

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

**IOT NO SISTEMA DE DRENAGEM COMO APOIO PARA
ALERTA DE INUNDAÇÕES**

ALEX FELÍCIO DE LIMA

São Carlos
2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

**IOT NO SISTEMA DE DRENAGEM COMO APOIO PARA
ALERTA DE INUNDAÇÕES**

ALEX FELÍCIO DE LIMA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof^a. Dr^a. Elza Luli Miyasaka
Coorientação: Dr^a. Beatriz Campos Fialho

São Carlos
2025

Lima, Alex Felício de

IoT no sistema de drenagem como apoio para alerta de inundações / Alex Felício de Lima -- 2025.
153f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Elza Luli Miyasaka

Banca Examinadora: Prof.^a Dra. Elza Luli Miyasaka,
Prof.^a Dra. Anáí Floriano Vasconcelos, Prof.^a Dr. Julio Cezar Estrella

Bibliografia

1. Inundações. 2. Internet das coisas (IoT). 3. Modelagem hidrológico-hidrodinâmica. I. Lima, Alex Felício de. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Arildo Martins - CRB/8 7180



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

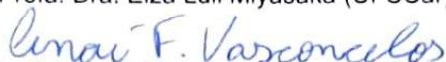
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Alex Felício de Lima, realizada em 28/04/2025.

Comissão Julgadora:


Profa. Dra. Elza Luli Miyasaka (UFSCar)


Profa. Dra. Anai Floriano Vasconcelos (UFSCar)


Prof. Dr. Julio César Estrella (ICMC/USP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser o meu refúgio.

À minha esposa, Isadora, pelo apoio incondicional, carinho, cuidado e amor.

À minha família, pelo amor, apoio, por entender o processo, e por ter me ensinado a buscar desafios.

Às minhas orientadoras, pela dedicação, paciência, ensinamentos, suporte e trocas tão valiosas que se estendem para o viver.

Ao Fabio, por todo conhecimento partilhado em nossas reuniões.

Ao grupo de pesquisa Cidades e Pessoas: Conectadas, pelo acolhimento e por fazer tanto sentido.

Ao PPGEU, pela diversidade e discussões tão edificantes.

Aos meus amigos, pelo incentivo, companheirismo e influência.

“Conhecimento é poder. Conhecimento compartilhado é poder multiplicado.”

(Robert Noyce)

RESUMO

No Brasil, entre os problemas mais recorrentes em áreas urbanas, estão as inundações. Muitas vezes são ocorrências pré-existentes devido às características hidrológicas e topográficas da região, mas que são potencializadas pelos efeitos da urbanização em termos de impermeabilização e modificação do ciclo hidrológico devido às ações antrópicas. As formas de lidar com esses eventos variam desde soluções estruturais envolvendo grandes obras de macrodrenagem, até soluções não-estruturais, que englobam regulamentações sobre a utilização do solo em regiões de risco. Entre o período de manifestação dos eventos e a efetiva adoção de medidas para resolução dos problemas, ações precisam ser tomadas visando atenuar os riscos e efeitos negativos das inundações. Composto essas ações destacam-se as alternativas baseadas em Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC), que incorporam IoT (*Internet of Things*) e gestão informatizada na segurança urbana, melhorando as respostas aos eventos hidrológicos extremos. Essas alternativas se inserem no contexto das *Smart Cities*, as quais são cidades com altos níveis de governança e desenvolvimento sustentável. Algumas pesquisas abordam o uso de IoT para o monitoramento e emissão de alertas de inundações, entretanto não foram encontradas pesquisas que associassem IoT, modelos hidrológicos e modelos hidrodinâmicos para previsão e alerta de inundações. Nesta perspectiva, este trabalho tem por objetivo desenvolver um modelo de sistema de alertas de inundações em cursos d'água situados em áreas urbanas baseado em soluções de IoT e modelagem hidrológico-hidrodinâmica. A abordagem metodológica do presente estudo de caso foi fundamentada em revisão de literatura, análise de dados oficiais do município e da bacia hidrográfica, levantamentos de campo, modelagem hidrológico-hidrodinâmica, prototipagem do modelo conceitual e físico do sistema de alertas e simulação de sua aplicação. O objeto de validação do estudo foi o município de Ribeirão Preto. O modelo de sistema de alertas proposto utiliza-se dos dados hidrometeorológicos coletados por uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF), os quais são inseridos em modelos hidrológicos e hidrodinâmicos que realizam a transformação da chuva em vazão e informam a ocorrência ou não de inundações, incluindo os horários que estas ocorrerão. Na simulação realizada o modelo de detecção de inundação possibilitou o alerta de inundação com 30 minutos de antecedência. Portanto, o modelo de sistema de alertas é capaz de fornecer informações para que a Defesa Civil ou órgão equivalente emita avisos em tempo hábil para os munícipes em situação de risco tomarem medidas com vistas à redução dos prejuízos sociais e materiais das inundações. Espera-se que este modelo possa ser replicado para outras localidades e que sirva de base para estudos de aprimoramento de pesquisas nesta área.

PALAVRAS-CHAVE: inundações; alertas; iot; rssf; cidades inteligentes.

ABSTRACT

In Brazil, among the most recurring problems in urban areas are floods. These are often pre-existing occurrences due to the hydrological and topographic characteristics of the region, but which are enhanced by the effects of urbanization in terms of waterproofing and modification of the hydrological cycle due to human actions. The ways of dealing with these events vary from structural solutions involving large macro-drainage works, to non-structural solutions, which include regulations on land use in risk regions. Between the period of manifestation of the events and the effective adoption of measures to resolve the problems, actions need to be taken to mitigate the risks and negative effects of floods. Composing these actions, Information and Communication Technologies (ICT)-based alternatives stand out, incorporating IoT (Internet of Things) and computerized management in urban security, improving responses to extreme hydrological events. These alternatives fall within the context of Smart Cities, which are cities with high levels of governance and sustainable development. Some research addresses the use of IoT for flood monitoring and alert issuance; however, no research was found that associated IoT, hydrological model and hydrodynamic model for flood forecasting and alerting. From this perspective, this work aims to develop a flood alert system model for watercourses located in urban areas based on IoT solutions and hydrological-hydrodynamic modeling. The methodological approach of this case study was based on a literature review, analysis of official data from the municipality and the watershed, field surveys, hydrological-hydrodynamic modeling, prototyping of the conceptual and physical model of the alert system, and simulation of its application. The object of validation of the study was the city of Ribeirão Preto. The proposed warning system model uses hydrometeorological data found by a Wireless Sensor Network (WSN), which are inserted into hydrological and hydrodynamic models that transform rainfall into flow and inform whether or not floods occur, including the times they occur. In the simulation performed, the flood detection model made it possible to issue a flood alert 30 minutes in advance. Therefore, the warning system model is capable of providing information so that Civil Defense or an equivalent agency can issue timely warnings to municipalities at risk so that they can take measures to reduce the social and material losses caused by flooding. It is expected that this model can be replicated in other locations and that it will serve as a basis for studies to improve research in this area.

KEYWORDS: floods; alerts; iot; wsn; smart cities.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Ciclo hidrológico antes e após a urbanização | 16 |
| Figura 2 - Enchente x Inundação | 21 |
| Figura 3 - Números de desastres por tipo | 21 |
| Figura 4 - Vítimas fatais, vítimas gerais e perdas econômicas..... | 22 |
| Figura 5 - Número de eventos | 24 |
| Figura 6 - Número de pessoas afetadas (em milhões)..... | 24 |
| Figura 7 - Barragem em Ribeirão Preto..... | 26 |
| Figura 8 – Nó-sensor de uma rede de sensores sem fio | 26 |
| Figura 9 - Tipos de previsão de inundações | 28 |
| Figura 10 - Exemplos de aplicações em IoT | 31 |
| Figura 11- Circuito básico com placa Arduino Uno + Sensor | 32 |
| Figura 12 - Fluxograma dos passos necessários para determinação do mapeamento das áreas inundáveis..... | 34 |
| Figura 13 - Quantidade de documentos publicados por país..... | 35 |
| Figura 14 - Publicações por ano e por tipo | 36 |
| Figura 15 - Quantidade de associações de publicações por área..... | 36 |
| Figura 16 - Ocorrências de palavras-chave ao longo dos anos..... | 37 |
| Figura 17 - Sistema de alertas proposto por Cardoso..... | 39 |
| Figura 18 - Sistema proposto por Noar e Kamal (2017) | 39 |
| Figura 19 - Flomosys..... | 41 |
| Figura 20 - Arquitetura do sistema de alertas FLOODWALL | 43 |
| Figura 21 - Camadas do sistema para alerta de inundações bruscas | 44 |
| Figura 22 - Funcionamento do sistema | 45 |
| Figura 23 - Delineamento da pesquisa | 46 |
| Figura 24 - Mapa do município de Ribeirão Preto | 52 |
| Figura 25 - Inundação do Ribeirão Preto..... | 53 |
| Figura 26 - Áreas sujeitas a inundação ou com microdrenagem deficitária..... | 54 |
| Figura 27 - Barragens e canais propostos no Plano Diretor de Macrodrenagem | 55 |
| Figura 28 - ANADEM recortado para a bacia do Ribeirão Preto | 57 |
| Figura 29 - Sub-bacias e rios identificados no HEC-HMS | 58 |
| Figura 30 - Mapa de CN gerado a partir da camada raster da ANA | 61 |
| Figura 31 - Hietograma do posto pluviométrico para o dia 07/11/2024 | 63 |

| | |
|--|-----|
| Figura 32 - Coeficiente espacial de distribuição da chuva | 64 |
| Figura 33 - Hietogramas e hidrograma de vazão para a sub-bacia S31 | 67 |
| Figura 34 - Hietograma de precipitação excedente | 68 |
| Figura 35 - Hidrogramas de vazão para o trecho R5 | 68 |
| Figura 36 - Volume e velocidade através do trecho R5 | 69 |
| Figura 37 - Hidrogramas de vazão da junção J5 | 70 |
| Figura 38 - Camada vetorial com a região de interesse da hidrografia dividida em feições.... | 71 |
| Figura 39 - Tratamento da TIN gerada para o leito de trecho do Ribeirão Preto | 72 |
| Figura 40 - MDE posicionado sobre imagem de satélite | 73 |
| Figura 41 - Criação de informações de geometria no HEC-RAS | 74 |
| Figura 42 - Inserção de condições de contorno | 75 |
| Figura 43 - Criação do plano de simulação | 76 |
| Figura 44 - Resultados da simulação/modelagem - Gráficos | 77 |
| Figura 45 - Resultados da simulação/modelagem – seção e perfil..... | 78 |
| Figura 46 - Visualização de mancha e WSE em perfil criado..... | 79 |
| Figura 47 - Determinação da área de abrangência de cada nó-sensor meteorológico..... | 80 |
| Figura 48 - Distribuição de nós-sensores meteorológicos na bacia do Ribeirão Preto | 81 |
| Figura 49 - Alocação dos nós-sensores hidrológicos | 83 |
| Figura 50 - Altura de chuva em mm para diferentes TR e durações de chuva para Ribeirão Preto | 84 |
| Figura 51 - Horários de início das inundações | 85 |
| Figura 52 - ESP32-WROOM-32E e Heltec Wifi Lora 32 V3..... | 87 |
| Figura 53 - Comparativo entre tecnologias de comunicação | 88 |
| Figura 54 - Esquema da topologia da rede LoRaWAN..... | 88 |
| Figura 55 - LoRa SX1262 RF Wireless..... | 89 |
| Figura 56 - Nó-sensor meteorológico..... | 90 |
| Figura 57 - Esquema de ligação do Pluviômetro PL-1 com DHT22 integrado | 91 |
| Figura 58 - Nó-sensor hidrológico..... | 94 |
| Figura 59 – Funcionamento de um sensor ultrassônico | 95 |
| Figura 60 - Teste do nó-sensor hidrológico..... | 97 |
| Figura 61 - Caixa de acoplamento IP65 | 100 |
| Figura 62 - Esquema de ligação para o Gateway | 101 |
| Figura 63 - Teste de alcance da antena de 3 dBi | 104 |
| Figura 64 - Antenas omnidirecionais e direcional..... | 105 |

| | |
|---|-----|
| Figura 65 - Padrões de radiação das antenas omnidirecional e direcional | 105 |
| Figura 66 - Padrões de radiação ao aumentar o ganho da antena..... | 106 |
| Figura 67 - Recebimento de pacote via LoRaWAN..... | 107 |
| Figura 68 - Teste de alcance das antenas de 10 dBi omnidirecional e de 8 dBi direcional.... | 107 |
| Figura 69 - Fluxograma de funcionamento do nó-sensor hidrológico | 109 |
| Figura 70- Fluxograma de funcionamento do nó-sensor meteorológico..... | 109 |
| Figura 71 - Dados de saída no monitor serial para o nó-sensor hidrológico | 111 |
| Figura 72 - Dados de saída no monitor serial para o nó-sensor meteorológico | 112 |
| Figura 73 – Infográfico do Modelo de Sistema de Alertas de Inundações | 117 |
| Figura 74 - Categorias de risco de inundação dos SAHs | 118 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
API - *Application Programming Interface*
AWS - *Amazon Web Services*
BDTD - Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações
BW - *Bandwidth*
CAD - *Computer Aided Design*
CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CEMADEN - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CN - *Curve Number*
COMPDEC - Coordenadoria Municipal de Proteção e Defesa Civil
CRED - *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*
DPS - Dispositivo de Proteção Contra Surtos
DR - *Data Rate*
ECP - Estado de Calamidade Pública
EM-DAT - *Emergency Event Database*
EPA - *Environmental Protection Agency*
FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FHWA - *Federal Highway Administration*
GIS - *Geographic Information System*
GPIO - *General Purpose Input/Output*
GPRS - *General Packet Radio Service*
HEC-HMS - *Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System*
HEC-RAS - *Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICT - *Information and Communication Technologies*
IDAP - Divulgação de Alertas Públicos
IDE - *Integrated Development Environment*
IDF - Intensidade-Duração-Frequência
IDHM - Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
INCC - Índice Nacional de Custos da Construção
IoT - *Internet of Things*
IPH - Instituto de Pesquisas Hidráulicas

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
LCD - *Liquid Crystal Display*
LED - *Light-Emitting Diode*
LoRaWAN - *Long Range Wide Area Network*
LPWAN - *Low Power Wide Area Network*
LTE: CAT-M1 - *Long Term Evolution CAT-M1*
M2M - *Machine to Machine*
MDE - Modelo Digital de Elevação
MDT - Modelo Digital do Terreno
MIDR - Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional
MNT - Modelo Numérico do Terreno
NA - Nível de Água
NLOS - Non-Line-of-Sight
NRCS - *Natural Resources Conservation Service*
ODS - Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
PCI - Placa de Circuito Impresso
PCPDC - Plano de Contingência de Proteção e Defesa Civil
PMSB - Plano Municipal de Saneamento Básico
QGIS - *Quantum GIS*
RPA - *Robotic Process Automation*
RPi - Raspberry Pi
RSSF - Rede de Sensores Sem Fio
S2iD - Sistema Integrado de Informações Sobre Desastres
SCS - *Soil Conservation Service*
SE - Situação de Emergência
SEDEC - Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil
SF - *Spreading Fator*
SGB-CPRM - Serviço Geológico do Brasil - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
SIG - Sistema de Informações Geográficas
SIM - *Subscriber Identity Module*
SMS - *Short Message Service*
SMS - *Surface-water Modeling System*
SNIRH - Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*

SWMM - *Storm Water Management Model*

TICs - *Tecnologias da Informação e Comunicação*

TIN - *Triangulated Irregular Network*

TR – *Tempo de Retorno*

UFRGS - *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*

USACE - *United States Army Corps of Engineers*

USDA-NRCS - *United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service*

USGS - *United States Geological Survey*

USP - *Universidade de São Paulo*

VANT - *Veículos Aéreos Não Tripulados*

WMS - *Watershed Modeling System*

WSE – *Water Surface Elevation*

WSN - *Wireless Sensor Network*

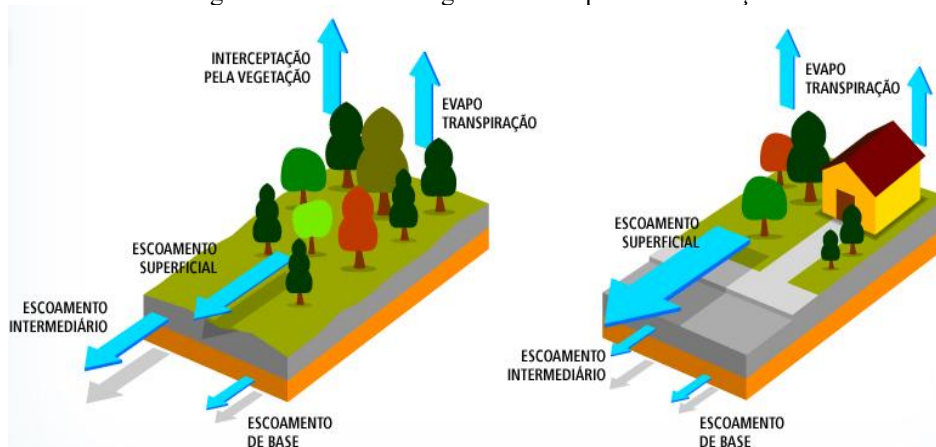
SUMÁRIO

| | |
|---|------------|
| 1 INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 OBJETIVOS | 18 |
| 1.1.1 Objetivo Geral | 18 |
| 1.1.2 Objetivos Específicos | 18 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA | 18 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 20 |
| 2.1 ENCHENTES E INUNDAÇÕES | 20 |
| 2.2 INUNDAÇÕES NO BRASIL E NO MUNDO | 21 |
| 2.3 MEDIDAS DE CONTROLE DAS INUNDAÇÕES | 25 |
| 2.3.1 Previsão e alerta de inundações | 27 |
| 2.4 INTERNET DAS COISAS E CIDADES INTELIGENTES | 30 |
| 2.5 MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA | 32 |
| 2.6 CENÁRIO ATUAL DAS PESQUISAS | 34 |
| 2.7 SISTEMAS DE ALERTAS DE INUNDAÇÕES | 38 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 46 |
| 3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ANÁLISE DOCUMENTAL | 48 |
| 3.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA E MODELAGEM HIDRODINÂMICA | 49 |
| 3.3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DO SISTEMA DE ALERTAS DE INUNDAÇÕES | 50 |
| 4 RESULTADOS | 51 |
| 4.1 OBJETO DE ESTUDO | 51 |
| 4.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA E MODELAGEM HIDRODINÂMICA | 56 |
| 4.2.1 Modelagem Hidrológica | 56 |
| 4.2.2 Modelagem Hidrodinâmica | 70 |
| 4.3 DISTRIBUIÇÃO E FUNCIONAMENTO DOS NÓS-SENSORES | 79 |
| 4.3.1 Posicionamento e funcionamento do nó-sensor meteorológico | 80 |
| 4.3.2 Posicionamento e funcionamento do nó-sensor hidrológico | 82 |
| 4.3.3 Emissão do alerta e tempo de resposta | 84 |
| 4.4 COMPONENTES DOS NÓS-SENSORES E <i>GATEWAYS</i> | 86 |
| 4.4.1 Placa de desenvolvimento | 86 |
| 4.4.2 Módulo de comunicação M2M | 87 |
| 4.4.3 Itens do nó-sensor meteorológico | 89 |
| 4.4.4 Itens do nó-sensor hidrológico | 93 |
| 4.4.5 Itens do Gateway | 100 |
| 4.4.6 Custos estimados dos nós-sensores e do gateway | 101 |
| 4.5 TESTES DE FUNCIONAMENTO | 102 |
| 4.5.1 Protocolo de comunicação LoRaWAN | 103 |
| 4.5.2 Teste dos nós-sensores em funcionamento | 108 |
| 4.6 DEMAIS ITENS DO SISTEMA DE ALERTAS | 113 |
| 4.7 FUNCIONAMENTO PÓS-MEDIÇÕES, CLASSIFICAÇÃO DE RISCO E EMISSÃO DE ALERTA | 115 |
| 5 CONCLUSÕES | 120 |
| REFERÊNCIAS | 122 |
| APÊNDICE A | 132 |

1 INTRODUÇÃO

Uma das características de grande parte das cidades ao redor do mundo é a de que elas tiveram sua formação em torno de um curso d'água, motivada por diversos fatores, como: dessedentação, alimentação, rota para outras civilizações, entre outros. À medida que a urbanização avançava, os meios de transporte se transformavam, removia-se a vegetação e aumentava-se a impermeabilização do solo, de modo a provocar alteração no ciclo hidrológico, diminuindo os volumes de chuva interceptado, evaporado e infiltrado no solo. As mudanças climáticas aumentaram a frequência de eventos climáticos extremos, entre os quais estão as precipitações pluviais intensas (GIORGI; RAFFAELE; COPPOLA, 2019; ROUNDY; DUAN; SCHAAKE, 2019). A soma desses fatores resulta em aumento do volume escoado superficialmente e com maior velocidade, tendo como consequência o alcance rápido de vazão superior àquela que a calha do curso d'água poderia suportar e, em seguida, ocorrem as inundações urbanas (TUCCI; BERTONI, 2003). A Figura 1 mostra como a urbanização pode influenciar o comportamento hidrológico de uma microbacia¹, e mudar a relação entre a precipitação total e a precipitação excedente – chuva que de fato se torna deflúvio, ou seja, é o escoamento superficial resultante após a interceptação e a infiltração. Os tamanhos das setas indicam a magnitude dos volumes de chuva em cada ocorrência.

Figura 1 - Ciclo hidrológico antes e após a urbanização



Fonte: RIGHETTO; MOREIRA; SALES (2009)

As inundações urbanas são problemas de difícil resolução em determinadas regiões,

¹ Microbacia hidrográfica é uma área de drenagem relativamente pequena de um afluente (tributário) de uma sub-bacia hidrográfica, que por sua vez também é uma área de drenagem de um afluente de uma bacia hidrográfica maior, a qual é constituída da área de drenagem de um curso d'água principal. Nos três casos, a área é definida a partir de uma foz (exutório) localizado no ponto baixo da área, para o qual é direcionado o volume escoado superficialmente. Não existe um consenso entre os especialistas sobre qual seria a extensão de cada uma dessas áreas. Classificá-las como sub-bacias ou microbacias depende de estarem inseridas em uma bacia maior, bem como da relação de grandeza entre elas (ANA, 2011).

sobretudo naquelas onde há pouca disponibilidade de área livre de uso. Nessas circunstâncias, normalmente são demandadas complexas obras de engenharia, que em muitos casos, levam-se anos para serem efetivadas. Neste intervalo, quando há a ocorrência de eventos extremos, grande parte da sociedade sofre com os efeitos de inundações, que variam desde comunidades ilhadas, grandes perdas materiais e até mesmo perdas de vidas humanas (AMARAL; RIBEIRO, 2015; PAWAR et. al., 2024).

Até que seja materializada uma medida estrutural para o problema, alternativas de baixo custo podem ser exploradas, entre elas, sistemas de alerta de inundações que, segundo Tucci (2007), é classificada como uma medida não-estrutural, e pode dar tempo suficiente para que os indivíduos e o poder público possam reduzir as perdas decorrentes desses eventos.

Com a evolução das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs), hodiernamente, é possível a elaboração de sistemas de alerta de larga escala, e com isso emitir avisos instantâneos sobre quaisquer ocorrências. A Defesa Civil do Estado de São Paulo conta com um sistema de alerta atuante em caso de eventos pluviométricos, incêndios florestais, bem como outras ocorrências ambientais (SÃO PAULO, 2017). De modo análogo, em escala municipal, também é possível emitir avisos sobre regiões pontuais, nas quais podem ocorrer inundações devido aos eventos pluviométricos.

Alguns pesquisadores desenvolveram sistemas de alerta antecipado em risco de inundações, como Yuliandoko *et al.* (2018), que criaram um sistema baseado no uso de IoT (*Internet of Things*, em português, Internet das Coisas) e nas características da água para este propósito. Já Aljohani *et al.* (2023), desenvolveram uma estrutura inteligente para gerenciar desastres baseada em IoT e *Machine Learning*. Al Kindhi *et al.* (2023) projetaram uma solução integrando sensores e IoT, e testaram-na em áreas inundáveis da cidade de Surabaya, na Indonésia, sendo um dos poucos trabalhos da temática que tiveram aplicação *in loco*. Vários outros estudos foram apresentados em artigos de congressos, entretanto abordam prioritariamente a tecnologia de suporte aos sistemas de alerta. É importante salientar que outros aspectos precisam ser considerados, que envolvem o local de aplicação e seu funcionamento hidrológico, bem como a integração com sistemas de tomada de decisão. Fica claro que para que haja aderência da adoção de sistemas similares no Brasil, é necessário que sejam realizados estudos e aplicações voltados ao panorama nacional, dando peso aos devidos parâmetros que compõem as inundações urbanas no país.

Diante desse contexto, em complemento ao estado da arte, este trabalho tem como proposta a estruturação de um sistema de alerta de inundações baseado em IoT, englobando

desde a modelagem hidrológica da área e simulações hidrodinâmicas até a seleção das tecnologias e diretrizes de operação que deverão compor o sistema, objetivando o aviso antecipado às autoridades, para que estas possam comunicar e realocar os munícipes em regiões de risco, bem como tomar precauções em relação ao tráfego nas regiões sujeitas aos eventos e outras providências e, adicionalmente, servir de base para outros estudos visando a melhoria da gestão dos desastres urbanos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um modelo de sistema de alertas de inundações em cursos d'água situados em áreas urbanas baseado em soluções de IoT e modelagem hidrológico-hidrodinâmica.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Obter por meio de modelagem hidrológica da bacia hidrográfica os hidrogramas de vazões resultantes de um evento de chuva para o curso hídrico principal e seus afluentes.
- Identificar os locais com risco de inundação por meio da modelagem hidrodinâmica.
- Definir o posicionamento e os componentes físicos e lógicos dos nós-sensores e *gateways* em uma rede de sensores sem fio para monitoramento meteorológico e hidrológico.
- Propor a classificação dos riscos em diferentes níveis de acordo com a sua amplitude para subsidiar a gestão dos eventos hidrometeorológicos.

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

O presente estudo visa contribuir para o incremento das pesquisas a respeito do tema em nível local, pois no país não existem muitos trabalhos relacionados, tampouco aplicações. Portanto, um estudo considere as características urbanas locais pode servir de base para pesquisas e aplicações, visto que vários municípios do país compartilham as mesmas características geomorfológicas, ocupação do solo e estão situados em bacias hidrográficas com fisiografia similar.

A criação de um sistema de alerta que inclua as etapas preliminares de implantação deste pode servir de incentivo para que a administração municipal adote medidas úteis para realizar

a gestão das inundações urbanas, indo de encontro com o atendimento parcial dos ODS (Objetivos do Desenvolvimento Sustentável) 6, 11 e 13, previstos na Agenda 2030, que englobam ações de saneamento e higiene, gestão dos recursos hídricos e proteção de ecossistemas relacionados; segurança, sustentabilidade e resiliência das cidades; e medidas de combate às mudanças climáticas e seus impactos, que inclui planejamento, educação, conscientização, mitigação, adaptação, redução de impacto e alerta precoce da mudança do clima (UNIC RIO, 2016).

É importante mencionar que a temática de inundações urbanas é um assunto constante em pesquisas devido ao aumento na frequência de ocorrência catalisado pelo aquecimento global, e a evolução rápida das tecnologias da informação e dos meios de comunicação proporciona abordagens alternativas para a gestão desses problemas, as quais devem ser exploradas por meio de pesquisas para que possam ter efetiva aplicação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo foi dividido em sete seções. Nas primeiras são apresentados conceitos, histórico e medidas de controle das inundações urbanas. Em seguida são explorados os temas de cidades inteligentes e internet das coisas. Ao final são apresentados o cenário atual das pesquisas e as publicações com maior correlação com este trabalho.

2.1 ENCHENTES E INUNDAÇÕES

Enchentes ou cheias são processos sazonais que ocorrem quando um curso d'água passa a ocupar o seu leito maior, ocupando áreas ribeirinhas naturalmente, sem extravasamento (IPT, 2007; TUCCI; BERTONI, 2003). As inundações representam o transbordamento das águas de um curso d'água, atingindo sua planície de inundação ou área de várzea (IPT, 2007) e, segundo Tominaga *et al.* (2015), podem ter sua frequência influenciada por dois grupos de fatores:

- Naturais: forma da bacia, relevo, forma do talvegue do rio, permeabilidade do solo, cobertura vegetal, pluviosidade;
- Antrópicos: ocupação das planícies de inundação, descarte inadequado de resíduos sólidos, remoção da vegetação, impermeabilização do solo, assoreamento (potencializado pelas ações humanas), sistemas de drenagem higienistas (convencionais), alteração dos cursos d'água.

São chamadas de inundações urbanas os eventos caracterizados pelo transbordamento das águas de um corpo hídrico situado em uma região urbana, sendo que muitas vezes a planície inundada encontra-se ocupada por edificações ou vias (TUCCI, 2007).

É comum que diversas regiões do meio urbano sofram com os efeitos das inundações, visto que a impermeabilização do solo que acompanha a urbanização altera o hidrograma de escoamento da água, que chega mais rapidamente nos pontos baixos da bacia e em maior volume, já que a infiltração no solo e interceptação da precipitação pela vegetação foram diminuídas (AMARAL; RIBEIRO, 2015; TUCCI, 2007). A Figura 2 exemplifica os processos de enchente e inundação decorrentes de eventos pluviométricos, bem como a “situação normal” que corresponde ao escoamento sem ocorrência de chuva.

Figura 2 - Enchente x Inundação



Fonte: AMARAL; RIBEIRO (2015, p. 41)

A canalização de córregos também é grande responsável pela transferência de ônus entre regiões ao longo do caminhamento do curso d'água, assim como a implantação de empreendimentos sem a devida preocupação em manter os picos de vazão equivalentes às de pré-urbanização (TUCCI; BERTONI, 2003; IPT, 2007).

2.2 INUNDAÇÕES NO BRASIL E NO MUNDO

A inundação está entre os tipos de desastres que afetam o maior número de pessoas ao redor do mundo. O Centro de Pesquisas em Epidemiologia de Desastres (do inglês, *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters - CRED*) mantém o *Emergency Event Database (EM-DAT)* e anualmente produz um relatório de desastres ao redor do mundo. O último relatório informa que em 2023, ocorreram 164 eventos de inundação, seguindo a média observada entre 2003 e 2022 conforme mostra a Figura 3 (CRED, 2024).

Figura 3 - Números de desastres por tipo













Fonte: Adaptado de CRED (2024)











Destacam-se as inundações como os desastres mais frequentes e que afetam mais pessoas. No período, ao considerar apenas as inundações presentes entre os dez eventos que mais impactaram em cada uma das três classificações da Figura 4 (mortalidade, pessoas afetadas e perdas econômicas), identifica-se que: foram ceifadas 5022 vidas; 22,1 milhões de pessoas foram afetadas; e as perdas econômicas somaram 9,8 bilhões (CRED, 2024).

Figura 4 - Vítimas fatais, vítimas gerais e perdas econômicas

Quadro 1
Top 10
Mortalidade
2023

| | | | | | |
|--|--------------------------|--------|---|-----------------------------------|-------|
|  Turquia | Terremoto | 50,783 |  Afeganistão | Terremoto | 2,445 |
|  Líbia | Tempestade Daniel | 12,352 |  Índia | Inundação | 1,529 |
|  República Árabe Síria | Terremoto | 5,900 |  Malawi | Tempestade Tropical Freddy | 1,209 |
|  Congo (Rep. Democrática) | Enchente | 2,970 |  Nigéria | Inundação | 275 |
|  Marrocos | Terremoto | 2,946 |  Iêmen | Inundação | 248 |

Quadro 2
Top 10
Pessoas
afetadas
2023

| | | | | | |
|---|------------------|--------------|---|-------------------------------------|-------------|
|  Indonésia | Seca | 18.8 milhões |  Índia | Tempestade Tropical Michaung | 4.4 milhões |
|  Índia | Inundação | 10.2 milhões |  Tanzânia | Inundação | 2.9 milhões |
|  Turquia | Terremoto | 9.2 milhões |  Somália | Inundação | 2.5 milhões |
|  República Árabe Síria | Terremoto | 8.8 milhões |  Malawi | Tempestade Tropical Freddy | 2.3 milhões |
|  Guatemala | Inundação | 4.4 milhões |  Filipinas | Inundação | 2.1 milhões |

Quadro 3
Top 10
Perdas
Econômicas
2023

| | | | | | |
|---|------------------------------------|--------------|---|---------------------------|-------------|
|  Turquia | Terremoto | 34 bilhões |  República Árabe Síria | Terremoto | 8.9 bilhões |
|  China | Tempestade Tropical Doksuri | 25 bilhões |  Marrocos | Terremoto | 7.0 bilhões |
|  EUA | Seca | 14.5 bilhões |  Líbia | Tempestade Daniel | 6.2 bilhões |
|  México | Tempestade Tropical Otis | 12 bilhões |  EUA | Tempestade | 6 bilhões |
|  Itália | Inundação | 9.8 bilhões |  EUA | Incêndio (Lahaina) | 5.5 bilhões |

Fonte: Adaptado de CRED (2024)

Para inclusão no relatório é necessário que o evento seja reportado e esteja enquadrado em ao menos um dos critérios:

- 10 fatalidades;
- 100 pessoas afetadas;
- Tenha sido declarado estado de emergência;
- Tenha sido pedida assistência internacional.

As inundações nem sempre são reportadas ou gerenciadas de forma a gerar dados estatísticos sobre os eventos, portanto mesmo que atendam os critérios de inclusão do CRED, não aparecem no relatório. Por isso, estima-se que os impactos causados pelas inundações são muito maiores que os dados registrados.

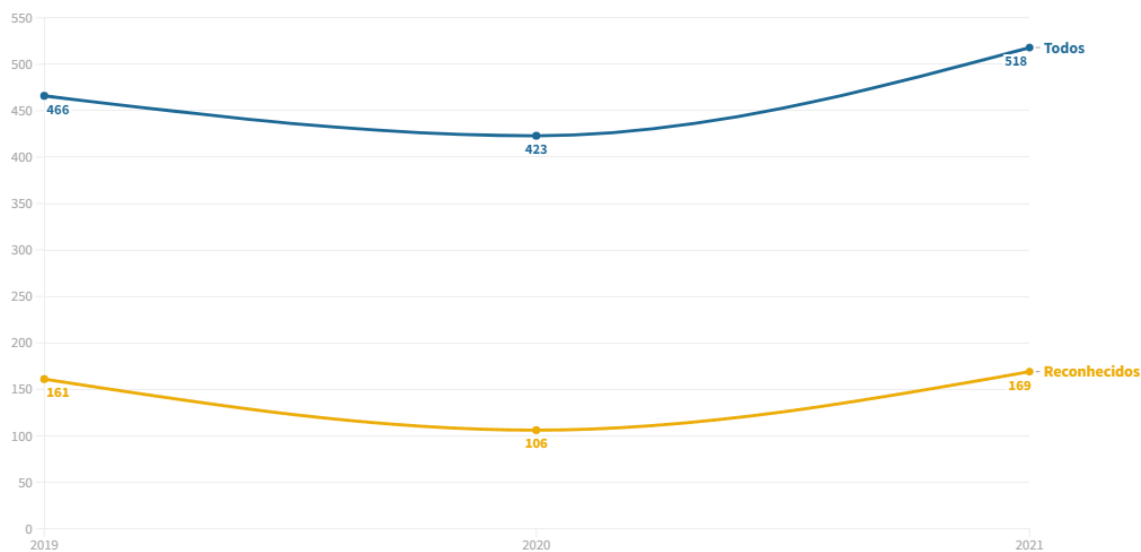
No período compreendido entre 2000 e 2019, segundo o relatório publicado pelo CRED

(2020) ocorreram 3254 inundações no mundo, o desastre com maior frequência no período, com 44% dos desastres contabilizados. A inundação também foi o desastre que afetou mais pessoas, 1,65 bilhões no período, 41% do total, seguido da seca, com 35% do total. O número de mortes causadas por inundações foi de 104.614, somando 9% do total. O desastre mais fatal no período foi o terremoto, que causou 721.318 mortes, 58% do total. Os prejuízos decorrentes das inundações somaram 651 bilhões de dólares, o segundo em perdas econômicas. A tempestade/ciclone foi o desastre que causou mais perdas econômicas, 1,39 trilhões de dólares.

No Brasil, o início do ano de 2023 foi caracterizado pelo intenso volume de chuvas registrado, sobretudo no litoral norte do estado de São Paulo, que teve recorde de volume de precipitação registrado, 638 milímetros em 24 horas, desencadeando diversas catástrofes, entre inundações e deslizamentos ocasionando grandes perdas humanas e materiais (AGÊNCIA BRASIL, 2023; METRÓPOLES, 2023). Foram contabilizadas 65 mortes e 4 mil pessoas ficaram sem moradia (METRÓPOLES, 2023). Em 2024, novamente eventos pluviométricos extremos ocorreram no país, desta vez no Rio Grande do Sul, causando grande devastação devido às chuvas persistentes e condições que favoreceram a inundação prolongada, afetando quase 2,4 milhões de pessoas, incluindo 182 mortas e 29 desaparecidas (RIO GRANDE DO SUL, 2024). As cidades de Fontoura Xavier, Caxias do Sul, Cerro Branco, Guaporé e Sinimbu registraram mais de 1000 milímetros de chuva acumulada entre os dias 28 de abril e 28 de maio (G1 RS, 2024). A pluviosidade anual média de Caxias do Sul é de 2090 mm e para o mês de maio, são esperados em média 146 mm (CLIMATE DATA, 2022), o que reforça a ocorrência de um evento extraordinário. A chuva média anual do Brasil é de 1760 mm, que varia de menos de 500 mm na região semiárida do Nordeste a mais de 3000 mm na região Amazônica, devido à grande extensão e heterogeneidade do território nacional (ANA, 2023).

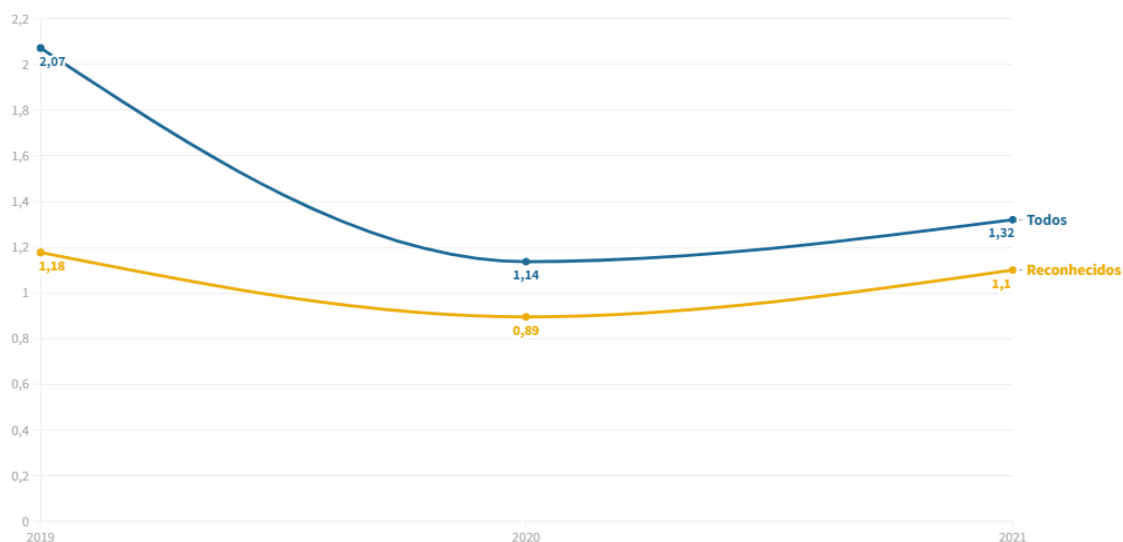
Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), em seu informe anual Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil, de 2023, entre os 5570 municípios brasileiros, 2765 (49,6%) decretaram Situação de Emergência (SE) ou Estado de Calamidade Pública (ECP) devido a ocorrência de cheias pelo menos uma vez de 2003 a 2021 (ANA, 2023). Nas Figura 5 e Figura 6, os gráficos trazem os números de eventos e o número de pessoas afetadas, respectivamente, nos anos de 2019, 2020 e 2021. A linha azul indica todos os eventos que foram reportados de quaisquer formas, já a linha amarela, indica os eventos que foram reconhecidos, isto é, que tiveram confirmação por um ente oficial.

