sem fio

Alex Felício de Lima

Mestre, UFSCar, Brasil

alexlima@estudante.ufscar.br

ORCID iD <https://orcid.org/0000-0002-5828-7150>

Elza Luli Miyasaka

Professora Doutora, UFSCar, Brasil

elza.miyasaka@ufscar.br

ORCID iD <https://orcid.org/0000-0003-4480-9672>

Beatriz Campos Fialho

Doutora, UFSCar, Brasil

beatrizfialho@ufscar.br

ORCID iD <https://orcid.org/0000-0002-0339-1436>

Monitoramento hidrometeorológico usando redes de sensores sem fio

RESUMO

As inundações urbanas estão entre os tipos de desastres mais frequentes no planeta. Muitas vezes são ocorrências preexistentes devido às características fisiográficas da região, mas que são potencializadas pelos efeitos da urbanização com a impermeabilização e modificação do ciclo hidrológico devido às ações antrópicas. As formas de lidar com esses eventos variam desde soluções estruturais, envolvendo obras de macrodrenagem, até soluções não estruturais, que incluem regulamentações sobre o uso do solo. No contexto das Cidades Inteligentes, ações de mitigação incluem o uso de tecnologias como a Internet das Coisas (IoT) e gestão informatizada na segurança urbana para aprimorar a resposta aos eventos hidrometeorológicos extremos. Nessa perspectiva, este trabalho tem como objetivo propor nós-sensores e gateway para a criação de Redes de Sensores Sem Fio (RSSFs) para monitoramento hidrometeorológico e previsão de inundações. O trabalho baseou-se em uma revisão científica da literatura e de manuais técnicos, incluindo a seleção de placas de desenvolvimento, módulo de comunicação, módulos sensores, codificação e testes. Os testes demonstraram que sistemas microcontrolados podem compor uma RSSF, processando coletas de dados em intervalos de poucos segundos com baixo custo e baixo consumo de energia. Além disso, os nós-sensores apresentam escalabilidade e versatilidade, podendo incorporar diversos sensores e protocolos de comunicação.

PALAVRAS-CHAVE: Inundações. IoT. RSSF.

Hydrometeorological monitoring using wireless sensor networks

ABSTRACT

Urban floods are among the most frequent types of disasters on the planet. They are often pre-existing occurrences due to the region's physiographic characteristics, but they are exacerbated by the effects of urbanization, including waterproofing and modification of the hydrological cycle due to human activities. Approaches to addressing these events range from structural solutions, involving macro-drainage projects, to non-structural solutions, including land use regulations. In the context of Smart Cities, mitigation actions include the use of technologies such as the Internet of Things (IoT) and computerized urban security management to improve the response to extreme hydrometeorological events. From this perspective, this work aims to propose sensor nodes and gateways for the creation of Wireless Sensor Networks (WSNs) for hydrometeorological monitoring and flood forecasting. The work was based on a scientific review of the literature and technical manuals, including the selection of development boards, communication module, sensor modules, coding, and testing. The tests demonstrated that microcontroller systems can comprise a WSN, processing data collections every few seconds at low cost and with low power consumption. Furthermore, sensor nodes are scalable and versatile, incorporating a variety of sensors and communication protocols.

KEYWORDS: Floods. IoT. WSN.

Monitoreo hidrometeorológico mediante redes inalámbricas de sensores

RESUMEN

Las inundaciones urbanas se encuentran entre los desastres más frecuentes del planeta. Suelen ser fenómenos preexistentes debido a las características fisiográficas de la región, pero se ven exacerbados por los efectos de la urbanización, como la impermeabilización y la modificación del ciclo hidrológico a causa de las actividades humanas. Los enfoques para abordar estos eventos abarcan desde soluciones estructurales, como proyectos de macrodrenaje, hasta soluciones no estructurales, como la regulación del uso del suelo. En el contexto de las Ciudades Inteligentes, las acciones de mitigación incluyen el uso de tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT) y la gestión informatizada de la seguridad urbana para mejorar la respuesta ante eventos hidrometeorológicos extremos. Desde esta perspectiva, este trabajo busca proponer nodos sensores y una puerta de enlace para la creación de Redes Inalámbricas de Sensores (RISs) para el monitoreo hidrometeorológico y la predicción de inundaciones. El trabajo se basó en una revisión científica de la literatura y manuales técnicos, que incluyó la selección de placas de desarrollo, módulos de comunicación, módulos de sensores, codificación y pruebas. Las pruebas demostraron que los sistemas de microcontroladores pueden incluir una RIS, procesando recopilaciones de datos cada pocos segundos a bajo costo y con bajo consumo de energía. Además, los nodos sensores son escalables y versátiles, y pueden incorporar diversos sensores y protocolos de comunicación.

PALABRAS CLAVE: Inundaciones. IoT. RIS.

1 INTRODUÇÃO

A inunda  o está entre os tipos de desastres que afetam o maior número de pessoas ao redor do mundo (CRED, 2024). Eventos climáticos extremos tomam maiores propor  es a depender das varia  es no ciclo da   gua (Giorgi; Raffaele; Coppola, 2019; Roundy; Duan; Schaake, 2019). As mudanças climáticas têm tornado as inunda  es mais extremas e frequentes (Roundy; Duan; Schaake, 2019; Sadkou et al., 2024).

Detectar previamente a ocorrência desses eventos extremos    um meio de reduzir os impactos que poderiam causar, tornando as cidades e a sociedade mais resilientes (Roundy; Duan; Schaake, 2019). A detec  o das inunda  es pode se valer de modelos hidrometeorológicos e/ou modelos estatísticos, os quais podem se tornar cada vez mais precisos com a melhoria da resolu  o das tecnologias de observa  o e gera  o de dados (Roundy; Duan; Schaake, 2019; Wetterhall; Smith, 2019).

Dados observados por radares ou esta  es hidrometeorológicas podem ser utilizados para previsão de inunda  es na escala de *nowcasting* (de alguns minutos até 12 h de antecedência) (Wetterhall; Smith, 2019; Zheng et al., 2024).

2 IOT E CIDADES INTELIGENTES

Ao redor do mundo estão se formando várias *smart cities*, com a aplica  o de *IoT* em áreas e serviços da cidade, como segurança pública, ilumina  o pública, controle de tráfego, mobilidade urbana e utiliza  o em equipamentos públicos, otimizando os serviços e reduzindo custos operacionais (Keung et al., 2018; Mehmood et al., 2017). Em rela  o    transforma  o das cidades em *Smart Cities*, existem múltiplos fatores que influenciam o avanço do processo, variando desde a motiva  o política, passando pela pr  -disposi  o do funcionalismo público e até mesmo a participa  o social (Csuk  s; Bukovszki; Reith, 2020).

Diversas condi  es ambientais, como temperatura, umidade, polui  o do ar, radia  o UV e chuva, podem ser constantemente monitoradas, processadas e controladas usando uma placa de desenvolvimento e sensores, que atualmente são considerados itens de baixo custo (Aljohani et al., 2023; Hashim; Adnan; Husain, 2023).

Um sistema *IoT* pode conter uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) como forma de coletar dados do mundo físico e enviar esses dados para plataformas de nuvem ou outros sistemas *IoT* para análise e a  o. Neste contexto, os nós-sensores em uma RSSF coletam dados, enviam para o *gateway* da rede que através da internet envia os dados para a plataforma *IoT*.

3 RSSF E MONITORAMENTO HIDROMETEOROLÓGICO

Considerando que as inunda  es são eventos hidrometeorológicos, o monitoramento das variáveis que as causam    a base para a previsão desses eventos usando quaisquer técnicas de previsão (por exemplo, Gêmeo Digital, utilizando modelos hidrológicos e hidrodinâmicos calibrados). Alguns pesquisadores desenvolveram Sistemas de Alerta Precoce (EWS - *Early Warning Systems*) para risco de inunda  o, como Pratama et al. (2017), que propuseram uma RSSF com nós-sensores compostos de sensor ultrassônico para aferir o nível d'água do rio,

sensor de fluxo para aferir a velocidade, módulo de comunicação que utiliza o protocolo *Zigbee* para a transferência de dados entre os nós até chegar em um servidor no qual os dados são tratados por meio de lógica *fuzzy* para classificar o risco de inundação em uma de três possíveis classes, então as informações são mostradas em uma interface acessível por meio da internet.

Al Kindhi et al. (2023) projetaram uma solução que integra sensores e *IoT* e a testaram em áreas propensas a inundações na cidade de Surabaya, Indonésia, sendo um dos poucos trabalhos sobre o assunto com aplicação *in-situ*.

Groot e Dezfouli (2020) desenvolveram um sistema embarcado para monitoramento de inundações batizado de Flomosys. Os nós-sensores do sistema contam com microcontrolador, sensor de nível ultrassônico, módulo de comunicação LoRa, o que o faz ter baixo consumo de energia, requisito importante, haja vista a utilização de bateria para alimentar o nó-sensor. Para o *gateway*, Groot e Dezfouli (2020) utilizaram um conjunto mais robusto, haja vista o local de instalação ser provido de rede de energia elétrica, composto de Raspberry Pi (RPI), que foi equipado com seis antenas para comunicação com os nós-sensores em três frequências diferentes, conferindo redundância em casos de falhas.

Prakash, Barthwal, Acharya (2022) criaram um sistema de monitoramento e previsão de inundações bruscas (flash flood), o qual nomearam de FLOODWALL. O sistema foi idealizado com os seguintes componentes: Arduino UNO, pluviômetro, sensor de fluxo, sensor de nível, sensor de umidade, sensor de temperatura, anemômetro e módulo GSM/GPRS (*Global System for Mobile Communications 2G/General Packet Radio Service*) para envio dos dados via internet para a nuvem *IoT*. O sistema utiliza uma plataforma de *IoT* para processamento de dados, previsão de inundações e classificação de risco, empregando LSTM (*Long Short-Term Memory*) para analisar dados de sensores e categorizar o risco de inundação em quatro níveis de alerta. Essa classificação de risco e os dados processados pelos sensores são então transmitidos via API (*Application Programming Interface*) para o aplicativo desenvolvido, que exibe as informações ao usuário.

Sung, Devi, Hsiao (2022) desenvolveram um sistema de alerta precoce de inundações bruscas adaptado para vilarejos afastados dos centros urbanos com base nos dados coletados por um pluviômetro e por um sensor de fluxo. O sistema conta também com uma placa de desenvolvimento Lora 32 V2 da marca Heltec e um módulo GSM/GPRS, vinculação com servidor em nuvem e aplicativo para dispositivos móveis.

4 NOSSA CONTRIBUIÇÃO

A partir da revisão da literatura, identificou-se que os trabalhos atuais não abordam a proposição de nós-sensores e *gateways* para uma RSSF baseada em um protocolo LPWAN que possa medir diversas variáveis hidrometeorológicas e servir de base para diversas metodologias de previsão de enchentes. Nesta perspectiva, este manuscrito, extraído de resultados parciais de Lima (2025), tem como objetivo reunir algumas das características dos sistemas desenvolvidos pelos pesquisadores da revisão de literatura e propor nós-sensores e *gateways* para a composição de uma RSSF baseada em LoRaWAN, a fim de preencher essa lacuna e possibilitar a incorporação da RSSF em estudos de previsão de inundações com diferentes metodologias, locais de inundações e características de bacias hidrográficas. O trabalho inclui

testes e recursos para monitorar a integridade física e a resiliência do nó-sensor responsável pelas medições em cursos d'água.

5 IOT E CIDADES INTELIGENTES

A seleção de componentes para a RSSF proposta foi baseada em uma revisão da literatura existente e manuais técnicos. Os nós e o *gateway*, que são baseados em microcontroladores, foram montados em protoboards por se tratarem de protótipos. A programação foi feita em C++ usando a Arduino IDE.