Figura 5 - Número de eventos



Fonte: ANA (2023, p. 82)

Figura 6 - Número de pessoas afetadas (em milhões)



Fonte: ANA (2023, p. 82)

É possível perceber que houve flutuação entre o número de eventos e de pessoas afetadas, havendo diminuição entre 2019 e 2020, e aumento em 2021, sendo que o último apresenta números maiores, indicando um possível acréscimo de eventos extremos. Estes dados indicam que ações precisam ser tomadas em nível nacional. Cabe destacar que esses eventos hidrológicos podem se tornar mais frequentes, intensos e imprevisíveis, devido às mudanças climáticas desencadeadas pelo aquecimento global, fruto das ações antrópicas (BLENKINSOP; ALVES; SMITH, 2021; GIORGI; RAFFAELE; COPPOLA, 2019). Diante deste cenário mutável e imprevisível, torna-se de fundamental importância o mapeamento de regiões sujeitas

aos efeitos e a definição de medidas mitigadoras desses efeitos.

O Atlas Digital de Desastres do Brasil, mantido pela Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC), disponibiliza informações sobre os registros de desastres ocorridos no país desde 1991 (BRASIL, 2023). No sistema, quando aplicados filtros de ocorrências de inundações em território nacional entre os anos de 2015 e 2024 são apresentados:

- 1540 ocorrências;
- 117 óbitos;
- 1,12 milhões de pessoas desabrigadas e desalojadas;
- 6,56 milhões de pessoas afetadas;
- R\$ 5,47 bilhões em danos totais;
- R\$ 24,85 bilhões de prejuízo.

Esses números indicam a magnitude dos impactos das inundações, que não se limitam aos números registrados, visto que os impactos sociais vão muito além do quantificável.

2.3 MEDIDAS DE CONTROLE DAS INUNDAÇÕES

De acordo com Canholi (2015) e Tucci, Porto, Barros (1995) às medidas de controle das inundações, também chamadas de técnicas compensatórias, são classificadas em estruturais e não-estruturais:

- As medidas estruturais envolvem obras de engenharia e são divididas entre intensivas e extensivas.
 - Intensivas são aquelas que englobam canalizações, reservatórios de contenção, barragens, diques, pôlderes, etc.
 - Extensivas são medidas que incluem a distribuição de pequenas contenções ao longo da bacia, aumento da cobertura vegetal e controle de erosão do solo de modo a preservar os rios
- As medidas não-estruturais envolvem a regulamentação do uso do solo, sistemas de alerta e previsão de enchentes, construções à prova de enchentes, incentivos fiscais ao aumento de áreas permeáveis e adoção de sistemas de contenção, contratação de seguros, etc.

A Figura 7 apresenta uma barragem para controle de inundações construída junto ao talvegue do curso d'água. Esse é um exemplo de medida estrutural, cuja função é deter o escoamento durante as chuvas, liberando apenas uma pequena vazão por meio do orifício de

controle. Em casos extremos, o escoamento pode verter sobre a estrutura. Um dos impactos diretos desse tipo de solução é grande região que será inundada.

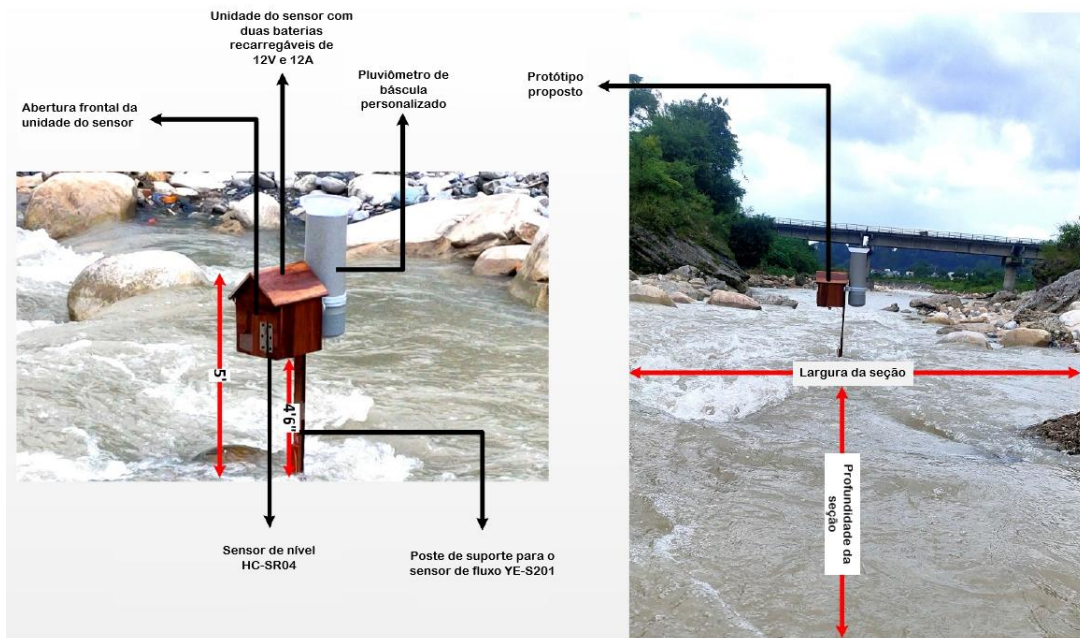
Figura 7 - Barragem em Ribeirão Preto



Fonte: Autor (2024)

A Figura 8 mostra um nó-sensor, parte de um sistema de monitoramento de cheias baseado em IoT e redes de sensores sem fio, o qual é considerado uma medida não-estrutural para o controle de inundações.

Figura 8 – Nó-sensor de uma rede de sensores sem fio



Fonte: Prakash; Barthwal; Acharya (2022)

Uma rede de sensores sem fio contendo um nó-sensor como este e um *gateway*² para enviar os dados para uma plataforma IoT teria um custo de aquisição dos materiais limitado a

²O gateway, ou concentrador, em redes de sensores sem fio, é o mote principal, o qual transmite os dados dos nós-sensores para a plataforma de nuvem IoT.

R\$ 2000,00, conforme demonstra o levantamento realizado na subseção 4.4.6. Aguirre (2017) orçou um sistema similar e chegou em custos relativamente menores na época de sua pesquisa. Conexão à internet e fonte de energia é necessária para o *gateway*, portanto, para evitar custos adicionais, pode-se avaliar a possibilidade de posicionar o *gateway* em uma repartição pública que atenda esses dois requisitos. É desejável uma assinatura de plataforma IoT para programação do sistema, análise, armazenamento e visualização dos dados da rede de sensores sem fio, além de outras funcionalidades adicionais. Em busca na internet foram encontrados planos comerciais/governamentais com mensalidades que variam entre: \$ 42,00 - Plataforma Arduino, \$ 61,66 – Plataforma ThingSpeak e \$ 99,00 - Plataforma Blynk. O custo de montagem e instalação depende da estrutura necessária para posicionamento do nó-sensor e do custo dos serviços prestados por um profissional. Treinamentos podem ser necessários para gerenciamento do sistema.

Já o custo para a implantação de uma barragem de contenção, similar àquela presente na Figura 7, que é uma das 41 intervenções estruturais propostas no Plano de Macrodrenagem da Prefeitura Municipal de Ribeirão Preto em 2015, a Barragem 68.5 (também chamada de Barragem Luzitana), foi estimado em R\$ 36.128.023,07, conforme atualização orçamento realizada na Revisão do Plano Municipal de Saneamento Básico (RIBEIRÃO PRETO, 2024a). A Barragem 68.5 é uma estrutura de detenção que pode armazenar 206.906,54 m³ para redução dos picos de vazão do córrego Ribeirão Preto (RIBEIRÃO PRETO, 2024a). Até o momento da escrita desta dissertação não houve licitação para construção da barragem.

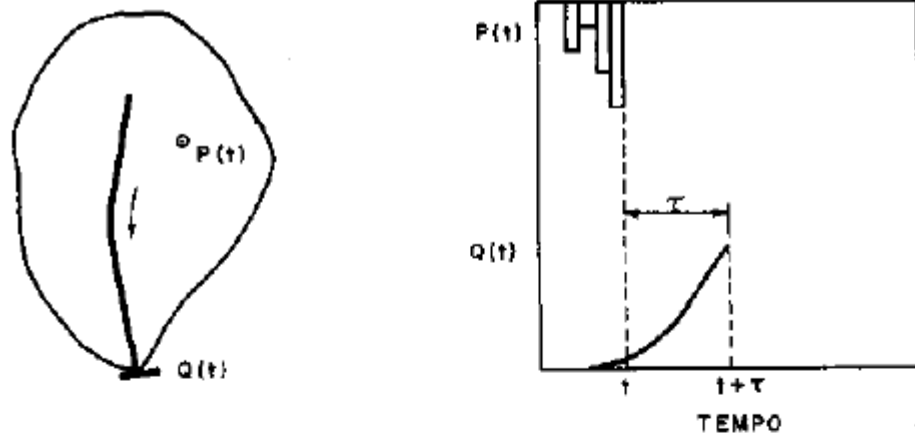
Conclui-se que existe grande discrepância entre os custos de implantação das duas soluções. É importante destacar que as medidas possuem propostas diferentes de controle das inundações: enquanto o sistema de monitoramento auxilia promovendo melhor coexistência com as inundações, a barragem visa promover a diminuição da frequência de ocorrência das inundações. Essas duas medidas não são excludentes, mas sim complementares. Uma rede de sensores sem fio pode, por exemplo, monitorar o funcionamento e segurança de barragens e outros tipos de estruturas de contenção de águas pluviais.

2.3.1 Previsão e alerta de inundações

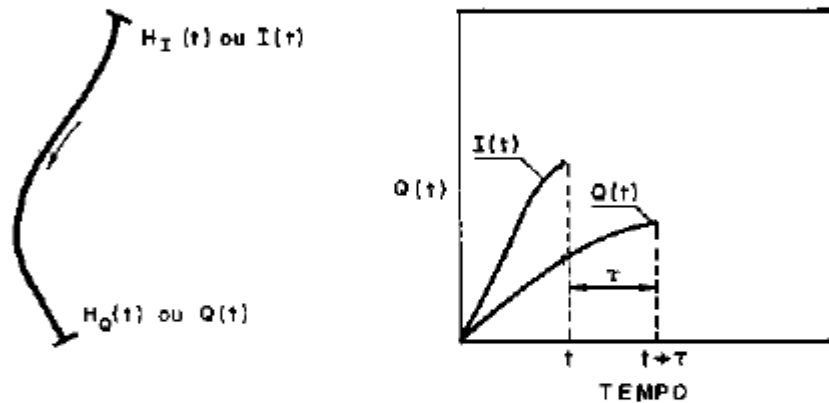
Tucci e Bertoni (2003) destacam três métodos para a previsão do nível de cheia, como mostra a Figura 9, sendo: a) previsão com base na precipitação; (b) previsão com base no nível ou vazão; (c) previsão com base na precipitação ou vazão. A estimativa da cheia é realizada através do uso de modelos matemáticos que simulem o comportamento das diferentes fases do

ciclo hidrológico.

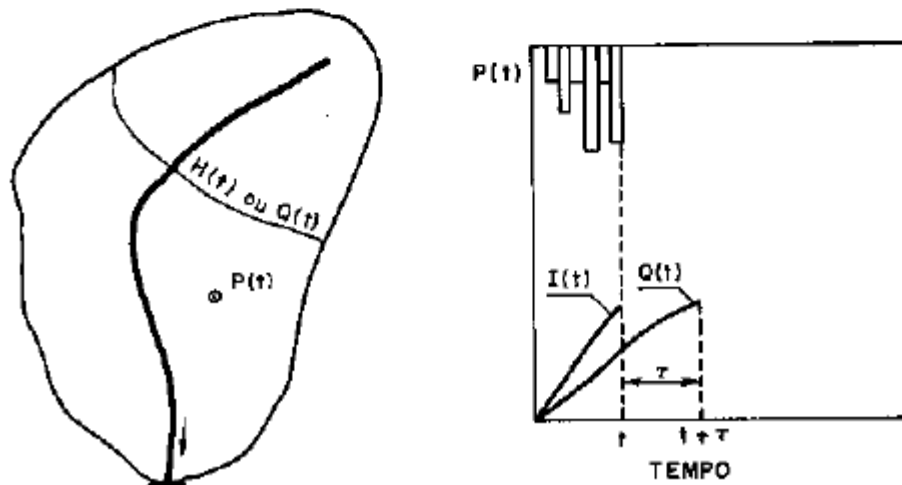
Figura 9 - Tipos de previsão de inundações



a) previsão com base na precipitação



b) previsão com base no nível ou vazão



c) previsão com base na precipitação ou vazão

Fonte: Tucci e Bertoni (2003)

No primeiro caso (Figura 9.a), deve ser obtida a precipitação sobre a bacia por meio de radar, telemetria ou técnica equivalente e posteriormente deve ser efetuado o tratamento

matemático para a transformação em vazão. No segundo caso (Figura 9.b), o tempo de antecedência é menor, e depende do comportamento do escoamento e forma da bacia. Quando houver uma bacia intermediária que apresente uma contribuição relevante, a combinação dos dois processos anteriores pode ser útil na previsão em tempo real (Figura 9.c). As pesquisas indicam o desenvolvimento e aplicação de novos métodos de previsão envolvendo telemetria de outras variáveis meteorológicas e hidrológicas em conjunto com a utilização de *Machine Learning* (Aprendizado de Máquina) para identificação de padrões de ocorrência de inundações (ALJOHANI *et al.*, 2023; ARSHAD *et al.*, 2019; SUBASHINI *et al.*, 2021). Righetto, Moreira, Sales (2009) discutem medidas a serem tomadas pelo Poder Público para prevenção de desastres em cidades vulneráveis:

Cidades cortadas por cursos de água, os quais são sujeitos a grandes variações de vazões em tempos relativamente curtos, tornam-se extremamente vulneráveis aos trágicos eventos de inundação, com prejuízos enormes à economia das propriedades ribeirinhas e, sobretudo, de alto risco de perdas de vidas humanas. Nessas situações, a implementação de um sistema de prevenção e de alerta, a organização e o acionamento de uma instituição de defesa civil tornam-se obrigatórios e imprescindíveis como garantia à vida cidadã da localidade. A existência de áreas ocupadas de alto risco de inundação é da competência do Poder Público municipal e, portanto, é de sua responsabilidade oferecer condições de vida a todas as pessoas estabelecidas em locais aprovados ou permitidos pela administração municipal (RIGHETTO; MOREIRA; SALES, 2009, p. 25).

Um sistema de previsão e alerta visa a antecipação das ocorrências de inundações, dando tempo para o poder público e a população tomarem medidas que possam minimizar os efeitos da inundação (TUCCI; BERTONI, 2003). Este sistema é constituído dos seguintes itens:

- sistema de coleta e transmissão de informações;
- sistema de processamento de informações;
- modelo de previsão de vazões e níveis;
- procedimentos para acompanhamento e transferência de informações para a Defesa Civil e Sociedade;
- planejamento das situações de emergência através Defesa Civil.

Tucci e Bertoni (2003) ainda recomendam a estruturação de três níveis de risco para balizar as ações da Defesa Civil: o nível de acompanhamento, o nível de alerta e o nível de emergência, cada qual contendo seus protocolos específicos. O Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) igualmente classifica eventos geológicos e hidrológicos em três níveis de risco: moderado, alto e muito alto (BRASIL, 2021a). O Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM) que, entre outras atividades, realiza o mapeamento de risco para diversas cidades no país e é responsável pelo monitoramento de cheias e secas em algumas bacias hidrográficas no país, classifica as cotas fluviais em quatro

níveis para a emissão de alertas hidrológicos (BRASIL, 2021a):

- Cota de inundação severa: Cota em que a inundação provoca danos severos ao município;
- Cota de inundação: Cota em que o primeiro dano é observado no município;
- Cota de alerta: Possibilidade elevada de ocorrência de inundação;
- Cota de atenção: Possibilidade moderada de ocorrência de inundação.

O Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional (MIDR), utiliza a Interface de Divulgação de Alertas Públicos (IDAP) para emitir alertas à população por meio da Defesa Civil Nacional. Os alertas podem ser recebidos por qualquer pessoa via SMS (*Short Message Service*, em português Serviço de Mensagens Curtas), *Telegram*, *WhatsApp*, após um breve cadastro (BRASIL, 2021).

A plataforma S2iD (Sistema Integrado de Informações Sobre Desastres) integra diversos produtos da Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil visando qualificar e conferir transparência a gestão de riscos e desastres no país, a qual pode ter aderência dos municípios por meio do cadastro que deve ser realizado pelo responsável indicado pela autoridade municipal (BRASIL, 2021b).

2.4 INTERNET DAS COISAS E CIDADES INTELIGENTES

A presença das TICs na infraestrutura das cidades é um tema recorrente em pesquisas acadêmicas, devido aos benefícios que estas tecnologias podem proporcionar em termos de gestão e gerenciamento dos recursos e serviços públicos (MEIJER; BOLÍVAR, 2016; ZANELLA *et al.*, 2014). Essa recorrência se deve em partes à evolução da infraestrutura de redes de computadores, bem como à popularização dos dispositivos situados no campo da Internet das Coisas (do inglês, *Internet of Things* - IoT). De acordo com Atzori, Iera, Morabito (2010 apud FURQUIM, 2017), o termo *Internet of Things*, introduz uma visão orientada à Internet e à Coisas (*Things*), sendo que esta última remete a itens muito simples, capazes de se conectarem uns com os outros de forma inteligente, com o mínimo de interferência humana, seguindo determinados protocolos de comunicação, de modo a serem combinados em um *framework* comum. Segundo Brasil (2019),

INTERNET DAS COISAS (IoT) é a infraestrutura que interconecta objetos de diferentes usos (coisas) à rede digital para prestar serviços na vida cotidiana, na indústria, nos setores urbanos, etc. Os objetos usam sensores e softwares eletrônicos para coletar e transmitir dados pela internet (BRASIL, 2019).

Na Figura 10 é possível visualizar alguns exemplos de aplicações para diferentes tipos de sensores IoT.

Figura 10 - Exemplos de aplicações em IoT



Fonte: Fialho (2021, p. 64) baseado em Asin e Gascón (2015)

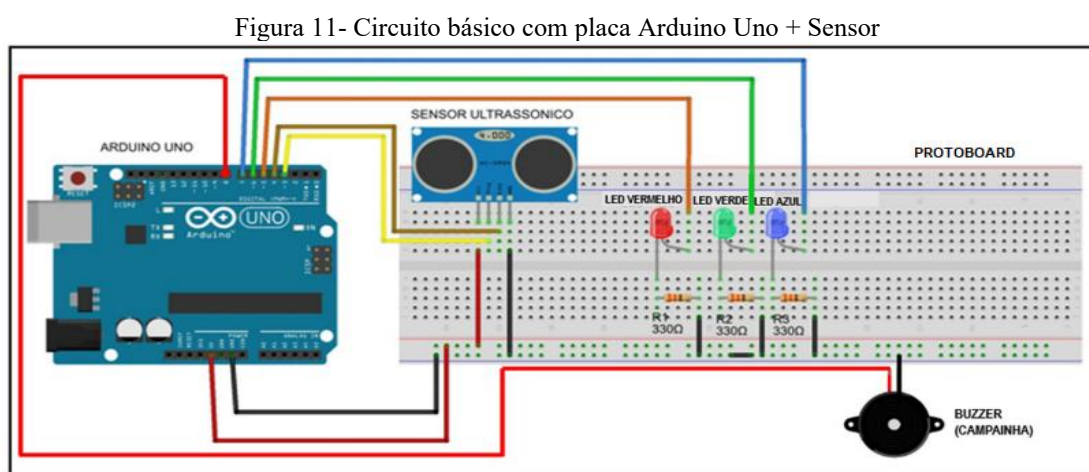
A integração das TICs aos diversos setores do meio urbano potencializa a formação das promissoras *Smart Cities*, que são cidades apoiadas por tecnologia, com objetivo de alcançar o mais alto nível de governança e gestão pública, combinado com elevadas sustentabilidades ambiental, social e financeira (AL KINDHI *et al.*, 2023; BATTY *et al.*, 2012; BRASIL, 2020). Ao redor do mundo estão se formando várias *smart cities*, com a aplicação de IoT em áreas e serviços da cidade, como segurança pública, iluminação pública, controle de tráfego, mobilidade urbana e utilização em equipamentos públicos, otimizando os serviços e reduzindo custos operacionais (KEUNG *et al.*, 2018; MEHMOOD *et al.*, 2017).

Em relação à transformação das cidades em *Smart Cities*, existem múltiplos fatores que influenciam o avanço do processo, variando desde a motivação política, passando pela predisposição do funcionalismo público e até mesmo a participação social (CSUKÁS; BUKOVSKI; REITH, 2020). Ocasões para aplicação de *smart things*³ são bastante variadas, conforme destacado por Rashid e Rehmani (2016) e Zanella *et al.* (2014) e definitivamente podem contribuir para diversos setores do meio urbano.

Diversas condições ambientais, como temperatura, umidade, poluição do ar, intensidade da luz solar e chuva, podem ser constantemente monitoradas, processadas e controladas usando

³ *Smart things* (em português: coisas inteligentes) são objetos que possuem identificação única, capacidade de interação com outros objetos e de executar funções específicas a partir da detecção por meio de sensores de algum parâmetro ou situação específicos pré-estabelecidos (MIORANDI *et al.*, 2012).

uma placa de desenvolvimento⁴ e sensores, que atualmente são considerados itens de baixo custo (ALJOHANI *et al.*, 2023; HASHIM; ADNAN; HUSAIN, 2023). A Figura 11 apresenta um circuito básico com placa de desenvolvimento Arduino⁵ Uno, sensor ultrassônico, *protoboard*, LEDs (*Light-emitting diode*, em português: Diodo Emissor de Luz), resistores e campainha. Esta composição permite captar dados por meio do sensor, interpretá-los por meio de algoritmos pré-estabelecidos e fornecer avisos sonoros e visuais após o tratamento dos dados.



Fonte: Silveira; Barthem e Santos (2018)

Este conjunto possibilita detectar, por exemplo, o nível da água por meio do sensor ultrassônico, que pode aferir distâncias. Os LEDs poderiam, por exemplo, representar os níveis de alerta. Adicionando mais componentes que o permitissem se conectar à *internet* e alimentando-o com energia elétrica, bem como com a devida programação do conjunto e tratamento dos dados, é possível utilizá-lo para compor uma estação para gestão de inundações baseada no nível da água no corpo hídrico, como a solução proposta por Yuliandoko *et al.* (2018).

2.5 MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA

A modelagem hidrológica pode ser realizada por meio de diversos *softwares* de modelagem, e é capaz de representar virtualmente o funcionamento de uma bacia hidrográfica, transformando a precipitação pluviométrica em vazão, ao passo que a modelagem

⁴ Placa de desenvolvimento é uma placa de circuito impresso (PCI), que contém um SoC (*System-on-Chip*, em português Sistema em um Chip), o qual, por conseguinte contém um módulo PoP (*Package-on-Package*), que por sua vez possui memória RAM (PATNAIK PATNAIKUNI; DINKAR, 2017).

⁵ O Arduino é uma plataforma programável de prototipagem eletrônica concebida com o propósito de facilitar a interação física entre o ambiente e o computador por meio do uso de dispositivos eletrônicos, baseando-se em uma abordagem simples e empregando softwares e hardwares livres (ARDUINO, 2021).

hidrodinâmica pode simular o escoamento de rios sob diversas condições (CANHOLI, 2015; PONTES *et al.*, 2015). Canholi (2015) afirma que a modelagem hidrológica e hidrodinâmica tem papel fundamental no gerenciamento da drenagem urbana, possibilitando a avaliação de cenários para o planejamento. Tucci (2005) afirma que modelos hidrológicos e hidrodinâmicos podem contribuir durante a elaboração de um Plano de Bacia, permitindo a avaliação de diferentes soluções e seleção daquela que se apresentar mais viável.

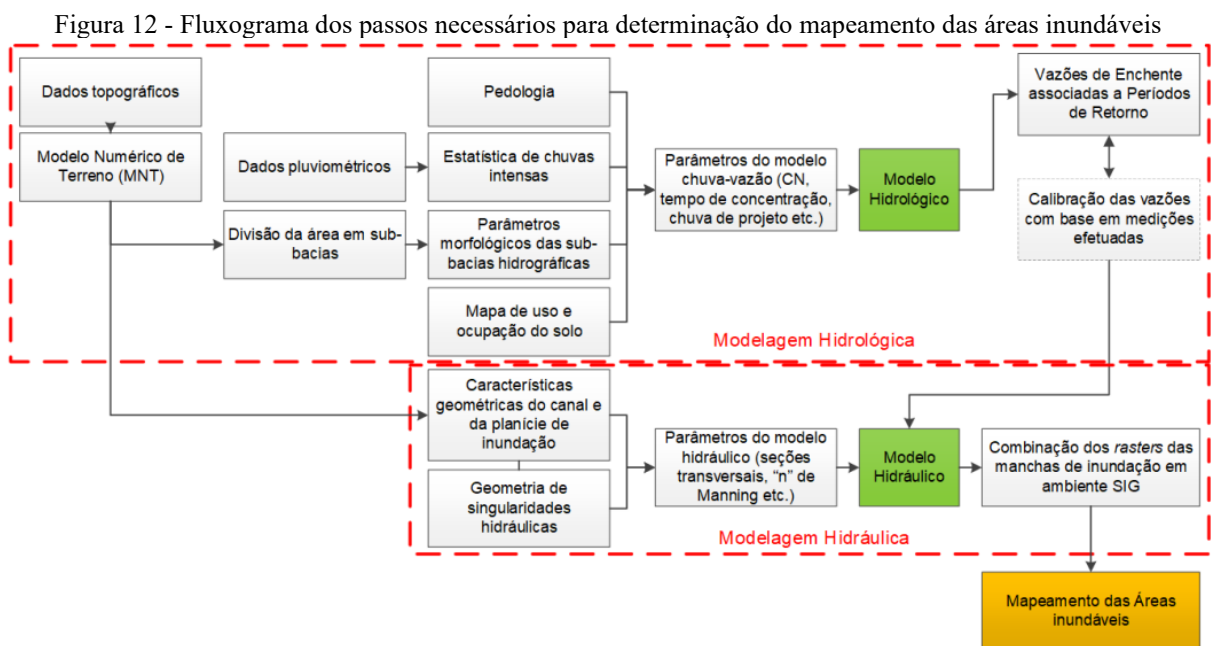
Para a realização de tais modelagens é necessário primeiramente realizar a delimitação da área de estudo, que será composta pela extensão da bacia hidrográfica que contribui para as vazões que escoam nas seções de interesse. Essa delimitação pode ser realizada por meio de ambientes SIG (Sistema de Informações Geográficas), nos quais deve-se realizar a entrada de dados topográficos oriundos de levantamentos realizados com usos de equipamentos diversos, entre eles: Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), dotados ou não de sensores laser/LIDAR, cartas topográficas ou resultantes de missões espaciais, como por exemplo, a SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), levantamento realizado pela NASA, em 2000, com o objetivo de obter um modelo numérico de elevação planetário, com resolução espacial de 30 metros. Após o tratamento dos dados topográficos, gera-se então o Modelo Digital de Elevação (MDE) - denominado também de MNT e MDT, respectivamente “Modelo: Numérico do Terreno e Digital do Terreno” - que abrange a região de estudo, o qual será utilizado nos *softwares* de modelagem (IPT, 2023).

Entre os *softwares* disponíveis para modelagem hidrológica e modelagem hidrodinâmica destacam-se:

- HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System*) e HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center's River Analysis System*), ambos produzidos pelo USACE (*US Army Corps of Engineers*, o Corpo de Engenheiros do Exército Americano), e *softwares freeware*, isto é, de utilização gratuita. O primeiro é utilizado para modelagem hidrodinâmica e o segundo para modelagem hidrológica;
- SWMM (*Storm Water Management Model*) e PCSWMM, que é a versão do SWMM com GIS (*Geographic Information System*, em português SIG - Sistema de Informações Geográficas) integrado. Ambos *softwares* são produzidos pela EPA (*Environmental Protection Agency*, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos), sendo o primeiro *freeware* e o segundo pago. Podem ser utilizados para modelagem hidrológica e hidráulica;
- WMS (*Watershed Modeling System*) e SMS (*Surface-water Modeling System*), ambos

produzidos pela FHWA (*Federal Highway Administration*, a Administração Federal de Autoestradas do Departamento de Transportes dos Estados Unidos) e são pagos. No primeiro é possível realizar modelagens hidrológicas e no segundo modelagens hidrodinâmicas.

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), propôs em 2023 um fluxograma dos passos necessários para a determinação do mapeamento de áreas inundáveis, que engloba as modelagens hidrológica e hidrodinâmica (considerada como hidráulica pelo Instituto) o qual pode ser visualizado na Figura 12.



Fonte: IPT (2023)

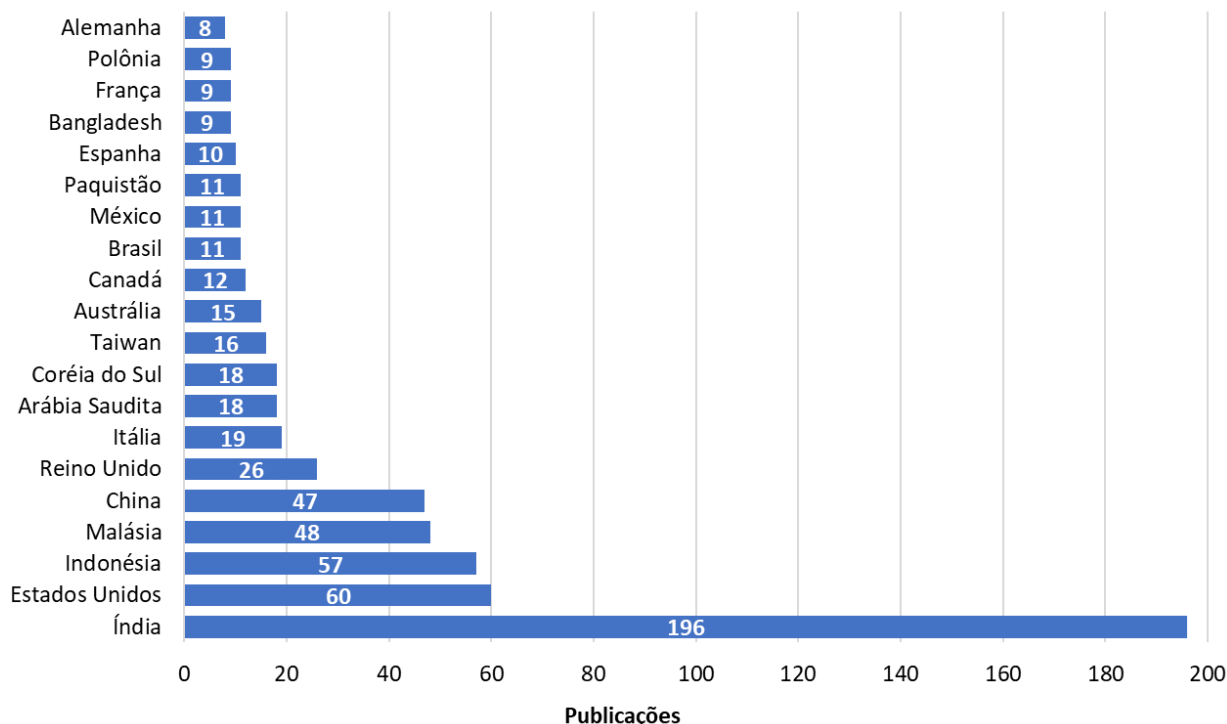
2.6 CENÁRIO ATUAL DAS PESQUISAS

No mundo todo, pesquisas têm sido desenvolvidas visando a integração das TICs à gestão das cidades e prevenção de desastres. Em análise bibliométrica, utilizando a base de dados da *Scopus*⁶, em busca realizada em 1 de abril de 2025, utilizando como *string* de consulta no título, resumo ou palavras-chave do documento as palavras “*flood*”, “*warning*”, “*sensor*”, “*iot*” – incluindo flexões das palavras e sinônimos, excluindo resultados relacionados com agricultura, por meio da exclusão do termo *agric** e sinônimos (relacionados à agricultura), artigos retratados e limitando-se ao período de 2015 até abril de 2025 – foram encontrados 633 documentos, entre artigos científicos, artigos de congresso, capítulos de livros e artigos de

⁶ *Scopus* é uma base de referenciais de resumos e citações da literatura, produzida pela companhia de publicações Elsevier, internacionalmente reconhecida pela comunidade acadêmica.

revisão. Entre os países que mais publicaram a respeito do tema estão Índia e os Estados Unidos, com 196 e 60 publicações respectivamente, conforme mostra o gráfico da Figura 13.

Figura 13 - Quantidade de documentos publicados por país

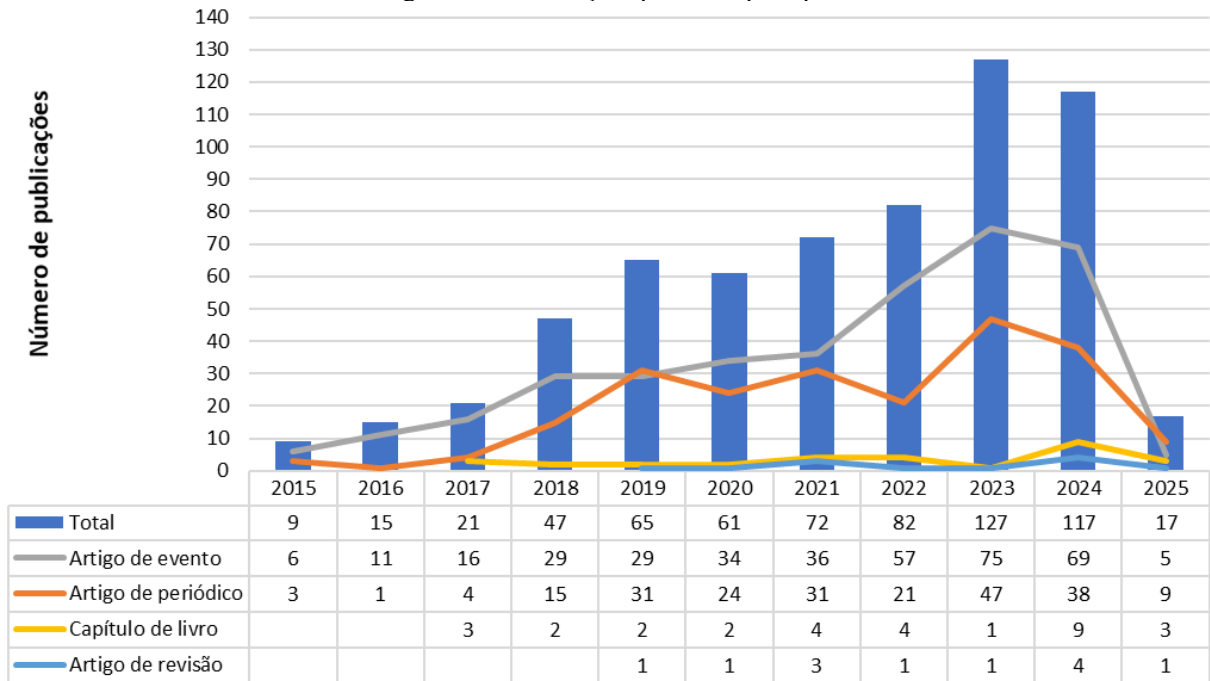


Fonte: Autor (2024)

O número de documentos publicados por cada país, em alguns casos, vai ao encontro da recorrência dos problemas de enchentes e inundações em alguns desses países. É possível correlacionar os dados de ocorrência de inundações presentes no relatório publicado pelo CRED em 2024 (como mostra a Figura 4) e em anos anteriores, bem como outros dados oficiais com a frequência de publicações pelos países no mesmo período.

Antes de 2015, o número de pesquisas envolvendo os termos relacionados na busca era muito baixo. A partir desta data houve um crescimento constante nas publicações sobre o tema até o ano de 2023, com leve queda em 2024. Em 2025, até o mês de abril foram publicados 17 documentos. O gráfico da Figura 14 mostra o número de publicações por ano e por tipo de publicação.

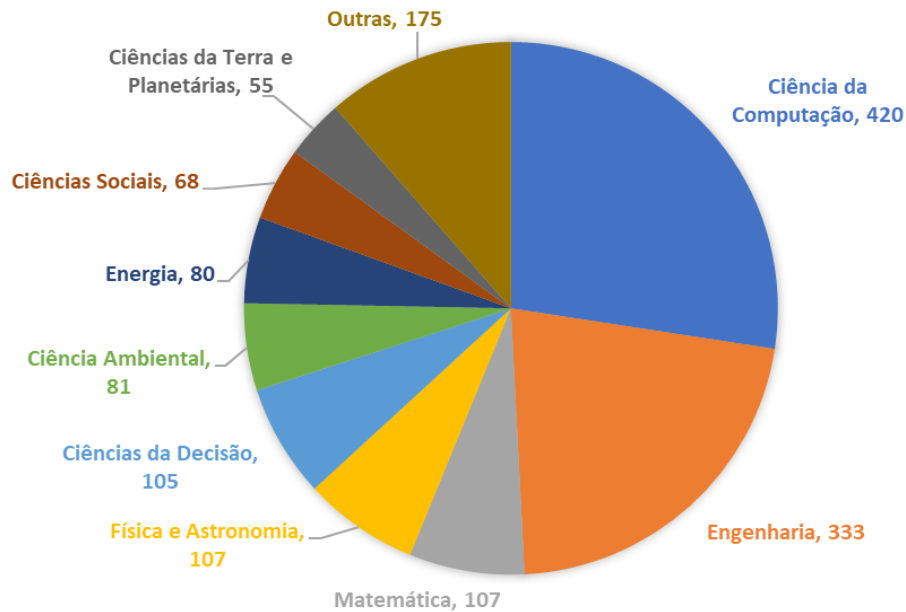
Figura 14 - Publicações por ano e por tipo



Fonte: Autor (2024)

Do total de 633 publicações, grande parte das pesquisas estão associadas às áreas de Engenharia (333) e Ciência da Computação (420), conforme mostra o gráfico da Figura 15. Em “Outras”, estão agrupadas as demais áreas do conhecimento que tem menor relação com os termos da pesquisa. No gráfico uma pesquisa pode estar cumulativamente associada a mais de uma área do conhecimento, o que resultou em um universo de 1531 associações das publicações com as áreas do conhecimento.

Figura 15 - Quantidade de associações de publicações por área



Fonte: Autor (2024)

2.7 SISTEMAS DE ALERTAS DE INUNDAÇÕES

Nesta seção são apresentados alguns dos principais trabalhos relacionados, selecionados da bibliometria, que utilizaram IoT, sistemas microcontrolados e Redes de Sensores Sem Fio (RSSF, em inglês WSN – *Wireless Sensor Network*) para monitoramento, previsão e emissão de alertas de enchentes e inundações.

Pechoto, Ueyama e Pereira (2012) criaram um sistema de alerta de inundações, batizado de *e-Noé*, que é composto de conjuntos com placa embarcada, sensores e câmera, instalados em pontos do curso d'água sujeitos a transbordamento. Os sensores de pressão dos conjuntos detectam alterações na coluna d'água e, em paralelo, as câmeras fotografam o leito do rio, registrando o nível d'água. Os dados são transmitidos entre os conjuntos por meio de uma rede de comunicação sem fio, como *LoRa*, *Bluetooth* ou *Zigbee*⁷, até chegar à estação-base, que tem acesso à internet por meio da rede de telefonia móvel. Da estação-base, os dados são enviados para uma nuvem de dados, na qual é realizado o tratamento dos dados e em seguida são gerados os alertas para a Defesa Civil e a população. Conforme indicam pesquisas posteriores, este sistema foi patenteado pela Universidade de São Paulo (USP) e aprimorado com novas funcionalidades. Vasconcelos (2022), em matéria publicada pela revista Pesquisa da FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), menciona o custo aproximado de R\$ 15 mil para implantação do sistema, o qual já foi implantado em Santa Catarina e seria implantado em Rio Branco, no estado do Acre.

Cardoso (2016) desenvolveu um sistema de comunicação apoiado em Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) para monitoramento do córrego Itaim, em Poá, no estado de São Paulo, denominado *Alerta Poá*. O sistema desenvolvido é capaz de medir os níveis da superfície do córrego, fornecendo alertas com base em quatro classificações de níveis de risco: Estado Normal – até 70% da altura antes da cota de extravasamento; Estado de Atenção – de 71% a 80%; Estado de Alerta – de 81% a 90%; Estado de Emergência – de 91 a 100%; e Estado de Extravasamento – acima de 100%. A plataforma utilizada foi o Rádiumino, a qual pode ser considerada como uma extensão do projeto Arduino, com o objetivo de simplificar a criação de uma RSSF por indivíduos com menor familiaridade com a programação. O kit DK 105 da

⁷ *LoRa* é uma tecnologia de comunicação sem fio de longo alcance, adequada para transmissão de baixo volume de dados, recomendada para dispositivos de *IoT*, sendo que o alcance é da ordem de aproximadamente 5km em área urbana e até 15km em área rural, com poucos obstáculos; *Bluetooth* uma tecnologia de comunicação sem fio de alcance até 100m e com boa capacidade de transferência de dados, sendo capaz de transmitir dados de imagem e som; *Zigbee* tem um alcance similar ao *Bluetooth*, entretanto com uma capacidade de transferência de dados menor.

Radiuino, utilizado pelo pesquisador, é adquirido com o nó-sensor e o *gateway* previamente montados, facilitando a aplicação para a finalidade pretendida. Ao nó-sensor, foi adicionado um sensor de nível para aferir o nível d'água no córrego, o qual foi posicionado em uma distância dentro de um raio de 120 metros do *gateway*. A Figura 17 mostra a arquitetura do sistema proposto por Cardoso (2016), anteriormente definido por Stallings, em 1998, a qual engloba as fases de coleta dos dados, tratamento, armazenamento em banco de dados, gestão por meio de interface e notificação.

Figura 17 - Sistema de alertas proposto por Cardoso

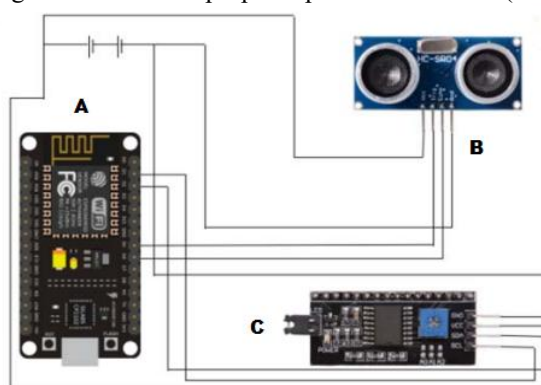


Fonte: Cardoso (2016)

Em seu trabalho, Cardoso (2016) desenvolveu uma página acessível por meio da internet para o monitoramento dos riscos de inundação, além de um aplicativo denominado Alerta Poá, para que a população pudesse acompanhar o nível do curso d'água e a classificação de risco.

Noar e Kamal (2017), desenvolveram um sistema de monitoramento de inundações composto de *hardware* que incluía dois nós. O nó-sensor responsável por aferir o nível d'água, possui os componentes microcontrolador NodeMCU ESP8266 (Figura 18.A), sensor ultrassônico HC-SR04 (Figura 18.B) e um módulo com display LCD (*Liquid Crystal Display*, em português Display de Cristal Líquido) (Figura 18.C).

Figura 18 - Sistema proposto por Noar e Kamal (2017)



Fonte: Noar e Kamal (2017)

O gateway é equipado com os componentes microcontrolador NodeMCU ESP8266, LEDs que representam as três faixas de níveis de alerta e campainha para aviso sonoro no caso de alcance do nível mais crítico. A comunicação entre os nós acontece via comunicação Wi-Fi entre si, que tem alcance máximo de 90 metros em condições ideais ou por meio da internet, neste caso cada um se conecta à uma rede internet por meio do módulo Wi-Fi integrado no microcontrolador e são vinculados por meio de uma Plataforma IoT⁸. O trabalho ainda prevê o envio de dados para uma Plataforma *Low-Code*⁹ chamada *Blynk*, que conta com aplicativo para os sistemas operacionais *IOS* e *Android*, nos quais o usuário pode obter as informações acerca dos níveis d'água e sua atual classificação de risco. Neste trabalho, foi realizado um teste que obteve resultados positivos para a aferição dos níveis e apresentação dos dados e riscos na interface do aplicativo.

Pratama *et al.* (2017) 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.

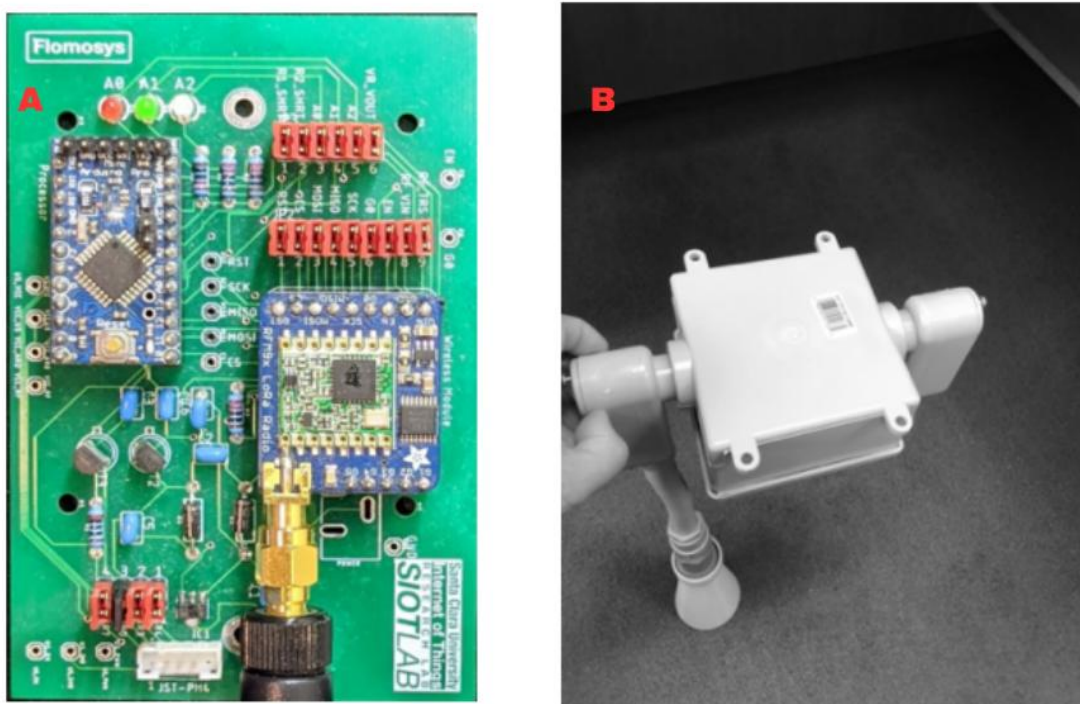
O sistema proposto por Hassan *et al.* (2020) engloba microcontrolador Arduino Uno R3, sensor de umidade e temperatura DHT11, sensor de nível HC-SR04 e módulo GSM SIM900. Os níveis foram agrupados em três classificações: normal, atenção e perigo. As mensagens enviadas pelo serviço de SMS contêm informações sobre o nível d'água, a classificação de risco, a umidade e a temperatura.

Groot e Dezfouli (2020) desenvolveram um sistema embarcado para monitoramento de inundações batizado de *Flomoşys*. 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. A Figura 19.A, à esquerda, apresenta a placa eletrônica com o circuito que interliga os componentes do nó-sensor. Na Figura 19.B, à direita, é apresentado o conjunto com a embalagem protetora do nó-sensor, preparada para ser fixada em pontes para efetuar as medições.

⁸ Plataforma online que permite o gerenciamento de sistemas microcontrolados por meio de programação, armazenamento dos dados gerados pelos nós em nuvem e apresentação das informações em interface gráfica.

⁹ Método facilitado de desenvolvimento de aplicações com programação por meio de interface gráfica, dedicada principalmente para usuários com menor conhecimento em linguagens de programação.

Figura 19 - Flomosys



Fonte: Groot e Dezfouli (2020)

Os autores ainda implementaram melhorias no *hardware* para minimizar o consumo de energia do nó, e com isso diminuir o custo do sistema de geração de energia solar para recarga da bateria. No *software* foram programadas rotinas para diminuir o intervalo entre as medições de acordo com os últimos níveis medidos. Também foi implementado um modo de suspensão para economia de energia.

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. Os autores destacam que o *Flomosys* pode relatar dados continuamente por até 100 dias utilizando uma bateria de 2400 mAh ou, em condições ideais, 2,8 anos com a mesma capacidade de carga da bateria, funcionando no modo de suspensão.

Silva Júnior, Cunha, Souza Júnior (2021) elaboraram um sistema para monitorar o nível d'água de corpos hídricos, batizado de *IOTFlood*, utilizando placas de desenvolvimento da marca Pycom. No nó-sensor, foi utilizada uma placa do modelo LoPy4, que possui suporte ao protocolo de comunicação LoRa, além de outros, a qual também recebeu uma placa de expansão para conexão dos sensores: de pressão do ar e temperatura, sensor de nível ultrassônico, sensor de nível fixo, sensor de chuva, módulo GPS e um banco de energia de

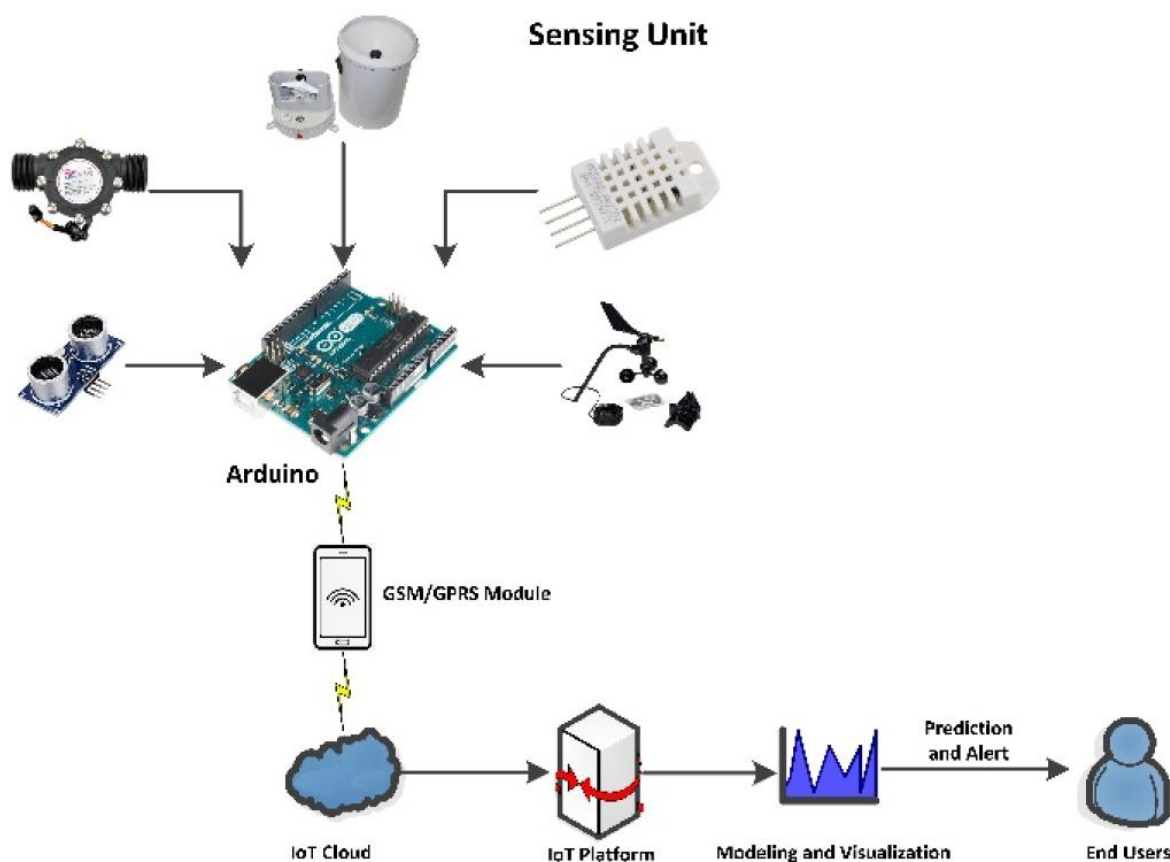
20.000 mAh de capacidade.

No *gateway*, Silva Júnior, Cunha e Souza Júnior (2021) utilizaram o modelo FyPy, que contempla para comunicação, além do protocolo LoRa, o LTE CAT-M1¹⁰ para que o *gateway* pudesse ser ter mobilidade, conectando-se à internet por meio de um cartão SIM (*Subscriber Identity Module*, em português Módulo de Identificação do Assinante), entretanto, em local com disponibilidade de rede Wi-Fi, esta poderia ser utilizada, já que o FyPy pode se conectar a redes Wi-Fi. Por meio da internet, os dados podem ser transmitidos para a nuvem IoT *The Things Network* que foi integrada a plataforma *IoT Cayenne* para que os usuários pudessem visualizar as informações por meio do sítio eletrônico ou aplicativo móvel.

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*, em português, Sistema Global para Comunicações Móveis 2ª Geração/Serviços Gerais de Pacotes por Rádio) para envio dos dados via internet para a nuvem IoT. Na Figura 20 é possível visualizar a arquitetura proposta.

¹⁰ LTE: CAT-M1 (*Long Term Evolution CAT-M1*) é um protocolo de comunicação que se utiliza da infraestrutura das redes de telefonia móvel GPRS (*General Packet Radio Service*), dedicado para dispositivos IoT de baixa potência que opera em uma faixa de frequência de 1,4 MHz. Pode transmitir dados em uma velocidade de até 1 Mbps (1 Megabit por segundo).

Figura 20 - Arquitetura do sistema de alertas FLOODWALL

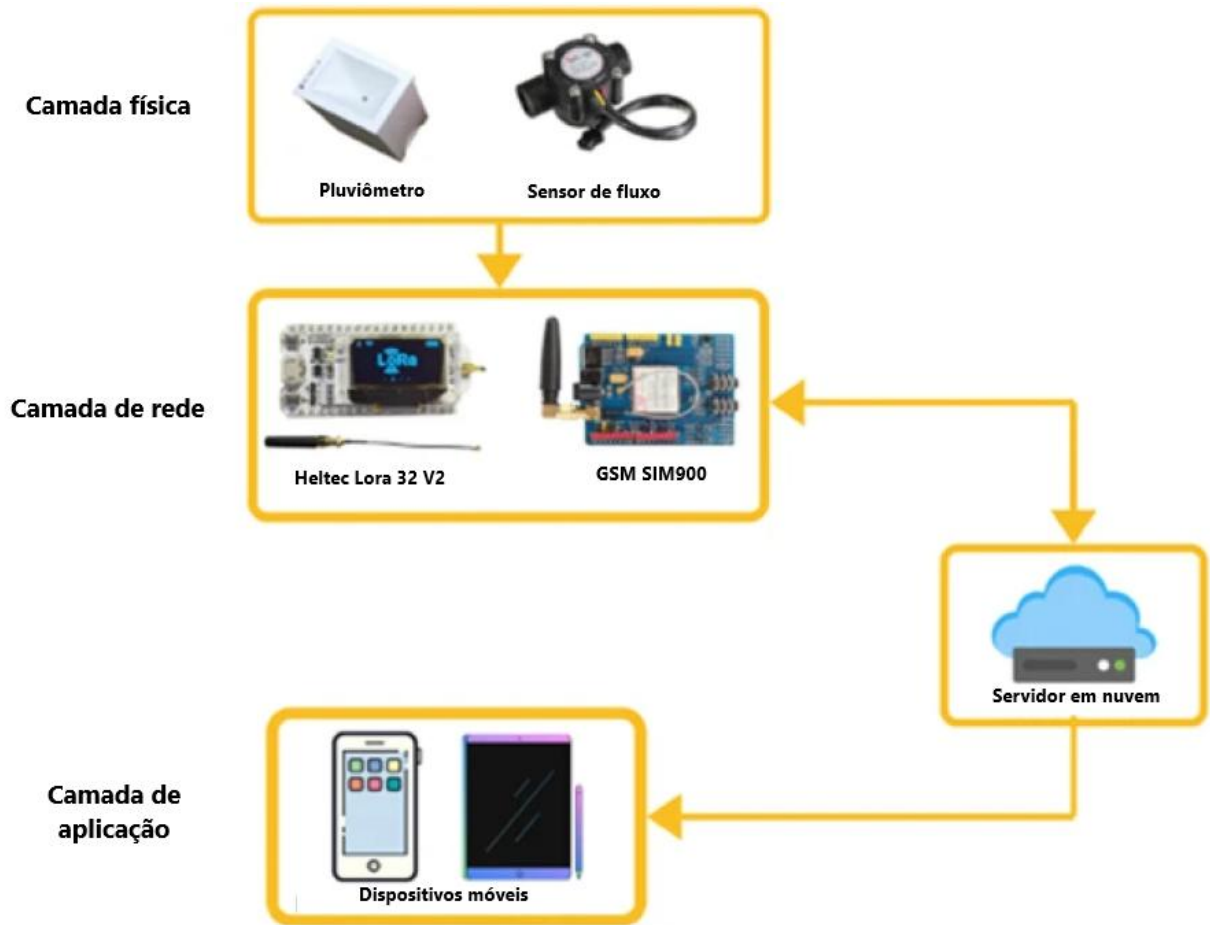


Fonte: Prakash, Barthwal, Acharya (2022)

O sistema ainda prevê a utilização de uma plataforma IoT para tratamento dos dados para que sejam levados por meio de API (*Application Programming Interface*, em português, Interface de Programação de Aplicação) ao aplicativo desenvolvido, mostrando os dados e a classificação de risco (PRAKASH; BARTHWAL; ACHARYA, 2022).

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. A arquitetura do sistema proposto pode ser visualizada na Figura 21. 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.

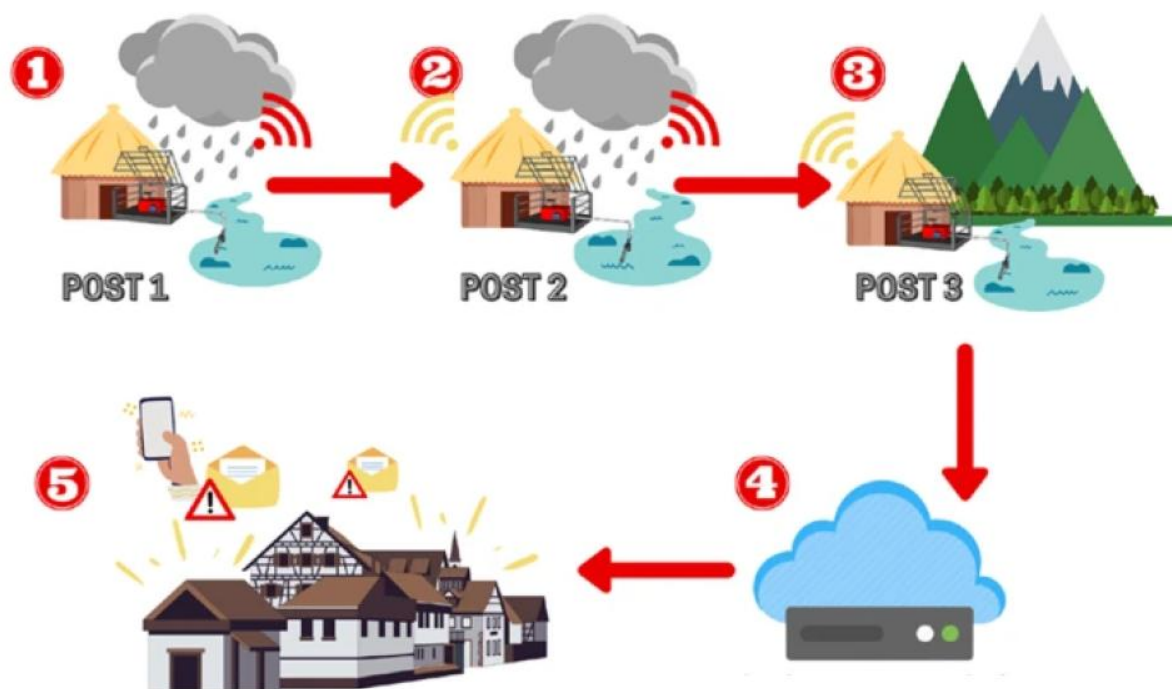
Figura 21 - Camadas do sistema para alerta de inundações bruscas



Fonte: Sung, Devi, Hsiao (2022)

Na Figura 22 é possível identificar o fluxo de funcionamento do sistema em uma vila, na qual existe uma rede de sensores sem fio com dois nós-sensores (1 e 2) e um *gateway* (3) que é o único nó equipado com o módulo GSM/GPRS que possibilita o envio de dados via internet para o servidor (4), além de envio de SMS como alerta (5). Os nós enviam dados entre si até chegar ao *gateway* que envia o dado para o servidor, que por sua vez faz o tratamento e envia os dados para a aplicação (5).

Figura 22 - Funcionamento do sistema



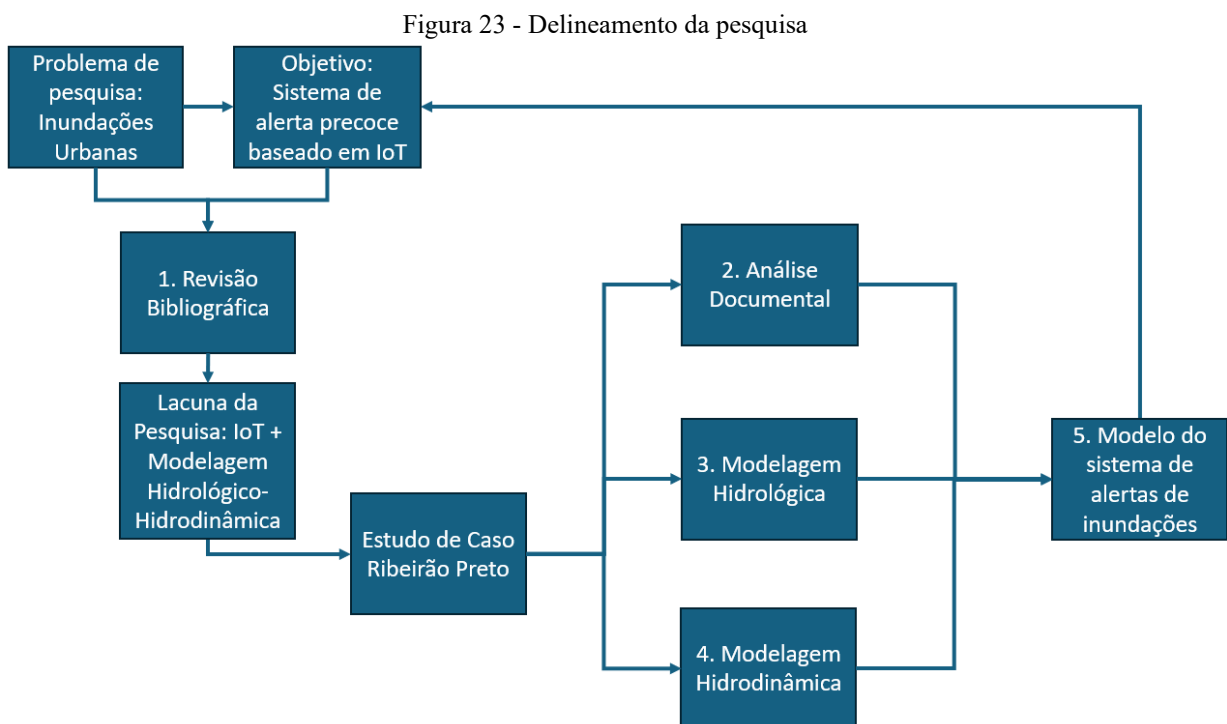
Fonte: Sung, Devi, Hsiao (2022)

Khavita *et al.* (2024) desenvolveram um sistema microcontrolado composto de microcontrolador, módulo GPS, módulo GSM e sensor ultrassônico. O sistema pode aferir o nível d'água do rio e foi configurado para enviar alertas para um destinatário via SMS e via WhatsApp.

Após a revisão, detectou-se que nos trabalhos não foi utilizada modelagem hidrológico-hidrodinâmica para melhor conhecimento das condições de risco para uma implantação mais eficaz da rede de sensores sem fio e estabelecimento de critérios mais assertivos para classificação de risco e emissão dos alertas. Diante disso, este trabalho terá enfoque em preencher essas lacunas, utilizando a cidade de Ribeirão Preto como objeto de estudo para a criação de um modelo de sistema de alertas de inundações em cursos d'água situados em áreas urbanas baseado em soluções de IoT e modelagem hidrológico-hidrodinâmica.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A presente dissertação trata-se de uma pesquisa exploratória, a qual seguirá a estratégia de pesquisa de Estudo de Caso e terá caráter qualitativo. O objeto de investigação será o município de Ribeirão Preto, o qual tem sua área urbana quase inteiramente situada na bacia hidrográfica do curso d'água homônimo. A progressão da urbanização no entorno do córrego não aconteceu de maneira apropriada, resultando em inundações frequentes em diversos pontos ao longo do talvegue do córrego, as quais afetam a infraestrutura urbana, equipamentos públicos e moradias. Uma das formas de conviver com essas inundações é adotando um sistema de previsão e emissão de alertas de inundações, para isso um modelo de alertas de inundações baseado em soluções de IoT e modelagem hidrológico-hidrodinâmica foi desenvolvido conforme descrito neste capítulo. A Figura 23 apresenta o delineamento da pesquisa.



Fonte: Autor (2024)

O Quadro 1 apresenta uma síntese do método, contendo as etapas, os métodos de coleta e geração de dados e seus respectivos resultados.

Quadro 1 – Síntese do método

| Etapas | Métodos de coleta e geração de dados | Resultados obtidos |
|--------------------------|---|--|
| 1. Revisão bibliográfica | <ul style="list-style-type: none"> - Apresentação de conceitos e contextualização das inundações urbanas e da Internet das Coisas; - Consulta aos trabalhos acadêmicos para selecionar o método de modelagem hidrológica e modelagem hidrodinâmica; - Consulta aos trabalhos acadêmicos para selecionar as alternativas mais adequadas para comporem o modelo; - Consulta aos trabalhos acadêmicos para conhecer proposições de classificações de risco de inundações e respostas aos eventos de chuvas extremas. - Levantamento do estado da arte na base de dados <i>Scopus</i>, na Biblioteca Digital Brasileira de Teses, Dissertações (BDTD) e no Observatório da pós-graduação da Plataforma Sucupira, mantida pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). | <ul style="list-style-type: none"> - Discussão sobre os conceitos e impactos das inundações no Brasil e no mundo; - Definição dos <i>softwares</i> HEC-HMS e HEC-RAS para realização das modelagens hidrológica e hidrodinâmica respectivamente; - Conhecimento dos protocolos de comunicação e tecnologias mais eficientes para compor o modelo, além de tecnologias novas e promissoras para o monitoramento, processamento de dados e emissão de alertas; - Conhecimento dos principais desafios na área de gestão de desastres e de novas propostas. - Identificação da lacuna da pesquisa: as publicações visitadas não englobam a modelagem hidrológico-hidrodinâmica para conhecimento dos eventos pluviométricos de risco e planejamento da resposta. |
| 2. Análise documental | <ul style="list-style-type: none"> - Busca de equação IDF¹¹, dados de estações meteorológicas e/ou dados de precipitação históricos de eventos que causaram inundações no município, mapas temáticos do município/bacia hidrográfica, parâmetros e métodos de cálculo para realização da modelagem hidrológica; - Busca do MDE (Modelo Digital de Elevação) apropriado para realização das modelagens hidrológicas e hidrodinâmicas; - Consulta ao mercado para determinar os itens mais viáveis para compor o modelo. - Consulta aos documentos oficiais de Planos de Contingência e guias de resposta aos riscos das inundações para criação de uma classificação de risco para subsidiar a gestão dos eventos; | <ul style="list-style-type: none"> - Definição da equação IDF e do método de cálculo para realização da modelagem hidrológica; - Obtenção dos mapas temáticos em fontes oficiais; - Seleção do MDE disponibilizado pelo ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico) para realização da modelagem hidrológica; - Obtenção do levantamento aerofotogramétrico do município (maior resolução) para realização da modelagem hidrodinâmica com maior precisão; - Obtenção de levantamento topográfico com seções topobatimétricas do Ribeirão Preto; - Definição das tecnologias mais adequadas para os componentes físicos do sistema de alertas; - Definição das plataformas IoT mais viáveis para o modelo; - Definição dos níveis de classificação de risco de inundação. |

¹¹ Equação IDF (Intensidade-Duração-Frequência) são equações de chuvas intensas, definidas por meio da utilização de séries históricas das maiores chuvas ocorridas em um período longo e representativo dos eventos pluviométricos extremos (PINTO, 2013). A partir dessas equações, utilizando o tempo de duração e o tempo de retorno da chuva do risco para o qual se pretende dimensionar ou verificar infraestruturas de drenagem, é possível obter a respectiva intensidade pluviométrica.

| Etapas | Métodos de coleta e geração de dados | Resultados obtidos |
|--|--|--|
| 3. Modelagem hidrológica | - Tratamento e processamento do MDE disponibilizado pela ANA no <i>software</i> QGIS e posterior modelagem hidrológica por meio do HEC-HMS. | - Criação de modelo hidrológico para obter os hidrogramas de vazões em diferentes pontos de interesse da pesquisa para encontrar alturas pluviométricas que causam inundação; - Definição dos locais posicionamento de próximos aos locais de inundação e nós-sensores meteorológicos nas sub-bacias; |
| 4. Modelagem hidrodinâmica | - Geração do MDE por meio das curvas de nível disponibilizadas pelo município, as quais são parte do levantamento aerofotogramétrico do município; - Geração do MDE das seções topobatimétricas por meio dos pontos cotados de um levantamento topográfico presente em um dos projetos executivos que faz parte do Plano de Macrodrenagem do município. - Modelagem hidrodinâmica por meio do HEC-RAS com utilização dos hidrogramas gerados no HEC-HMS, após a junção dos dois MDEs no QGIS; | Criação do modelo hidrodinâmico para simular o escoamento no Ribeirão Preto, utilizando diversos hidrogramas de vazão, a fim de identificar quando acontecem as inundações, as áreas afetadas e, por fim, definição do posicionamento ideal de nós-sensores hidrológicos em regiões vulneráveis. |
| 5. Desenvolvimento do Modelo de Sistema de Alertas de Inundações | - Reunião dos componentes físicos do sistema com base nos esquemas de ligação fornecidos por fabricantes e presentes em manuais técnicos; - Escrita dos códigos-fonte para <i>upload</i> nas placas de desenvolvimento dos nós-sensores para os testes; - Testes dos sensores; - Testes da comunicação via LoRaWAN; - Escrita dos códigos-fonte dos nós-sensores com todos itens incluídos; - Testes finais e depuração dos códigos-fonte; - Sugestão de plataformas IoT e congêneres para utilização no sistema; - Proposição de classificação de risco para enquadramento em categoria de risco quanto aos níveis do córrego captados pelo nó-sensor hidrológico. | Conclusão da criação do Modelo de Sistema de Alertas de Inundações. |

Fonte: Autor (2025)

3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ANÁLISE DOCUMENTAL

A fundamentação teórica foi materializada por meio de revisão bibliográfica de fontes relacionadas ao tema de pesquisa, como artigos, dissertações, teses, documentos oficiais (leis e planos), e levantamentos (de órgãos oficiais e da imprensa), a maior parte deles disponível em bases de dados científicos e repositórios acadêmicos.

Para o levantamento do estado da arte da pesquisa, foram priorizadas as fontes que estabelecem o mínimo de relação entre inundação, alerta/aviso, cidades inteligentes e Internet das Coisas. A busca de publicações foi realizada na base de dados *Scopus*, conforme apresentado na seção 2.6, na Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) e no Observatório da pós-graduação da Plataforma Sucupira, mantida pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

A análise documental foi realizada por meio de planos, manuais técnicos, guias, mapas, *data sheets*¹², publicações oficiais, notícias e acessos em sites de plataformas IoT e de computação em nuvem.

A partir de todo levantamento realizado, foram selecionadas as tecnologias mais adequadas e viáveis, no momento desta pesquisa, para compor as partes constituintes do sistema. Durante definição dos componentes foi considerada a aplicabilidade e o custo, depois, como critério de desempate foram escolhidos aqueles que apresentaram resultados mais satisfatórios nas pesquisas. O modelo foi desenvolvido com os seguintes parâmetros gerais:

- Tecnologias e sensores de baixo custo;
- Infraestrutura de aplicação simples e de baixa complexidade;
- Baixo consumo energético;
- Melhores resultados em pesquisas e aplicações.

As plataformas para recebimento, tratamento e armazenamento dos dados foram sugeridas com base na quantidade de dados que serão transmitidos, funcionalidades disponibilizadas e simplicidade de implantação e utilização.

3.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA E MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A modelagem hidrológica foi realizada por meio do *software* HEC-HMS, versão 4.12, disponível gratuitamente. Foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) disponibilizado pelo ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico) (ANA, 2024b) para modelagem da bacia hidrográfica do córrego Ribeirão Preto, o qual possui resolução espacial de 30 metros. A modelagem foi realizada utilizando o método de transformação chuva-vazão SCS Hidrograma Unitário¹³ (USDA-NRCS, 1986). Os dados pluviométricos (com medições

¹² Fichas de dados que contêm as especificações técnicas de produtos eletrônicos.

¹³ Método de transformação da chuva unitária em vazão proposto em 1986 pelo SCS (*Soil Conservation Service*), atualmente denominado *Natural Resources Conservation Service* (NRCS), do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA). O método também é conhecido por outras denominações, como: Método de *Curve Number* ou Método SCS (CN/SCS).

consolidadas em períodos de 15 minutos) e os dados de *curve number* (CN) com resolução de 30 metros foram obtidos no Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) mantido pela ANA (ANA, 2024c).

Com base nos hidrogramas de vazões gerados a partir da modelagem hidrológica, foi realizada a modelagem hidrodinâmica 1D, utilizando-se software HEC-RAS, versão 6.5. A modelagem unidimensional foi escolhida devido ao número de pesquisas e materiais instrucionais ser superior à modelagem bidimensional. Além disso, foi empregado levantamento aerofotogramétrico do município e levantamento topográfico que contém pontos de seções topobatimétricas do Ribeirão Preto, parte de um dos projetos executivos do Plano de Macrodrenagem (RIBEIRÃO PRETO, 2015c). Adicionalmente, utilizou-se o *software* QGIS, versão 3.34.7, para manipulação dos elementos desses levantamentos, possibilitando a geração do Modelo Digital de Elevação (MDE) ao longo do talvegue do curso d'água, com resolução de 50 centímetros, mais preciso e adequado para a referida modelagem hidrodinâmica.

3.3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DO SISTEMA DE ALERTAS DE INUNDAÇÕES

O desenvolvimento do modelo integrou as etapas anteriores, reunindo todos componentes dos nós-sensores, *gateways* e a plataforma IoT, avançando em:

- Proposição de posicionamento dos nós-sensores com base na bibliografia e nos resultados das modelagens.
- Escrita de códigos-fonte para testes dos sensores e módulos;
- Testes de alcance da comunicação LoRaWAN;
- Montagem do *hardware* dos nós-sensores com todos módulos e sensores;
- Definições de mecanismos para suspensão de medições e economia de energia;
- Definição de mecanismos para verificação da integridade do nó-sensor meteorológico;
- Escrita de códigos-fonte para testes dos nós-sensores com todos itens instalados;
- Testes finais com depuração dos códigos-fonte;
- Proposição de plataformas IoT e congêneres para tratamento dos dados e emissão dos alertas;
- Proposição dos níveis de risco com base em recomendações de órgãos do governo, destacados no Guia prático de utilização de alertas do Governo Federal para ações de preparação para desastres (BRASIL, 2021a), na bibliografia e nos Planos de Contingência de órgãos de Defesa Civil.

4 RESULTADOS

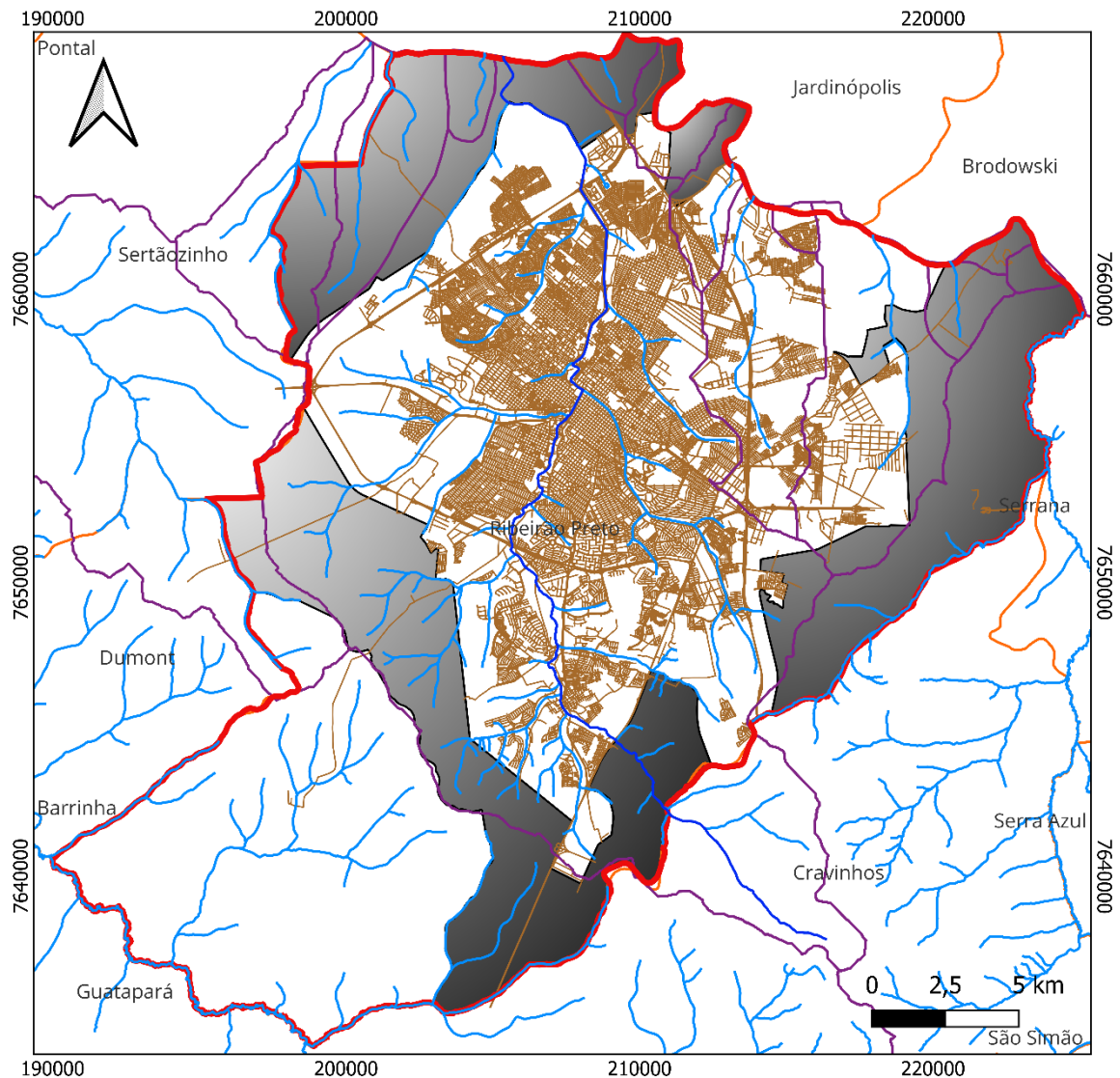
Neste capítulo serão apresentados os resultados alcançados neste trabalho e a discussão com outras pesquisas. Será apresentado o objeto de estudo, a realização das modelagens hidrológica e hidrodinâmica, a composição física dos nós-sensores e *gateways*, os custos, os testes de funcionamento e a proposição de classificação de riscos.