Esta seção está dividida em subseções que detalham os diferentes componentes da RSSF, incluindo os nós-sensores e o *gateway*. Os nós-sensores foram denominados: nó-sensor meteorológico e nó-sensor hidrológico. O primeiro é responsável por medir dados meteorológicos que representarão uma área específica, como altura da chuva, umidade, temperatura e velocidade do vento, enquanto o segundo é responsável por medir dados hidrológicos em regiões propensas a inundações, como nível da água e velocidade do escoamento.

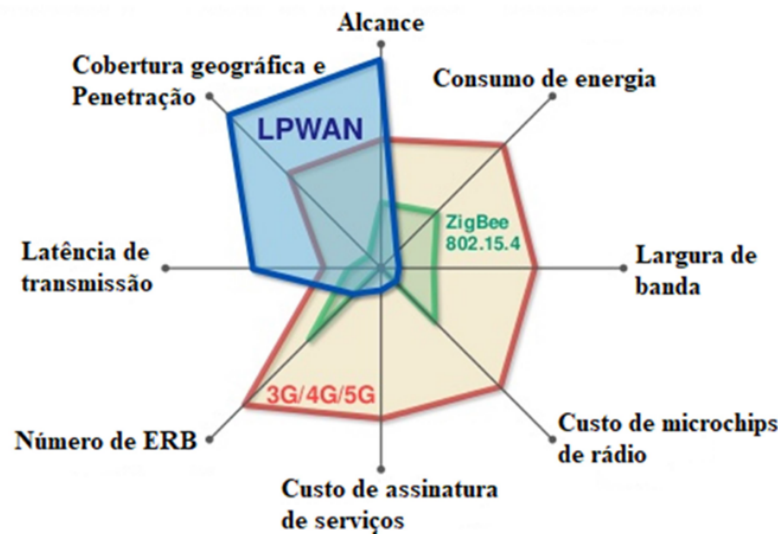
5.1 Placa de desenvolvimento

Para ambos os nós-sensores, o nó-sensor hidrológico e o nó-sensor meteorológico, foi selecionada a Heltec Wifi Lora 32 V3 como placa de desenvolvimento. Esta placa, uma versão atualizada da usada por Sung, Devi, Hsiao (2022), é baseada no microcontrolador ESP32-S3FN8 e possui módulos LoRa SX1262 e Wi-Fi integrados. Esses módulos são essenciais para a transmissão e recepção de pacotes de dados entre os nós e para o upload de dados para uma plataforma *IoT*, respectivamente.

5.2 Módulo de comunicação M2M

O módulo de comunicação é o item que permite a comunicação entre nós em uma RSSF, entre o *gateway* e outras redes, ou entre sistemas baseados em microcontroladores e redes. No contexto deste trabalho, pequenos pacotes de dados alfanuméricos, o que permite o uso de uma tecnologia de comunicação de baixo consumo de energia. Portanto, neste caso, é possível usar uma tecnologia de comunicação que consome pouca energia. Considerando que os nós-sensores hidrológicos são posicionados em áreas urbanas com risco de inundação, na maioria dos casos, não haverá rede Wi-Fi com acesso à internet para enviar os dados medidos diretamente para a plataforma *IoT*, portanto, é necessário enviá-los para um *gateway*. Para este propósito, foi escolhida a tecnologia de comunicação LPWAN (*Low Power Wide Area Network*), que se caracteriza por ser uma rede de baixo consumo de energia e longo alcance, amplamente aplicada em comunicações M2M (*Machine to Machine*) (Milarokostas et al., 2023). A Figura 1 mostra uma comparação entre as tecnologias de comunicação sem fio, destacando como a LPWAN é a mais adequada para a presente proposta.

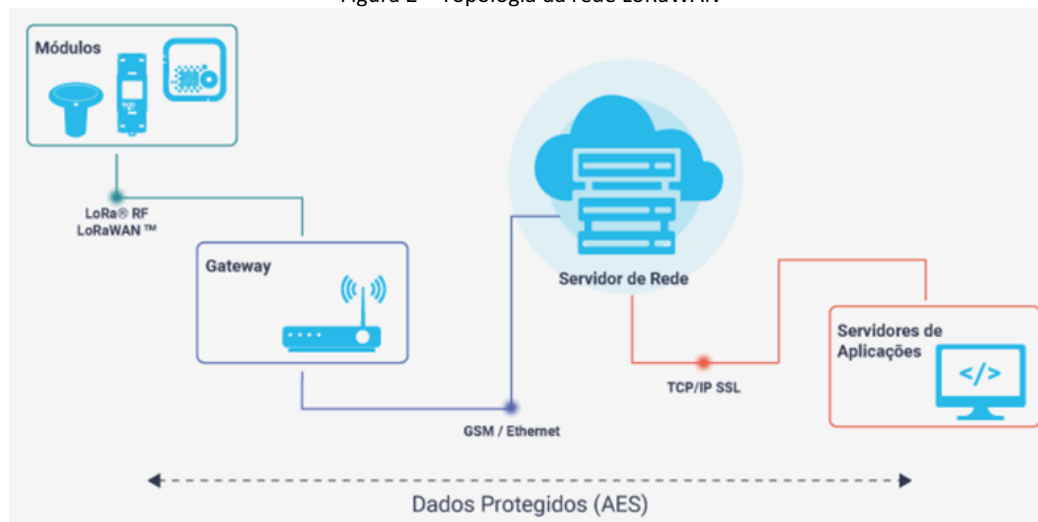
Figura 1 – Gráfico de radar comparando três tecnologias de comunicação sem fio (LPWAN, ZigBee/802.15.4 e 3G/4G/5G) em oito parâmetros principais



Fonte: Meireles (2018, p. 38)

Dentre as tecnologias LPWAN, o LoRaWAN, protocolo desenvolvido pela LoRa Alliance, foi selecionado devido à sua relação custo-benefício. Sua proposta é promover longo alcance e cobertura para a formação de redes de dispositivos inteligentes (LoRa Alliance, 2015). Essa escolha se caracteriza pela ausência de taxas mensais ou anuais recorrentes, uma vantagem significativa proporcionada pela capacidade de implantar redes privadas e utilizar servidores de rede de código aberto, tornando-se uma opção economicamente viável para implantações de longo prazo. A Figura 2 apresenta um esquema da operação da topologia da rede LoRaWAN.

Figura 2 – Topologia da rede LoRaWAN



Fonte: ZenzorControl (2024)

Para a operação LoRaWAN no Brasil, as faixas de frequência de 902 MHz a 907,5 MHz e 915 MHz a 928 MHz são permitidas (Brasil, 2017a, 2017b; LoRa Alliance, 2022). Essas frequências fazem parte das bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*), que são faixas de frequência reservadas internacionalmente para desenvolvimento nessas áreas e não exigem licenças de uso, apenas adesão às regulamentações locais. No Brasil, a regulamentação

referente ao uso de frequências ISM ainda é limitada; portanto, a especificação AU915-928 é utilizada (Brasil, 2017b; LoRa Alliance, 2022). Para a transmissão e recepção de dados via LoRaWAN, foi escolhido o módulo LoRa SX1262, que já está integrado à placa de desenvolvimento selecionada, no entanto, o módulo pode ser adquirido separadamente para adição a outras placas de desenvolvimento.

Testes de alcance foram realizados para validar o protocolo de comunicação. Foram usados dois nós, um como transmissor e outro como receptor, com o transmissor posicionado no terceiro andar de um prédio e o receptor movido para a parte externa do prédio. O teste consistiu em um contador de números inteiros para verificar a perda de pacotes. Foram utilizadas várias antenas omnidirecionais (3, 7, 10 e 12 dBi) e uma antena direcional (ou Yagi) de 8 dBi. O alcance foi definido como a distância máxima na qual a recepção de pacotes ocorreu sem perdas. Parâmetros de comunicação para alcance máximo (DR0 de AU915-928 com SF 12 e BW 125 KHz) foram utilizados, embora esta configuração exceda o tempo de permanência de 400 ms regulamentar, foi usada para os testes. Testes subsequentes usaram diferentes combinações de antenas e potências de transmissão para otimizar o alcance da comunicação.

5.3 Nó-sensor Meteorológico

O nó-sensor meteorológico foi projetado para medir precipitação, umidade, temperatura e velocidade do vento dentro de uma área de drenagem específica. A posição deste nó deve ser idealmente em uma área aberta, livre de obstáculos, e em um local com acesso à eletricidade e internet, como um edifício público. Isso permite que ele envie dados diretamente para a plataforma *IoT*, potencialmente eliminando a necessidade de um módulo LoRaWAN ou permitindo que ele funcione como um *gateway* para outros nós. Para locais sem rede elétrica, ele pode ser alimentado por um painel fotovoltaico e transmitir dados via LoRaWAN para outro nó ou *gateway*. Nesse caso, é necessária a transmissão de dados via protocolo LoRaWAN para outro nó ou *gateway*. Este nó também pode assumir o papel de um *gateway*, tornando-se responsável por receber dados de outros nós e enviar os dados recebidos e os seus próprios dados medidos para a plataforma *IoT*.

Na Figura 3 é apresentado o nó-sensor meteorológico com todos módulos e sensores interligados. As letras indicam os itens, os quais terão suas descrições abordadas a seguir. A Heltec Wifi Lora 32 V3 que equipa o nós-sensor está identificada pela letra A.

Figura 3 – Nó-sensor meteorológico



Fonte: Lima (2025, p. 90)

Os componentes do nó-sensor meteorológico incluem:

5.3.1 Pluviômetro

Um pluviômetro automático de báscula (Fig. 3.B) foi selecionado para a medição de chuva. O dispositivo possui, como componente adicional, o sensor DHT22 (localizado na parte inferior, protegido das intempéries), que pode medir temperatura e umidade com uma precisão de 0,1°C e 1% para cada variável climática, respectivamente. Este pluviômetro envia pulsos a cada 0,25 mm de chuva acumulada. Ele deve ser posicionado em uma área aberta, livre de obstáculos acima do dispositivo. Dependendo da extensão da área coberta pela RSSF, mais ou menos nós-sensores meteorológicos devem ser usados para representar fielmente a chuva e a distribuição da precipitação sobre as sub-bacias hidrográficas. Este dispositivo também foi adotado pelos pesquisadores Prakash, Barthwal e Acharya (2023) e Sung, Devi e Hsiao (2022).

5.3.2 Módulo leitor/gravador de cartão de memória

Este módulo (Fig. 3.C) pode estar presente no nó-sensor meteorológico se ele também estiver atuando como um *gateway* ou como armazenamento redundante para evitar a perda de dados. O módulo é responsável por registrar dados em um cartão de memória microSD. O armazenamento é útil em casos de acesso à internet indisponível, como uma alternativa para recuperar dados não enviados para a plataforma *IoT*. Neste trabalho, o teste de gravação de dados foi realizado em um cartão microSD de 32 GB. Este é o único módulo que exigiu uma fonte de alimentação de 5 VCC; no entanto, um módulo equivalente com uma fonte de alimentação de 3,3 VCC pode ser encontrado.

5.3.3 Fonte de alimentação

Na Fig. 3.E, uma fonte de alimentação com saída de 9 VCC 1 A está sendo usada; esta tensão é então reduzida por uma Fonte de Alimentação Ajustável para Protoboard (Fig. 3.D) para 3,3 VCC e 5 VCC em cada uma de suas duas saídas. A fonte de alimentação energiza todos os componentes diretamente. Existem alternativas para alimentar a placa de desenvolvimento, como usar um carregador de *smartphone* com saída de 5 VCC e um cabo com um conector macho Tipo-C em uma das extremidades. Neste caso, os outros componentes seriam alimentados pelas saídas de 3,3 VCC e 5 VCC da placa. É sugerido que os componentes sejam alimentados diretamente da fonte de alimentação e não da placa para evitar sobrecarga. Fontes de alimentação de 3,3 VCC ou outras fontes com um suprimento a partir de 5 W combinadas com reguladores de tensão podem ser consideradas suficientes para alimentar este nó-sensor.