4.1 OBJETO DE ESTUDO

Ribeirão Preto é um município paulista localizado na região nordeste do estado, a 319 km da capital, ocupa uma área de 650,9 km² e conta com uma população de 698.642 habitantes, conforme o censo demográfico (IBGE, 2022). A cidade possui internamente ao seu perímetro urbano 294 km² e sua área de expansão urbana corresponde a 203 km², conforme última atualização da Lei Complementar no 3.175/2023, que trata do Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo (RIBEIRÃO PRETO, 2023). Possui clima tropical, com verão chuvoso e inverno seco, o que o enquadra na classificação climática Aw de Köppen-Geiger (RIBEIRÃO PRETO, 2024b). A precipitação anual média é de aproximadamente 1500 mm (PINTO *et al.*, 2011). Estas são características climáticas comuns aos locais onde ocorrem inundações frequentes ao redor do mundo (AL KINDHI *et al.*, 2023).

A Figura 24 traz um mapa do município contendo os limites do perímetro urbano e da zona de expansão urbana. A partir da hidrografia é possível notar que quase a totalidade da área urbanizada está situada dentro da bacia hidrográfica de um único curso d'água que corta a cidade, o qual, por ter dado origem ao nome desta, também é chamado de Ribeirão Preto, destacado na cor azul marinho. A bacia hidrográfica desse curso hídrico possui aproximadamente 342 km² de extensão.

Figura 24 - Mapa do município de Ribeirão Preto



Legenda

- Córrego Ribeirão Preto
- Hidrografia
- Logradouros
- Expansão Urbana
- Limite Ribeirão Preto
- Principais Bacias
- Limites Municipais
- Limites Estaduais

Projeção UTM Zona 23K

Datum: SIRGAS 2000



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Ribeirão Preto (2023)

A cidade encontra-se em uma das regiões mais desenvolvidas do Estado de São Paulo, oferecendo elevado padrão de qualidade de vida, comprovado pelos indicadores de renda, consumo e longevidade, além de possuir bons indicadores sociais, como os de saúde, educação e saneamento (RIBEIRÃO PRETO, 2024b), destacando-se o alto Índice de Desenvolvimento

Humano Municipal (IDHM) de 0,800 (IBGE, 2010). Dito isso, a cidade atualmente é caracterizada pelo intenso processo de urbanização e alteração da estrutura natural de suporte aos corpos hídricos situados no meio urbano (RIBEIRÃO PRETO, 2024b). Vale destacar que os empreendimentos que datam de época mais antiga, possuem alto grau de impermeabilização e precária solução de manejo das águas pluviais, contribuindo com a manifestação de inundações frequentes (RIBEIRÃO PRETO, 2024a).

Durante o período chuvoso, os noticiários regionais trazem diariamente matérias citando inundações e alagamentos na cidade, acompanhadas de diversos prejuízos sociais que muitas vezes poderiam ter sido atenuados com a presença de um sistema de monitoramento em tempo real, o qual permitisse que a Defesa Civil Municipal alertasse a população com antecedência para que as ações fossem tomadas em favor da redução dos impactos negativos. A Figura 25 mostra a inundação do curso d'água Ribeirão Preto, na Av. Eduardo Andréia Matarazzo no dia 26 de dezembro de 2022 após chover 65 milímetros entre as 02:00 e 07:00 (EPTV, 2022).

Figura 25 - Inundação do Ribeirão Preto



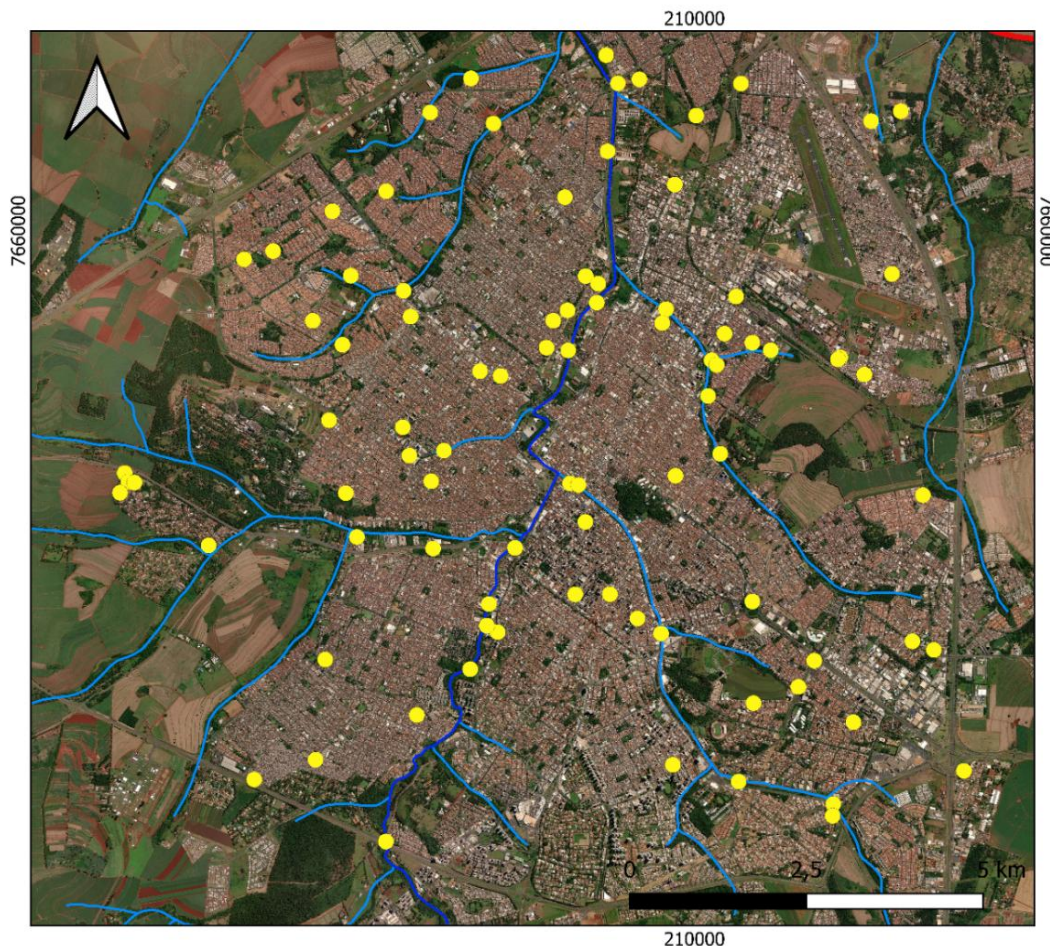
Fonte: EPTV (2022)

Desde 2009 a cidade conta com uma Coordenadoria Municipal de Proteção e Defesa Civil (COMPDEC), que toma diversas ações com vistas à prevenção e redução de danos provenientes de desastres ocasionados por eventos naturais. O órgão, em seu Plano de Contingência de Proteção e Defesa Civil (PCPDC), elaborado em 2022, destacou 46 locais sujeitos a inundações ou alagamentos na área urbana (RIBEIRÃO PRETO, 2022). Na Revisão do Plano Municipal de Saneamento Básico, foram destacados 100 pontos de áreas alagáveis, inundáveis e suscetíveis a enxurradas na cidade, incluindo também aqueles pontos que foram destacados pela COMPDEC em 2022 (RIBEIRÃO PRETO, 2024a). Dos 100 pontos, 15 são

classificados como inundações e, desses, 11 foram considerados com classificação de risco muito alta, a de mais alto risco dentro das classificações presentes no documento (RIBEIRÃO PRETO, 2024a).

O mapa da Figura 26, mostra vários dos pontos destacados na Revisão do Plano Municipal de Saneamento Básico. Aqueles mais próximos da hidrografia se referem às inundações. Os demais pontos são locais de alagamentos ou enxurradas, decorrentes de microdrenagem (sarjetas, bocas de lobo, galerias e outros elementos que conduzem o escoamento pluvial para o curso d'água) insuficiente e/ou falta de amortização do escoamento por meio de estruturas de contenção à montante.

Figura 26 - Áreas sujeitas a inundação ou com microdrenagem deficitária



Legenda

- Drenagem deficitária
- Córrego Ribeirão Preto
- Hidrografia
- Limite de Ribeirão Preto

Projeção UTM Zona 23K

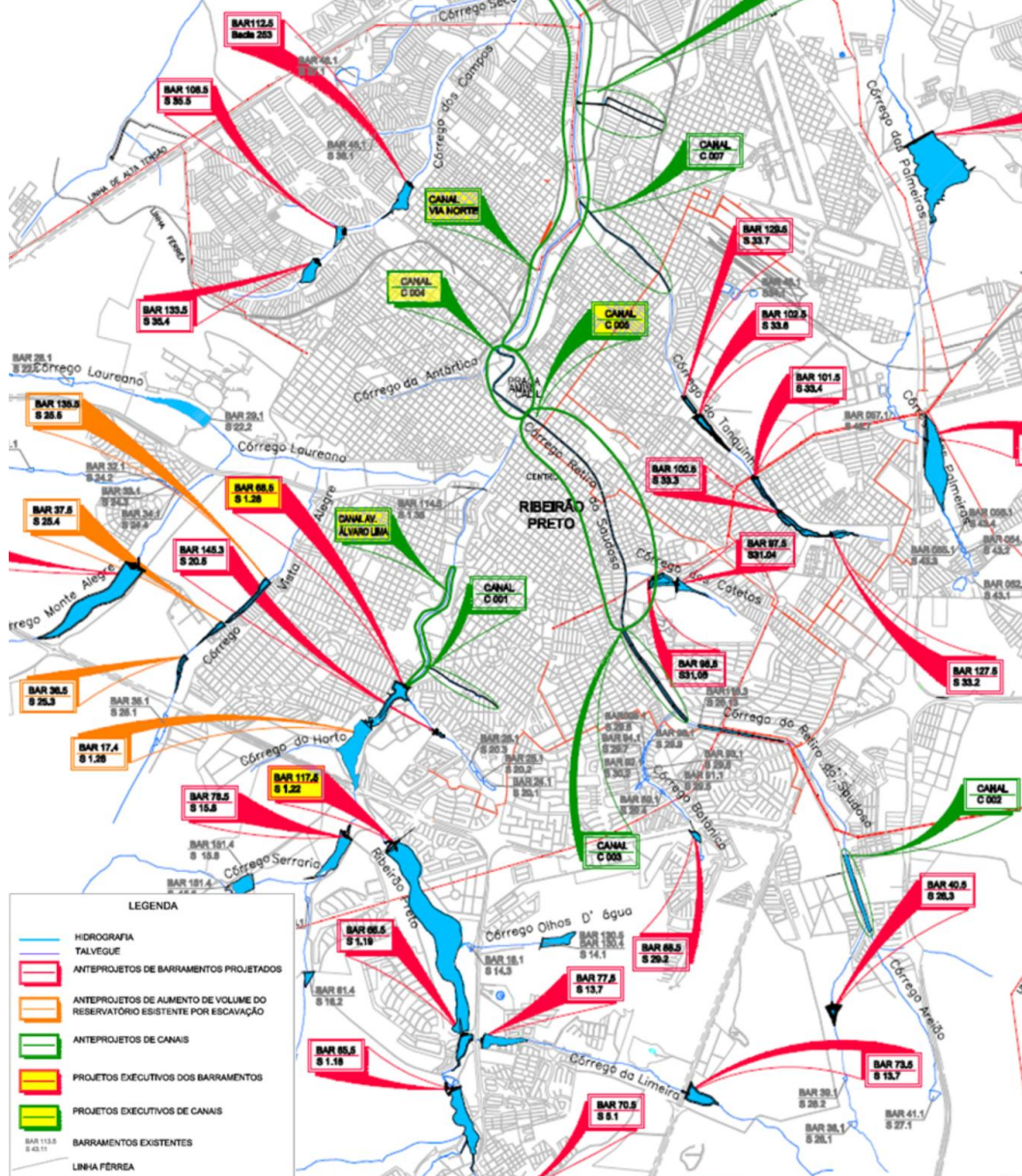
Datum: SIRGAS 2000

Fonte: Elaborado pelo autor. Imagem de ESRI (2023) e dados de Ribeirão Preto (2024a)

A cidade possui um Plano Diretor de Macrodrenagem de Ribeirão Preto, no qual são propostas medidas estruturais para o controle das inundações ao longo do Ribeirão Preto e seus

afluentes, divididas entre canalizações e barramentos. A Figura 27 apresenta parte do mapa de localização das intervenções propostas. Tais medidas totalizam 43 intervenções, sendo que 7 possuem projetos executivos (destacadas na cor amarela) e as demais apenas anteprojetos. Os projetos executivos somam um investimento de R\$ 394.323.897,06 para realização das obras, em orçamentos realizados entre setembro de 2014 e novembro de 2015 pela empresa contratada por meio de planilhas de custos oficiais (RIBEIRÃO PRETO, 2015c). Esses valores, quando atualizados pelo INCC (Índice Nacional de Custos da Construção), resultam em aproximadamente 700 milhões de reais, para materialização de apenas 7 das 43 intervenções. Já o total estimado atualizado para todas intervenções é de quase R\$ 1,5 bilhões.

Figura 27 - Barragens e canais propostos no Plano Diretor de Macrodrenagem



Fonte: Mapa de localização de barragens e canais. Anexo da Revisão do Plano Municipal de Saneamento Básico (RIBEIRÃO PRETO, 2015a)

A Secretaria de Planejamento e Gestão Pública da Prefeitura de Ribeirão Preto realizou um *workshop* em 2018, denominado *Workshop Smart City Ribeirão Preto*, para mostrar o panorama da cidade no que diz respeito às cidades inteligentes, bem como elencar os avanços em andamento e projetos futuros (RIBEIRÃO PRETO, 2018). No documento presente no sítio eletrônico da Prefeitura, consta como um objetivo futuro, entre outros, o sistema de alerta contra inundações, evidenciando que existe preocupação do governo com a solução para o problema, e que a referida solução está relacionada com a presente pesquisa.

4.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA E MODELAGEM HIDRODINÂMICA

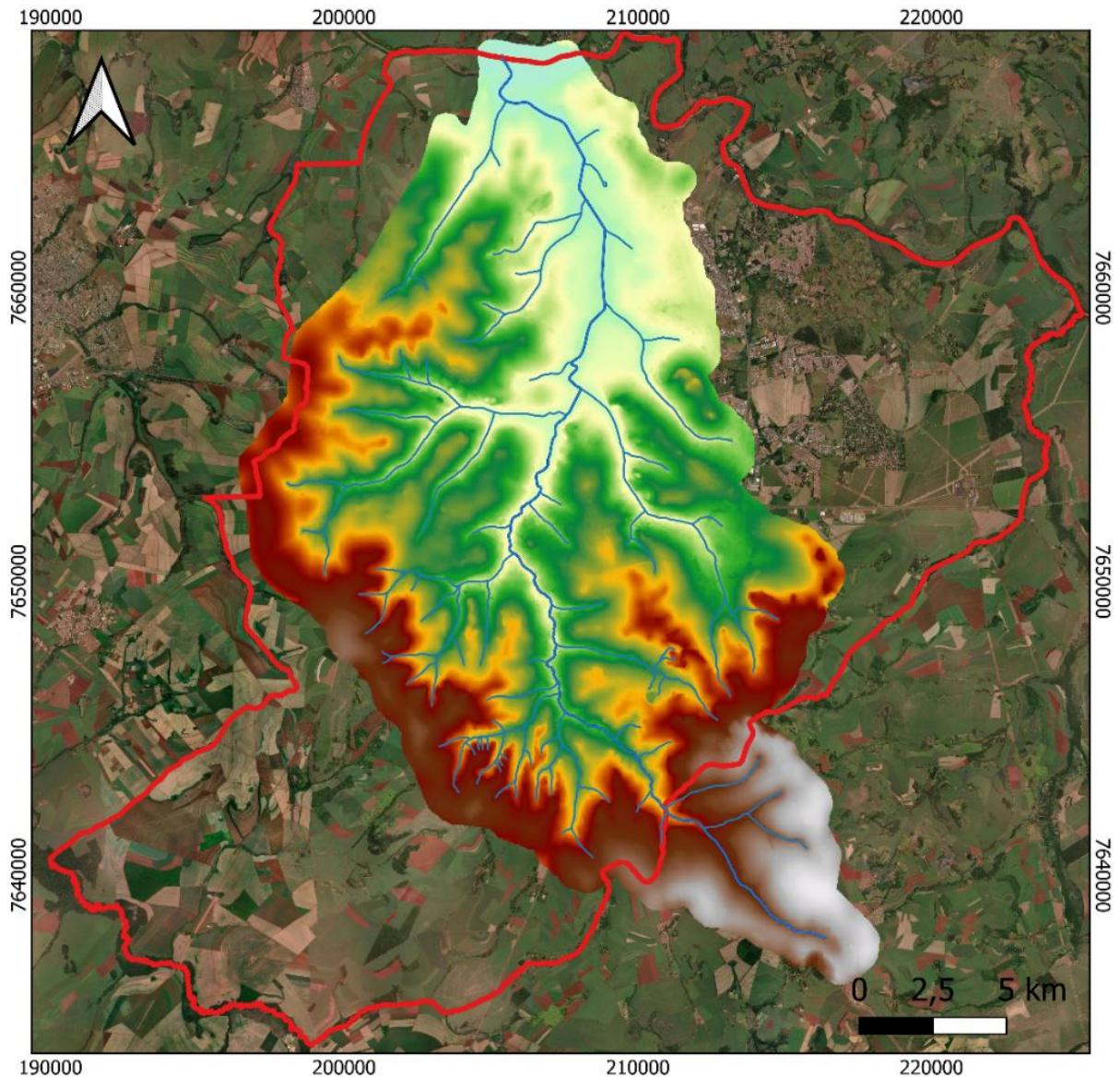
A modelagem hidrológica e a modelagem hidrodinâmica permitiram a identificação das áreas inundáveis para um determinado evento pluviométrico e quanto tempo após a acumulação da chuva suficiente para causar inundação a onda de cheia chegará aos locais de risco. Os resultados das modelagens estão descritos abaixo.

4.2.1 Modelagem Hidrológica

Antes da modelagem hidrológica foi necessário buscar um Modelo Digital de Elevação (MDE) que pudesse replicar o terreno da bacia hidrográfica do córrego Ribeirão Preto. Desta forma, optou-se pela utilização do modelo digital de elevação ANADEM¹⁴, recortado por meio do polígono da bacia hidrográfica com aplicação de um *buffer* de 500 metros nos limites da bacia, cujo resultado pode ser visualizado na Figura 28.

¹⁴ O ANADEM é um modelo digital do terreno (MDT) com remoção de viés causado pela vegetação no modelo digital de elevação (MDE) Copernicus GLO-30. Com resolução espacial de 30 metros, e disponível para toda a América do Sul, o produto foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS em parceria com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) através de termo de cooperação (ANA, 2024b).

Figura 28 - ANADEM recortado para a bacia do Ribeirão Preto



Legenda

ANADEM

Altitude (m)



▭ Limite de Ribeirão Preto

— Córrego Ribeirão Preto

— Afluentes do Ribeirão Preto

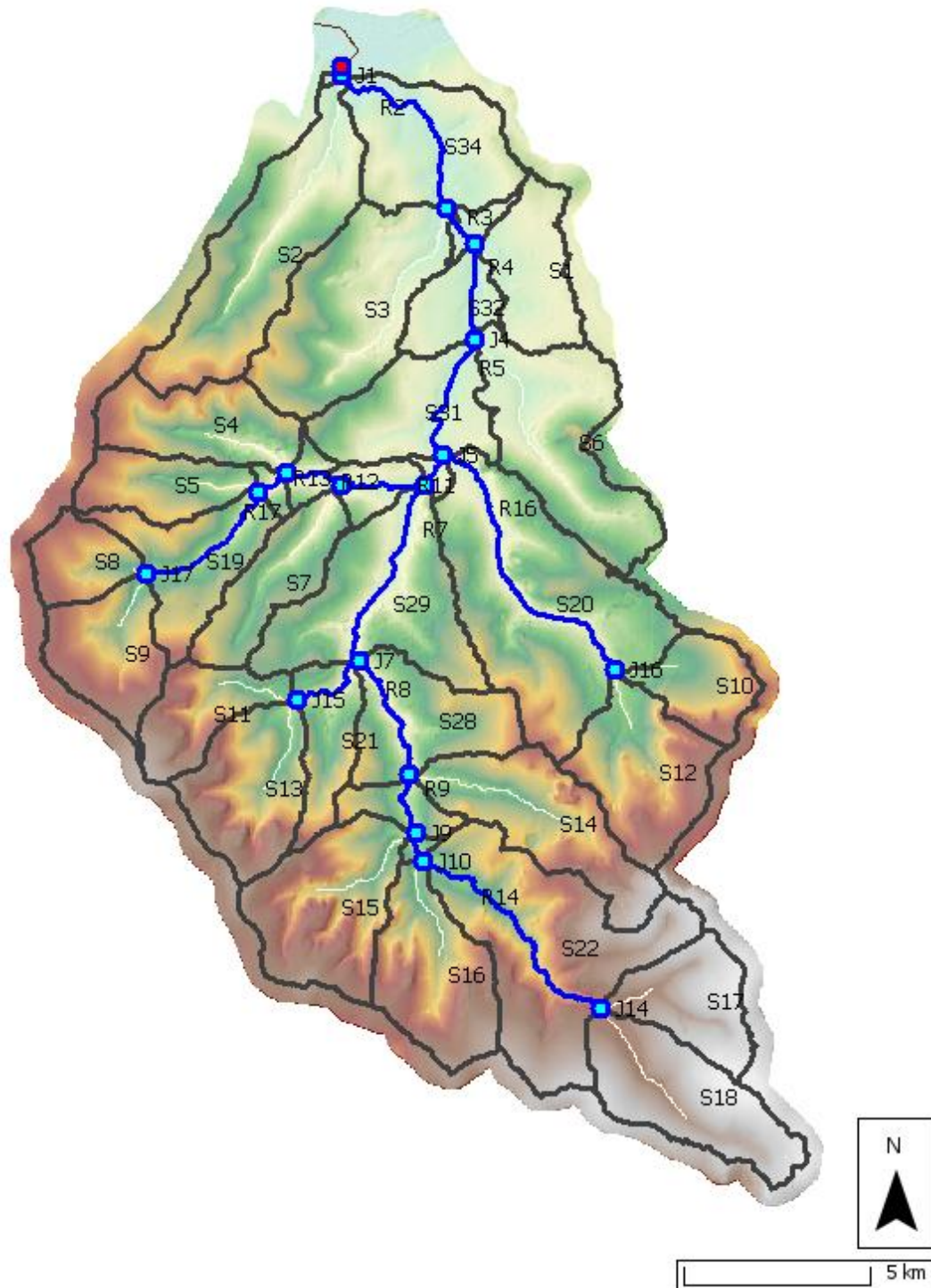
Projeção UTM Zona 23K

Datum: SIRGAS 2000

Fonte: Elaborado pelo autor. Imagem de ESRI (2025) e MDE de ANA (2024)

Na Figura 29 é possível visualizar a bacia hidrográfica do Ribeirão Preto após a importação no HEC-HMS do MDE ANADEM recortado e a realização dos primeiros processos: preenchimento de depressões, pré-processamento da rede de drenagem, identificação dos rios e indicação de exutório. Para o delineamento dos rios e delimitação das sub-bacias foi considerada uma discretização de 7 km², de tal forma que o número de rios identificados ficou muito próximo da situação real.

Figura 29 - Sub-bacias e rios identificados no HEC-HMS



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A partir dos processos supramencionados também foi possível extrair as características fisiográficas das sub-bacias e dos trechos de rios identificados. Nas Tabela 1 é possível visualizar as características fisiográficas das sub-bacias: área (km²), declividade média da bacia(m/m), comprimento do talvegue principal (km), declividade média do talvegue principal (m/m) e fator de forma.

Tabela 1 – Características fisiográficas das sub-bacias

| Sub-bacia | Área (km ²) | Declividade média da bacia (m/m) | Comprimento do talvegue principal (km) | Declividade média do talvegue principal (m/m) | Fator de Forma |
|-----------|-------------------------|----------------------------------|--|---|----------------|
| S18 | 13.215 | 0.060 | 8.102 | 0.020 | 0.506 |
| S17 | 8.468 | 0.061 | 5.890 | 0.029 | 0.557 |
| S22 | 24.284 | 0.082 | 11.147 | 0.022 | 0.499 |
| S16 | 12.385 | 0.097 | 7.350 | 0.029 | 0.540 |
| S15 | 14.546 | 0.108 | 7.230 | 0.028 | 0.595 |
| S26 | 0.578 | 0.088 | 1.589 | 0.051 | 0.540 |
| S14 | 13.572 | 0.088 | 9.668 | 0.026 | 0.430 |
| S27 | 3.197 | 0.071 | 3.517 | 0.028 | 0.574 |
| S13 | 11.701 | 0.105 | 5.967 | 0.036 | 0.647 |
| S11 | 7.285 | 0.092 | 6.341 | 0.035 | 0.480 |
| S28 | 10.741 | 0.070 | 6.383 | 0.024 | 0.579 |
| S21 | 6.368 | 0.086 | 6.589 | 0.032 | 0.432 |
| S9 | 9.272 | 0.068 | 5.836 | 0.034 | 0.589 |
| S8 | 5.325 | 0.066 | 4.026 | 0.030 | 0.647 |
| S19 | 10.126 | 0.071 | 7.582 | 0.021 | 0.474 |
| S5 | 6.897 | 0.075 | 5.946 | 0.027 | 0.498 |
| S4 | 10.184 | 0.087 | 6.541 | 0.025 | 0.550 |
| S23 | 0.949 | 0.078 | 1.882 | 0.042 | 0.584 |
| S7 | 8.409 | 0.069 | 7.747 | 0.022 | 0.422 |
| S24 | 1.691 | 0.081 | 2.381 | 0.030 | 0.616 |
| S29 | 17.768 | 0.059 | 9.194 | 0.009 | 0.517 |
| S25 | 2.806 | 0.054 | 3.321 | 0.025 | 0.569 |
| S12 | 12.492 | 0.084 | 6.698 | 0.035 | 0.595 |
| S10 | 6.411 | 0.070 | 4.859 | 0.034 | 0.588 |
| S20 | 28.076 | 0.065 | 13.101 | 0.013 | 0.456 |
| S30 | 0.839 | 0.053 | 1.746 | 0.018 | 0.592 |
| S6 | 16.911 | 0.056 | 9.901 | 0.010 | 0.469 |
| S31 | 11.081 | 0.043 | 7.125 | 0.018 | 0.527 |
| S1 | 8.557 | 0.024 | 5.014 | 0.009 | 0.658 |
| S32 | 5.085 | 0.031 | 4.896 | 0.010 | 0.520 |
| S3 | 18.349 | 0.057 | 9.641 | 0.016 | 0.501 |
| S33 | 1.429 | 0.032 | 3.393 | 0.014 | 0.398 |
| S2 | 19.477 | 0.058 | 11.604 | 0.016 | 0.429 |
| S34 | 13.454 | 0.039 | 7.910 | 0.004 | 0.523 |
| S35 | 0.180 | 0.057 | 0.954 | 0.031 | 0.502 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Complementarmente, a Tabela 2 apresenta as características fisiográficas dos trechos de rios, como comprimento (km), declividade média (m/m), desnível (m) e sinuosidade.

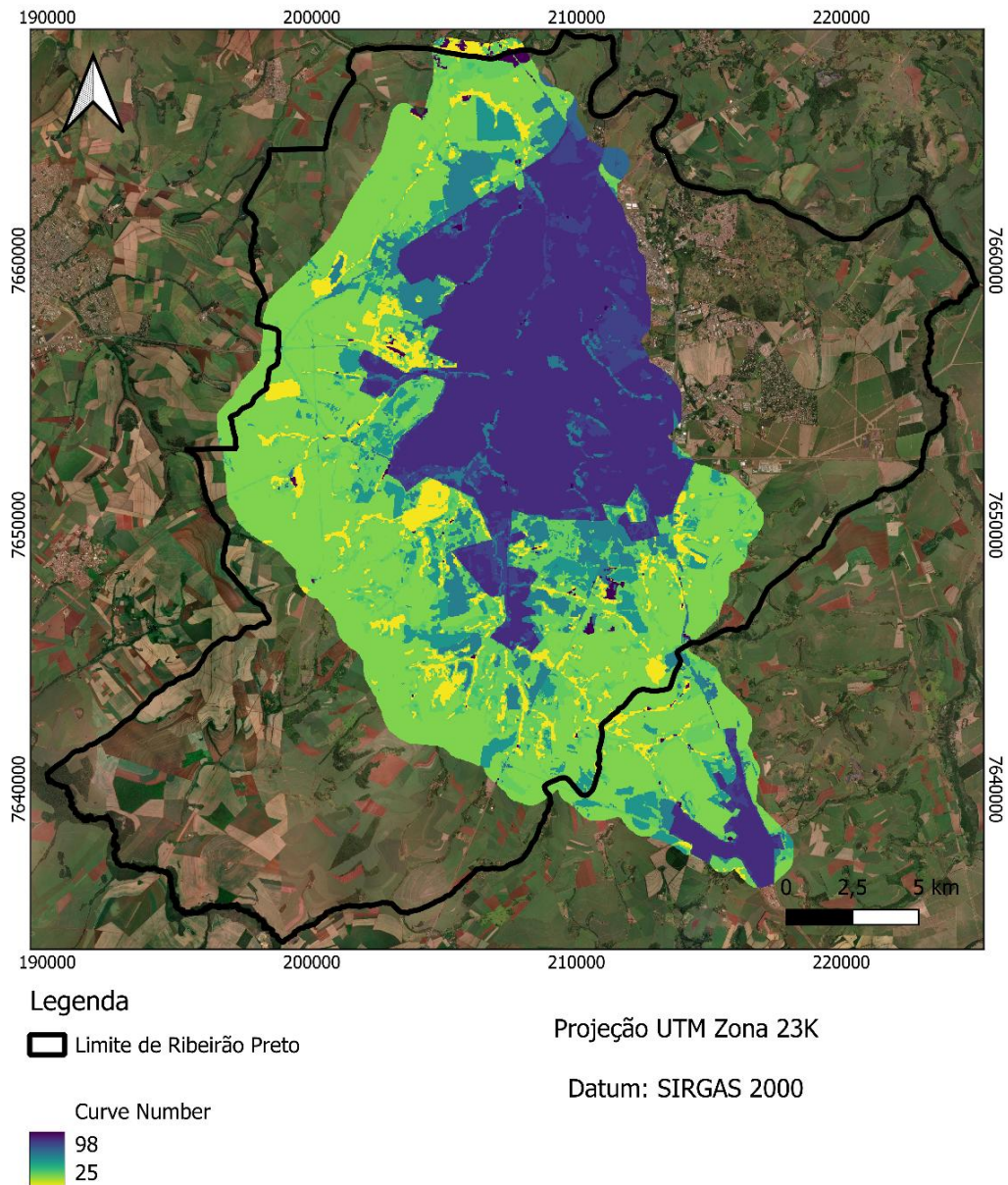
Tabela 2 – Características fisiográficas dos trechos de rios

| Trecho | Comprimento (km) | Declividade média (m/m) | Desnível (m) | Sinuosidade |
|--------|------------------|-------------------------|--------------|-------------|
| R14 | 7.713 | 0.015 | 113.010 | 1.249 |
| R10 | 0.952 | 0.007 | 7.010 | 1.182 |
| R9 | 2.019 | 0.005 | 10.470 | 1.287 |
| R8 | 4.012 | 0.002 | 9.930 | 1.208 |
| R15 | 2.536 | 0.006 | 15.760 | 1.313 |
| R7 | 6.055 | 0.002 | 14.960 | 1.196 |
| R17 | 4.411 | 0.007 | 30.630 | 1.181 |
| R13 | 1.115 | 0.006 | 6.510 | 1.211 |
| R12 | 1.724 | 0.005 | 9.130 | 1.144 |
| R11 | 2.580 | 0.002 | 6.010 | 1.146 |
| R6 | 1.057 | 0.002 | 2.220 | 1.136 |
| R16 | 8.892 | 0.004 | 32.290 | 1.206 |
| R5 | 4.180 | 0.004 | 16.100 | 1.295 |
| R4 | 2.665 | 0.001 | 2.990 | 1.037 |
| R3 | 1.413 | 0.001 | 1.070 | 1.165 |
| R2 | 6.258 | 0.002 | 9.910 | 1.377 |
| R1 | 0.255 | 0.005 | 1.390 | 1.104 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Os dados de *curve number* (CN) representam os números de escoamento, que podem variar de 0 a 100, de modo que valores maiores representam menor capacidade de infiltração (USDA-NRCS, 1986). Para utilização na modelagem hidrológica, foram obtidos de um arquivo *raster* no Catálogo de Metadados da ANA, presente no portal do SNIRH (ANA, 2024c). Na Figura 30 é possível visualizar o mapa de CN recortado para abranger apenas a bacia do Ribeirão Preto.

Figura 30 - Mapa de CN gerado a partir da camada raster da ANA



Fonte: Elaborado pelo autor. Imagem de ESRI (2025) e camada raster de CN de ANA (2024c)

Para a obtenção dos hidrogramas de vazão foi realizada a modelagem hidrológica de toda a bacia, replicando-se os dados pluviométricos por 24h, do dia 07/11/2024, desde às 00:00 até às 00:00 do dia 08/11/2024. A escolha desse dia foi motivada pelo fato de ter ocorrido inundação após o evento pluviométrico. Os dados de chuva foram obtidos no sistema HIDRO-Telemetria, componente do SNIRH, do posto pluviométrico de código 61834000, que faz coletas a cada 15 minutos (ANA, 2024a). A Tabela 3 mostra os dados coletados pelo posto pluviométrico e a Figura 31 apresenta o hietograma da chuva extraído do HEC-HMS após a inserção dos dados de precipitação, com o período de maior intensidade média destacado no polígono roxo.

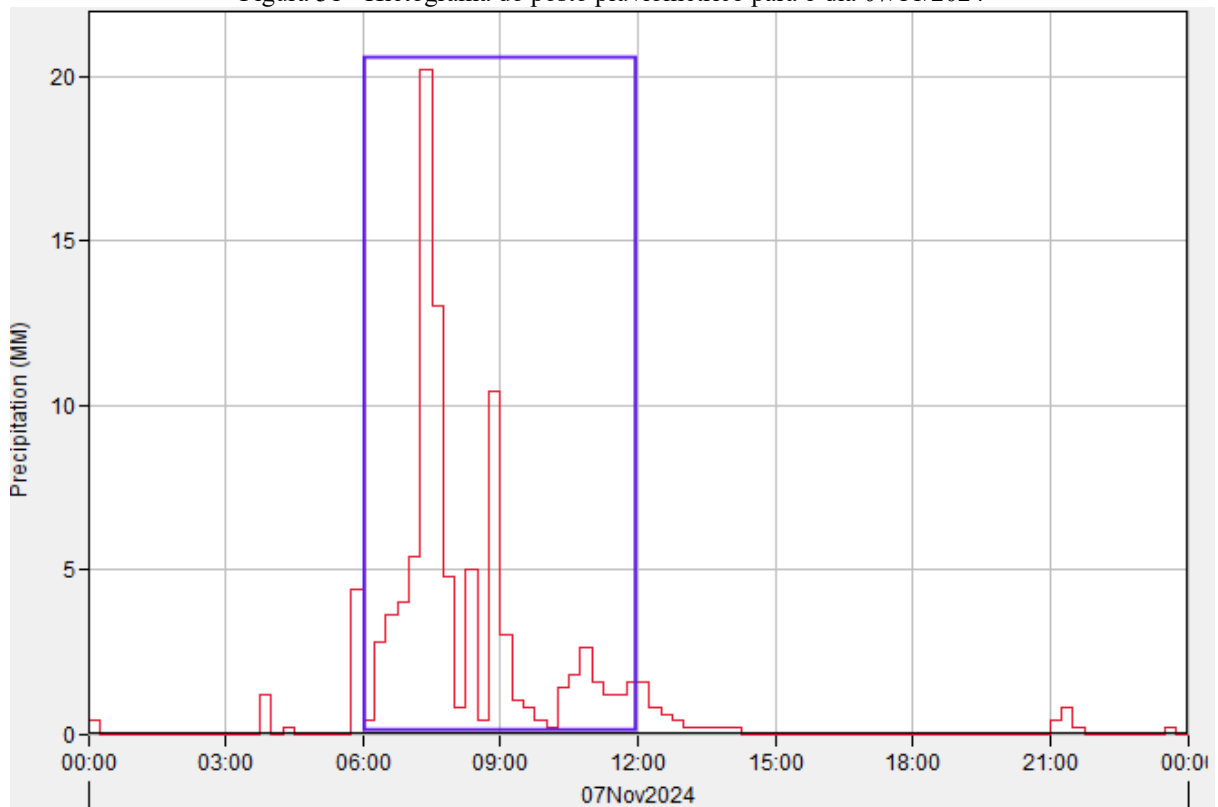
Tabela 3 – Série temporal do posto pluviométrico para o dia 07/11/2024

| Data/Hora | Chuva horária (mm) | Data/Hora | Chuva horária (mm) |
|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| 7/11/2024 0:00 | 0.2 | 7/11/2024 12:00 | 1.6 |
| 7/11/2024 0:15 | 0.4 | 7/11/2024 12:15 | 1.6 |
| 7/11/2024 0:30 | 0 | 7/11/2024 12:30 | 0.8 |
| 7/11/2024 0:45 | 0 | 7/11/2024 12:45 | 0.6 |
| 7/11/2024 1:00 | 0 | 7/11/2024 13:00 | 0.4 |
| 7/11/2024 1:15 | 0 | 7/11/2024 13:15 | 0.2 |
| 7/11/2024 1:30 | 0 | 7/11/2024 13:30 | 0.2 |
| 7/11/2024 1:45 | 0 | 7/11/2024 13:45 | 0.2 |
| 7/11/2024 2:00 | 0 | 7/11/2024 14:00 | 0.2 |
| 7/11/2024 2:15 | 0 | 7/11/2024 14:15 | 0.2 |
| 7/11/2024 2:30 | 0 | 7/11/2024 14:30 | 0 |
| 7/11/2024 2:45 | 0 | 7/11/2024 14:45 | 0 |
| 7/11/2024 3:00 | 0 | 7/11/2024 15:00 | 0 |
| 7/11/2024 3:15 | 0 | 7/11/2024 15:15 | 0 |
| 7/11/2024 3:30 | 0 | 7/11/2024 15:30 | 0 |
| 7/11/2024 3:45 | 0 | 7/11/2024 15:45 | 0 |
| 7/11/2024 4:00 | 1.2 | 7/11/2024 16:00 | 0 |
| 7/11/2024 4:15 | 0 | 7/11/2024 16:15 | 0 |
| 7/11/2024 4:30 | 0.2 | 7/11/2024 16:30 | 0 |
| 7/11/2024 4:45 | 0 | 7/11/2024 16:45 | 0 |
| 7/11/2024 5:00 | 0 | 7/11/2024 17:00 | 0 |
| 7/11/2024 5:15 | 0 | 7/11/2024 17:15 | 0 |
| 7/11/2024 5:30 | 0 | 7/11/2024 17:30 | 0 |
| 7/11/2024 5:45 | 0 | 7/11/2024 17:45 | 0 |
| 7/11/2024 6:00 | 4.4 | 7/11/2024 18:00 | 0 |
| 7/11/2024 6:15 | 0.4 | 7/11/2024 18:15 | 0 |
| 7/11/2024 6:30 | 2.8 | 7/11/2024 18:30 | 0 |
| 7/11/2024 6:45 | 3.6 | 7/11/2024 18:45 | 0 |
| 7/11/2024 7:00 | 4 | 7/11/2024 19:00 | 0 |
| 7/11/2024 7:15 | 5.4 | 7/11/2024 19:15 | 0 |
| 7/11/2024 7:30 | 20.2 | 7/11/2024 19:30 | 0 |
| 7/11/2024 7:45 | 13 | 7/11/2024 19:45 | 0 |
| 7/11/2024 8:00 | 4.8 | 7/11/2024 20:00 | 0 |
| 7/11/2024 8:15 | 0.8 | 7/11/2024 20:15 | 0 |
| 7/11/2024 8:30 | 5 | 7/11/2024 20:30 | 0 |
| 7/11/2024 8:45 | 0.4 | 7/11/2024 20:45 | 0 |
| 7/11/2024 9:00 | 10.4 | 7/11/2024 21:00 | 0 |
| 7/11/2024 9:15 | 3 | 7/11/2024 21:15 | 0.4 |
| 7/11/2024 9:30 | 1 | 7/11/2024 21:30 | 0.8 |
| 7/11/2024 9:45 | 0.8 | 7/11/2024 21:45 | 0.2 |
| 7/11/2024 10:00 | 0.4 | 7/11/2024 22:00 | 0 |

| Data/Hora | Chuva horária (mm) | Data/Hora | Chuva horária (mm) |
|---|--------------------|-----------------|--------------------|
| 7/11/2024 10:15 | 0.2 | 7/11/2024 22:15 | 0 |
| 7/11/2024 10:30 | 1.4 | 7/11/2024 22:30 | 0 |
| 7/11/2024 10:45 | 1.8 | 7/11/2024 22:45 | 0 |
| 7/11/2024 11:00 | 2.6 | 7/11/2024 23:00 | 0 |
| 7/11/2024 11:15 | 1.6 | 7/11/2024 23:15 | 0 |
| 7/11/2024 11:30 | 1.2 | 7/11/2024 23:30 | 0 |
| 7/11/2024 11:45 | 1.2 | 7/11/2024 23:45 | 0.2 |
| Total (mm) | | 100 | |
| Total período intenso 6h às 12h (mm) | | 92 | |

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Figura 31 - Hietograma do posto pluviométrico para o dia 07/11/2024



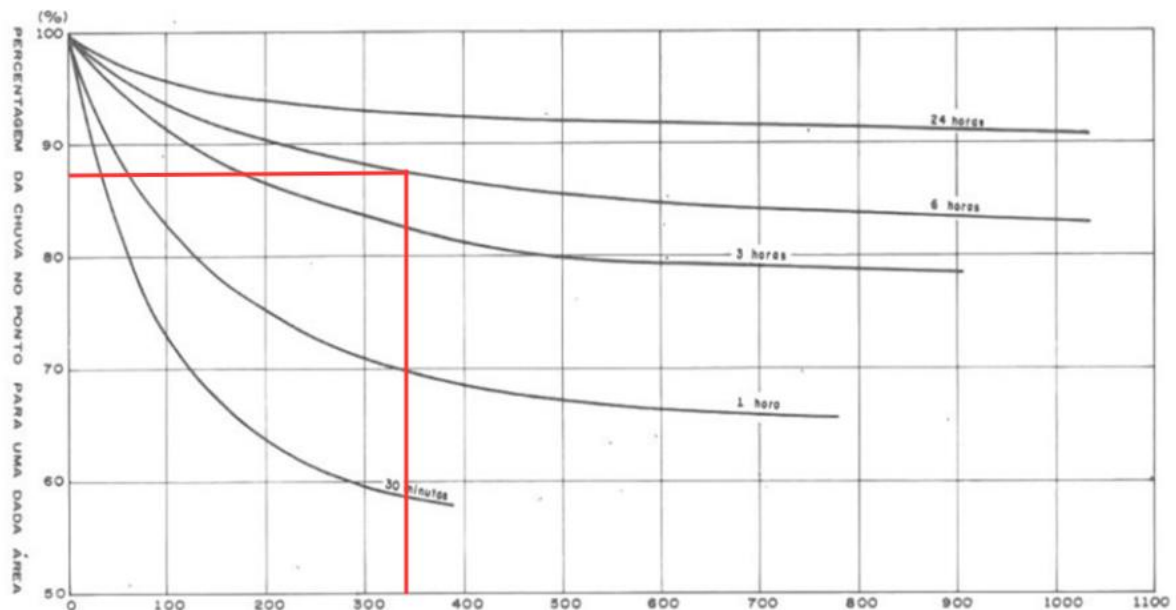
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Em consulta ao documento que contém a nova equação IDF elaborada pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB-CPRM) para a cidade de Ribeirão Preto, publicada em 2023 no Atlas Pluviométrico do Brasil (SGB-CPRM, 2023), identificou-se que o período mais intenso de chuva ocorreu, entre 06:00 e 12:00, com acumulado de 92 mm (destacado na Tabela 3 em cinza e na Figura 31). Esse acumulado, é compatível com o período de retorno (TR) de 10 anos, que na publicação é de 93,2 mm para chuvas com 6 horas de duração (SGB-CPRM, 2023). Conclui-se, portanto, que uma chuva com TR de 10 anos, a depender da duração, é suficiente para causar

inundações no Ribeirão Preto.

A depender da extensão da área e da duração da chuva, esta pode não se distribuir uniformemente sobre toda área de estudo. Quanto menor a duração da chuva e maior a área, maior é a probabilidade de que a precipitação não ocorra em toda área de estudo (MEDEIROS, 2002). O HEC-HMS permite que sejam indicadas séries temporais de postos pluviométricos para cada sub-bacia e até mesmo subdividir uma sub-bacia e informar mais de uma série temporal para a mesma sub-bacia. A bacia hidrográfica do Ribeirão Preto possui aproximadamente 342 km², e não existem múltiplos postos pluviométricos ativos distribuídos uniformemente sobre as sub-bacias, dessa forma foi aplicado um coeficiente de distribuição espacial da chuva com base no coeficiente de distribuição por área e duração da precipitação proposto por U.S. Weather Bureau (1961). As curvas para obtenção do coeficiente de distribuição podem ser visualizadas na Figura 32. A abscissa corresponde à extensão da bacia em quilômetros quadrados e a ordenada ao percentual de chuva na área.

Figura 32 - Coeficiente espacial de distribuição da chuva



Fonte: U.S. Weather Bureau (1961) apud Cetesb (1986, p. 24)

Para replicar o coeficiente de distribuição 0,865 (86,5%) encontrado para a bacia hidrográfica do Ribeirão Preto, conforme linhas traçadas no gráfico da Figura 32, diante de uma chuva de 6 horas de duração, atribuiu-se 0 mm de chuva para as sub-bacias S17, S18 e S22, localizadas na região mais à montante do córrego, que juntas somam aproximadamente 13,5% da área total da bacia. Optou-se por este método para replicar melhor a distribuição da chuva, visto que a aplicação do coeficiente de redução em todas sub-bacias causaria um impacto maior

na magnitude da vazão e menos condizente com a realidade. Essas sub-bacias podem ser visualizadas na Figura 29, já apresentada anteriormente.

A Equação (1), proposta no Método SCS Hidrograma Unitário para separação do escoamento (USDA-NRCS, 1986) pode ser visualizada abaixo:

$$Pe = \frac{(P-I_a)^2}{(P-I_a)+S} \quad (1)$$

Onde:

Pe: precipitação efetiva ou excedente (parcela da chuva que gera escoamento superficial) (mm);

P: precipitação (mm);

I_a: abstração inicial (mm);

S: retenção potencial do solo (mm).

A abstração inicial corresponde às perdas antes do escoamento superficial, incluindo retenção em superfícies, interceptação por vegetação, evaporação e infiltração. Segundo a USDA-NRCS (1986), estas perdas foram estimadas empiricamente e correspondem a 20% do potencial máximo de retenção da precipitação, conforme mostra a Equação (2). O HEC-HMS não atribui automaticamente uma equação para calcular o valor de abstração inicial, e neste caso, foi utilizado o mesmo percentual preconizado pelo método:

$$I_a = 0.2S \quad (2)$$

Onde:

I_a: abstração inicial (mm);

S: retenção potencial do solo (mm).

O potencial máximo de retenção da precipitação no solo depende do parâmetro CN, e pode ser calculado por meio da Equação (3), adaptada para unidades milimétricas. Os valores de CN utilizados foram aqueles obtidos do arquivo *raster* fornecido pela ANA (2024c), os quais foram atribuídos às sub-bacias por meio da discretização estruturada, utilizando um grid com células regulares de 10 metros criado no HEC-HMS. Dessa forma o *software* foi capaz de calcular por meio de interpolações um CN médio para cada sub-bacia.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

Onde:

S: retenção potencial do solo (mm).

O tempo de concentração para as sub-bacias e para os trechos de rio foi calculado por meio da fórmula de Kirpich (1940), descrita na Equação (4), utilizando as características

fisiográficas das Tabelas 1 e 2, anteriormente apresentadas:

$$T_c = 0.0195L^{0.77}S^{-0.385} \quad (4)$$

Onde:

T_c: tempo de concentração (min);

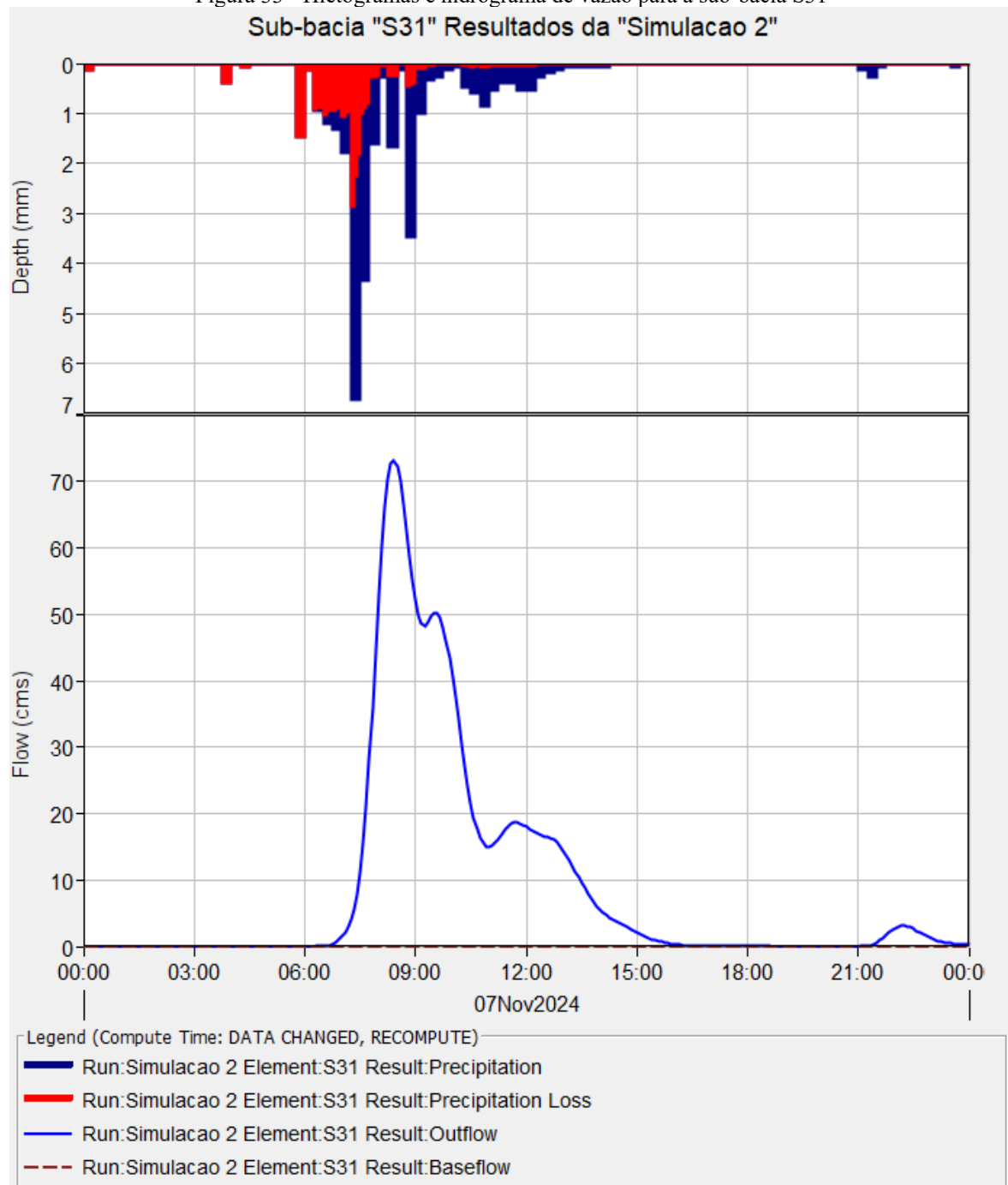
L: comprimento do talvegue (m);

S: declividade (m/m).

Como parâmetros para o cálculo da propagação de vazão nos rios pelo método Muskingum-Cunge (CUNGE, 1969), utilizou-se o coeficiente de rugosidade de Manning de 0,025 para o canal (leito composto de argila com a presença não uniforme de seixos e pedras, e margens inclinadas com grama baixa, vegetação e raízes), conforme recomendação do manual do HEC-HMS (USACE, 2024a) replicada da publicação do USGS (1987), o Serviço Geológico dos Estados Unidos (United States Geological Survey), indicado para leitos compostos de argila, margens com grama e raízes de árvores em alguns pontos, seixos e pedras isolados com distribuição irregular; e as larguras dos rios variando desde 10 até 27 metros. Demais parâmetros físicos foram calculados com base nas características fisiográficas detectadas pelo *software* por meio do MDE. Por não existir estação para medição de vazão no córrego para estimar o escoamento de base, utilizou-se como vazão de base o valor de 1 m³/s.

O intervalo de tempo da simulação foi configurado para um terço do intervalo de cada coleta do posto pluviométrico, ou seja, 5 minutos. Após o processamento do modelo hidrológico, que durou quase 11 minutos, foram obtidos hidrogramas de vazão das sub-bacias, rios e junções. Na Figura 33 é possível visualizar alguns dos resultados para a sub-bacia S31. O gráfico superior mostra a precipitação total e a abstração inicial em milímetros ao longo do período. Já o gráfico inferior mostra a vazão resultante da precipitação excedente e também a vazão de base. Destaca-se o descolamento temporal entre o pico da precipitação e o pico da vazão. Apesar de essa ser a representação para uma sub-bacia, é justamente este tipo de intervalo que será explorado no próximo item, ao longo dos resultados da modelagem hidrodinâmica. Este intervalo é importante pois é o tempo de resposta do poder público diante do evento climático.

Figura 33 - Hietogramas e hidrograma de vazão para a sub-bacia S31
Sub-bacia "S31" Resultados da "Simulacao 2"

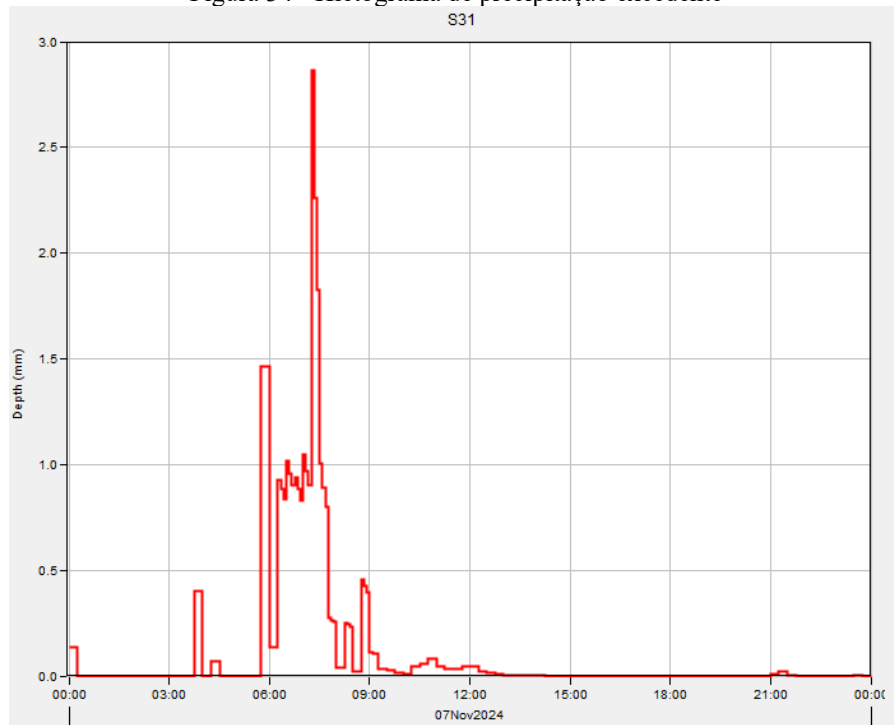


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O gráfico¹⁵ da Figura 34 mostra a precipitação excedente ao longo do período, que se torna deflúvio, ou escoamento superficial, e chega com maior velocidade até o talvegue.

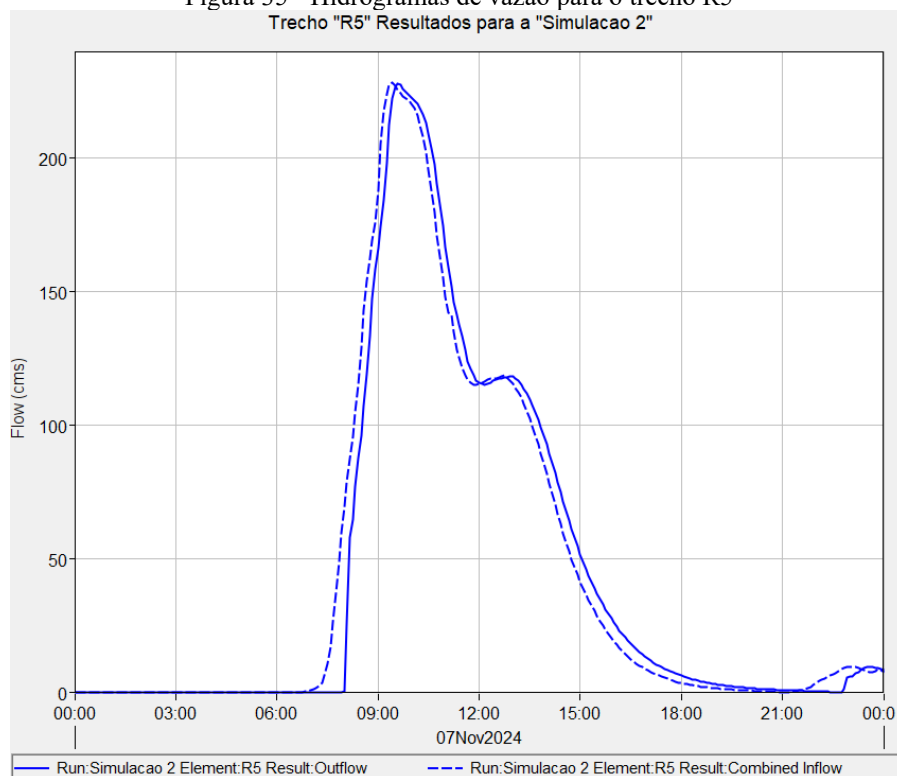
¹⁵ No gráfico, *Flow (cms)* corresponde à vazão em metros cúbicos por segundo e *Depth (mm)* às precipitações total e excedente em milímetros, ambas ao longo do período.

Figura 34 - Hietograma de precipitação excedente



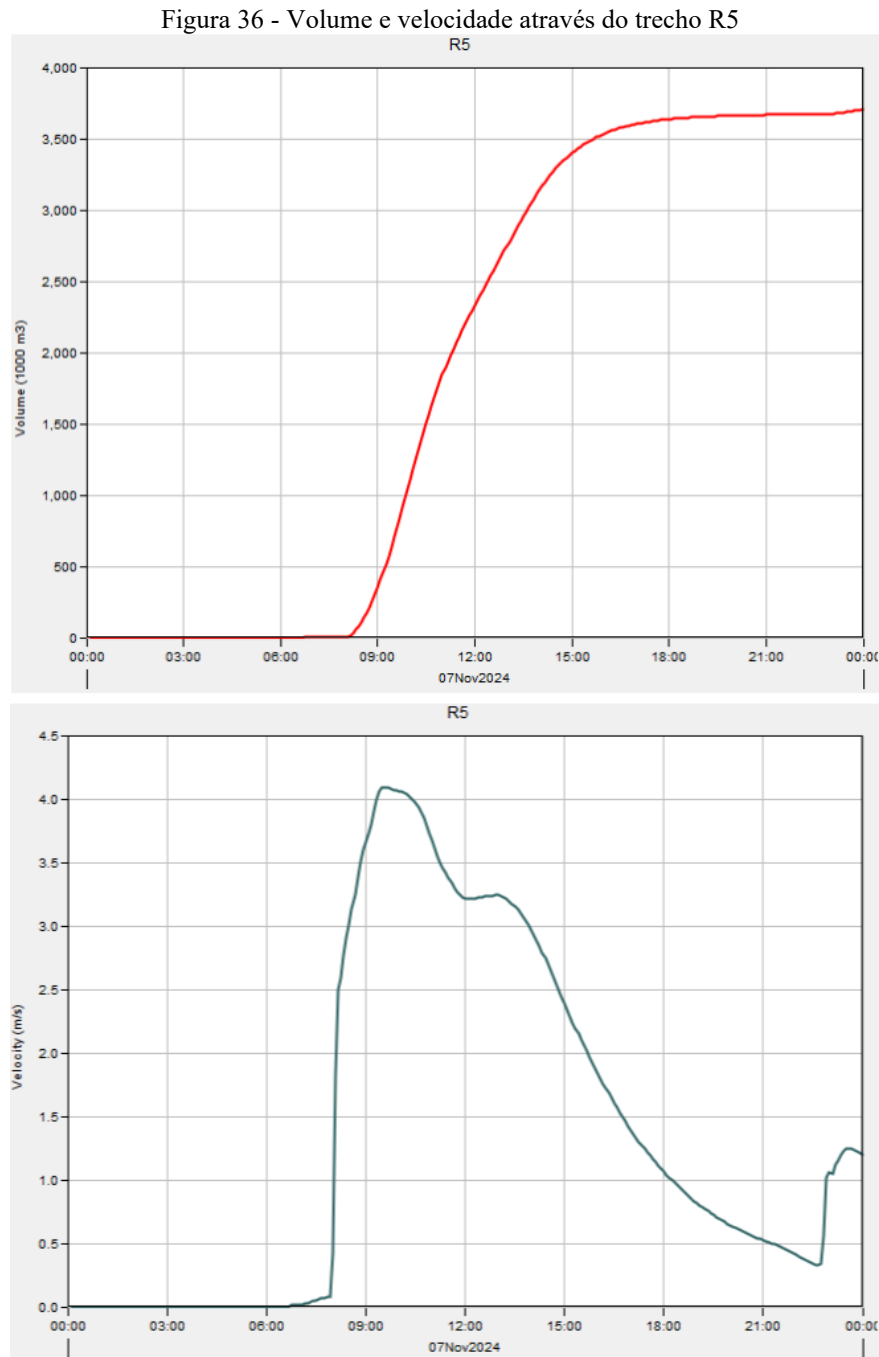
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 35 apresenta os hidrogramas de entrada e saída em um trecho (R5) do Ribeirão Preto. Esses hidrogramas representam as vazões resultantes da precipitação excedente que fora mostrada por meio de histograma na Figura 34.

Figura 35 - Hidrogramas de vazão para o trecho R5
Trecho "R5" Resultados para a "Simulacao 2"

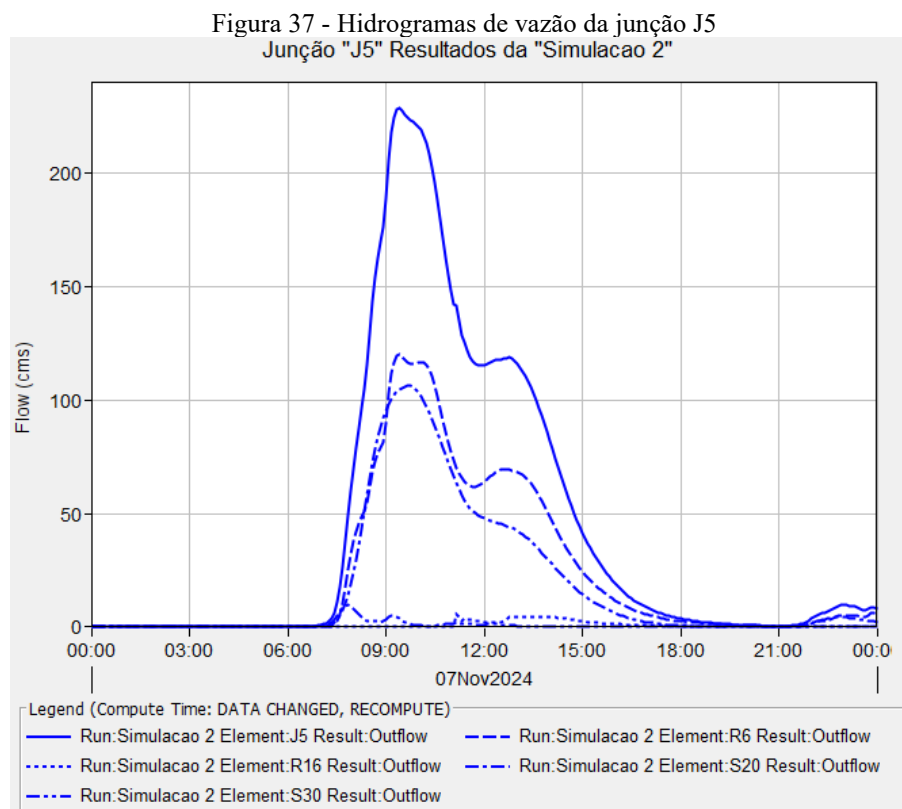
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Na Figura 36 são apresentados dois gráficos que trazem, acima, o volume acumulado ao longo do período escoado no trecho R5 e, abaixo, a velocidade do escoamento ao longo do período.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Por fim, o gráfico da Figura 37 apresenta os hidrogramas de vazão para uma junção, ou confluência de rios. Neste caso, trata-se da junção (J5) do Retiro Saudoso (afluente, trecho R16) ao Ribeirão Preto (curso principal, trecho R6). São mostrados também os hidrogramas de contribuições das sub-bacias S20 e S30, que possuem seus exutórios na junção J5.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Todos os dados podem ser exportados em formatos textuais ou tabulares, de modo que possam ser facilmente utilizados em outras plataformas. O modelo hidrológico não passou por calibração, devido à inexistência de estações hidrológicas e ao enfoque desta pesquisa no desenvolvimento de soluções IoT.

4.2.2 Modelagem Hidrodinâmica

A modelagem hidrodinâmica permite a análise do escoamento de rios por meio da entrada de dados geométricos das seções e parâmetros hidrológicos. Tal simulação, quando realizada por meio do *software* HEC-RAS permite, entre outras, a geração de manchas de inundação, visualização dos níveis de água nas seções e velocidade do escoamento (USACE, 2024b), que permitindo a análise da viabilidade técnica da implantação de um sistema de alertas com base no nível de água ao longo do talvegue de um rio.

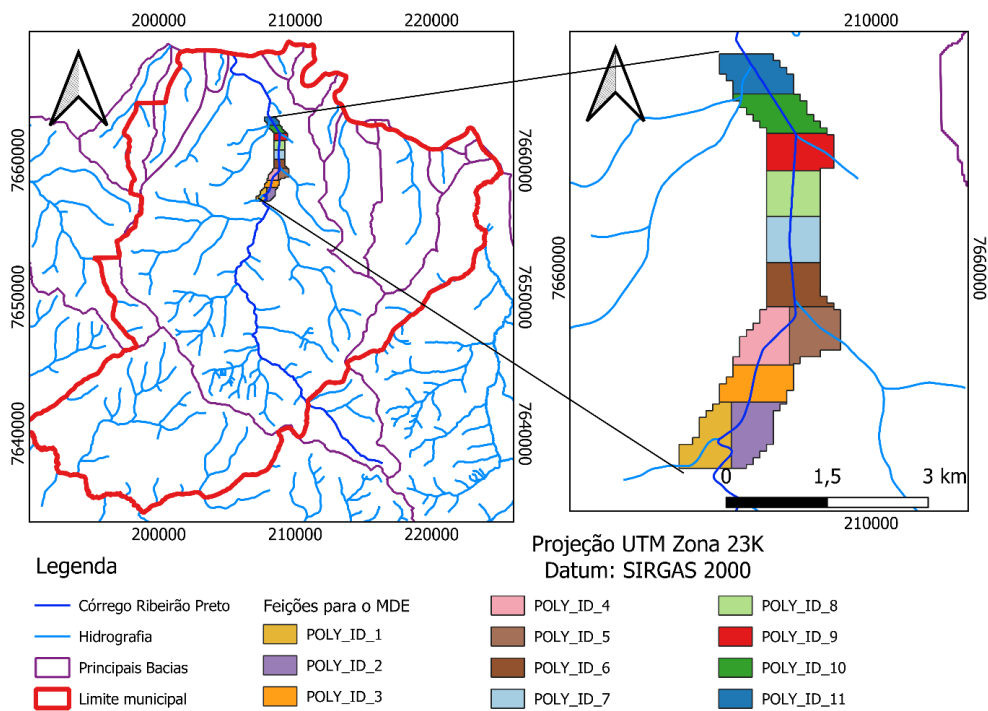
Foi realizada a modelagem hidrodinâmica unidimensional (1D) de um trecho do curso d'água Ribeirão Preto de aproximadamente 6,1 km de extensão, localizado entre as pistas da Avenida Eduardo Andréia Matarazzo, na zona norte da cidade, compreendido entre a Av. Dom Pedro I e a Rod. Alexandre Balbo. Este trecho foi escolhido por seu histórico de inundações frequentes em vários pontos. A modelagem 1D foi escolhida devido ao maior número de

pesquisas e materiais instrucionais relacionados à técnica.

Para o abastecimento do HEC-RAS com o terreno ao longo do trecho do curso d'água, incluindo a provável extensão das áreas de inundação, foram utilizados dois levantamentos topográficos. O primeiro trata-se de um levantamento realizado por aerofotogrametria, com resolução espacial de 10 centímetros – 10 cm de GSD (*Ground Sample Distance*, em português Distância de Amostragem do Solo) – contratado pela Prefeitura Municipal no ano de 2015 por meio da Concorrência Pública nº 013/2015, com voo realizado em 2016. Uma planta com as curvas de nível, com os devidos tratamentos, foi um dos subprodutos do levantamento contratado, a qual foi disponibilizada pela Administração Municipal para utilização neste trabalho.

Por meio do software Quantum GIS (QGIS), em sua versão 3.28.11, foi realizada a rasterização¹⁶ das curvas de nível, e posterior geração do Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução de 50 centímetros, conferindo boa confiabilidade aos resultados da modelagem. Para geração do MDE, foi necessário fracionar a região de estudo em áreas de aproximadamente 5 hectares, totalizando 11 frações, como mostra a Figura 38, devido ao poder computacional requerido durante o processamento.

Figura 38 - Camada vetorial com a região de interesse da hidrografia dividida em feições



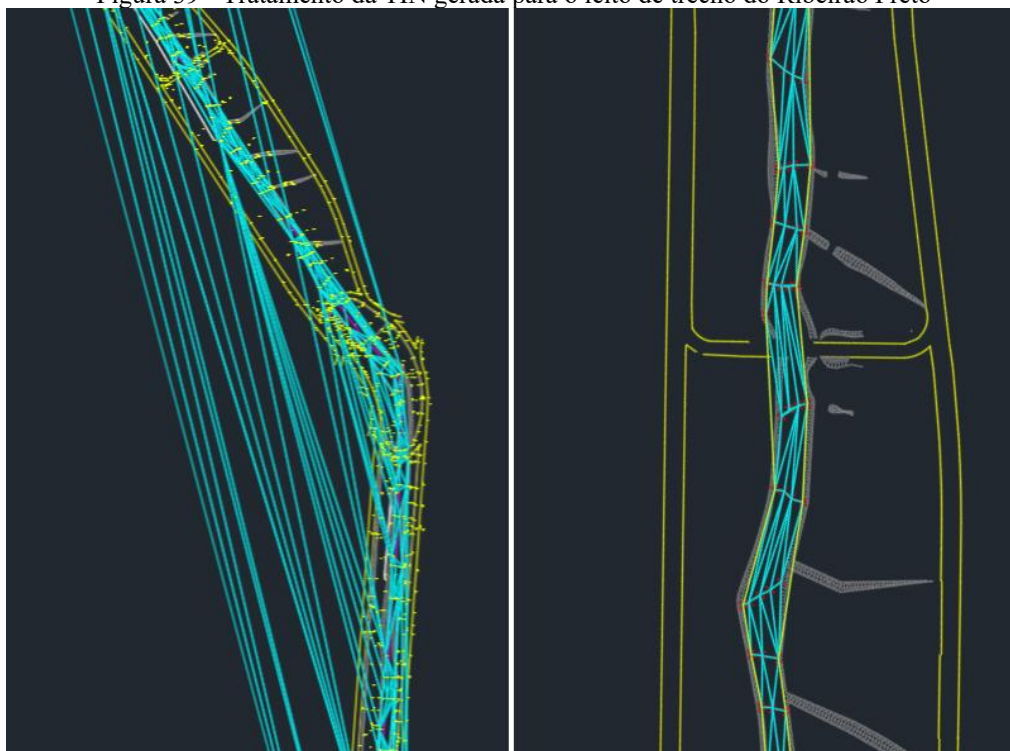
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

¹⁶ Transformação de imagem vetorizada (imagem em formas: linhas, polígonos, círculos, etc; também chamado de *shapefile*, em português, arquivo de forma) em imagem raster (composta de *pixels*), indicando o valor de um atributo da feição da camada vetorial para representar os *pixels* na imagem.

O processo de rasterização das curvas de nível em frações do MDE levou de 4 a 8 minutos, gerando arquivos com tamanhos entre 16 e 38 MB. Houve algumas falhas de pequenas regiões sem nenhum dado numérico de elevação, que foram tratadas quando as parcelas foram mescladas, formando um único MDE.

O levantamento aerofotogramétrico não é capaz de penetrar corpos hídricos e coletar as profundidades dos seus leitos, por isso foi necessário utilizar um segundo levantamento topográfico que possuía pontos coletados por topobatimetria ao longo do trecho de interesse. Este levantamento está disponível em arquivo *dwg* nos anexos dos projetos executivos de uma das canalizações previstas no Plano de Macrodrenagem do município, que é parte do Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) (RIBEIRÃO PRETO, 2015c). Dada a forma como o levantamento se apresentava, foi necessário efetuar um tratamento para isolar os blocos CAD¹⁷ da topobatimetria dos demais blocos do levantamento, externos ao leito do rio. Então foi criada uma TIN (*Triangulated Irregular Network*, em português Rede Triangular Irregular) no AutoCAD Civil 3D 2025 por meio dos blocos, da qual um pequeno trecho ainda não tratado pode ser visualizado na à esquerda, na Figura 39. À direita é mostrado outro trecho, quando o tratamento da TIN estava concluído.

Figura 39 - Tratamento da TIN gerada para o leito de trecho do Ribeirão Preto

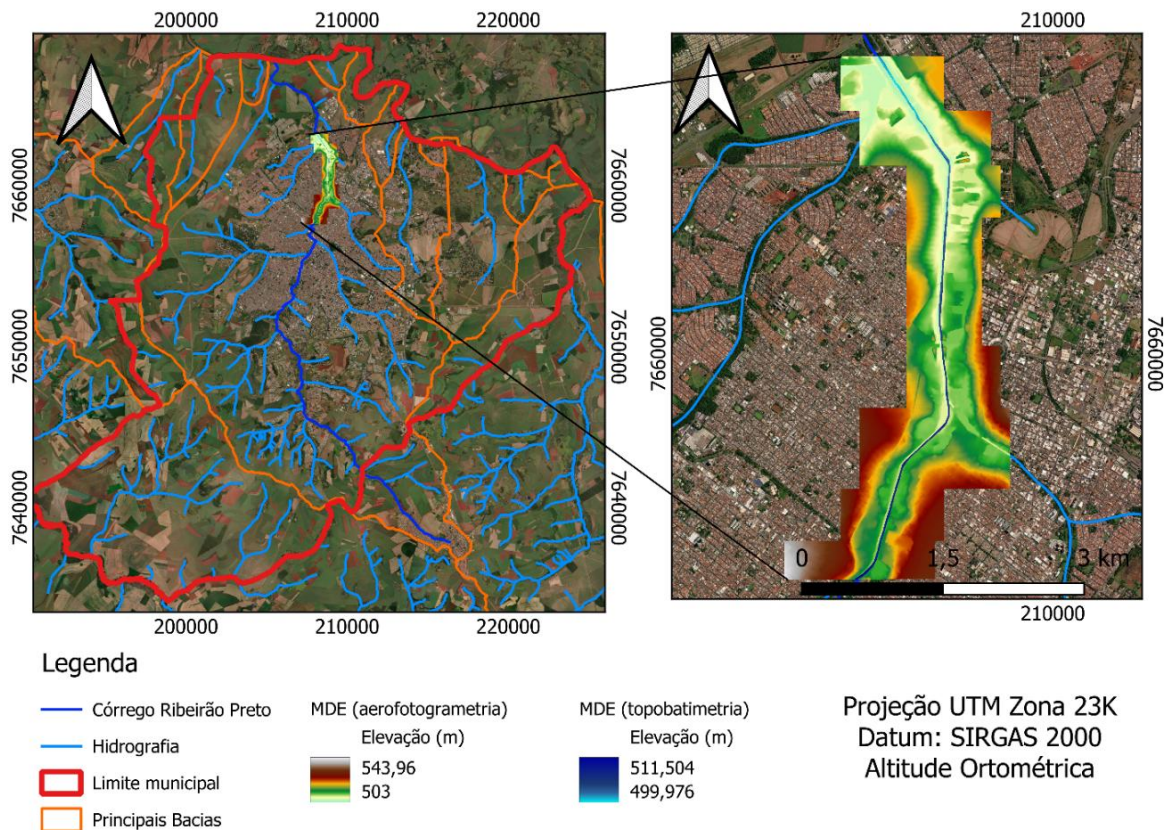


Fonte: Elaborado pelo autor (2025). Levantamento de Ribeirão Preto (2015)

¹⁷ Objeto ou entidade CAD (*Computer Aided Design*) que, quando oriundos de levantamentos topográficos geralmente contém as coordenadas e elevação de um ponto.

Após tratamento das arestas dos triângulos da TIN, foi exportada a superfície em arquivo *GeoTIFF*¹⁸, o mesmo do outro MDE. No mapa da Figura 40 é possível visualizar os dois modelos, com o MDE do leito do córrego sobreposto ao primeiro MDE gerado a partir das curvas de nível do levantamento aerofotogramétrico.