5.3.4 Sensor de umidade e temperatura DHT22

Este sensor é acoplado ao pluviômetro. Ele mede umidade de 0 a 100%, com uma precisão de +/- 2%, e temperatura de -40 a 80°C, com uma precisão de +/- 0,5°C.

5.3.5 Anemômetro

Este item (Fig. 3.F) foi adicionado para medir a velocidade do vento. Ele pode ser encontrado com uma biruta integrada, adicionando uma variável adicional às medições, semelhante ao usado por Prakash, Barthwal e Acharya (2023).

5.3.6 Itens complementares

O nó também inclui um Optoacoplador PC817, resistores de 470R e 10K, uma protoboard (que deve ser substituída por uma PCB - Placa de Circuito Impresso - em uma implantação do sistema), fios, uma antena (Fig. 3.H) e uma caixa de proteção (Fig. 3.G) para proteção física.

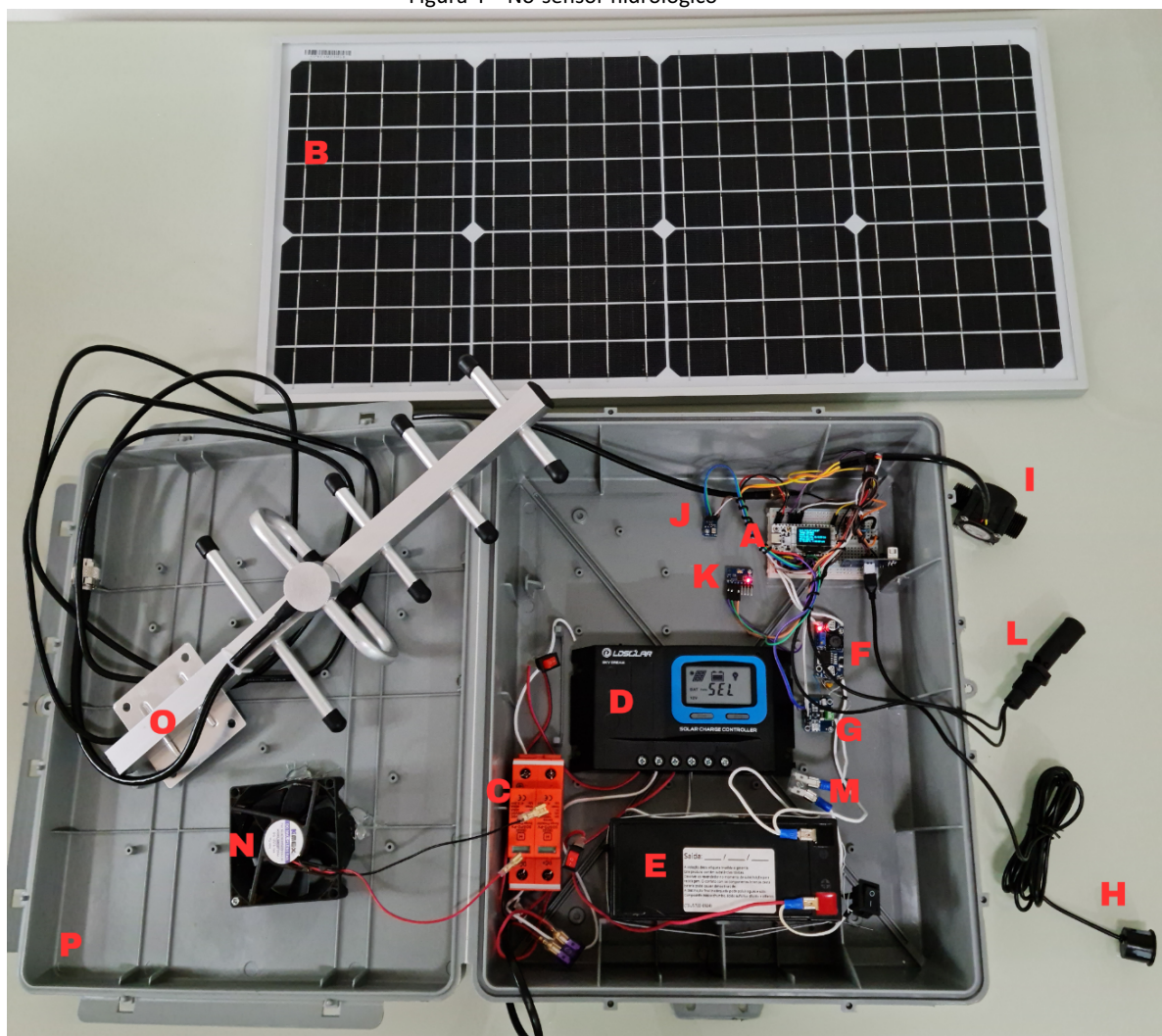
5.4 Nó-sensor Hidrológico

Este nó-sensor é responsável por medir variáveis hidrológicas úteis para o monitoramento da evolução do nível da superfície da água em áreas propensas a inundações, possibilitando o aprimoramento das ações e protocolos da Defesa Civil e o monitoramento da situação pela população. Além disso, os dados podem ser utilizados para a previsão de inundações.

O nó é tipicamente posicionado onde a energia *off-grid* é necessária devido à sua localização, sobre o leito de um curso hídrico. Ele é alimentado por uma bateria que é recarregada por um painel fotovoltaico.

Na Figura 4, é possível visualizar o nó-sensor hidrológico com todos os componentes interligados, utilizando uma *protoboard*, visto que o sistema não foi aplicado, tendo passado apenas por testes de algumas funcionalidades. Algumas letras foram adicionadas à imagem para indicar cada item, que serão descritas a seguir. Os itens B, H, I, L e O são aqueles que devem ser posicionados fora da caixa e ter seus cabos estendidos até o local de fixação.

Figura 4 – Nó-sensor hidrológico



Fonte: Lima (2025, p. 94)

Os componentes do nó-sensor hidrológico são:

5.4.1 Sensor de medição do nível de água

Para medir a elevação do nível da água, escolhemos um sensor ultrassônico (Fig. 4.H) devido ao seu baixo custo e consumo de energia. O modelo selecionado foi o módulo de sensor JSN-SR04T V 3.0, que pode medir distâncias entre 21 cm e 600 cm com uma precisão aproximada de 3 mm, sendo adequado para o sistema proposto. É resistente à água e vem com um cabo de 2,5 m. Como alternativa, o MB7066 XL-MaxSonar-WRL1 pode ser usado, que pode atingir até 1068 cm. Sensores ultrassônicos também foram utilizados em diversas outras pesquisas para monitorar o nível de água em corpos hídricos (Al Kindhi et al., 2023; Groot; Dezfouli, 2020; Hashim; Adnan; Husain, 2023; Prakash; Barthwal; Acharya, 2023; Pratama; Munadi; Mayasari, 2017).

5.4.2 Sensor de fluxo

O sensor de fluxo YF-S201 (Fig. 4.I) é usado para medir a vazão em condutos forçados, por meio da sua fixação ao longo de uma tubulação de 20 mm de diâmetro. No entanto, neste trabalho, ele foi incluído para medir a velocidade do escoamento no curso d'água. Adicionamos este sensor simplesmente pela oportunidade de coletar mais métricas a um custo acessível. Portanto, ele não é obrigatório para a operação do sistema e não é o mais apropriado para esta função, pois a velocidade do escoamento em um rio varia ao longo da seção transversal. Outros pesquisadores também incorporaram este sensor em seus sistemas e obtiveram resultados positivos (Prakash; Barthwal; Acharya, 2023; Pratama; Munadi; Mayasari, 2017; Sung; Devi; Hsiao, 2022).

5.4.3 Sensor de umidade e temperatura

O módulo do sensor de umidade e temperatura AHT-10 (Fig. 4.J) deve ser colocado dentro da caixa de proteção IP65, e sua função é medir a temperatura e a umidade internas, acionando a ventoinha de resfriamento com base em um limite configurado. Também é possível monitorar anormalidades na operação do nó-sensor, principalmente em relação a variações de temperatura.

5.4.4 Sensor de inclinação

A estrutura do nó-sensor hidrológico pode estar sujeita a impactos físicos de enchentes e inundações, devido ao seu posicionamento em áreas de risco, e pode ser fixada em solo de baixa resistência. Considerando este contexto, um módulo MPU-6050 (Fig. 4.K) foi incluído, que integra um acelerômetro e um giroscópio de 3 eixos, capaz de fornecer informações sobre a inclinação da estrutura em qualquer direção, facilitando assim a manutenção preventiva ou corretiva em caso de anormalidades. O sensor escolhido também mede a temperatura; portanto, se o monitoramento de umidade não for necessário, o módulo

AHT-10 pode ser omitido, pois a temperatura medida pelo MPU-6050 pode ser usada para monitorar a temperatura interna da caixa e controlar a ventoinha.

5.4.5 Sensor de nível com boia horizontal

O sensor de nível com boia horizontal (Fig. 4.L) é responsável por ativar ou suspender o sensor ultrassônico e o sensor de vazão quando a superfície da água no curso d'água está acima ou abaixo de seu nível de instalação, através de suas duas posições: aberta ou fechada. O nível de instalação do sensor deve ser aquele imediatamente acima do nível máximo de escoamento durante a estiagem. Foi planejado para proporcionar economia de energia e reduzir o volume de dados a serem manipulados e armazenados.