Figura 40 - MDE posicionado sobre imagem de satélite

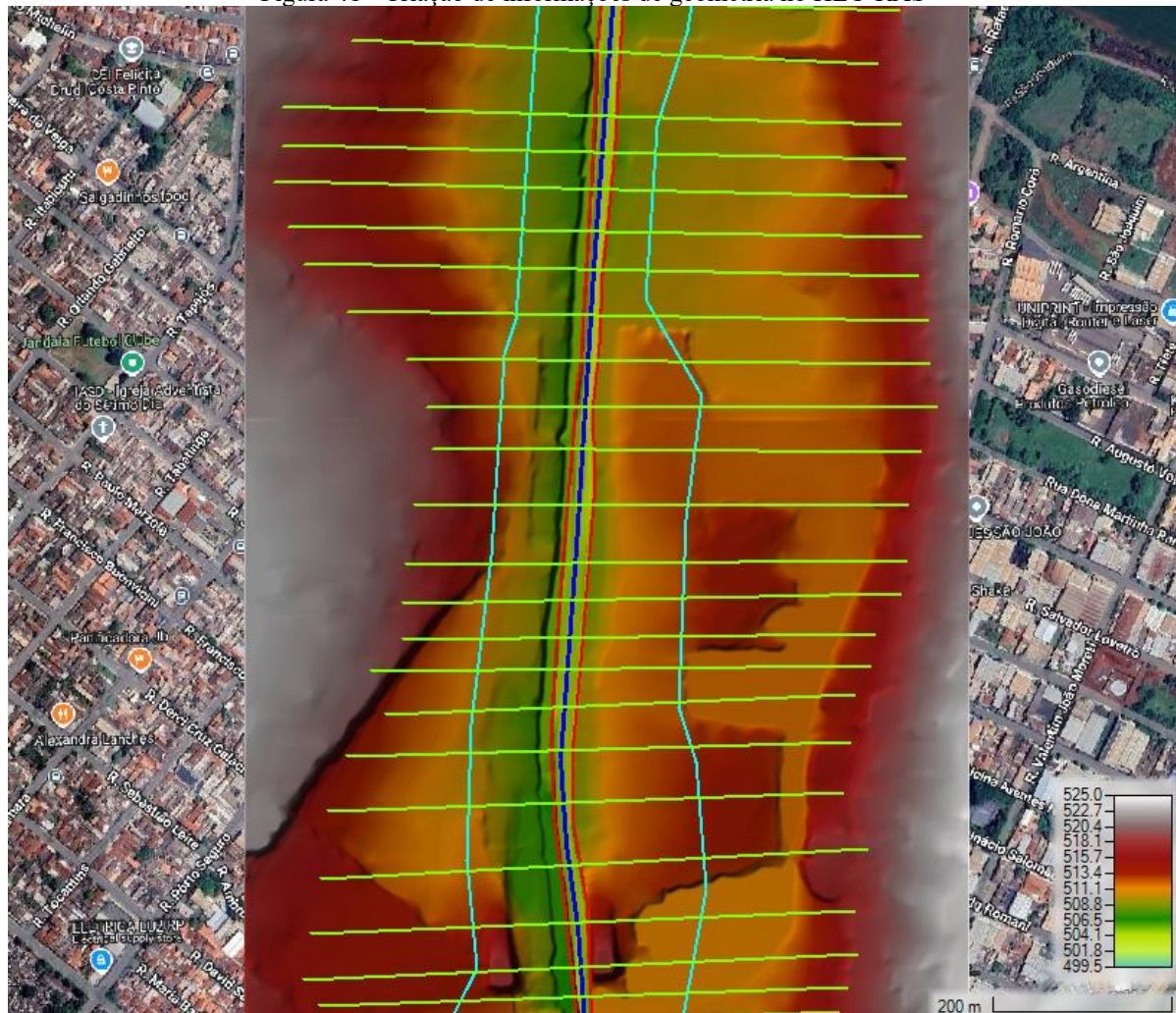


Fonte: Elaborado pelo autor. Imagem de satélite de ESRI (2025)

A junção dos dois MDEs foi realizada no HEC-RAS, e então a modelagem foi configurada. A configuração da modelagem requer o delineamento de alguns elementos, conforme pode ser visualizado na Figura 41. São eles o talvegue (em azul), as *bank lines* (ou limites da calha/leito menor, em vermelho), os *flow paths* (caminhos de fluxo, que compreendem o leito maior e outras áreas inundáveis, em ciano) e as *cross sections* (seções transversais, que devem ser espaçadas em distâncias que contemplem as mudanças na seção ao longo do talvegue, em verde). Após essa etapa, foi realizada a inserção dos coeficientes de rugosidade de *manning* diferenciados para o leito menor e para o leito maior, de 0,025 e de 0,1, respectivamente, conforme publicação do USGS (1987) e tabelas presentes no manual do usuário do HEC-RAS (USACE, 2024b).

¹⁸ Tipo de arquivo baseado no formato de arquivo *TIFF* (*Tagged Image File Format*) com informações georreferenciadas adicionadas aos dados do arquivo.

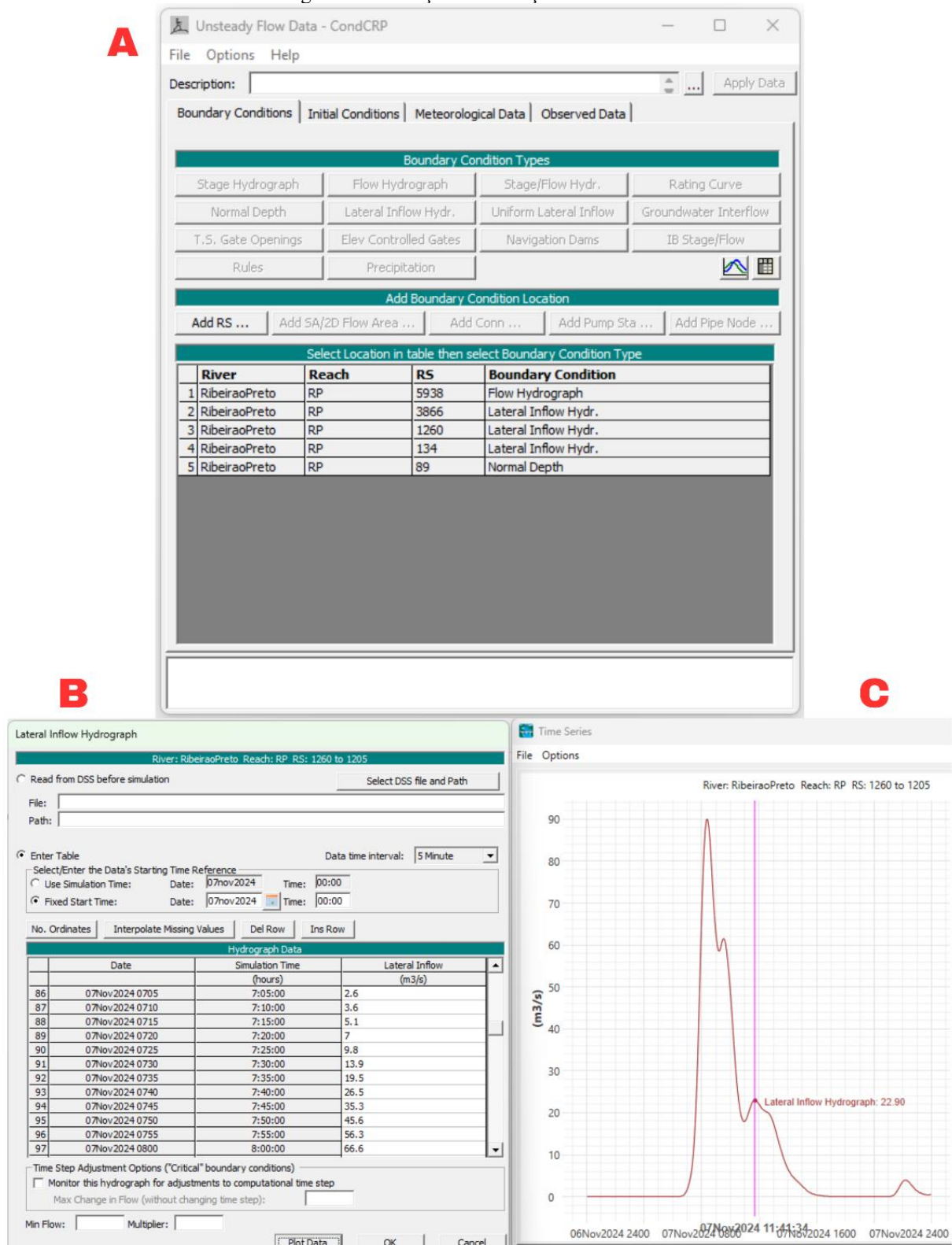
Figura 41 - Criação de informações de geometria no HEC-RAS



Fonte: Elaborado pelo autor. Imagem de satélite de Google (2025)

Em seguida foram configuradas as condições de contorno para a simulação do escoamento em regime não permanente. Nesta etapa, foram inseridos os hidrogramas de vazão de contribuições à montante e de contribuição lateral (de sub-bacias e afluentes). O hidrograma da contribuição de montante foi inserido como condição de contorno da primeira *cross section* (na localização de 5938 metros a montante do final do trecho de estudo) e as contribuições laterais foram inseridas nas *cross sections* 3866, 1226 e 134. Por último, foi configurada a condição de contorno para jusante do trecho, na qual foi informada a declividade do trecho imediatamente à jusante do trecho de estudo. Na Figura 42.A podem ser visualizados a janela de inserção das condições de contorno, os dados tabulares exportados do HEC-HMS para inserção como contribuição lateral são mostrados na Figura 42.B e o hidrograma de vazões plotado a partir dos dados na Figura 42.C.

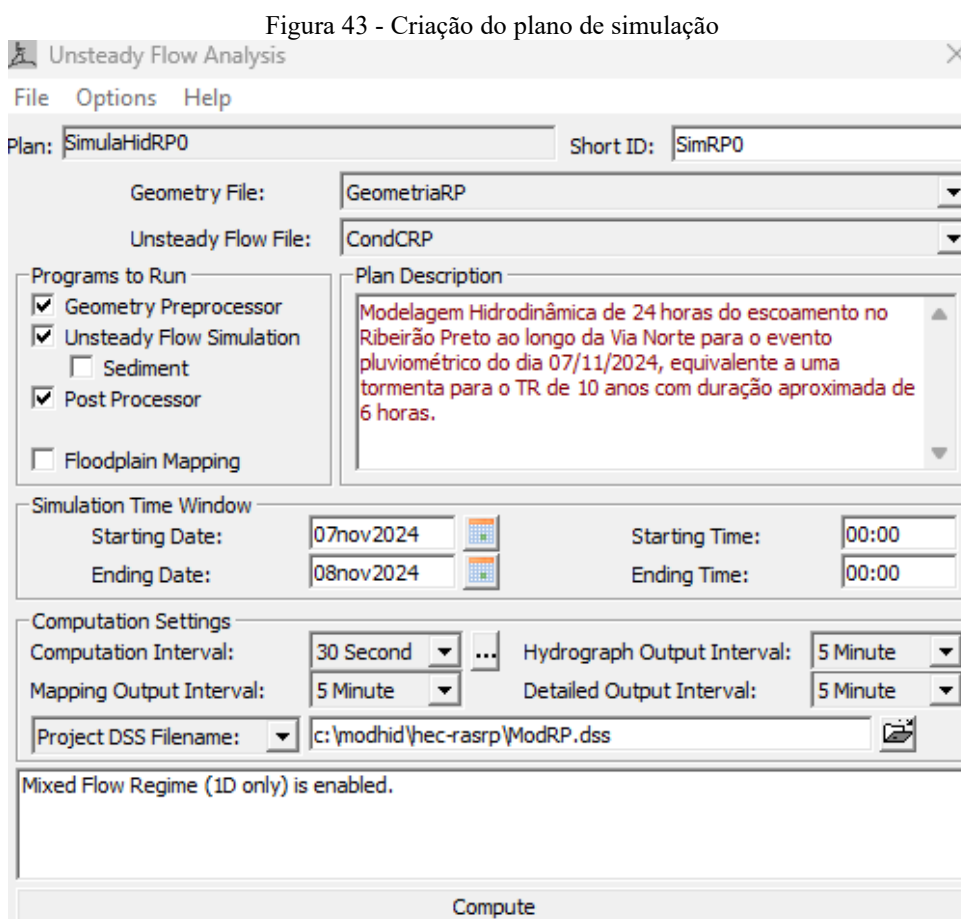
Figura 42 - Inserção de condições de contorno



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Depois de inseridas as condições de contorno, foi configurada a simulação, cujos os parâmetros podem ser visualizados na Figura 43. O intervalo computacional foi definido em 30 segundos HEC-RAS e o intervalo para as saídas do mapa de inundação foi de 5 minutos, o que

significa que se pode observar a variação da elevação da lâmina d'água, a profundidade de água sobre o terreno e a velocidade do escoamento a cada 5 minutos. As saídas de dados detalhados e hidrogramas foram configurados com 5 minutos de intervalo. A simulação levou menos de 1 minuto para ser concluída.



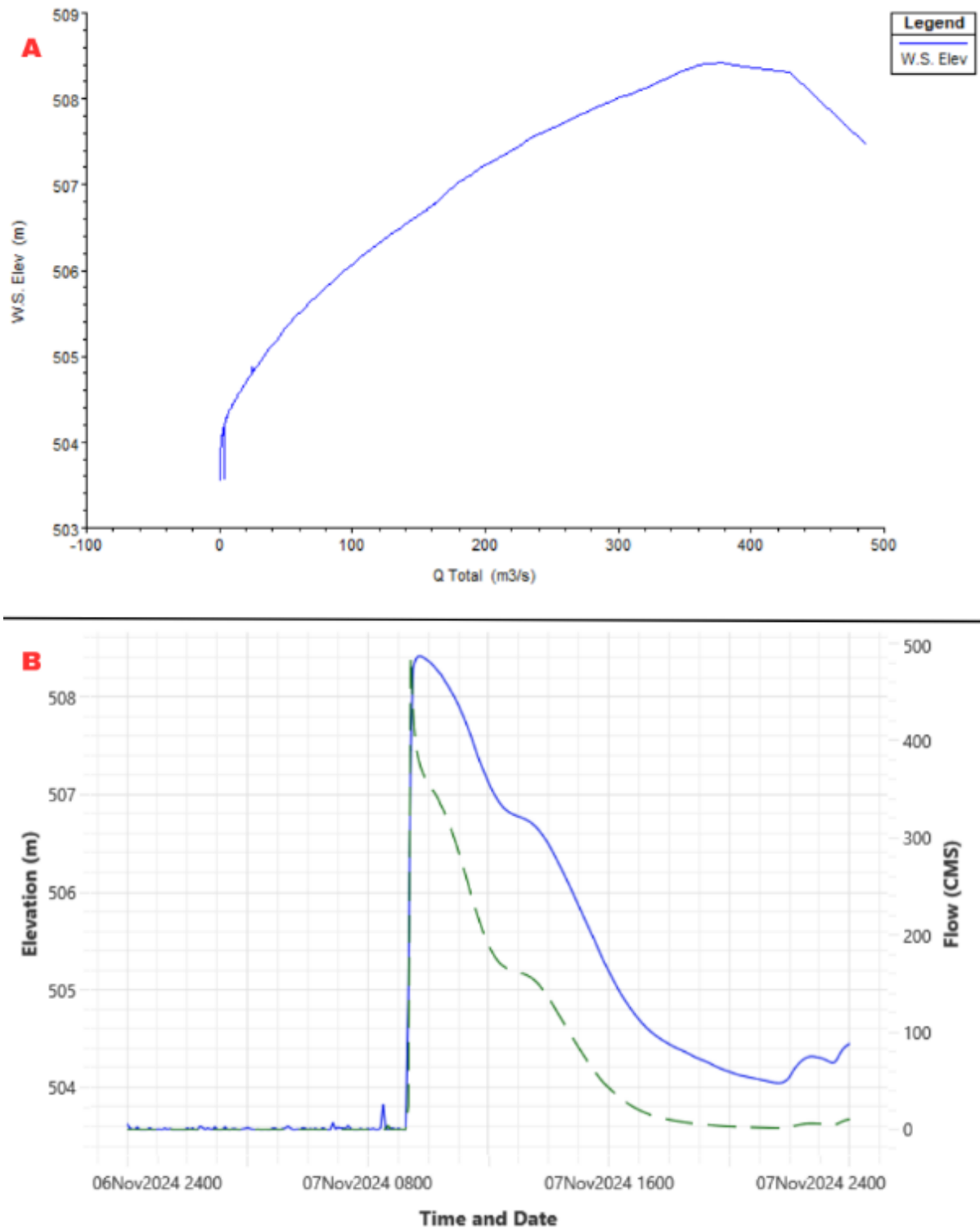
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O HEC-RAS permite visualizar e exportar os resultados de várias variáveis hidráulicas. Perfis transversais e longitudinais podem ser traçados em qualquer ponto plotando quaisquer das diversas variáveis: vazão, elevação da superfície da água, velocidade do escoamento, etc. Também podem ser gerados mapas de: profundidade de água sobre o terreno, elevação da superfície da água e de velocidade do escoamento. Curvas-chave, hidrogramas de cota-vazão e outros gráficos podem ser elaborados combinando variáveis. Na Figura 44, podem ser visualizados dois tipos de resultados gerados para a *cross section 2367*:

Figura 44.A – curva-chave: que relaciona a vazão com a WSE (*water surface elevation*, em português elevação da superfície da água, ou NA (nível d'água) na seção transversal);

Figura 44.B – hidrograma cota-vazão: apresenta dois hidrogramas, um de cota (verde tracejado) e um de vazão (azul contínuo) para o período da simulação.

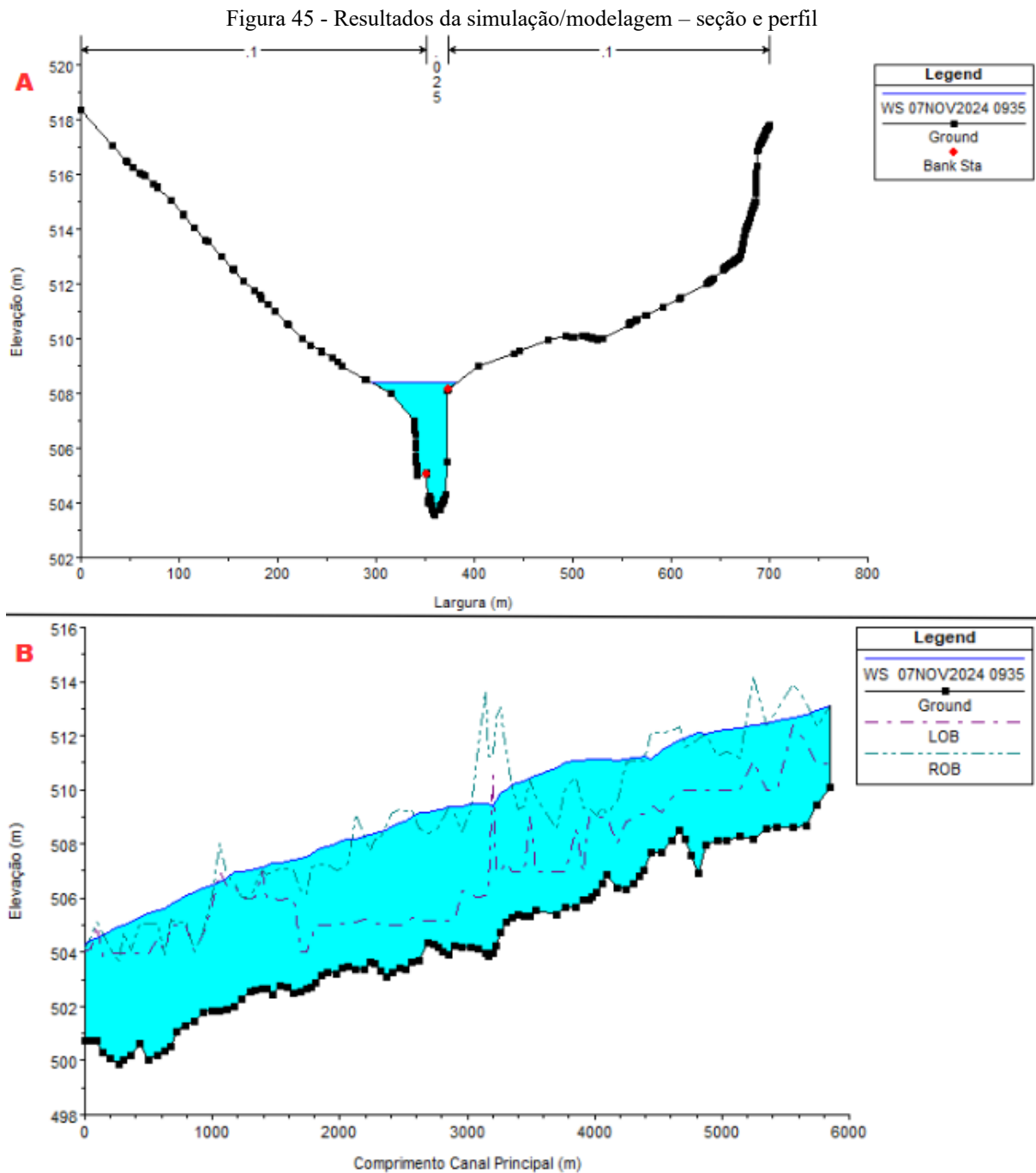
Figura 44 - Resultados da simulação/modelagem - Gráficos



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Outro resultado para a *cross section 2367* pode ser visualizado na Figura 45.A, que mostra a ocupação da água na seção transversal às 09:35. O eixo superior indica os coeficientes de rugosidade de *manning* atribuídos no centro e nas laterais do talvegue.

Já a Figura 45.B apresenta a WSE e a elevação do fundo e das margens do canal principal ao longo do Ribeirão Preto no trecho de estudo. Vale destacar que o perfil longitudinal não foi traçado passando apenas pelas cotas mais baixas do leito.

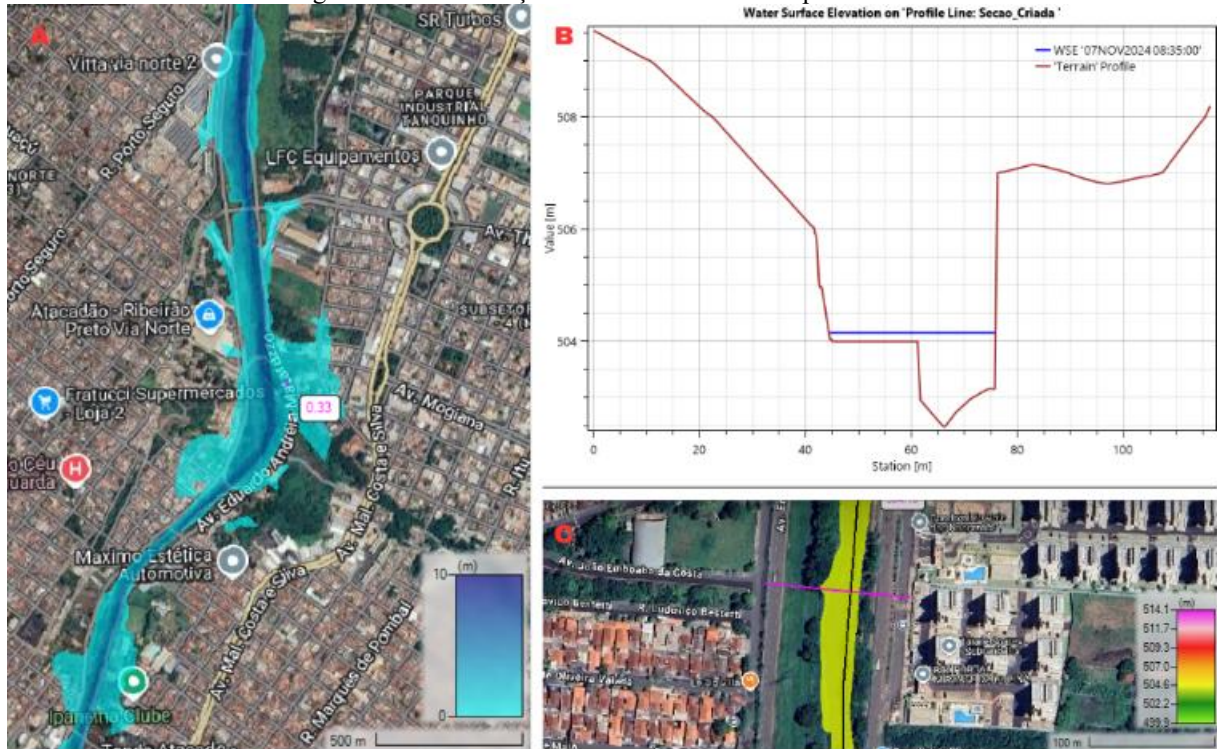


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Figura 46.A mostra o avanço máximo da mancha de inundação em uma região, utilizando a variável profundidade, que apresenta a altura de água sobre o terreno. Onde aparece o número 0.33 é o local do cursor no momento da captura de tela e o valor corresponde à altura de água em metros em relação ao terreno naquele ponto. Na Figura 46.B é possível visualizar

uma seção personalizada criada por meio da ferramenta de perfis, e nela está sendo mostrada a WSE (em azul) e o terreno (em vermelho) ao longo da seção transversal criada (destacada em rosa, na imagem de satélite da Figura 46.C). As regiões inundadas condizem com os locais reportados frequentemente no noticiário e pela população nas redes sociais.

Figura 46 - Visualização de mancha e WSE em perfil criado



Fonte: Elaborado pelo autor. Imagem de satélite de Google (2025)

4.3 DISTRIBUIÇÃO E FUNCIONAMENTO DOS NÓS-SENSORES

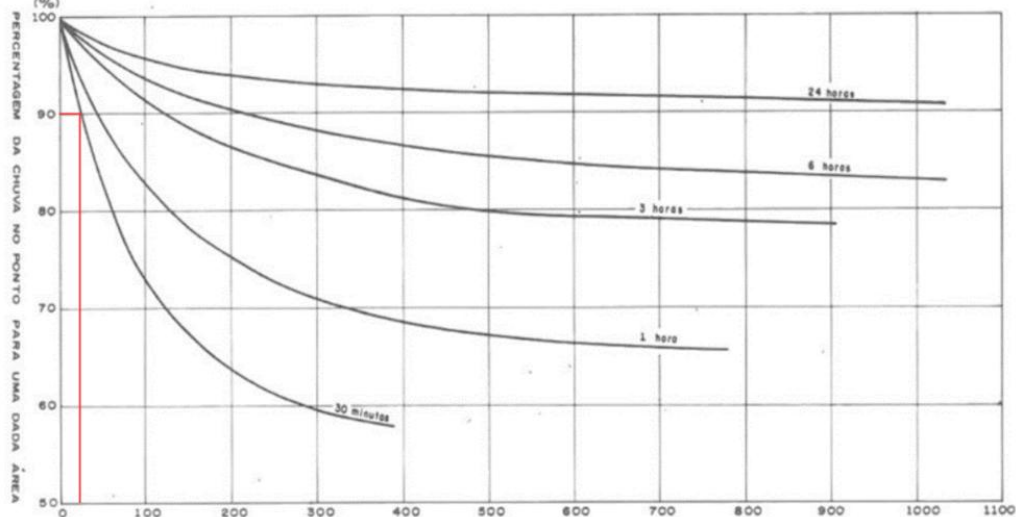
O sistema de alertas proposto neste trabalho se apoia em variáveis hidrológicas e meteorológicas para emitir alertas antecipados de inundações. Desta forma, dois tipos de nós-sensores foram previstos, denominados nó-sensor hidrológico e nó-sensor meteorológico. A função de cada tipo será discutida nesta seção, enquanto a constituição deles será abordada na Seção 4.4.

As modelagens podem auxiliar no posicionamento desses nós em uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) como a que está sendo proposta neste trabalho. Nesta seção será explicado como foram utilizados os resultados das modelagens para a definição da localização dos nós e também como foi determinado o momento do alerta e o tempo de resposta diante da concretização do risco de inundação.

4.3.1 Posicionamento e funcionamento do nó-sensor meteorológico

O nó-sensor meteorológico é responsável principalmente por coletar dados sobre a precipitação pluviométrica em uma determinada região, ou seja, a quantidade de chuva que ocorrer. Suas medições podem ser enviadas em intervalos bem curtos, da ordem de segundos. Tendo em vista que a bacia hidrográfica do Ribeirão Preto possui aproximadamente 342 km², será necessário distribuir nós-sensores para abranger várias regiões da bacia, captando a heterogeneidade espacial da chuva. Com base no coeficiente de distribuição espacial da chuva proposto em U.S. Weather Bureau (1961 apud CETESB, 1986), foi definida uma área de abrangência de 25 km² para cada nó-sensor meteorológico, conforme mostra a Figura 47, onde a abscissa corresponde à extensão da bacia em quilômetros quadrados e a ordenada ao percentual de chuva na área. Dessa forma será possível obter a precipitação pluviométrica sobre a bacia com ao menos 90% de precisão para precipitações a partir de 30 minutos de duração. Esta distribuição também favorece o funcionamento do sistema mesmo quando um dos nós-sensores estiver inativo, por meio da previsão da utilização dos dados do nó-sensor mais próximo.

Figura 47 - Determinação da área de abrangência de cada nó-sensor meteorológico



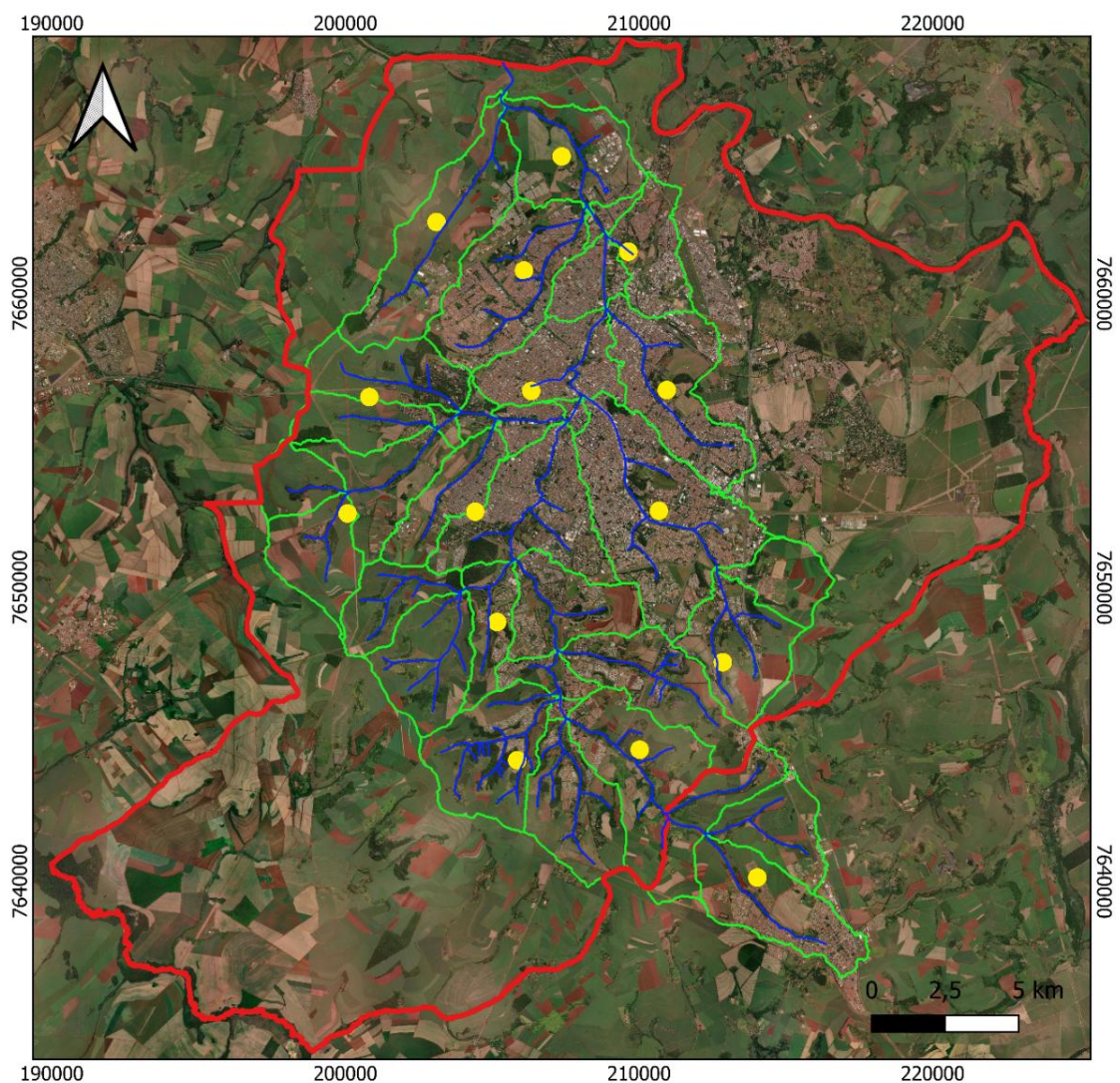
Fonte: Adaptado de U.S. Weather Bureau (1961) apud Cetesb (1986)

Os nós-sensores meteorológicos devem ser posicionados preferencialmente em prédios públicos, com disponibilidade de energia elétrica e de acesso à internet, para que os dados coletados possam ser enviados diretamente para uma plataforma IoT ou plataforma de integração de dados. Neste caso o nó-sensor meteorológico poderia também funcionar como um *gateway*, pois estando no raio de alcance da transmissão via LoRaWAN do nó-sensor hidrológico (ou até mesmo de outro nó-sensor meteorológico que não tivesse acesso à internet),

poderia receber os dados deste último e enviar juntamente com os próprios dados para a plataforma.

Na Figura 48, é possível visualizar um exemplo de distribuição de nós-sensores meteorológicos na bacia hidrográfica do Ribeirão Preto. Foram alocados arbitrariamente 15 nós-sensores meteorológicos ao longo de toda bacia utilizando-se a cobertura geográfica do nó-sensor como parâmetro principal de posicionamento. Pode-se atribuir a altura de chuva aferida por um nó-sensor meteorológico a uma ou mais sub-bacias ou realizar uma nova divisão de áreas de abrangência para cada nó-sensor.

Figura 48 - Distribuição de nós-sensores meteorológicos na bacia do Ribeirão Preto



Legenda

- Nó-sensor meteorológico
- Sub-bacias - Ribeirão Preto
- Hidrografia da bacia do Ribeirão Preto
- Limite da cidade

Projeção UTM Zona 23K

Datum: SIRGAS 2000

Fonte: Elaborado pelo autor. Imagem de satélite de ESRI (2025)

A partir da modelagem hidrológica realizada, replicou-se a inundação que uma chuva de 6 horas de duração, com recorrência de 10 anos causou. Chuvas com durações menores ou maiores e com intensidades diferentes podem provocar o mesmo efeito, o que pode ser demonstrado através de múltiplas modelagens hidrológicas e hidrodinâmicas. Nesta perspectiva, os nós-sensores meteorológicos, são responsáveis por coletar as alturas de chuvas ao longo de suas durações para subsidiar a detecção de uma possível inundação diante do evento pluviométrico. A detecção da inundação pode acontecer de duas formas: por meio modelagens intervaladas sucessivas realizadas em tempo real; ou por meio de algoritmo computacional que faria a comparação da situação real com cenários simulados pré-cadastrados oriundos de modelagens.

Na opção de modelagens intervaladas sucessivas com os dados de chuva acumulados no período, as modelagens seriam realizadas por um técnico ou por meio de RPA (*Robotic Process Automation*, em português Automação Robótica de Processos), o qual seria responsável por inserir os dados de chuva coletados pelo nó-sensor meteorológico no HEC-HMS e, posteriormente os hidrogramas de vazão no HEC-RAS para descobrir se haverá inundação e qual será o horário de início desta. Em caso de detecção de inundação, deverá ser realizado o acionamento do protocolo de segurança da Defesa Civil e, por meio do horário de início da inundação será dimensionado o tempo de resposta (para evacuação, isolamento e outras medidas de segurança). Esse processo será abordado com detalhes na subseção 4.3.3.

Na comparação por meio de algoritmo computacional, este deve comparar a situação real com um número razoável de cenários simulados para encontrar um cenário equivalente ou bem próximo, e então realizar o enquadramento, informando o tempo de resposta disponível obtido do cenário equivalente. Este segundo método é bastante complexo e sua precisão dependeria do número de cenários cadastrados para comparação.

4.3.2 Posicionamento e funcionamento do nó-sensor hidrológico

Os nós-sensores hidrológicos têm a função principal de aferir a elevação da superfície da água no córrego nos locais onde existe risco de inundações. Neste contexto, o posicionamento desses nós foi definido com base no mapa que contém as manchas de inundação. Na Figura 49 é possível visualizar o posicionamento dos nós ao longo do trecho para o qual foi realizada a modelagem hidrodinâmica. Foram posicionados três nós-sensores para atender as regiões que começam a ser invadidas pelas águas com alguns minutos de intervalo entre si. O posicionamento também pode ser realizado com base nos locais históricos

de inundações e outras considerações.

Figura 49 - Alocação dos nós-sensores hidrológicos



Fonte: Elaborado pelo autor. Imagem de satélite de ESRI (2025)

Por meio do nó-sensor hidrológico, é possível acompanhar em tempo real a proximidade do NA da cota de transbordamento, assim como a sua recessão; categorizar o risco de modo estratificado, atribuindo-se níveis de risco a depender da elevação da superfície do escoamento; liberar o retorno aos locais de risco; entre outras possibilidades.

4.3.3 Emissão do alerta e tempo de resposta

A emissão do alerta por um técnico, após realização das modelagens com os dados de chuva do período, ocorrerá de modo similar ao descrito neste item, observando quando iniciaram as inundações a partir do recurso de mapeamento dinâmico do HEC-RAS, que é uma espécie de animação, na qual pode-se visualizar a evolução de uma variável ao longo do período da simulação.

Convém destacar que neste trabalho foi realizada a modelagem de apenas um evento histórico específico utilizando modelos hidrológico e hidrodinâmico não calibrados. Entretanto, considerando que ambos os modelos estejam calibrados com eventos observados, podem-se efetuar modelagens para múltiplos cenários (de alturas de chuva e de distribuição espacial), utilizando, por exemplo, as publicações das equações IDF, que possuem tabelas como a da Figura 50, da cidade de Ribeirão Preto. Essas modelagens poderiam abastecer o cadastro de cenários em caso de utilização do método de detecção de inundação por algoritmo computacional de comparação.