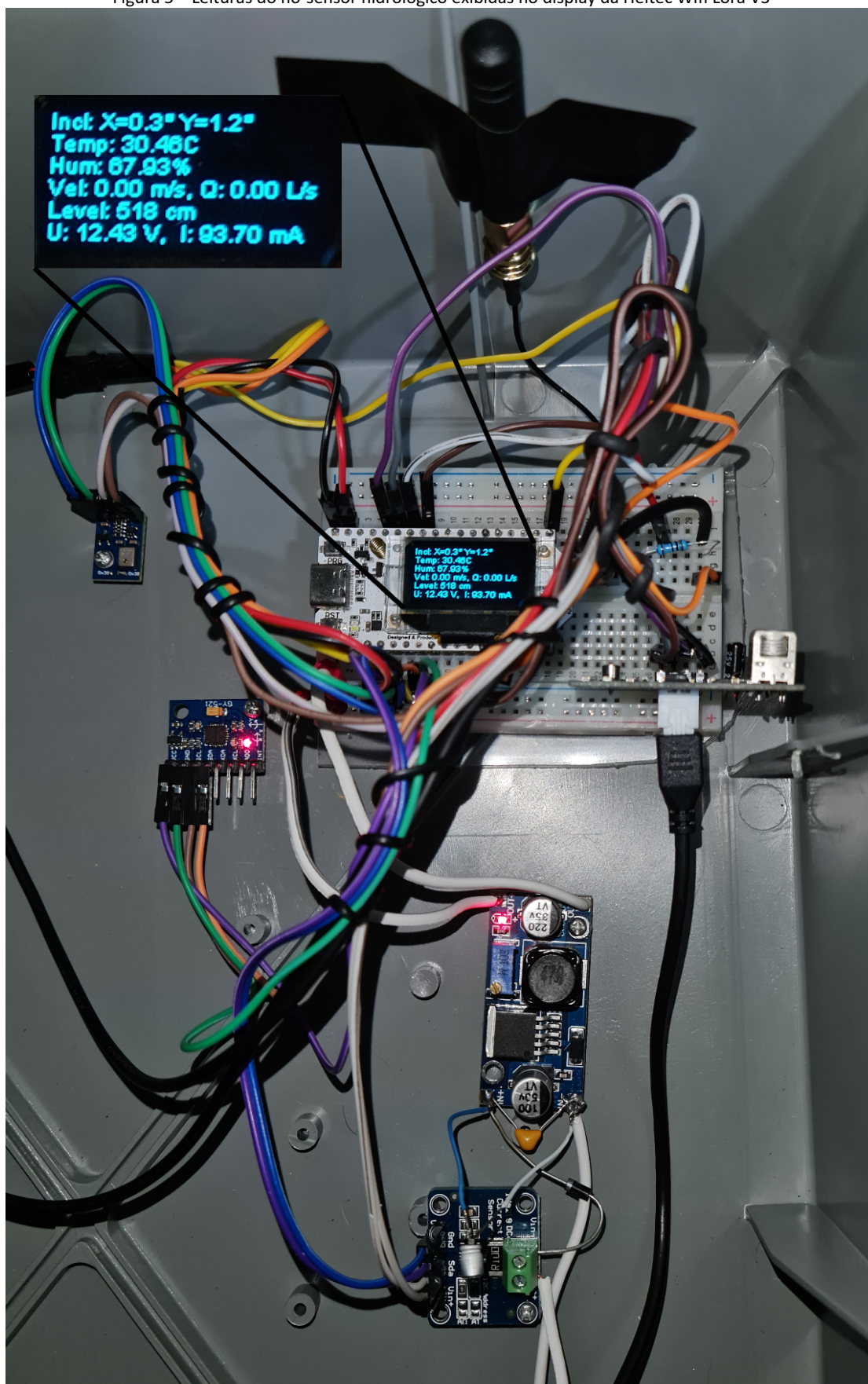
5.4.6 Regulador de tensão

O módulo LM2596 (Fig. 4.F) é um regulador de tensão step-down que permite a redução da tensão CC (corrente contínua) ajustando um trimpot (potenciômetro de ajuste). Ele pode reduzir tensões entre 3,2 e 40 VCC com uma eficiência de até 92% e opera entre -40 °C e 85 °C. O nó-sensor hidrológico é alimentado por uma bateria de 12 V; assim, é necessário usar um módulo desse tipo para reduzir a tensão para o nível de alimentação da placa e dos sensores, que neste caso foram alimentados com 3,3 VCC.

5.4.7 Monitoramento de energia elétrica

O módulo INA219 (Fig. 4.G) é responsável por monitorar a saúde da bateria e o consumo de energia, podendo identificar anormalidades neste último. Este monitoramento é realizado através da tensão e da corrente medidas entre a bateria e o LM2596. A Figura 5 mostra o display do nó-sensor hidrológico em um teste com algumas das variáveis medidas. Na última linha, a letra U indica a tensão da bateria em Volts (V), e a letra I é a corrente em miliamperes (mA), que combinadas podem representar o consumo.

Figura 5 – Leituras do nó-sensor hidrológico exibidas no display da Heltec Wifi Lora V3



Fonte: Capturada pelos autores (2025)

5.4.8 Suprimento de energia elétrica

O sistema inclui uma bateria de chumbo-ácido selada de 12 V e 9 Ah (Fig. 4.E), um painel fotovoltaico monocristalino de 30 W (Fig. 4.B) e um controlador de carga solar PWM (*Pulse Width Modulation*) 150 W (Fig. 4.D) para controlar os parâmetros da geração de energia e carga da bateria.

5.4.9 Itens complementares

Outros componentes incluem um Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS) para corrente contínua (Fig. 4.C), fusíveis, interruptores, capacitores de 100nF e 10μF, um diodo Schottky 1N5819, um resistor *pull-down* 10 KΩ 1/4 W, uma *protoboard*, fios, uma antena (Fig. 4.O), uma caixa de proteção IP65 (Fig. 4.P) e um ventilador de resfriamento (Fig. 4.N).

5.5 Gateway

O *gateway*, neste trabalho, é o nó responsável por receber dados de um ou mais nós-sensores via LoRaWAN, armazená-los no cartão de memória e enviá-los para a plataforma *IoT*. Ele é necessário quando não é possível utilizar um nó-sensor meteorológico para acumular essa função de upload de dados. Ele deve estar posicionado em local com disponibilidade de rede elétrica e acesso à internet ou possuir alimentação off-grid e acesso à internet por meio de outra tecnologia (por exemplo, módulo 3G ou superior). Os itens que compõem o *gateway* são: placa de desenvolvimento com o módulo SX1262 integrado ou adicionado, módulo para cartão SD, cartão SD (de qualquer capacidade, pois os dados são pequenos, porém limitados à capacidade máxima de cartão compatível com módulo), fonte de alimentação com cabo e antena adequada para atender à faixa de cobertura de comunicação com os nós-sensores.

A Figura 6 mostra o *gateway* com o Heltec Wifi Lora 32 V3 e um módulo leitor/gravador de cartões SD instalado, alimentado por uma bateria do tipo 18650 com capacidade de 2000 mAh (a placa possui um módulo de carregamento de bateria de 3,7 V integrado), que pode ser substituída por um cabo tipo C de uma fonte de 5 VCC. A antena escolhida deve ser apropriada para a área de cobertura. Módulos LoRaWAN suplementares podem ser adicionados e configurados para expandir a área de cobertura e receber pacotes com diferentes configurações de frequência e DR.

6 RESULTADOS

6.1 Teste da comunicação via LoRaWAN

No Brasil, à época dos testes realizados neste trabalho, a regulamentação quanto à comunicação LoRaWAN replicava a regulamentação Australiana para banda ISM (AU915-928), que utiliza o mesmo plano de frequências, cujos parâmetros de transmissão então presentes em publicação da LoRa Alliance (2022).

288

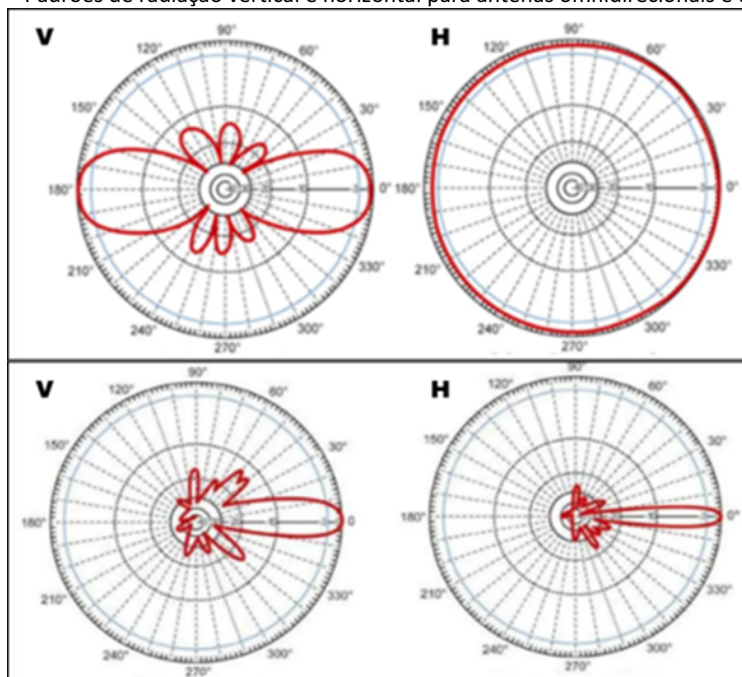
das janelas, e a segunda móvel, que foi levada para o exterior do prédio. O teste consistiu em um contador de números inteiros, resultando em pacotes de até 4 bytes quando o contador atingia números de quatro dígitos. Cada número recebido era exibido no visor OLED da placa, juntamente com o RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) e o tamanho do pacote. Se o contador omitisse algum número, significava que houve perda de pacote.

Os parâmetros de transmissão foram definidos para o Data Rate 0 (DR0) da norma AU915-928, especificamente: SF (*Spreading Factor*) 12 e BW (*Bandwidth*) 125 KHz, que são os indicados para o alcance máximo (Milarokostas et al., 2023). No entanto, de acordo com as normas, essa configuração excede o período máximo de ocupação do espectro (*dwell time*) de 400 ms, razão pela qual foi utilizada apenas nestes testes. Os demais parâmetros foram a potência de transmissão de 20 dBm e a Coding Rate (CR) de 4/5. A comunicação foi bem-sucedida, mas descontínua, ou seja, com perdas de pacotes, até 385 metros, com linha de visada parcialmente obstruída, com RSSI entre -120 e -130 dBm. Até aproximadamente 300 metros e uma diferença de altitude de 20 metros, a comunicação ocorreu continuamente sem perdas, com RSSI em torno de -85 dBm.

Dado o baixo alcance alcançado, novos testes foram realizados, substituindo as antenas por outras antenas omnidirecionais de 7, 10 e 12 dBi e uma antena direcional (ou Yagi) de 8 dBi.

Antenas omnidirecionais propagam o sinal horizontalmente em um padrão radial. Na Figura 7, parte superior, é possível visualizar os padrões de radiação horizontal e vertical de uma antena omnidirecional. Antenas direcionais, por outro lado, concentram o sinal em uma direção específica. Na parte inferior da mesma figura, são mostrados os padrões de radiação de uma antena direcional.

Figura 7 – Padrões de radiação vertical e horizontal para antenas omnidirecionais e direcionais

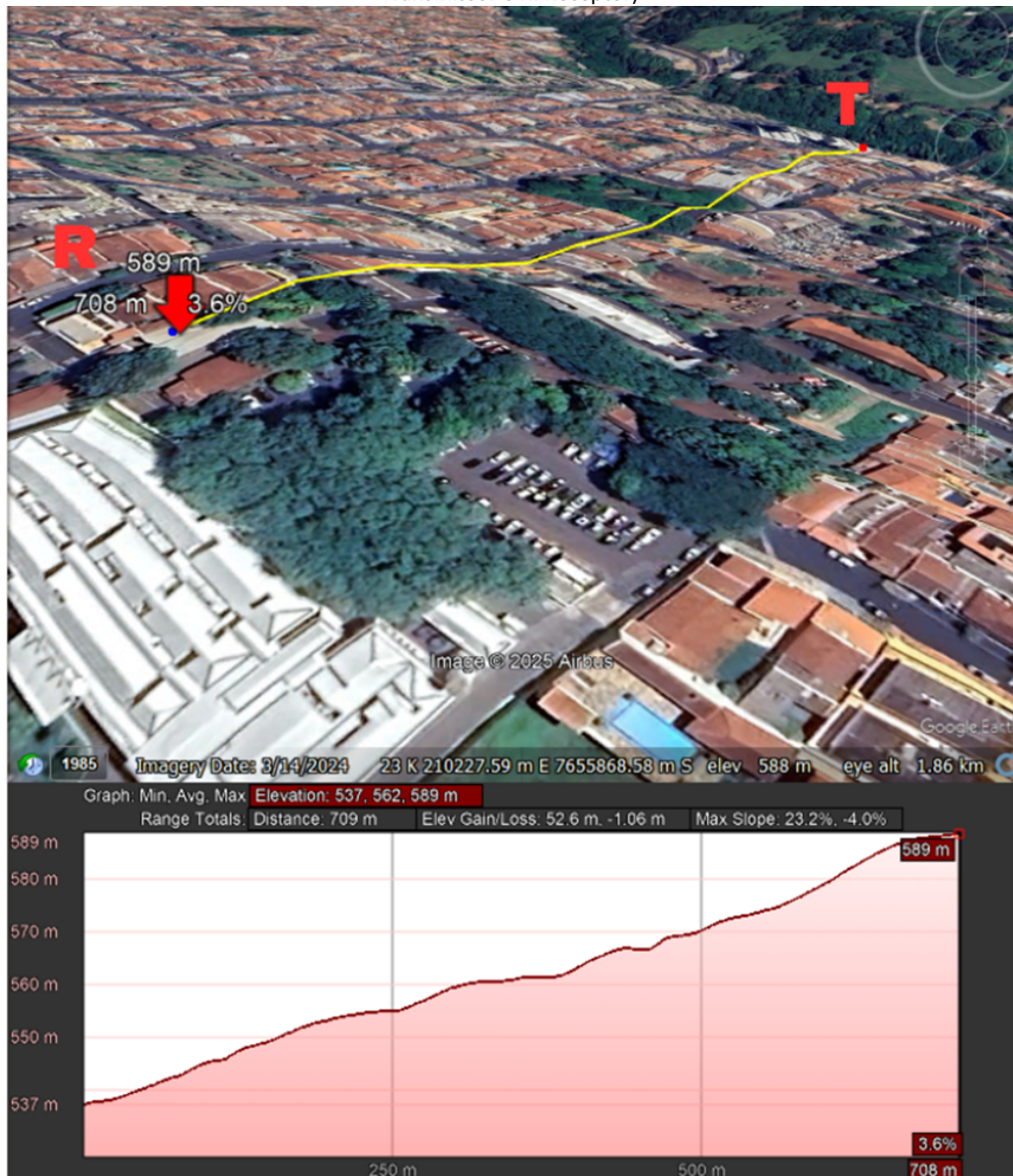


Fonte: Adaptado de Nguyen (2021)

As antenas possuem uma característica específica relacionada à cobertura do sinal. Quanto maior o ganho, mais estreito é o padrão de radiação vertical. Em antenas omnidirecionais, a cobertura horizontal aumenta, reduzindo a cobertura vertical. Em antenas direcionais, ocorre um efeito semelhante: o sinal atinge um ponto mais distante, diminuindo os ângulos de cobertura horizontal e vertical, direcionando o sinal para um ponto específico. Devido a essa característica, foram realizados testes com antenas de diferentes ganhos para identificar a melhor combinação de antenas.

Durante os novos testes, realizados em áreas urbanizadas com edificações de até 12 metros de altura, utilizando os mesmos parâmetros de comunicação previamente configurados em ambas as placas, resultados mais satisfatórios foram obtidos com a combinação de antenas omnidirecionais de 10 dBi. A distância máxima sem perda de pacotes foi de aproximadamente 700 metros, com uma diferença de altitude de cerca de 50 metros (Fig. 8) e cerca de 850 metros no mesmo plano horizontal. As antenas de 12 dBi apresentaram resultados semelhantes, o que era esperado já que, segundo a regulamentação, a EIRP (*Effective Isotropic Radiated Power*) máxima é de 30 dBm, sendo necessário reduzir a potência de transmissão de rádio de 20 para 18 dBm.

Figura 8 – Representação gráfica da topografia e distância durante o teste de alcance de antenas omnidirecionais (T: Transmissor e R: Receptor)



Fonte: Adaptado de Lima (2025)

A melhor combinação geral foi uma antena omnidirecional de 10 dBi no transmissor com uma antena direcional de 8 dBi no receptor. Os parâmetros de comunicação utilizados foram os mesmos do teste inicial, exceto pela potência de transmissão do receptor, que foi aumentada para 22 dBm (a máxima suportada pela placa) para utilizar a EIRP máxima permitida. A maior distância de comunicação sem perdas (com RSSI em torno de -100 dBm) foi de aproximadamente 1150 metros no mesmo plano horizontal (Fig. 9).

Figura 9 – Representação gráfica da topografia e distância durante o teste de alcance usando antenas omnidirecionais e direcionais (uma em cada extremidade - T: Transmissor e R: Receptor)



Fonte: Adaptado de Lima (2025)

Posteriormente, com a melhor combinação de antenas, o alcance do nó-sensor hidrológico foi testado enviando todos os dados coletados, totalizando até 50 bytes, para o nó-sensor meteorológico. Alguns parâmetros de transmissão foram alterados para o DR3 (SF 9 e BW 125 KHz) para atender à regulamentação referente ao tempo máximo de permanência no espectro de 400 ms. A distância alcançada foi de 750 metros, com uma diferença de altitude de 37 metros. Aproximadamente a mesma distância foi obtida no mesmo plano horizontal, com obstrução significativa por edificações. Nesses testes, a potência de transmissão configurada no receptor foi de 22 dBm, totalizando uma EIRP de 30 dBm, considerando o ganho de 8 dBi da antena direcional. No transmissor, a EIRP foi de 30 dBm, com 20 dBm de potência de transmissão e 10 dBi de ganho da antena omnidirecional.

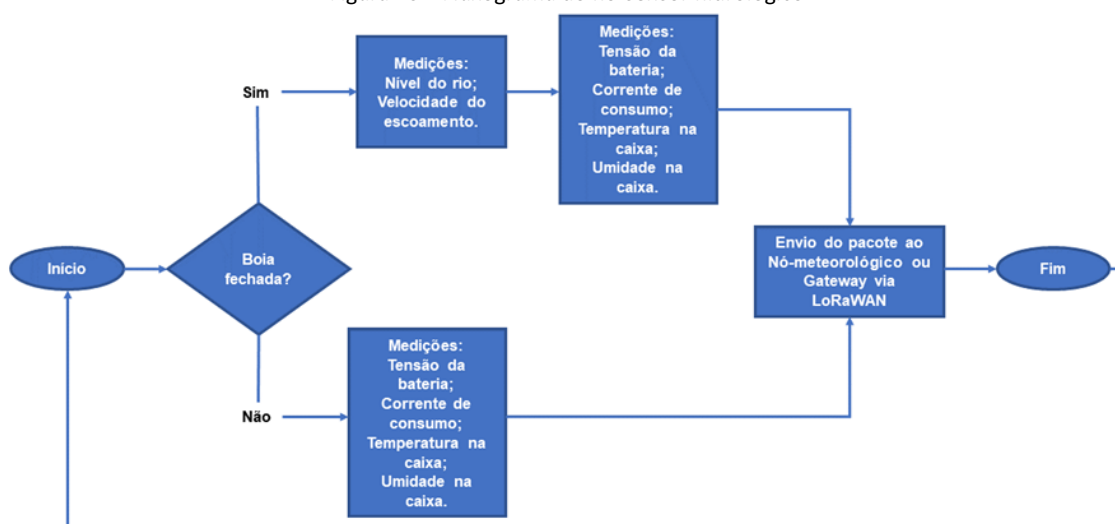
A partir dos testes, constatou-se que, para o *gateway*, a antena mais adequada é a omnidirecional, pois pode atender múltiplos nós. Para nós mais distantes, antenas direcionais são recomendadas devido ao seu maior alcance. Vale ressaltar que, diante de obstruções, melhores resultados podem ser obtidos posicionando a antena receptora no topo de edifícios altos, ao ar livre (Groot; Dezfouli, 2020; Juledi et al., 2024; Sendra et al., 2020; Singh, 2024), utilizando uma antena do tipo outdoor. Antenas com menor ganho apresentam maior cobertura vertical em detrimento da cobertura horizontal. Perdas causadas por conectores e cabos podem ser consideradas para compensação por meio do ganho da antena. Os códigos-fonte utilizados nos testes foram escritos em linguagem de programação C++, e podem ser obtidos/visualizados mediante acesso ao repositório¹ criado no GitHub para a dissertação da qual este trabalho foi extraído, dentro do diretório “teste_de_alcance”.

6.2 Teste dos nós-sensores em operação

Os módulos e sensores que compõem os nós-sensores foram testados individualmente e, posteriormente, incluídos um a um no código-fonte do respectivo nó-sensor, realizando um novo teste. Os resultados apresentados a seguir foram obtidos a partir do teste em que todos os módulos e sensores estavam conectados aos nós.

As etapas do loop do código-fonte do nó-sensor hidrológico correspondem ao fluxograma mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma do nó-sensor hidrológico



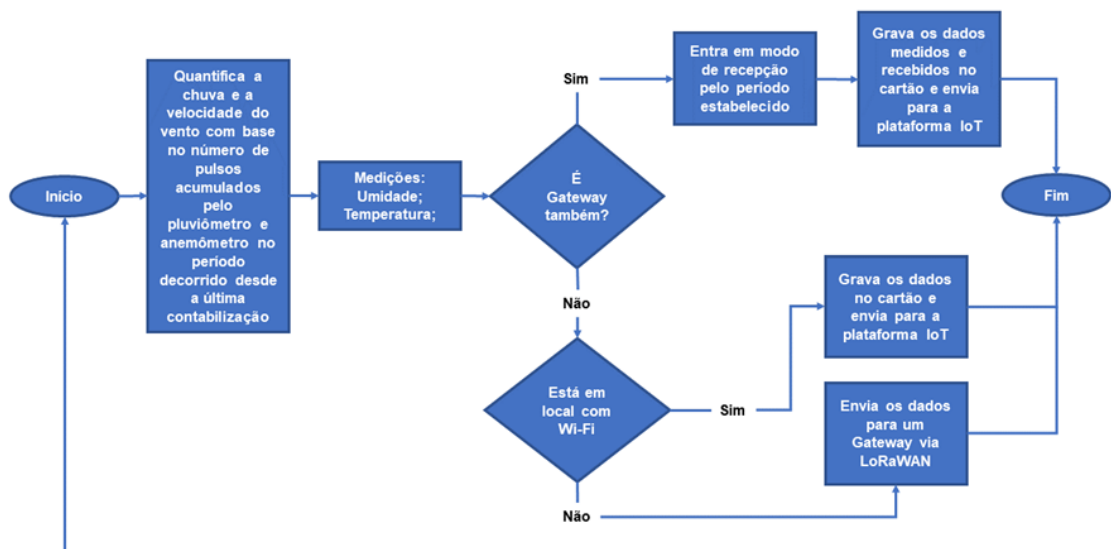
Fonte: Lima (2025, p. 109)

Para facilitar a execução dos testes, no código-fonte do nó-sensor hidrológico, todas as medições foram incluídas para ocorrerem apenas na condição de boia fechada, ou seja, com a boia aberta, nenhum pacote é enviado e o *loop* é reiniciado após um intervalo de 1 segundo.

A operação planejada para o nó-sensor meteorológico, em suas três formas possíveis, corresponde ao fluxograma da Figura 11.

¹ Link para o repositório: <https://github.com/alexlimaf94/dissertacao/tree/main>

Figura 11 – Fluxograma do nó-sensor meteorológico



Fonte: Lima (2025, p. 109)

Os testes a seguir foram realizados utilizando o nó-sensor hidrológico e um nó-sensor meteorológico que também atuou como *gateway*. Os códigos-fonte para ambos os nós-sensores utilizados nos testes foram escritos em linguagem de programação C++ e podem ser obtidos/visualizados acessando o diretório “teste_nos_sensores”².

Na Figura 12 é possível visualizar no monitor serial da Arduino IDE, algumas medições realizadas pelo nó-sensor hidrológico. No início da saída de dados pode-se visualizar que um envio acabava de ser concluído. Na primeira linha após os hífenes, a mensagem informa o estado “Boia aberta! Sensores desativados.”, o qual permanece até o fechamento da boia, que ocorre quando o nível d’água no córrego ultrapassa a altura de fixação da boia, então os sensores são ativados - neste teste, o fechamento foi realizado manualmente, pois foi um teste em bancada.

Nesse teste o MPU-6050, responsável por medir a inclinação estava sobre a bancada, sendo assim, os valores mostrados de inclinação em x e y, não representam inclinação de um poste. Este módulo, o MPU-6050, também possui um sensor de temperatura, por isso existem duas medidas de temperatura no monitor serial. A temperatura medida pelo AHT-10 é aquela que integra o pacote a ser enviado via LoRaWAN, pois sensor dele tem maior precisão. Não havendo interesse em tamanha precisão de medição de temperatura e dispensa do parâmetro ‘umidade dentro da caixa de acoplamento’, o AHT-10 pode ser dispensado, enviando no pacote a temperatura aferida pelo MPU-6050.