Figura 50 - Altura de chuva em mm para diferentes TR e durações de chuva para Ribeirão Preto

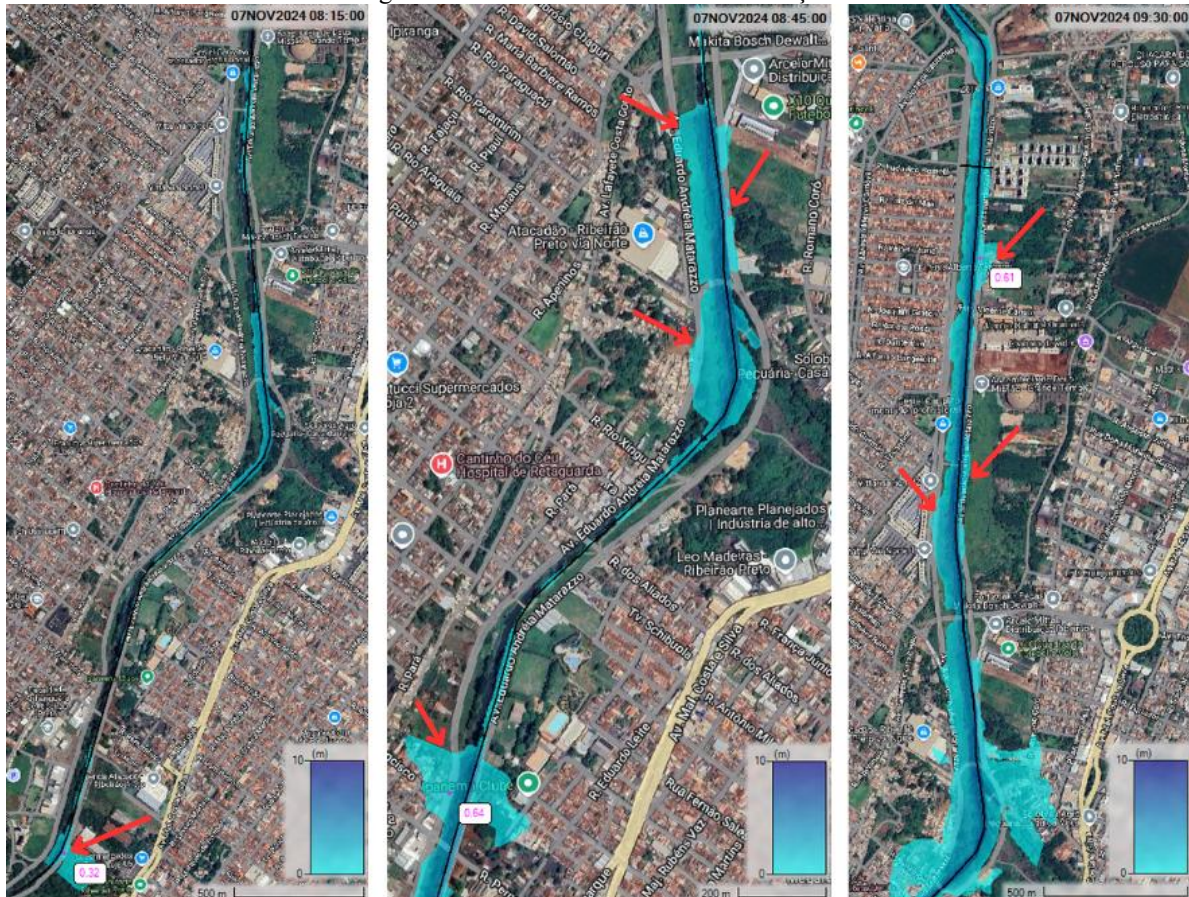
| DURAÇÃO DA CHUVA | TEMPO DE RETORNO, T (ANOS) | | | | | | | | | | | |
|------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 2 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 | 75 | 100 |
| 10 Minutos | 16,9 | 19,6 | 21,9 | 23,3 | 24,4 | 25,3 | 26,0 | 27,2 | 28,2 | 29,0 | 30,1 | 31,5 |
| 15 Minutos | 22,2 | 25,7 | 28,6 | 30,5 | 32,0 | 33,1 | 34,1 | 35,7 | 37,0 | 38,0 | 39,4 | 41,3 |
| 20 Minutos | 26,3 | 30,5 | 34,0 | 36,3 | 37,9 | 39,3 | 40,5 | 42,4 | 43,9 | 45,2 | 46,8 | 49,0 |
| 30 Minutos | 32,6 | 37,7 | 42,1 | 44,9 | 47,0 | 48,7 | 50,1 | 52,4 | 54,3 | 55,9 | 57,9 | 60,6 |
| 45 Minutos | 39,1 | 45,2 | 50,5 | 53,8 | 56,4 | 58,4 | 60,1 | 62,9 | 65,2 | 67,1 | 69,5 | 72,7 |
| 1 Hora | 43,8 | 50,6 | 56,5 | 60,3 | 63,1 | 65,3 | 67,3 | 70,4 | 72,9 | 75,1 | 77,8 | 81,4 |
| 2 Horas | 54,9 | 63,4 | 70,8 | 75,5 | 79,0 | 81,9 | 84,3 | 88,2 | 91,4 | 94,1 | 97,5 | 102,0 |
| 3 Horas | 61,3 | 70,8 | 79,1 | 84,3 | 88,2 | 91,4 | 94,1 | 98,5 | 102,0 | 105,0 | 108,8 | 113,9 |
| 4 Horas | 65,8 | 76,1 | 84,9 | 90,5 | 94,8 | 98,2 | 101,0 | 105,8 | 109,6 | 112,8 | 116,8 | 122,3 |
| 5 Horas | 69,3 | 80,1 | 89,4 | 95,4 | 99,8 | 103,4 | 106,5 | 111,4 | 115,4 | 118,8 | 123,1 | 128,8 |
| 6 Horas | 72,2 | 83,5 | 93,2 | 99,4 | 104,0 | 107,8 | 110,9 | 116,1 | 120,3 | 123,8 | 128,3 | 134,2 |
| 7 Horas | 74,7 | 86,4 | 96,4 | 102,8 | 107,6 | 111,5 | 114,7 | 120,1 | 124,4 | 128,0 | 132,7 | 138,8 |
| 8 Horas | 76,9 | 88,9 | 99,2 | 105,8 | 110,7 | 114,7 | 118,1 | 123,6 | 128,0 | 131,8 | 136,5 | 142,9 |
| 12 Horas | 83,6 | 96,7 | 107,9 | 115,0 | 120,4 | 124,7 | 128,4 | 134,4 | 139,2 | 143,3 | 148,5 | 155,4 |
| 14 Horas | 86,2 | 99,7 | 111,3 | 118,7 | 124,2 | 128,7 | 132,5 | 138,6 | 143,6 | 147,8 | 153,2 | 160,3 |
| 20 Horas | 92,5 | 107,0 | 119,4 | 127,3 | 133,3 | 138,1 | 142,1 | 148,8 | 154,1 | 158,6 | 164,3 | 172,0 |
| 24 Horas | 95,9 | 110,8 | 123,7 | 131,9 | 138,1 | 143,1 | 147,2 | 154,1 | 159,7 | 164,3 | 170,3 | 178,2 |

Fonte: Serviço Geológico do Brasil (2023)

O cenário simulado nessa pesquisa teve a primeira inundação iniciada às 08:15, a segunda às 08:45 e a terceira às 9:30, conforme mostra a Figura 51. Os locais indicados com

setas vermelhas são as inundações que invadiram ao menos o leito carroçável da avenida. Alguns desses pontos possuem números que indicam a altura da lâmina d'água sobre o pavimento asfáltico. A data e os horários estão indicados no canto superior direito de cada imagem.

Figura 51 - Horários de início das inundações



Fonte: Elaborado pelo autor. Imagem de satélite de Google (2025)

Tendo em vista os horários dos inícios das inundações e os tempos de concentração é possível atribuir a ocorrência da primeira inundação ao acumulado de chuva entre 06:00 e 07:45, que totaliza 53,8 mm (isolando o intervalo e a chuva acumulada equivale a intensidade pluviométrica para um TR de 2 anos, conforme a equação IDF da cidade, com intensidade 30,74 mm/h). A partir dessas informações o alerta deveria ser emitido às 07:45 para todas regiões inundáveis, assim, o tempo de resposta é de 30 minutos para o primeiro local de inundação, de 60 minutos para o segundo e de 105 minutos para o terceiro local. Tendo conhecimento desses tempos, é possível planejar rotas de fuga, desvio de tráfego (utilizando aplicativos como *Waze* e *Google Maps*) e efetuar um melhor gerenciamento das ações da Defesa Civil.

Pensando no uso de modelagens sucessivas intervaladas, de acordo com a premissa de que o ápice da inundação foi o momento 07:45 (que incrementou de 13 mm de chuva), uma das

modelagens realizadas durante o intervalo 07:30 – 07:45 é que detecta a inundação, visto que o intervalo de coletas de dados de chuva pelos nós-sensores meteorológicos é de alguns segundos e os dados utilizados na modelagem deste caso tinham 15 minutos de intervalo.

O tempo é um fator importante se a opção for utilizar o método de modelagens intervaladas sucessivas, portanto, deve-se utilizar uma configuração computacional que seja capaz de realizar modelagens em tempos reduzidos para que a verificação da possibilidade de inundação seja concluída no menor intervalo possível após a coleta dos dados pela camada sensorial meteorológica, o que também dependerá da extensão da bacia hidrográfica. Deve-se prever múltiplas estações de trabalho para realização das modelagens com o menor intervalo possível entre as verificações, não dependendo da finalização de uma verificação para o início de outra. Neste trabalho, o tempo para realização das duas modelagens totalizou aproximadamente 12 minutos, utilizando-se *hardware* com a seguinte configuração: processador Ryzen 7 5700x, memória RAM DDR4 32 GB 3600 MHz, unidade de armazenamento SSD 1 TB PCIe 4.0 NVMe e placa de vídeo NVIDIA GeForce RTX 2060 12 GB (a GPU foi muito pouco demandada durante as modelagens, detectou-se o predomínio da utilização da CPU).

4.4 COMPONENTES DOS NÓS-SENSORES E *GATEWAYS*

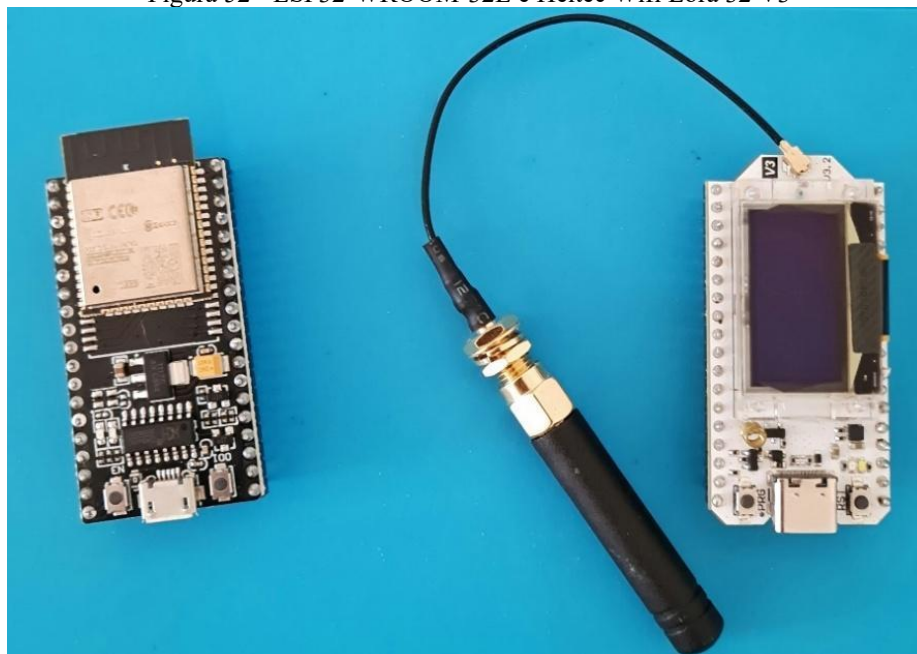
Nesta seção serão descritas as composições dos três tipos de nós da RSSF de monitoramento hidrometeorológico proposta neste trabalho, as funções dos itens e sensores, e os custos estimados.

4.4.1 Placa de desenvolvimento

A placa de desenvolvimento é a unidade central de um nó em uma RSSF. Ao receber a conexão de sensores, acesso à internet e ser programada por meio de uma IDE (*Integrated Development Environment*, em português Ambiente de Desenvolvimento Integrado), torna-se um objeto inteligente, inserido dentro do campo de IoT. Foram escolhidas as placas de desenvolvimento ESP32-WROOM-32E e a Heltec Wifi Lora 32 V3, por atenderem aos requisitos de processamento (ambas utilizam o microcontrolador ESP32, equipado com processador Xtensa 32-bit LX6 dual-core (LX7 para a Heltec) e SRAM de 520 KB) e terem preços acessíveis, de aproximadamente R\$ 50,00 e R\$ 200,00, respectivamente. A segunda possui módulo LoRa SX1262 integrado, um upgrade daquele utilizado por Sung, Devi, Hsiao

(2022). Outro ponto positivo é o fato de ambas já terem o módulo Wi-Fi integrado, o qual seria necessário no *gateway* e em alguns nós-sensores meteorológicos para o envio de dados à plataforma IoT. Ambas as placas podem ser alimentadas com tensões de 3,3 ou 5 VCC (tensão em corrente contínua). A Figura 52 apresenta as duas placas, à esquerda a ESP32-WROOM-32E.

Figura 52 - ESP32-WROOM-32E e Heltec Wifi Lora 32 V3



Fonte: Capturada pelo autor (2025)

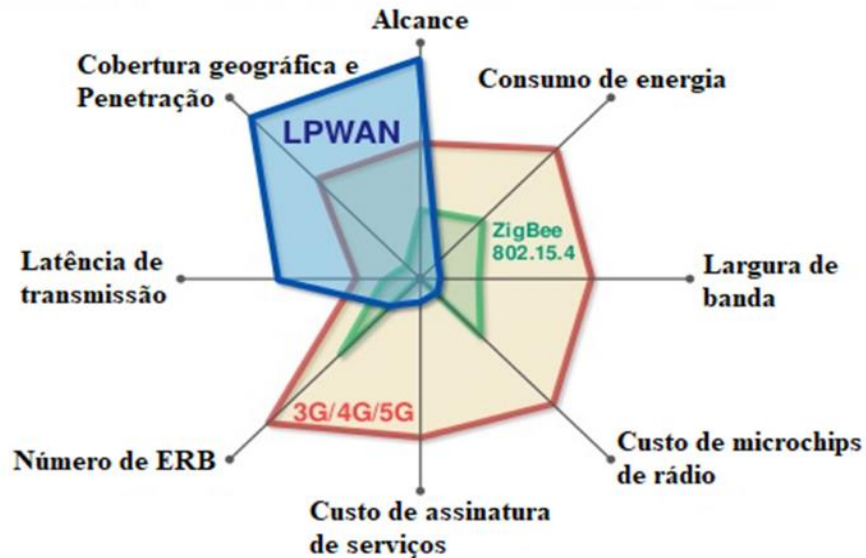
4.4.2 Módulo de comunicação M2M

O módulo de comunicação é o item que faz a comunicação entre os nós em uma RSSF, entre o *gateway* e outras redes ou entre sistemas microcontrolados e redes. No contexto deste trabalho o *mote*¹⁹, ou nó-sensor, enviará para o *gateway* apenas dados alfanuméricos, que requerem pequena largura de banda, portanto, neste caso é possível utilizar uma tecnologia de comunicação que consuma pouca energia. Considerando que os nós-sensores hidrológicos são posicionados na área urbana, é provável que até cerca de 2 km distancia exista uma repartição pública com acesso à internet, onde poderia ser posicionado um *gateway* ou um nó-sensor meteorológico para funcionar também como *gateway*. Sendo assim, foi escolhida a tecnologia de comunicação LPWAN (*Low Power Wide Area Network*), que é caracterizada como uma rede de baixo consumo energético e de longo alcance (até 12 km ou mais a depender do número de obstáculos), a qual é amplamente aplicada em comunicações M2M (*Machine to Machine*,

¹⁹ *Mote* é um pequeno sistema microcontrolado programado para executar tarefas específicas e com capacidade de comunicação sem fio com outros nós-sensores ou *motes*.

em português Máquina para Máquina) (MILAROKOSTAS *et al.*, 2023). A Figura 53 mostra uma comparação entre as tecnologias de comunicação, evidenciando como a *LPWAN* é a mais adequada para a presente proposta.

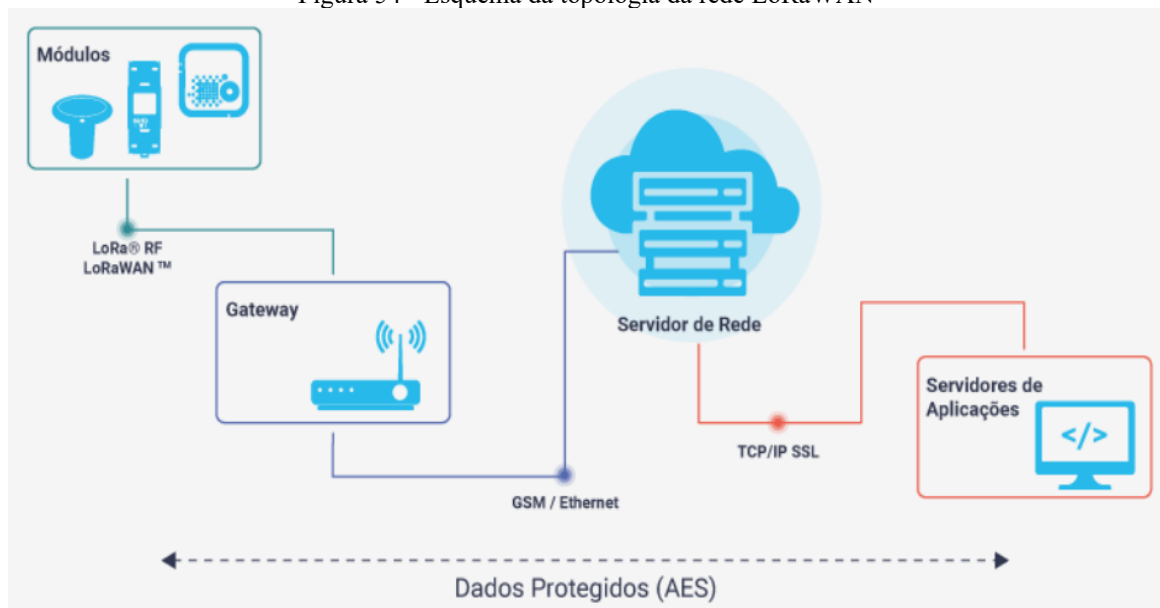
Figura 53 - Comparativo entre tecnologias de comunicação



Fonte: Meireles (2018)

Dentro da *LPWAN* existem diversos protocolos e o módulo escolhido utiliza o *LoRaWAN* (*Long Range Wide Area Network*), desenvolvido pela LoRa-Alliance (LORA ALLIANCE, 2015; MEIRELES, 2018). A sua proposta é a promoção de longo alcance e cobertura para formação de redes de dispositivos inteligentes (LORA ALLIANCE, 2015). A Figura 54 apresenta um esquema do funcionamento da topologia da rede *LoRaWAN*.

Figura 54 - Esquema da topologia da rede LoRaWAN



Fonte: ZenzorControl (2024)

No Brasil, para LoRaWAN, pode-se utilizar as faixas de frequências faixas de 902 MHz a 907,5 MHz e de 915 MHz a 928 MHz (BRASIL, 2017a, 2017b; LORA ALLIANCE, 2022), que fazem parte do grupo de bandas ISM (*Industrial, Scientific, and Medical*), isto é, são faixas de frequências reservadas internacionalmente para o desenvolvimento Industrial, Científico e Médico, e não necessitam de licenças para utilização, apenas o respeito à regulamentação local (SONG; NUAYMI; LAGRANGE, 2016). Sendo assim optou-se pela utilização da placa da Heltec com o módulo LoRa SX1262 integrado. Também poderia ser utilizado, juntamente com a ESP32-WROOM-32E, o módulo LoRa SX1262 RF Wireless que opera nessa faixa de frequência. O custo médio de importação do módulo é de R\$ 30,00, o que poderia acarretar em economia de R\$ 120,00 em relação à aquisição da placa da Heltec, perdendo-se, resumidamente, apenas o display OLED que acompanha esta última, que seria apenas uma comodidade na RSSF, mas que teve bastante utilidade na execução dos testes neste trabalho. Esta opção poderia também diminuir custos de reposição. Como desvantagem, aumenta-se o menor trabalho em montagem de circuitos. A Figura 55 mostra o módulo LoRa SX1262 RF Wireless.

Figura 55 - LoRa SX1262 RF Wireless



Fonte: Ebyte (s.d.)

4.4.3 Itens do nó-sensor meteorológico

O nó-sensor meteorológico será posicionado preferencialmente em locais com atendimento de rede elétrica e internet, sendo sugeridos prédios de repartições públicas para isso. Estando em locais “remotos” ou não urbanizados, pode-se utilizar alimentação elétrica *off-grid*²⁰, por meio da geração de energia elétrica com uso de painel fotovoltaico e transmissão dos dados via protocolo LoRaWAN para outro nó ou *gateway*. Na Figura 56 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.

²⁰ Neste caso, o termo diz respeito ao nó-sensor não utilizar a rede elétrica convencional.

Figura 56 - Nó-sensor meteorológico



Fonte: Capturada pelo autor (2025)

4.4.3.1 Placa de desenvolvimento e módulo de comunicação LoRa

As placas de desenvolvimento (Figura 56.A) dos nós-sensores meteorológicos poderão ser de qualquer um dos dois tipos descritos na subseção 4.4.1, a depender da necessidade de conter ou não o módulo de comunicação LoRa. Estando o nó-sensor meteorológico dentro raio de alcance da comunicação via LoRaWAN com o nó-sensor hidrológico – conforme testes realizados, descritos na subseção 4.5.1 – este deverá conter um módulo LoRa SX1262, integrado a placa de desenvolvimento ou adicional. Esta possibilidade diminuiria custos com *gateways* adicionais. Convém destacar novamente que o posicionamento ideal do nó-sensor

4.4.3.3 Módulo leitor e gravador de cartões de memória

Este módulo (Figura 56.C) pode estar presente no nó-sensor meteorológico caso este esteja atuando também como *gateway* ou como armazenamento redundante para evitar a perda de dados. O módulo é responsável por gravar os dados em um cartão de memória do tipo *microSD*. O armazenamento é útil para os casos de indisponibilidade do acesso à internet, como alternativa para recuperação dos dados não enviados à plataforma IoT. Neste trabalho o teste de gravação dos dados foi realizado em um *microSD* com capacidade de 32 GB de armazenamento. Esse é o único módulo que precisou de alimentação com tensão de 5 VCC, entretanto é possível encontrar módulo equivalente com alimentação de 3,3 VCC.

4.4.3.4 Fonte de alimentação

Na Figura 56.E está sendo utilizada uma fonte com saída 9 VCC 1 A, em seguida, essa tensão é reduzida por uma Fonte Ajustável para Protoboard (Figura 56.D) para 3,3 VCC e 5 VCC, em cada uma das duas saídas desta. A fonte alimenta todos componentes diretamente.

Existem alternativas para alimentação da placa de desenvolvimento, utilizando por exemplo um carregador de *smartphone* com saída de 5 V e um cabo com uma das pontas do tipo C macho. Neste caso, os demais componentes seriam alimentados pelas saídas 3,3 VCC e 5 VCC da placa. Sugere-se que a alimentação dos componentes venha diretamente da fonte e não da placa para evitar a sobrecarga. Fontes 3,3 VCC ou outras fontes com fornecimento a partir de 5 W combinadas com reguladores de tensão podem ser consideradas suficientes para alimentar esse nó-sensor.

4.4.3.5 Sensor de umidade e temperatura DHT22

Este sensor está acoplado ao pluviômetro. Ele mede a de umidade de 0 a 100 %, com precisão de + ou - 2% e a temperatura de -40 a 80 °C, com precisão de + ou - 0.5 °C. Ele pode ser ignorado, bastando não ligar o sinal de dados à GPIO²¹, entretanto ainda ele estará sendo alimentado e seu consumo máximo nessa condição seria de até 50uA – muito baixo.

4.4.3.6 Anemômetro

Por conveniência da etapa de testes foi adicionado um anemômetro (Figura 56.F) ao nó-sensor meteorológico para medição da velocidade do vento, entretanto os dados coletados por

²¹ *General Purpose Input/Output* (em português Entrada/Saída de Propósito Geral) são pinos em um microcontrolador que podem ser configurados para funcionar como entradas ou saídas digitais.

ele não foram objetos de estudo neste trabalho. No entanto, pode ser aproveitado em outros métodos de previsão, assim como realizado no trabalho de Prakash, Barthwal, Acharya (2022).

4.4.3.7 Demais componentes

O nó-sensor meteorológico conta ainda com outros componentes, como, aqueles do esquema do pluviômetro:

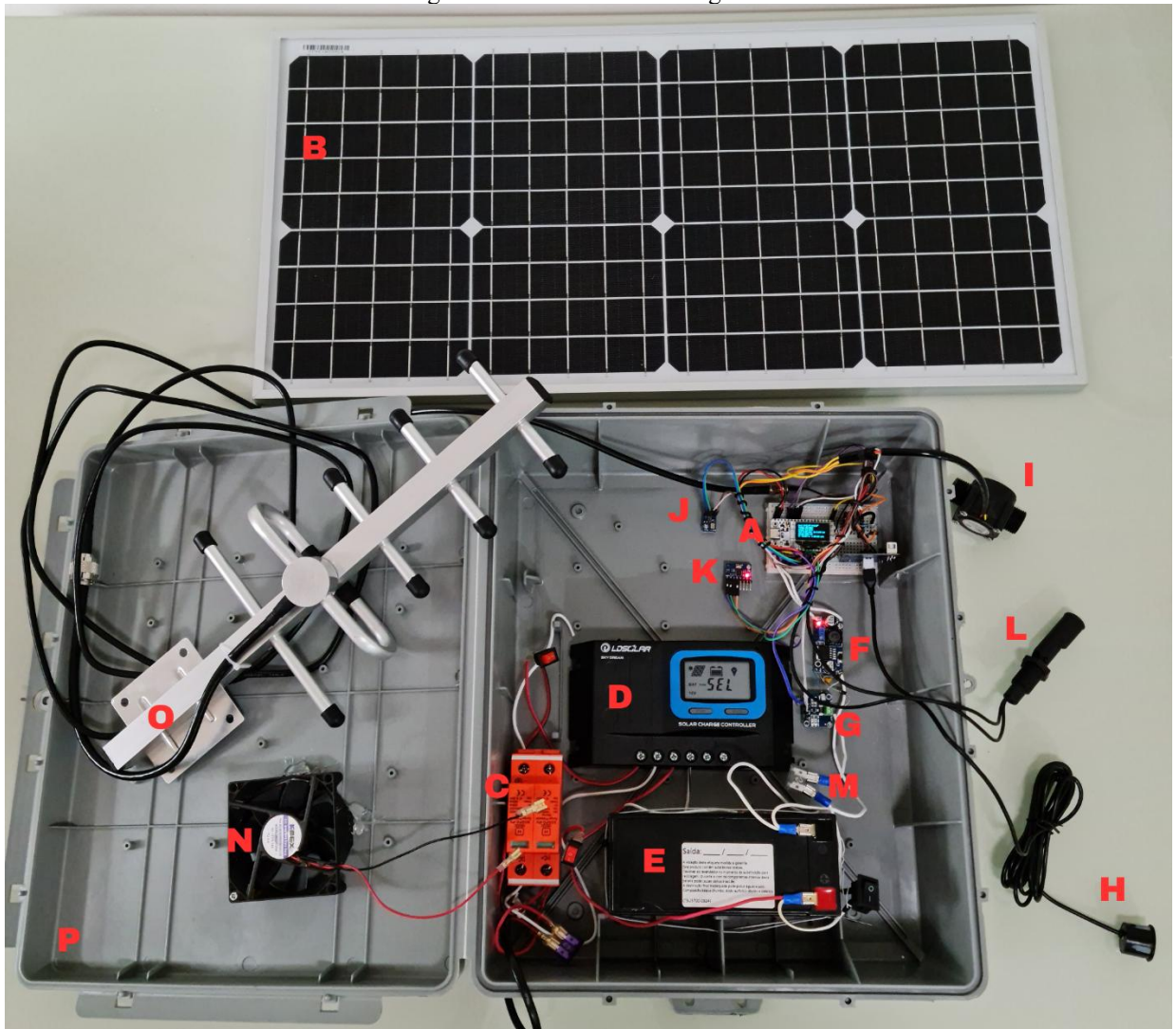
- Optoacoplador PC817: um pequeno componente eletrônico composto por um LED e um fototransistor, ambos encapsulados em um único chip, permite a transferência de sinais elétricos entre dois circuitos isolados. Neste caso, quando o pluviômetro mede 0,25 mm, é emitido um pulso elétrico, então uma corrente elétrica passa pelo LED, e ele emite luz infravermelha. Essa luz incide sobre o fototransistor, que, por sua vez, permite a passagem de corrente elétrica em seu circuito que vai para uma GPIO e também para o pino GND da placa, denotando um pulso. Esse funcionamento permite que o pluviômetro possa ser alimentado com uma tensão superior àquela da placa de desenvolvimento, desde que a tensão no pino 4 do PC817 esteja dentro dos limites da tensão digital suportada pela GPIO.
- Resistores 470R (470Ω 1/4 W) e 10K (10000Ω 1/4 W): o primeiro tem a função de limitar a corrente no circuito e o segundo de puxar a tensão para um nível lógico baixo quando o fototransistor está desligado e de limitar ruídos e reduzir a corrente que flui para a GPIO quando o pluviômetro emite pulsos.

Por último estão a *protoboard* que pode ser substituída por uma PCI (placa de circuito impresso) em uma implantação do sistema; os fios, que também seriam reduzidos em uma instalação permanente; a antena (Figura 56.H); e uma caixa acopladora (Figura 56.G) para proteção física.

4.4.4 Itens do nó-sensor hidrológico

O nó-sensor hidrológico geralmente estará posicionado em locais onde é mais conveniente a alimentação elétrica *off-grid*, o que é motivado também pelo baixo consumo energético. Na Figura 58 é possível visualizar o nó-sensor hidrológico com todos componentes interligados, utilizando uma *protoboard*, haja vista o sistema não ter sido aplicado, apenas ter passado por testes de algumas funcionalidades. Algumas letras foram adicionadas na imagem para indicar cada item, os quais serão descritos 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 seu local de fixação.

Figura 58 - Nó-sensor hidrológico



Fonte: Capturada pelo autor (2025)

4.4.4.1 Placa de desenvolvimento e módulo de comunicação LoRa

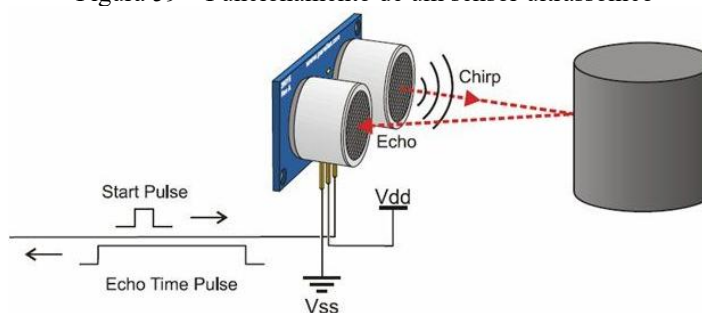
Assim como no outro nó-sensor, este nó-sensor deve ter uma placa de desenvolvimento (Figura 58.A, neste caso, uma Heltec Wifi Lora 32 V3) de um dos dois tipos descritos na subseção 4.4.1 e, somente em rara exceção, não precisará possuir módulo LoRa SX1262, integrado ou adicional, quando houver alcance de conexão Wi-Fi dotada de acesso à internet. Essa hipótese dificilmente ocorrerá devido ao alcance limitado de redes Wi-Fi. Nos casos comuns, o nó-sensor meteorológico enviará seus dados ao *gateway* ou nó-sensor meteorológico alcançável por meio do protocolo LoRaWAN, através de seu módulo LoRa SX1262.

4.4.4.2 Sensor de medição do nível d'água

Para a aferição do nível d'água, optou-se pela utilização de um sensor ultrassônico (Figura 58.H), por ter um baixo custo, consumo energético e resultados positivos relacionados

à precisão em outras pesquisas (PRATAMA; MUNADI; MAYASARI, 2017; GROOT; DEZFOULI, 2020; AL KINDHI *et al.*, 2023; PRAKASH; BARTHWAL; ACHARYA, 2023; HASHIM; ADNAN; HUSAIN, 2023). O modelo escolhido foi o módulo sensor JSN-SR04T V 3.0, que pode aferir distâncias entre 21 cm e 600 cm com acurácia aproximada de 3 mm, adequada para o sistema proposto. Possui resistência à água e acompanha um cabo de 2,5 m. O custo médio do sensor é de aproximadamente R\$ 80,00. Alternativamente pode ser usado o MB7066 XL-MaxSonar-WRL1, que pode alcançar até 1068 cm, entretanto possui um custo médio elevado, de \$ 110,00 para importação. A Figura 59 mostra o funcionamento de um sensor ultrassônico, o modelo HC-SR04.

Figura 59 – Funcionamento de um sensor ultrassônico



Fonte: UsinaInfo (2016)

4.4.4.3 Sensor de fluxo

O sensor de fluxo YF-S201 (Figura 58.I) é utilizado para medir vazão em condutos forçados por meio da sua fixação ao longo de uma tubulação de 20 mm de diâmetro, entretanto, neste trabalho ele foi incluído para aferir a velocidade do escoamento no curso d'água. Este sensor foi adicionado apenas pela oportunidade de coletar mais métricas por um custo acessível, portanto, não é obrigatório para o funcionamento do sistema, além de não ser o mais apropriado para esta função, visto que a velocidade do escoamento em um rio é variável ao longo da seção transversal. Este sensor também fez parte dos sistemas propostos por Pratama *et al.* (2017), Prakash, Barthwal, Acharya (2022) e Sung, Devi, Hsiao (2022).

4.4.4.4 Sensor de umidade e temperatura

O módulo sensor de umidade e temperatura AHT-10 (Figura 58.J e Figura 60.E) deve ficar dentro da caixa de acoplamento com IP65 e sua função é de aferir a temperatura e umidade no interior dela, acionando a ventoinha de refrigeração com base em um gatilho configurado. Ainda é possível monitorar anormalidades no funcionamento do nó-sensor, principalmente em relação às variações de temperatura.

4.4.4.5 Sensor de inclinação

A estrutura do nó-sensor hidrológico poderá estar sujeita aos impactos físicos das enchentes e inundações, dado seu posicionamento nos locais de risco, além de possivelmente ser fixado em solo de baixa resistência. Diante desse contexto, foi incluído um módulo MPU-6050 (Figura 58.K), que contém acelerômetro e giroscópio, ambos de 3 eixos, sendo capaz de fornecer informações sobre a inclinação da estrutura em qualquer direção, promovendo a manutenção preventiva ou corretiva em caso de anormalidade. O sensor escolhido também mede temperatura.

4.4.4.6 Sensor de nível com boia horizontal

O sensor de nível com boia horizontal (Figura 58.L) é responsável por acionar ou suspender o sensor ultrassônico e o sensor de fluxo quando a superfície da água no córrego estiver acima ou abaixo de sua cota de instalação, por meio de suas duas posições: aberta ou fechada. A cota de instalação do sensor deve ser aquela imediatamente acima do nível máximo do escoamento durante o período de estiagem. Foi previsto para proporcionar economia de energia e volume de dados a serem manipulados e armazenados.

4.4.4.7 Regulador de tensão

O módulo LM2596 (Figura 58.F e Figura 60.B) é um regulador de tensão *step-down*, que permite a redução de tensão em corrente contínua a partir do ajuste de um *trimpot* (*trimmer potentiometer* - potenciômetro ajustável). Pode reduzir tensões entre 3,2 e 40 VCC com eficiência de até 92% e opera entre -40 °C a 85 °C. O nó-sensor hidrológico é alimentado por bateria de 12 V, desta forma é necessária a utilização de um módulo desse tipo para reduzir a tensão ao patamar de alimentação da placa e dos sensores, que neste caso foram alimentados com 3,3 VCC. Na Figura 60.D é possível visualizar no display do multímetro a tensão vinda da bateria após redução pelo LM2596.

4.4.4.8 Monitoramento da alimentação elétrica

O módulo INA219 (Figura 58.G e Figura 60.A) é responsável por monitorar a saúde da bateria e o consumo energético, podendo identificar anormalidades neste último. Esse monitoramento é realizado por meio da tensão e da corrente medidas entre a bateria e o LM2596 (Figura 60.B). A Figura 60.C 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 combinados podem representar o consumo. Solução similar foi adotada por Loftis *et al.* (2018).

Figura 60 - Teste do nó-sensor hidrológico



Fonte: Capturada pelo autor (2025)

4.4.4.9 Suprimento elétrico do nó-sensor hidrológico

O nó-sensor não tem alimentação direta de uma rede elétrica, devido ao seu posicionamento sobre o leito do córrego, portanto foi necessária a previsão de uma fonte de energia constante, sendo assim, definiu-se que o conjunto dever ser alimentado por bateria, a

qual será recarregada por energia solar, por meio de painel fotovoltaico. A independência de rede elétrica também garante que as medições sejam efetuadas mesmo quando há falta de energia, o que pode ocorrer com certa frequência em eventos extremos. Conforme visualizado na Figura 60.C, 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) atendendo as 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 (5), onde o consumo está em Ah, a corrente está em A e o tempo está em h.

$$\text{Consumo} = \text{Corrente} \times \text{Tempo} \quad (5)$$

Consumo da placa e dos módulos:

- Tempo de ciclo: 2 minutos
- Tempo de atividade por ciclo: 10 segundos

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

Consumo da ventoinha:

- Corrente: 0,15 A
- Tempo: 9 horas

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

Consumo diário total:

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

Bateria:

A bateria utilizada para realização de testes foi uma bateria selada de chumbo ácido de 12 V 9 Ah (Figura 58.E), entretanto 7 Ah de capacidade, que é uma capacidade comum e econômica de baterias, seria suficiente para uma autonomia de 4 dias de funcionamento do nó-sensor hidrológico. Autonomia maior poderia ser associada ao nó-sensor meteorológico, que possui menos itens.

Painel fotovoltaico:

Para a recarga da bateria foi escolhido um painel fotovoltaico (Figura 58.B) com capacidade de geração de 30 W de potência. O modelo referência escolhido foi o Painel

Fotovoltaico 30 W Monocristalino - ZTROON - ZTP-030M, da marca NeoSolar. Ele possui tensão de operação (V_{mp}) 19,5 VCC e corrente de operação de 1,59 A, que é suficiente para recarregar uma bateria de 12V 7Ah, em aproximadamente 5 horas, considerando as possíveis perdas de carga ocasionadas pelo controlador de carga.

Controlador de carga solar:

O controlador de carga solar (Figura 58.D) regula a energia proveniente de painéis fotovoltaicos para carregar as baterias de forma segura e eficiente. Isso é feito monitorando a tensão e a corrente do painel fotovoltaico e da bateria, e ajustando a saída de acordo com os estágios de carregamento da bateria. Foi escolhido o modelo SD2410C da marca LDSOLAR, que é do tipo PWM (Pulse Width Modulation), o qual tem 150 W de potência de geração em tensão de 12 V. A corrente máxima de carregamento é de 10 A, maior que a máxima corrente do painel. Esse modelo possui estágios de carregamento ajustáveis, e esse foi um dos motivos da escolha.

Demais itens (alimentação):

Um Dispositivo de Proteção Contra Surtos (DPS) para corrente contínua (Figura 58.C) com o devido aterramento é necessário para proteção contra descargas atmosféricas, assim como outros itens, entre eles: fusíveis e chaves liga e desliga.