Na sequência estão as variáveis medidas pelo sensor de fluxo, que são a vazão de água e a velocidade do escoamento, neste caso o fluxo foi simulado com ar.

A distância medida é aquela que estava sendo captada pelo sensor ultrassônico, e o nível do rio é a distância do leito do rio até o seu fundo, calculada diferença da altura de fixação do sensor em relação ao fundo do rio para a distância medida – neste caso a altura em relação ao fundo foi arbitrada em 600 cm no código-fonte.

² Link para o diretório: https://github.com/alexlima94/dissertacao/tree/main/teste_nos_sensores

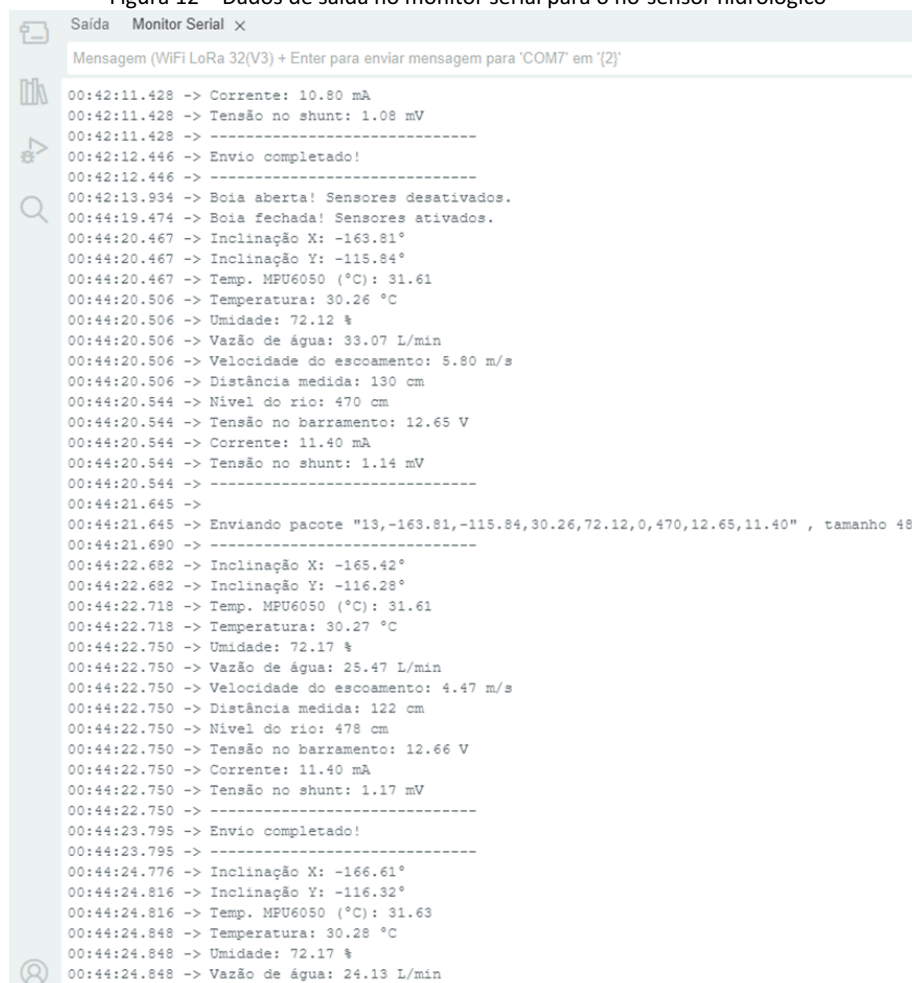
As três últimas variáveis são as medidas pelo INA219. A tensão no barramento é a tensão da bateria; a corrente é a corrente total de consumo do nó; e a tensão no shunt diz respeito ao método que o módulo utiliza para medir a corrente de modo seguro.

Em seguida, entre as linhas de hífenes, a saída informa que o pacote está sendo enviado, colocando entre vírgulas os valores de cada variável e, ao final, o tamanho do pacote em bytes. As variáveis que integram o pacote são: número do pacote (adicionada para verificar perda de pacotes, mas pode ser retirada para diminuir o tamanho), inclinações nos eixos x e y, temperatura, umidade, velocidade do escoamento, nível do rio, tensão da bateria e corrente de consumo.

Logo após, mais uma saída completa é apresentada no monitor serial, depois é mostrada a mensagem “Envio completado!”, referente à saída anterior. O loop já havia sido reiniciado, por isso mais uma saída completa foi mostrada, porém, a flag do rádio LoRa estava definida como false, pois, este estava ocupado. Apenas após completar o envio é que o loop encontra o rádio disponível (true) para novo envio.

Na última linha a mensagem informa que a boia está aberta novamente, então as medições são interrompidas. Na situação de implantado, a boia paralisaria apenas os sensores ultrassônico e de fluxo, já os demais, utilizados para monitorar a integridade do nó, continuariam tendo seus dados enviados. Para esta condição, o ideal é ser previsto um intervalo maior entre os envios.

Figura 12 – Dados de saída no monitor serial para o nó-sensor hidrológico



```
00:42:11.428 -> Corrente: 10.80 mA
00:42:11.428 -> Tensão no shunt: 1.08 mV
00:42:11.428 -> -----
00:42:12.446 -> Envio completado!
00:42:12.446 -> -----
00:42:13.934 -> Boia aberta! Sensores desativados.
00:44:19.474 -> Boia fechada! Sensores ativados.
00:44:20.467 -> Inclinação X: -163.81°
00:44:20.467 -> Inclinação Y: -115.84°
00:44:20.467 -> Temp. MPU6050 (°C): 31.61
00:44:20.506 -> Temperatura: 30.26 °C
00:44:20.506 -> Umidade: 72.12 %
00:44:20.506 -> Vazão de água: 33.07 L/min
00:44:20.506 -> Velocidade do escoamento: 5.80 m/s
00:44:20.506 -> Distância medida: 130 cm
00:44:20.544 -> Nível do rio: 470 cm
00:44:20.544 -> Tensão no barramento: 12.65 V
00:44:20.544 -> Corrente: 11.40 mA
00:44:20.544 -> Tensão no shunt: 1.14 mV
00:44:20.544 -> -----
00:44:21.645 ->
00:44:21.645 -> Enviando pacote "13,-163.81,-115.84,30.26,72.12,0,470,12.65,11.40" , tamanho 48
00:44:21.690 -> -----
00:44:22.682 -> Inclinação X: -165.42°
00:44:22.682 -> Inclinação Y: -116.28°
00:44:22.718 -> Temp. MPU6050 (°C): 31.61
00:44:22.718 -> Temperatura: 30.27 °C
00:44:22.750 -> Umidade: 72.17 %
00:44:22.750 -> Vazão de água: 25.47 L/min
00:44:22.750 -> Velocidade do escoamento: 4.47 m/s
00:44:22.750 -> Distância medida: 122 cm
00:44:22.750 -> Nível do rio: 478 cm
00:44:22.750 -> Tensão no barramento: 12.66 V
00:44:22.750 -> Corrente: 11.40 mA
00:44:22.750 -> Tensão no shunt: 1.17 mV
00:44:22.750 -> -----
00:44:23.795 -> Envio completado!
00:44:23.795 -> -----
00:44:24.776 -> Inclinação X: -166.61°
00:44:24.816 -> Inclinação Y: -116.32°
00:44:24.816 -> Temp. MPU6050 (°C): 31.63
00:44:24.848 -> Temperatura: 30.28 °C
00:44:24.848 -> Umidade: 72.17 %
00:44:24.848 -> Vazão de água: 24.13 L/min
```

Fonte: Lima (2025, p. 111)

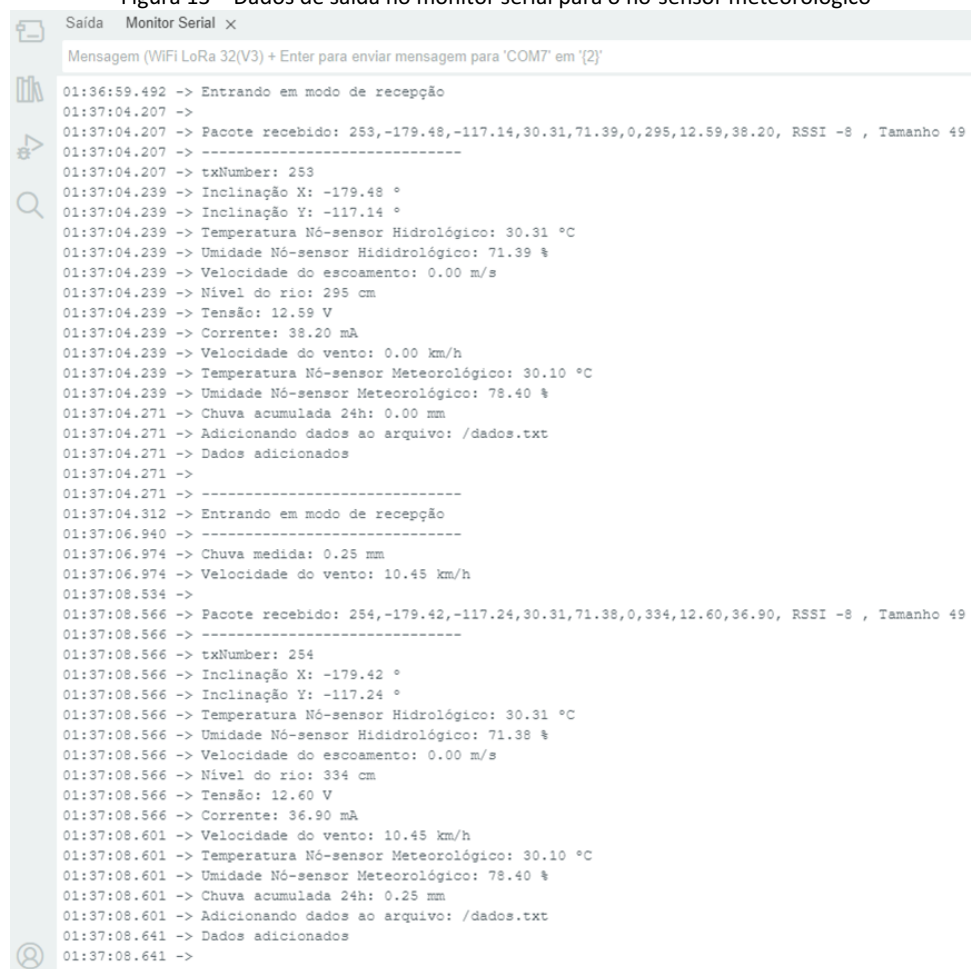
Na Figura 13 novamente o monitor serial apresenta os dados de saída, desta vez aqueles gerados pelo nó-sensor meteorológico. A primeira linha mostra a informação de que o rádio da placa entra em modo de recepção, em seguida é recebido um pacote de origem do nó-sensor hidrológico. O pacote é mostrado de forma linear, com vírgulas separando os valores, juntamente com o RSSI, que representa a qualidade do sinal, seguido do tamanho do pacote.

Após uma linha de hífen, o pacote é mostrado de modo formatado para melhor entendimento. Após a linha que apresenta a corrente de consumo, os dados seguintes são aqueles medidos pelo próprio nó-sensor meteorológico. É mostrada a velocidade do vento, que se encontrava zerada, a temperatura e a umidade medidas pelo DHT22, e a chuva acumulada em 24 horas, também zerada.

Em seguida, os dados são armazenados no cartão de memória juntamente com a data e horário que foram coletados. Neste momento, também seria enviado para a plataforma *IoT*, mas o limite deste teste incluiu apenas o armazenamento local.

Após entrar em modo de recepção novamente, um evento que estava em fila é mostrado, trata-se de um pulso do pluviômetro que foi detectado, então 0,25 mm chuva foram aferidos. Neste evento aproveitou-se para prever a apresentação da velocidade do vento, que agora era de 10,45 km/h. Em seguida um novo pacote foi recebido e o mesmo processo aconteceu.

Figura 13 – Dados de saída no monitor serial para o nó-sensor meteorológico



```
Saída Monitor Serial x
Mensagem (WiFi LoRa 32(V3) + Enter para enviar mensagem para 'COM7' em '2)

01:36:59.492 -> Entrando em modo de recepção
01:37:04.207 ->
01:37:04.207 -> Pacote recebido: 253,-179.48,-117.14,30.31,71.39,0,295,12.59,38.20, RSSI -8 , Tamanho 49
01:37:04.207 -> -----
01:37:04.207 -> txNumber: 253
01:37:04.239 -> Inclinação X: -179.48 °
01:37:04.239 -> Inclinação Y: -117.14 °
01:37:04.239 -> Temperatura Nó-sensor Hidrológico: 30.31 °C
01:37:04.239 -> Umidade Nó-sensor Hidrológico: 71.39 %
01:37:04.239 -> Velocidade do escoamento: 0.00 m/s
01:37:04.239 -> Nível do rio: 295 cm
01:37:04.239 -> Tensão: 12.59 V
01:37:04.239 -> Corrente: 38.20 mA
01:37:04.239 -> Velocidade do vento: 0.00 km/h
01:37:04.239 -> Temperatura Nó-sensor Meteorológico: 30.10 °C
01:37:04.239 -> Umidade Nó-sensor Meteorológico: 78.40 %
01:37:04.271 -> Chuva acumulada 24h: 0.00 mm
01:37:04.271 -> Adicionando dados ao arquivo: /dados.txt
01:37:04.271 -> Dados adicionados
01:37:04.271 -> -----
01:37:04.312 -> Entrando em modo de recepção
01:37:06.940 -> -----
01:37:06.974 -> Chuva medida: 0.25 mm
01:37:06.974 -> Velocidade do vento: 10.45 km/h
01:37:08.534 ->
01:37:08.566 -> Pacote recebido: 254,-179.42,-117.24,30.31,71.38,0,334,12.60,36.90, RSSI -8 , Tamanho 49
01:37:08.566 -> -----
01:37:08.566 -> txNumber: 254
01:37:08.566 -> Inclinação X: -179.42 °
01:37:08.566 -> Inclinação Y: -117.24 °
01:37:08.566 -> Temperatura Nó-sensor Hidrológico: 30.31 °C
01:37:08.566 -> Umidade Nó-sensor Hidrológico: 71.38 %
01:37:08.566 -> Velocidade do escoamento: 0.00 m/s
01:37:08.566 -> Nível do rio: 334 cm
01:37:08.566 -> Tensão: 12.60 V
01:37:08.566 -> Corrente: 36.90 mA
01:37:08.601 -> Velocidade do vento: 10.45 km/h
01:37:08.601 -> Temperatura Nó-sensor Meteorológico: 30.10 °C
01:37:08.601 -> Umidade Nó-sensor Meteorológico: 78.40 %
01:37:08.601 -> Chuva acumulada 24h: 0.25 mm
01:37:08.601 -> Adicionando dados ao arquivo: /dados.txt
01:37:08.641 -> Dados adicionados
01:37:08.641 ->
```

Fonte: Lima (2025, p. 112)

A Heltec Wifi Lora 32 V3 mostrou bastante responsividade durante as medições, envio e recebimento de dados, o que pode ser visualizado nos tempos (à esquerda de cada linha) de apresentação dos dados no monitor serial. Isso indica que placas que possuem o microcontrolador ESP32-S3 podem ser utilizadas nos nós-sensores e *gateways* desse sistema.

O nó-sensor hidrológico também foi levado à uma ponte para realização de testes, a fim de verificar principalmente a capacidade do sensor ultrassônico JSN-SR04T V 3.0 de medir distâncias quando existe perturbação na superfície da água em um rio, logo após ocorrer uma chuva. O sensor apresentou medições equivalentes às aquelas realizadas utilizando diastímetro, o que o prova ser adequado para aferição do nível de água do córrego. A calibração deste tipo de sensor também é possível, conforme demonstrado por Groot e Dezfouli (2020).

6.3 Consumo de energia do nó-sensor hidrológico

Para o dimensionamento do suprimento de energia elétrica do nó-sensor hidrológico, que constitui a alimentação off-grid, os dados medidos pelo módulo INA219 foram utilizados, os quais mostram, conforme dados do display da placa presente na Figura 5, que o nó-sensor hidrológico em funcionamento consome aproximadamente 100 mA com uma tensão de

alimentação de 12 V – neste caso estava sendo testado também o envio de dados via LoRaWAN, que representa a situação mais desfavorável. O cálculo abaixo demonstra o consumo do nó-sensor para um dia inteiro de medições, sendo realizada uma a cada 2 minutos, e foi estimado para o loop de medição + envio dos dados uma duração de 10 segundos. Utilizou-se a tensão de 12 V, que é a mesma encontrada nas baterias escolhidas neste trabalho, e uma corrente de consumo de 150 mA para todo conjunto (placa + módulos + sensores), majorando os 100 mA medidos pelo INA2019, para atender às variações de eficiência devido a fatores físicos e, por último, mais 150 mA de uma ventoinha para refrigeração do interior da caixa que funciona 9 horas por dia, nos horários mais quentes. Os cálculos foram realizados usando a Equação (1), onde o consumo está em Ah, a corrente está em A e o tempo está em h.

$$\text{Consumo} = \text{Corrente} \times \text{Tempo} \quad (1)$$

Consumo da placa e dos módulos:

$$\begin{aligned}\text{Consumo}_{\text{placa}} &= 0.15A \times (10s \div 120s) \times 24h \\ \text{Consumo}_{\text{placa}} &= 0.3Ah\end{aligned}$$

Consumo da ventoinha:

$$\text{Consumo}_{\text{ventoinha}} = 0.15A \times 9h = 1.35Ah$$

Consumo diário total:

$$\text{Consumo}_{\text{dia}} = 0.3Ah + 1.35Ah = 1.65Ah$$

Uma bateria de 12 V 7 Ah, poderia promover autonomia de quatro dias para o nó-sensor hidrológico. O painel solar é capaz de recarregar esta bateria em aproximadamente 5 horas, considerando as possíveis perdas no controlador de carga.

A independência de rede elétrica do nó-sensor hidrológico garante que as medições sejam efetuadas mesmo quando há falta de energia, o que pode ocorrer com certa frequência em eventos extremos. Caso necessário, se fosse posicionado em local sem disponibilidade de rede elétrica, o nó-sensor meteorológico também pode ser alimentado com uma estrutura similar.

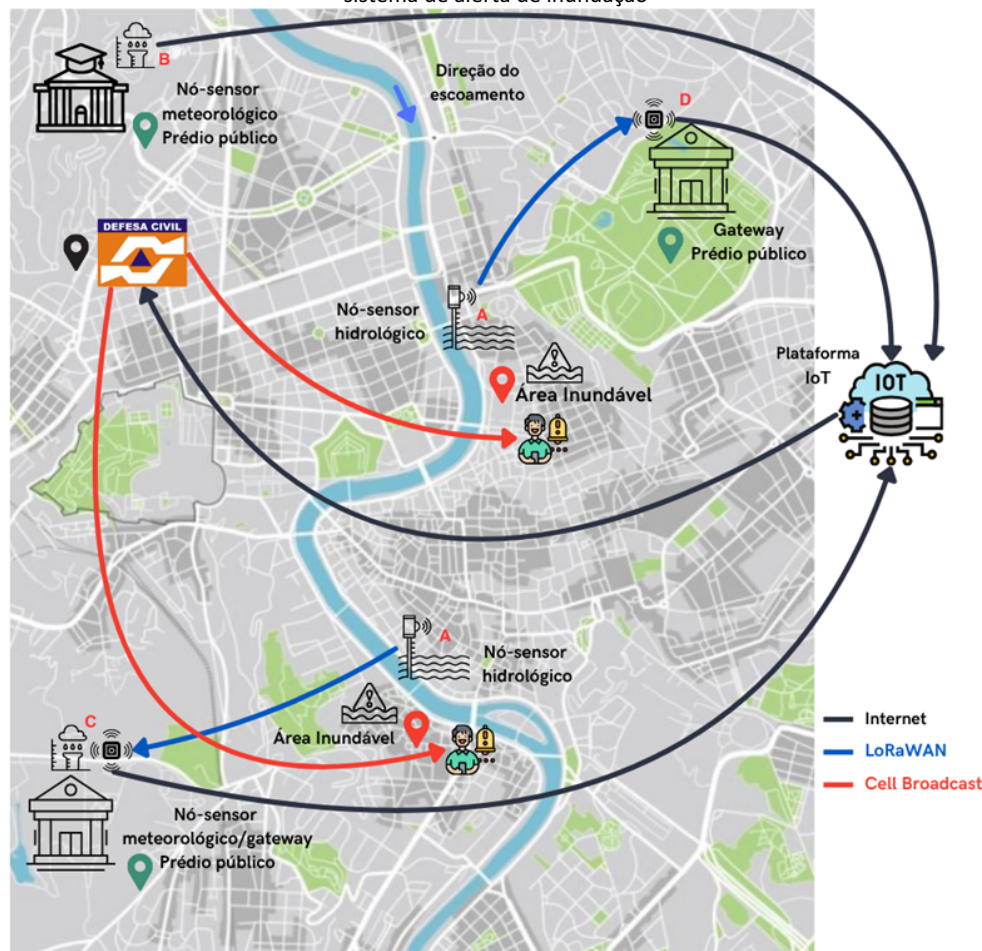
6.4 Visão geral de um sistema de previsão e alerta de inundações baseado em uma RSSF hidrometeorológica

Nesta seção, apresentamos na Figura 14 uma visão geral de uma região coberta por nós-sensores e gateways de uma RSSF. Existem três variações de nós-sensores. Aqueles identificados com a letra A representam os nós-sensores hidrológicos. Eles estão localizados em áreas propensas a inundações e seus dados de medição podem ser usados para previsão ou gerenciamento de incidentes, apoiando ações de evacuação, retorno, resgate e isolamento de vias e edifícios. Eles precisam enviar seus dados via LoRaWAN para outro nó ou gateway, pois não possuem acesso à internet para enviar diretamente para a plataforma IoT.

O nó-sensor identificado pela letra B é o nó-sensor meteorológico. Seus dados de medição podem ser usados para monitoramento e previsão. Como está localizado em um prédio público com acesso à internet, ele pode enviar seus dados diretamente para a plataforma IoT, dispensando a necessidade de um módulo de comunicação LoRaWAN.

O nó-sensor identificado pela letra C é um nó-sensor meteorológico que também atua como um *gateway*, pois está localizado dentro do alcance da LoRaWAN para receber dados medidos por um nó-sensor hidrológico. Nesse caso, ele precisa ter um módulo de comunicação LoRaWAN para receber dados do outro nó-sensor e acesso à internet disponível no prédio para enviar os dados recebidos, juntamente com seus dados medidos, para a plataforma *IoT*.

Figura 14 – Visão geral de uma RSSF hidrometeorológica com nós-sensores, gateways e plataforma *IoT* para um sistema de alerta de inundação



Fonte: Adaptado de Lima (2025)

A seguir, são apresentadas algumas opções de plataformas para compor um possível sistema de previsão e alerta de inundações que utilize RSSF. Essas plataformas incluem soluções para recepção, processamento, verificação e notificações de dados. Uma delas é gratuita.

- ThingsBoard;
- Google Cloud;
- AWS (Amazon Web Services);
- Azure (Microsoft Azure);
- Combinação de plataformas gratuitas: Mosquitto, Node-RED, InfluxDB e Grafana.

As opções reunidas atendem aos requisitos que um sistema pode necessitar, e alguns fatores se destacam na escolha de uma delas: a ThingsBoard atua exclusivamente no mercado de *IoT* e possui uma plataforma mais intuitiva; as opções das *big techs* (Google, Amazon e Microsoft) oferecem soluções completas e incluem o aprendizado de máquina como diferencial,

o que pode ser um fator positivo para o aprimoramento do sistema; a última opção, o combo de ferramentas, tem a vantagem de ser gratuita, porém, seu uso pode exigir um trabalho significativo para integração das ferramentas.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho, nós-sensores e um *gateway* foram propostos para uma RSSF de monitoramento hidrometeorológico. O uso de LoRaWAN permitiu a comunicação sem linha de visada (NLOS - *Non-Line-of-Sight*) entre os nós, demonstrando ser uma alternativa viável para RSSFs em ambientes urbanos.

Os sistemas microcontrolados utilizados em nosso trabalho demonstraram bom desempenho durante os testes dos sensores incluídos nos nós-sensores. A escalabilidade e a versatilidade desses sistemas oferecem muitas possibilidades para uma RSSF, potencialmente beneficiando múltiplos propósitos. O baixo custo dos itens também é um diferencial para a implantação desse tipo de sistema. Nessa perspectiva, *IoT* e RSSF constituem recursos úteis para previsão a curto prazo no contexto de inundações.

O trabalho realizado não incluiu uma aplicação prática de longo prazo para verificar o desempenho por um período prolongado, incluindo o envio dos dados para a plataforma *IoT*, a análise da consistência desses dados e a sugestão de métodos de organização e tratamento para eles. Dito isto, em trabalhos futuros, pretendemos conduzir experimentos de longo prazo e explorar mais a fundo o alcance do protocolo LoRaWAN, posicionando as antenas em locais mais apropriados e definitivos, além de combiná-lo com outros protocolos de comunicação de longo alcance e baixo consumo de energia, mitigando potenciais limitações do LoRaWAN e explorando o potencial de outras tecnologias dentro da mesma RSSF.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOSTA-COLL, M. *et al.* Forecasting and communication key elements for low-cost fluvial flooding early warning system in urban areas. **International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)**, [s. l.], v. 11, n. 5, p. 4143, 2021.

AL KINDHI, B. *et al.* Sensor and internet of things based integrated inundation mitigation for smart city. **International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 2695, 2023.

ALIPIO, M.; BURES, M. Current testing and performance evaluation methodologies of LoRa and LoRaWAN in *IoT* applications: Classification, issues, and future directives. **Internet of Things**, [s. l.], v. 25, p. 101053, 2024.

BRASIL. ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações. Resolução nº 680/2017 (Regulamento sobre Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita). **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 4, 29 junho 2017.

BRASIL. ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações. Ato nº 14448 de 29 de Novembro de 2017. **Ato de Certificação de Produtos**. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-certificacao-de-produtos/2017/1139-ato-14448#tabelal1>. Acesso em: 16 mai. 2023.

CRED. **EM-DAT: The International Disaster Database - Highlights 2024**. 2024. Disponível em: https://files.emdat.be/2024/10/EM-DAT_leaflet_2024.pdf. Acesso em: 10 abr. 2025.

CSUKÁS, M. S.; BUKOVSKZI, V.; REITH, A. Challenges and Solutions for Organizational Design in Urban Digitalization. **European Journal of Sustainable Development**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 615, 2020.

FULLER, A. *et al.* Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. **IEEE Access**, [s. l.], v. 8, p. 108952–108971, 2020.

GIORGI, F.; RAFFAELE, F.; COPPOLA, E. The response of precipitation characteristics to global warming from climate projections. **Earth System Dynamics**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 73–89, 2019.

GROOT, T.; DEZFOULI, B. Flomosys: A Flood Monitoring System. *In*: 2020 IEEE GLOBAL HUMANITARIAN TECHNOLOGY CONFERENCE (GHTC), 2020, Seattle, WA, USA. **2020 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)**. Seattle, WA, USA: IEEE, 2020. p. 1–8. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9342943/>. Acesso em: 28 jul. 2024.

HASHIM, S. D.; ADNAN, M. H. M.; HUSAIN, N. M. Rain monitoring and prediction system using *IoT*. *In*: 1ST INTERNATIONAL POSTGRADUATE CONFERENCE ON OCEAN ENGINEERING TECHNOLOGY AND INFORMATICS 2021 (IPCOETI 2021), 2023, Kuala Terengganu, Malaysia. **Anais [...]**. Kuala Terengganu, Malaysia: [s. n.], 2023. p. 060015. Disponível em: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article/2879530>. Acesso em: 16 maio 2023.

JULEDI, A. P. *et al.* Performance Evaluation of LoRa 923 MHz for the Internet of Things. *In*: 2024 IEEE 10TH INFORMATION TECHNOLOGY INTERNATIONAL SEMINAR (ITIS), 2024, Surabaya, Indonesia. **2024 IEEE 10th Information Technology International Seminar (ITIS)**. Surabaya, Indonesia: IEEE, 2024. p. 30–34. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10845693/>. Acesso em: 31 mar. 2025.

KEUNG, K. L. *et al.* Smart City Application and Analysis: Real-time Urban Drainage Monitoring by *IoT* Sensors: A Case Study of Hong Kong. *In*: 2018 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND ENGINEERING MANAGEMENT (IEEM), 2018, Bangkok. **2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)**. Bangkok: IEEE, 2018. p. 521–525. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8607303/>. Acesso em: 17 maio 2023.

LEE, H.-C.; KE, K.-H. Monitoring of Large-Area *IoT* Sensors Using a LoRa Wireless Mesh Network System: Design and Evaluation. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, [s. l.], v. 67, n. 9, p. 2177–2187, 2018.

LIMA, A. F. ***IoT no sistema de drenagem como apoio para alerta de inundações***. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2025.

LORA ALLIANCE. **A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™**. 2015. Disponível em: <https://resources.lora-alliance.org/document/what-is-lorawan>. Acesso em: 20 fev. 2025a.

LORA ALLIANCE. **LoRaWAN® Regional Parameters RP002-1.0.4**. 2022. Disponível em: <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp002-1-0-4-regional-parameters>. Acesso em: 20 fev. 2025b.

MEHMOOD, Y. *et al.* Internet-of-Things-Based Smart Cities: Recent Advances and Challenges. **IEEE Communications Magazine**, [s. l.], v. 55, n. 9, p. 16–24, 2017.

MEIRELLES, L. V. **Projeto de uma rede de internet das coisas para monitoramento e alerta de emergência em áreas de risco**. 2018. Dissertação (Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração) – Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

MILAROKOSTAS, C. *et al.* A Comprehensive Study on LPWANs With a Focus on the Potential of LoRa/LoRaWAN Systems. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, [s. l.], v. 25, n. 1, p. 825–867, 2023.

NGUYEN, A. **A Comprehensive Guide to External Antennas**. 2021. Disponível em: <https://www.mouser.mx/blog/comprehensive-guide-external-antennas>. Acesso em: 20 fev. 2025.

PRAKASH, C.; BARTHWAL, A.; ACHARYA, D. FLOODWALL: A Real-Time Flash Flood Monitoring and Forecasting System Using *IoT*. **IEEE Sensors Journal**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 787–799, 2023.

PRATAMA, A.; MUNADI, R.; MAYASARI, R. Design and implementation of flood detector using wireless sensor network with mamdani's fuzzy logic method. *In*: 2017 2ND INTERNATIONAL CONFERENCES ON INFORMATION TECHNOLOGY, INFORMATION SYSTEMS AND ELECTRICAL ENGINEERING (ICITISEE), 2017, Yogyakarta. **2017 2nd International conferences on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE)**. Yogyakarta: IEEE, 2017. p. 192–197. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8285493/>. Acesso em: 28 jul. 2024.

ROUNDY, J. K.; DUAN, Q.; SCHAAKE, J. C. Hydrological Predictability, Scales, and Uncertainty Issues. *In: DUAN, Q. et al. (org.). Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019. p. 3–31. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-39925-1_8. Acesso em: 28 mar. 2025.

SADKOU, S. *et al.* A review of flash-floods management: From hydrological modeling to crisis management. **Journal of Flood Risk Management**, [s. l.], v. 17, n. 3, p. e12999, 2024.

SENDRA, S. *et al.* LoRaWAN Network for Fire Monitoring in Rural Environments. **Electronics**, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 531, 2020.

SINGH, R. LoRaWAN for Remote Monitoring Applications in the Smart Grid - A Utility Perspective. *In: 2024 IEEE PES/IAS POWERAFRICA, 2024, Johannesburg, South Africa. 2024 IEEE PES/IAS PowerAfrica*. Johannesburg, South Africa: IEEE, 2024. p. 01–05. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10759451/>. Acesso em: 18 mar. 2025.

SUNG, W.-T.; DEVI, I. V.; HSIAO, S.-J. Early warning of impending flash flood based on *AIoT*. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, [s. l.], v. 2022, n. 1, p. 15, 2022.

U.S. WEATHER BUREAU. **Rainfall Frequency Atlas of the United States for Durations from 30 Minutes to 24 Hours and Return Periods from 1 to 100 Years**. Weather Bureau Technical Paper No. 40. Washington, D.C., 1961.

WETTERHALL, F.; SMITH, P. Hydrological Challenges in Meteorological Post-processing. *In: DUAN, Q. et al. (org.). Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019. p. 239–253. Disponível em: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-39925-1_15. Acesso em: 28 mar. 2025.

WIXTED, A. J. *et al.* Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks. *In: 2016 IEEE SENSORS, 2016, Orlando, FL, USA. 2016 IEEE SENSORS*. Orlando, FL, USA: IEEE, 2016. p. 1–3. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7808712/>. Acesso em: 18 mar. 2025.

ZHENG, Y. *et al.* Research on nowcasting prediction technology for flooding scenarios based on data-driven and real-time monitoring. **Water Science & Technology**, [s. l.], v. 89, n. 11, p. 2894–2906, 2024.

DECLARAÇÕES

CONTRIBUIÇÃO DE CADA AUTOR

- **Concepção e Design do Estudo:** Alex, Elza e Beatriz
 - **Curadoria de Dados:** Alex, Elza e Beatriz
 - **Análise Formal:** Alex, Elza e Beatriz
 - **Aquisição de Financiamento:** Não se aplica
 - **Investigação:** Alex
 - **Metodologia:** Alex, Elza e Beatriz
 - **Redação - Rascunho Inicial:** Alex
 - **Redação - Revisão Crítica:** Elza e Beatriz
 - **Revisão e Edição Final:** Alex, Elza e Beatriz
 - **Supervisão:** Elza e Beatriz
-

DECLARAÇÃO DE CONFLITOS DE INTERESSE

Nós, Alex Felício de Lima, Elza Luli Miyasaka e Beatriz Campos Fialho, declaramos que o manuscrito intitulado "**Monitoramento hidrometeorológico usando redes de sensores sem fio**":

1. **Vínculos Financeiros:** Não possui/possui vínculos financeiros que possam influenciar os resultados ou interpretação do trabalho. Nenhuma instituição ou entidade financiadora esteve envolvida no desenvolvimento deste estudo.
 2. **Relações Profissionais:** Não possui/possui relações profissionais que possam impactar na análise, interpretação ou apresentação dos resultados. Nenhuma relação profissional relevante ao conteúdo deste manuscrito foi estabelecida.
 3. **Conflitos Pessoais:** Não possui/possui conflitos de interesse pessoais relacionados ao conteúdo do manuscrito. Nenhum conflito pessoal relacionado ao conteúdo foi identificado.
-