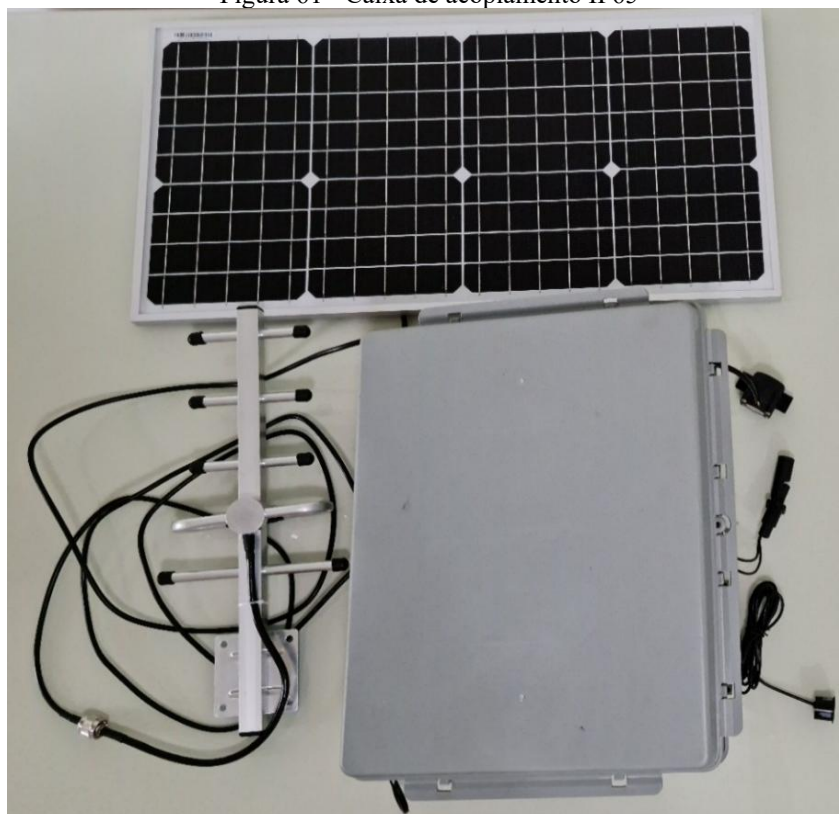
4.4.4.10 Demais componentes

No trecho antes do regulador de tensão para filtrar ruídos de alta e baixa frequência além de suavizar variações de tensão são necessários: capacitores de 100nF e de 10 μ F; para proteção contra corrente reversa: diodo *Schottky* 1N5819;

Um resistor *pull-down* de 10 K Ω 1/4 W é necessário para o funcionamento correto do sensor de nível com boia horizontal.

Outros itens, como a *proto-board* que pode ser substituída por uma PCI (placa de circuito impresso) em uma implantação do sistema; os fios, que neste caso são recomendados de cobre com ao menos 0,5 mm² de seção transversal no circuito de alimentação solar; a antena (Figura 58.O) com ganho em dBi suficiente para o alcance da comunicação com o outro nó; uma caixa acopladora (Figura 58.P) com IP65 para proteção física e contra intempéries; poste para suporte do nó; uma ventoinha para refrigeração (Figura 58.N) no interior da caixa; fusível lâmina de 2 A (Figura 58.M) para proteção contra sobrecorrente e sobretensão; chave liga e desliga; e terminais. A Figura 61 mostra a caixa fechada, mantendo fora apenas aqueles componentes que tem seu funcionamento previsto na área externa.

Figura 61 - Caixa de acoplamento IP65



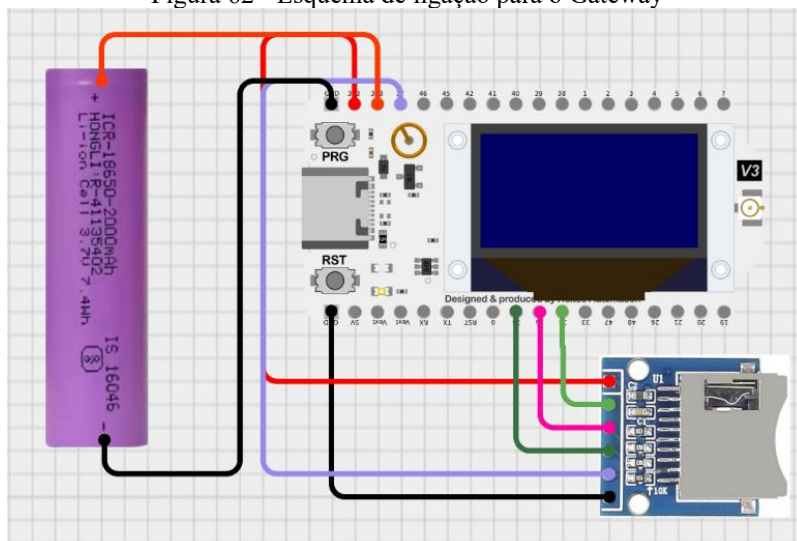
Fonte: Capturada pelo autor (2025)

4.4.5 Itens do Gateway

O *gateway*, neste trabalho, é o nó responsável por receber os 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 for possível utilizar um nó-sensor meteorológico para acumular essa função de *upload* dos dados. Ele deve ser posicionado em local com disponibilidade de rede elétrica e acesso à internet. Os itens que compõem o *gateway* são a placa de desenvolvimento com o módulo SX1262 integrado ou adicionado, módulo para cartão SD, fonte de alimentação com cabo e antena adequada para atender o raio de cobertura de comunicação com os nós-sensores.

A Figura 62 mostra o *gateway* com a Heltec Wifi Lora 32 V3 e um módulo leitor/gravador de cartão SD instalado, alimentado por uma bateria do tipo 18650 com capacidade de 2000 mAh (a placa possui módulo de carregamento de baterias de 3,7 V integrado), a qual pode ser substituída por alimentação via cabo tipo C oriunda 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.

Figura 62 - Esquema de ligação para o Gateway



Fonte: Elaborado pelo autor por meio do aplicativo *web* Cirkuit Designer (2025)

4.4.6 Custos estimados dos nós-sensores e do gateway

Os custos materiais estimados dos nós-sensores são aqueles apresentados na Tabela 4. Os serviços de montagem, codificação e plataforma IoT realizados pelo autor não foram incluídos. Outros serviços de instalações *in loco* também não foram incluídos.

Tabela 4 – Custos dos nós-sensores

| Nó-sensor Hidrológico | Preço médio | Nó-sensor Meteorológico | Preço médio |
|-------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------|
| Heltec Wifi Lora 32 V3 ^a | R\$ 200.00 | Heltec Wifi Lora 32 V3 ^h | R\$ 125.00 |
| Antena ^b | R\$ 74.00 | Antena ⁱ | R\$ 10.00 |
| JSN-SR04T V 3.0 ^c | R\$ 80.00 | Pluviômetro | R\$ 520.00 |
| YF-S201 ^d | R\$ 30.00 | Anemômetro ^d | R\$ 285.00 |
| AHT-10 ^e | R\$ 12.00 | Módulo para Cartão SD | R\$ 8.00 |
| MPU-6050 | R\$ 20.00 | Cartão SD | R\$ 25.00 |
| Sensor boia | R\$ 25.00 | Fonte de alimentação | R\$ 20.00 |
| INA219 | R\$ 15.00 | Regulador de tensão | R\$ 10.00 |
| LM2596 | R\$ 10.00 | Outros componentes ^f | R\$ 10.00 |
| Bateria | R\$ 120.00 | Caixa simples | R\$ 15.00 |
| Controlador de carga | R\$ 130.00 | Suporte ^j | R\$ 50.00 |
| Painel | R\$ 150.00 | | |
| DPS | R\$ 70.00 | | |
| Kit de aterramento | R\$ 50.00 | | |
| Outros componentes ^f | R\$ 25.00 | | |
| Caixa IP65 | R\$ 75.00 | | |
| Suporte/Poste ^g | R\$ 550.00 | | |
| Preço total^k | R\$ 1,636.00 | Preço total^k | R\$ 1,078.00 |
| Preço mínimo^l | R\$ 1,474.00 | Preço mínimo^l | R\$ 793.00 |

Fonte: Autor (2025)

- (a) Pode ser substituída pelo conjunto ESP32-WROOM-32E + Módulo LoRa SX1262, com economia de R\$ 120,00;
- (b) Considerado o custo médio entre adotar uma antena omnidirecional e uma antena direcional;
- (c) Depende da altura de fixação e da profundidade do rio. Pode ser trocado por um modelo mais robusto;
- (d) Pode ser dispensado se o objetivo for obter apenas as métricas mínimas de funcionamento;
- (e) Pode ser dispensado se o objetivo for obter apenas as métricas mínimas de funcionamento, pois o sensor de temperatura também está presente no MPU-6050 e a leitura da umidade não é obrigatória para o funcionamento;
- (f) Incluem, PCI, fios, cabos, terminais, fusíveis, chaves, resistores, capacitores e diodos.
- (g) Pode ser variável e depende das condições do local de instalação. Um poste galvanizado de 4 metros de altura tem preço entre R\$ 400,00 e R\$ 700,00.
- (h) Considerado o custo médio entre o nó-sensor com ou sem função de *gateway*;
- (i) Considerado o custo médio para o nó-sensor com antena omnidirecional ou sem antena (sem função de *gateway*);
- (j) Considerado o custo de um mastro/suporte de antena;
- (k) Soma simples de todos valores;
- (l) Soma apenas dos itens estritamente necessários para o sistema de alertas, considerando também a placa de custo mais baixo.

Para o gateway os custos são apresentados na Tabela 5. Igualmente não foram incluídos custos de montagem, codificação e instalação. As observações são as mesmas elencadas acima.

Tabela 5 – Custos do *gateway*

| Gateway | Preço médio |
|-------------------------------------|-------------------|
| Heltec Wifi Lora 32 V3 ^a | R\$ 125.00 |
| Antena | R\$ 20.00 |
| Módulo para Cartão SD | R\$ 8.00 |
| Cartão SD | R\$ 25.00 |
| Fonte de alimentação | R\$ 20.00 |
| Regulador de tensão | R\$ 10.00 |
| Outros componentes ^f | R\$ 10.00 |
| Caixa simples | R\$ 15.00 |
| Suporte ^j | R\$ 50.00 |
| Preço total^k | R\$ 283.00 |
| Preço mínimo^l | R\$ 238.00 |

Fonte: Autor (2025)

4.5 TESTES DE FUNCIONAMENTO

O modelo proposto passou por testes em diversas funcionalidades e sofreu alterações e adições de componentes e módulos para conferir maior confiabilidade e resiliência. Nesta seção serão apresentados os resultados dos testes efetuados.

4.5.1 Protocolo de comunicação LoRaWAN

Muitos estudos já comprovaram, por meio de experimentos, a capacidade de alcance da comunicação via LoRaWAN (WIXTED *et al.*, 2016; GROOT; DEZFOULI, 2020; SENDRA *et al.*, 2020; ALIPIO; BURES, 2024; JULEDI *et al.*, 2024). A obtenção de eficácia na comunicação por meio do protocolo de comunicação LoRaWAN depende da consideração de diversos aspectos, entre os quais, destacaram-se ao longo dos testes os aspectos: legislativos, morfologia urbana, distância e tamanho da mensagem. A distribuição dos nós pode ser realizada por meio de testes que levem em consideração esses quatro aspectos, ajustando-se os melhores parâmetros de comunicação e a potência de transmissão para escolha de antenas.

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).

Durante os testes, utilizaram-se duas placas de desenvolvimento Heltec Wifi Lora 32 V3 que acompanhavam antenas omnidirecionais com ganho de 3 dBi²², sendo uma delas emissora e a outra receptora, a primeira estacionária e a segunda móvel. O teste consistiu em um contador de números inteiros, que resultou em pacotes de até 4 bytes quando o contador atingiu números de quatro dígitos. Cada número recebido era mostrado no display, juntamente com o RSSI²³ e o tamanho do pacote. Caso o contador omitisse algum número, significava que o pacote foi perdido. Ajustaram-se os parâmetros de transmissão para o *DataRate 0* (DR0) da AU915-928, em resumo: SF²⁴ (*spreading factor*, em português fator de espalhamento) 12 e BW (*bandwidth*, em português largura de banda) 125 KHz, os quais são os mais adequados para o máximo alcance (ORTIZ, 2018; MILAROKOSTAS *et al.*, 2023), no entanto, de acordo com as regulamentações, essa configuração excede o tempo de utilização do espectro (*dwell time*) de 400 ms (milissegundos), motivo pelo qual foi utilizada apenas nestes testes. Os demais parâmetros foram a potência de transmissão de 20 decibel-miliwatt (dBm)²⁵ e a Taxa de

²² O dBi (*decibels isotropic*) é a unidade de medida representa o ganho de uma antena em relação a uma antena isotrópica teórica, ganho este que descreve a capacidade de uma antena de concentrar a energia do sinal em uma determinada direção.

²³ O *Received Signal Strength Indicator*, em português Indicador de Intensidade do Sinal Recebido, é expresso em dBm com sinal negativo e representa a força do sinal. Quanto mais próximo de 0, mais forte o sinal. Neste caso a sensibilidade do rádio da placa Heltec alcança até -134 dBm (com SF 12 e BW 125 KHz).

²⁴ O *Spreading Factor*, em português Fator de Espalhamento, varia de 7 a 12. Valores mais altos representam maior alcance, maior resistência à interferência e menor taxa de dados, valores menores representam o contrário.

²⁵ O dBm (decibel-miliwatt) é unidade de medida logarítmica usada para expressar a potência absoluta de um sinal em relação a 1 miliwatt (mW).

Codificação (CR)²⁶ de 4/5.

Foi possível obter sucesso na comunicação até 385 metros de distância com visada parcialmente desobstruída e diferença de altitude de 25 metros, entretanto descontínua, com perdas de pacotes frequentes, com RSSI entre -120 e -130 dBm. Até aproximadamente 300 metros, e diferença de altitude de 20 metros, a comunicação ocorreu de forma contínua, sem perdas, com RSSI em torno de -85 dBm. A Figura 63 mostra o local desse teste, a distância e o perfil do terreno para a situação sem perdas de pacotes. O emissor (E) estava posicionado no terceiro andar do prédio, próximo a uma das janelas, e o receptor (R) no passeio público. No ponto mais baixo está o emissor – o perfil do terreno destaca, à sua direita, os parâmetros da posição indicada pela seta vermelha na imagem de satélite.

Figura 63 - Teste de alcance da antena de 3 dBi



Fonte: Elaborado pelo autor. Imagem de satélite de Google (2025)

Diante do baixo alcance conseguido, procedeu-se com a realização de novos testes,

²⁶ O *Coding Rate*, em português Taxa de Codificação, é um parâmetro utilizado em sistemas de comunicação digital para adicionar redundância. Um CR 4/5 significa que a cada 4 bits de dados úteis, 1 bit de redundância é adicionado o qual é usado para verificação da integridade dos dados após recebimento.

trocando as antenas por outras omnidirecionais de 7, 10 e 12 dBi e uma direcional (ou *yagi*) de 8 dBi posicionadas, respectivamente, da esquerda para a direita na Figura 64. O custo de importação de cada unidade omnidirecional foi de aproximadamente R\$ 20,00 e da direcional R\$ 127,00.

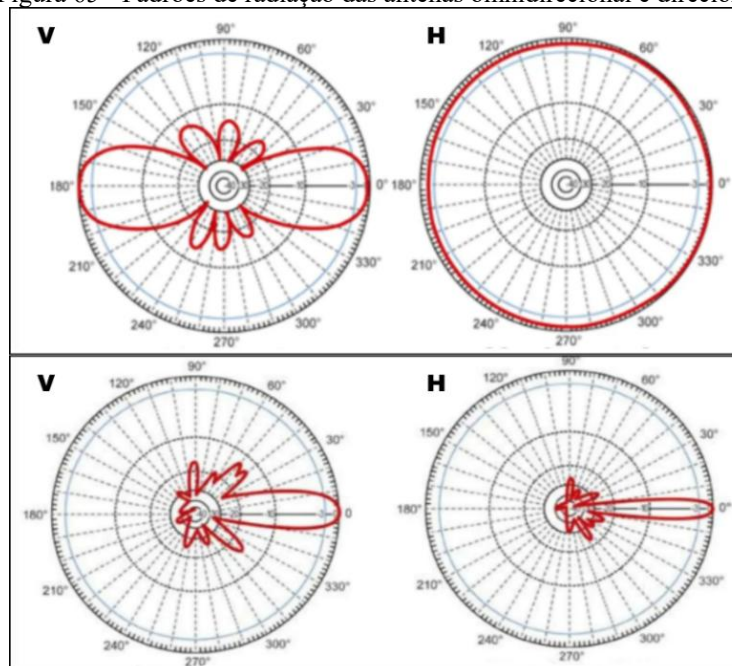
Figura 64 - Antenas omnidirecionais e direcional



Fonte: Capturada pelo autor (2025)

As antenas omnidirecionais propagam o sinal horizontalmente de forma radial. Na Figura 65, parte superior, é possível visualizar os padrões de radiação horizontal e vertical para uma antena omnidirecional. Já as antenas direcionais concentram o sinal em uma direção específica. Na parte inferior da mesma figura é mostrado os padrões de radiação de uma antena direcional.

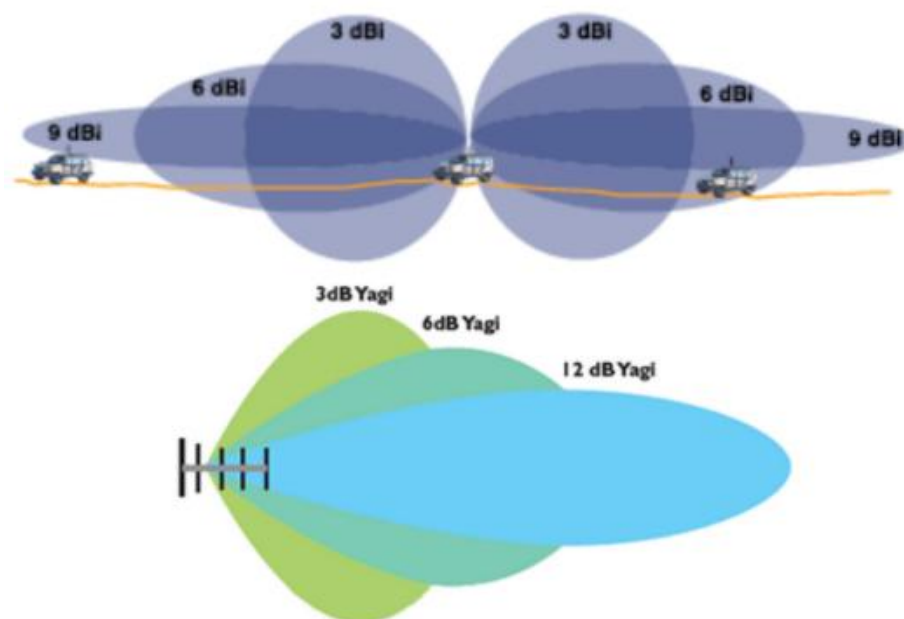
Figura 65 - Padrões de radiação das antenas omnidirecional e direcional



Fonte: Adaptado de Nguyen (2021)

As antenas possuem uma característica específica relacionada à cobertura de sinal. Quanto maior o ganho, mais estreito é o padrão de radiação vertical. Nas antenas omnidirecionais, a cobertura horizontal aumenta, reduzindo a cobertura vertical. Nas antenas direcionais, ocorre um efeito similar: o sinal alcança um ponto mais distante, diminuindo os ângulos de cobertura horizontal e vertical, direcionando o sinal para um ponto específico. Esses efeitos podem ser visualizados na Figura 66: na parte superior para antenas omnidirecionais e na inferior para antenas direcionais.

Figura 66 - Padrões de radiação ao aumentar o ganho da antena



Fonte: Adaptado de RFI (s.d.) e de Martins (2016)

Durante os novos testes, efetuados em locais urbanizados com edificações de até 12 metros de altura, utilizando os mesmos parâmetros de comunicação anteriormente configurados nas duas placas, resultados mais satisfatórios foram obtidos a partir da combinação de antenas omnidirecionais de 10 dBi. A distância máxima sem perdas de pacotes foi de aproximadamente 700 metros, com diferença de altitude de cerca de 50 metros (Figura 68, à esquerda) e de cerca de 850 metros no mesmo plano horizontal. As antenas de 12 dBi tiveram resultados similares, o que era esperado, pois segundo a regulamentação, a EIRP²⁷ máxima é de 30 dBm, então foi necessário diminuir a potência de transmissão do rádio de 20 para 18 dBm. A Figura 67 mostra o recebimento do pacote '66' pelo nó receptor (nos testes, o móvel), de tamanho 2 bytes com RSSI de -108 dBm.

²⁷ A *Effective Isotropic Radiated Power*, em português Potência Isotrópica Radiada Equivalente, é a medida da potência total irradiada por uma antena em dBm. Ela é obtida a partir da soma da potência do transmissor (dBm) com o ganho da antena (dBi).

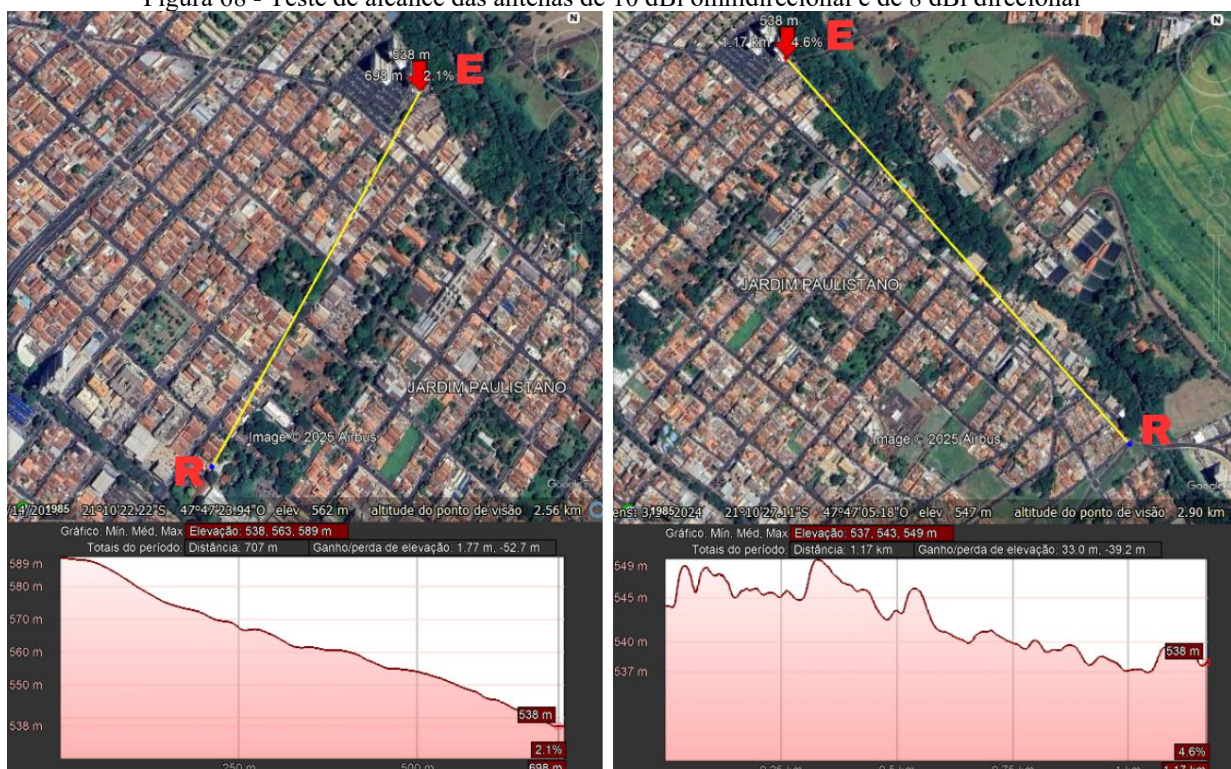
Figura 67 - Recebimento de pacote via LoRaWAN



Fonte: Capturada pelo autor (2025)

A melhor combinação geral foi da antena omnidirecional de 10 dBi no emissor com a direcional de 8 dBi no receptor. Os parâmetros de comunicação utilizados foram os mesmos do teste inicial, exceto a potência de transmissão do receptor, que foi aumentada para 22 dBm (a máxima suportada pela placa) para utilização da máxima EIRP permitida. A maior distância de comunicação sem perdas (com RSSI em torno de -100 dBm), foi de aproximadamente 1150 metros no mesmo plano horizontal (Figura 68, à direita). Esses resultados se aproximam daqueles obtidos por Wixted *et al.* (2016).

Figura 68 - Teste de alcance das antenas de 10 dBi omnidirecional e de 8 dBi direcional



Fonte: Elaborado pelo autor. Imagem de satélite de Google (2025)

Posteriormente, ainda com a melhor combinação de antenas, foi testado o alcance do nó-sensor hidrológico enviando todos dados coletados por ele, os quais totalizaram até 50 bytes, para o nó-sensor meteorológico. Alguns parâmetros de transmissão foram alterados (DR3: SF

9 e BW 125 KHz) para atender a regulamentação quanto ao *dwell time* de 400 ms. A distância alcançada foi de 750 metros, com diferença de altitude de 37 metros. No mesmo plano horizontal foi obtida aproximadamente a mesma distância, com significativa obstrução por edificações. Nesses testes, a potência de transmissão configurada no receptor foi de 22 dBm, totalizando a EIRP de 30 dBm, considerando o ganho de 8dBi de ganho da antena direcional. No emissor a EIRP foi de 30 dBm, sendo 20 dBm de potência de transmissão e 10 dBi de ganho da antena omnidirecional.

A partir dos testes, detectou-se que utilização de LoRaWAN permitiu a comunicação Non-Line-of-Sight (NLOS – Sem Linha de Visada) entre os nós, demonstrando que é uma alternativa viável para WSNs em ambientes urbanos. Para o *gateway* a antena mais adequada é a omnidirecional, pois dessa forma pode atender vários nós. Para os nós mais distantes, antenas direcionais são as mais recomendadas, devido ao maior alcance, e para múltiplos nós, pode ser necessária a adição de mais antenas com diferentes padrões de radiação e configuradas em frequências distintas para possibilitar o recebimento de pacotes simultaneamente, o que também deve ser ajustado no código-fonte. Convém destacar que diante de obstruções, melhores resultados podem ser obtidos posicionando a antena receptora no topo de edificações altas, ao ar livre (GROOT; DEZFOULI, 2020; SENDRA *et al.*, 2020; JULEDI *et al.*, 2024; SINGH, 2024), utilizando antena do tipo *outdoor*, sendo que aquelas com menor ganho tem 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 repositório²⁸ criado no GitHub para o presente trabalho, dentro do diretório “teste_de_alcance”.

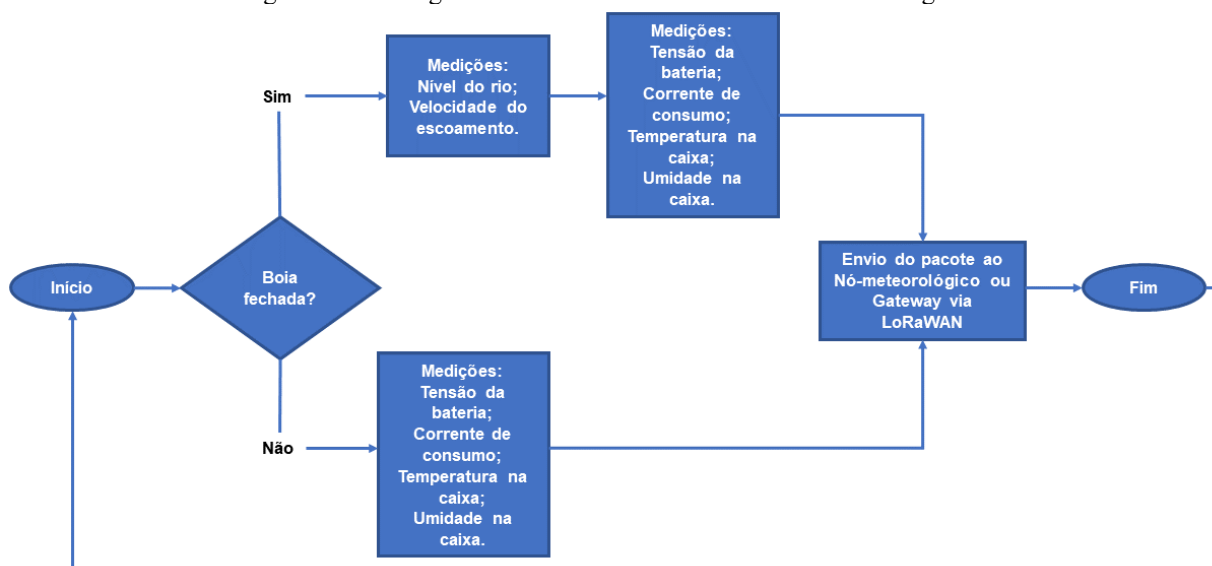
4.5.2 Teste dos nós-sensores em funcionamento

Os módulos e sensores que fazem parte dos nós-sensores foram testados individualmente e, posteriormente, foram incluídos um a um no código-fonte do respectivo nó-sensor, realizando-se então um novo teste. Os resultados apresentados a seguir foram obtidos do teste no qual estavam todos módulos e sensores conectados aos nós.

O funcionamento planejado para o nó-sensor hidrológico corresponde ao fluxograma da Figura 69:

²⁸ *Link* para o repositório: <https://github.com/alexlimaf94/dissertacao/tree/main>

Figura 69 - Fluxograma de funcionamento do nó-sensor hidrológico

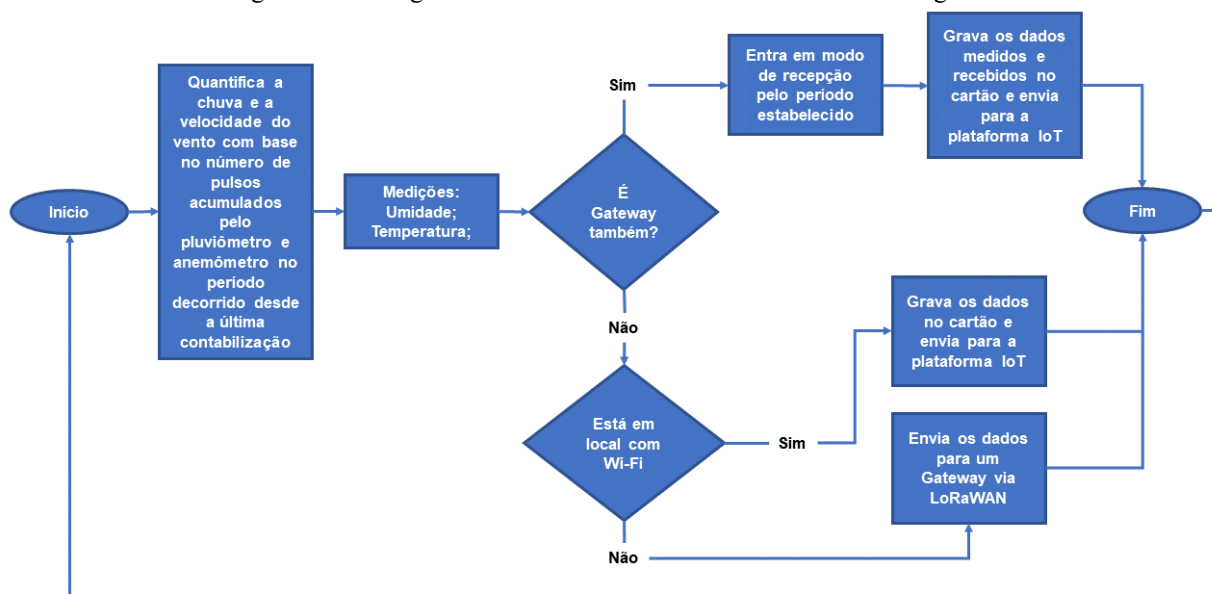


Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

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

O funcionamento planejado para o nó-sensor meteorológico, em suas três possíveis formas, corresponde ao do fluxograma da figura abaixo:

Figura 70- Fluxograma de funcionamento do nó-sensor meteorológico



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Os testes a seguir foram executados utilizando o nó-sensor hidrológico e um nó-sensor meteorológico que também executava a função de *gateway*. Os códigos-fonte de ambos os nós-

sensores podem ser visualizados no diretório “teste_nos_sensores”²⁹ e no apêndice.

Na Figura 71 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 hífenos, 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.

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.

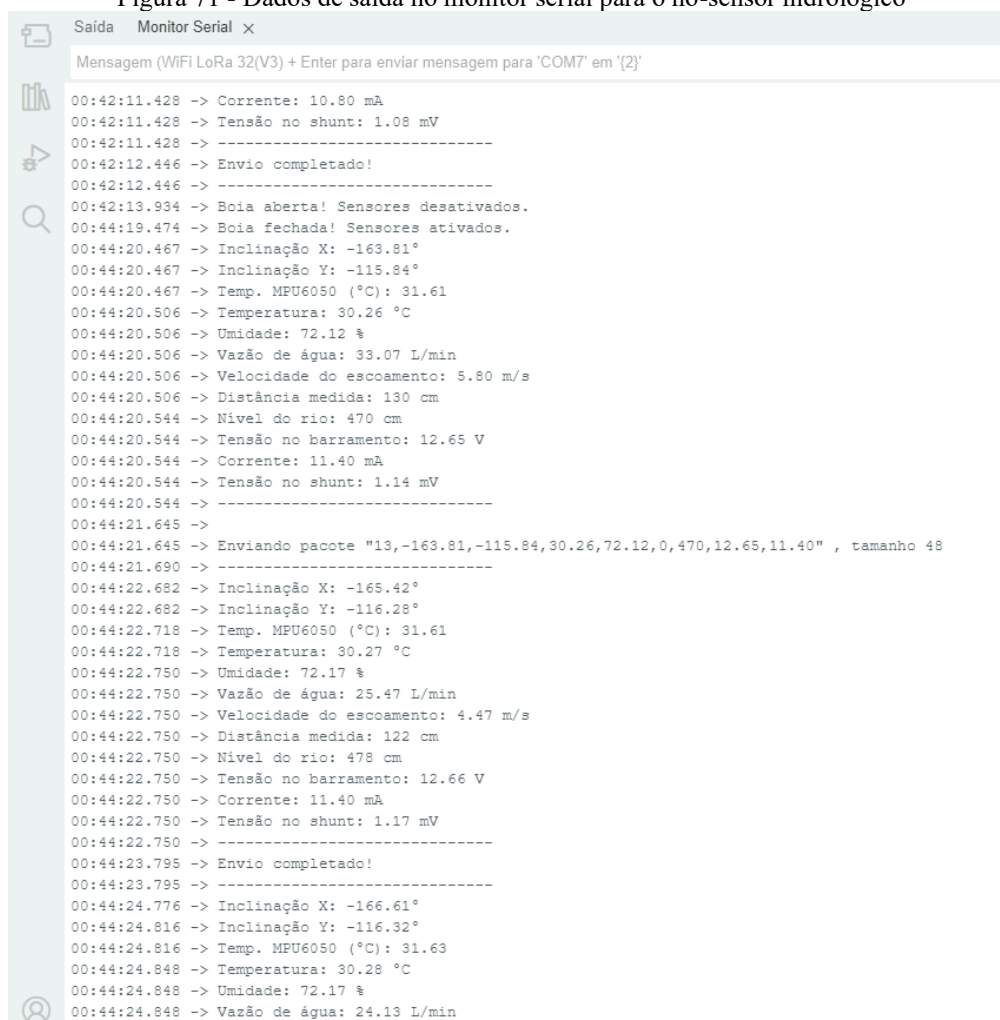
Em seguida, entre as linhas de hífenos, a saída informa que o pacote está sendo enviado, colocando entre vírgulas os valores de cada variável e, ao final, o tamanho do pacote em *bytes*. As variáveis que integram o pacote são: número do pacote (adicionada para verificar perda de pacotes, mas pode ser 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.

²⁹ Link para o diretório: https://github.com/alexlimaf94/dissertacao/tree/main/teste_nos_sensores

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 71 - Dados de saída no monitor serial para o nó-sensor hidrológico



```

Saída Monitor Serial x
Mensagem (WiFi LoRa 32(V3) + Enter para enviar mensagem para 'COM7' em '2')
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: Autor (2025)

Na Figura 72 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 72 - 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 Hididrológico: 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 ->
01:37:04.271 -> -----
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 Hididrológico: 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: Autor (2025)

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 àquelas 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).

4.6 DEMAIS ITENS DO SISTEMA DE ALERTAS

O sistema proposto depende de simulações em tempo real intervaladas com os dados coletados utilizando modelos hidrológico-hidrodinâmicos calibrados, ou da comparação intervalada por meio de algoritmo computacional da situação real com cenários pré-cadastrados de inundações. Esse processo precisa ser realizado após o recebimento e organização dos dados em uma plataforma IoT.

No caso do algoritmo computacional, este precisaria estar rodando na plataforma IoT através de um servidor dedicado ou máquina virtual em nuvem.

A seguir são apresentadas algumas soluções para recebimento dos dados, tratamento, verificações e notificações, com seus respectivos serviços aplicáveis ao sistema. Apenas a última opção é gratuita.

ThingsBoard:

- **Descrição:** Plataforma de IoT de código aberto para coleta, processamento, visualização e notificação de dados.
- **Serviços oferecidos:**
 - Coleta de dados de múltiplos sensores (MQTT, HTTP, CoAP).
 - Processamento e agregação de dados em tempo real.
 - Criação de regras de alarme e notificações personalizadas (e-mail, SMS, aplicativos móveis).
 - Visualização de dados em dashboards e gráficos interativos.
 - Gerenciamento de dispositivos e usuários.

- Possui banco de dados interno.
- Requer servidor dedicado ou máquina virtual em nuvem.

Google Cloud:

- **Descrição:** Plataforma de serviços de computação em nuvem, incluindo soluções para IoT, análise de dados e aprendizado de máquina.
- **Serviços oferecidos:**
 - Google Cloud IoT Core: para gerenciamento de dispositivos e coleta de dados.
 - Cloud Functions: para processamento de dados e execução de lógica personalizada.
 - Cloud Storage: para armazenamento de dados.
 - BigQuery: para análise de dados em grande escala.
 - Pub/Sub: para mensagens e notificações.
 - Possui serviços de banco de dados.
 - Possui servidores.

AWS (Amazon Web Services):

- **Descrição:** Plataforma de serviços de computação em nuvem, incluindo soluções para IoT, análise de dados e aprendizado de máquina.
- **Serviços oferecidos:**
 - AWS IoT Core: para gerenciamento de dispositivos e coleta de dados.
 - AWS Lambda: para processamento de dados e execução de lógica personalizada.
 - Amazon S3: para armazenamento de dados.
 - Amazon Athena: para análise de dados.
 - Amazon SNS: para mensagens e notificações.
 - Possui serviços de banco de dados.
 - Possui servidores.

Azure (Microsoft Azure):

- **Descrição:** Plataforma de serviços de computação em nuvem, incluindo soluções para IoT, análise de dados e aprendizado de máquina.
- **Serviços oferecidos:**
 - Azure IoT Hub: para gerenciamento de dispositivos e coleta de dados.

- Azure Functions: para processamento de dados e execução de lógica personalizada.
- Azure Blob Storage: para armazenamento de dados.
- Azure Synapse Analytics: para análise de dados.
- Azure Notification Hubs: para mensagens e notificações.
- Possui serviços de banco de dados.
- Possui servidores.

Combinação de plataformas gratuitas: Mosquitto, Node-RED, InfluxDB e Grafana:

- **Descrição:** Conjunto de ferramentas de código aberto para coleta, processamento, armazenamento e visualização de dados de séries temporais. Requer integração e configuração manual.
- **Serviços oferecidos e faltantes:**
 - Mosquitto: para comunicação MQTT entre dispositivos e aplicações.
 - Node-RED: para criação de fluxos de dados e integração de serviços.
 - InfluxDB: para armazenamento de dados de séries temporais.
 - Grafana: para visualização de dados em dashboards e gráficos.
 - Não possui serviço de mensagens/notificações;
 - Requer banco de dados externo.
 - Requer servidor externo.

As opções reunidas atendem aos requisitos que o sistema precisa e alguns fatores se destacam para a escolha de uma delas: a ThingsBoard atua exclusivamente com o mercado IoT e possui uma plataforma mais intuitiva; as opções das *big techs* (Google, Amazon e Microsoft) oferecem soluções completas e que incluem como diferencial o aprendizado de máquina (*machine learning*) que pode ser um fator positivo para melhoria do sistema; a última opção, do combo de ferramentas, tem a vantagem de ser gratuita, entretanto, sua utilização pode requerer bastante trabalho para integração das ferramentas.

4.7 FUNCIONAMENTO PÓS-MEDIÇÕES, CLASSIFICAÇÃO DE RISCO E EMISSÃO DE ALERTA

Após a coleta dos dados, a previsão da inundação e obtenção do tempo de resposta são uma tarefa bastante complexa de ser realizada por meio de algoritmos computacionais, desta forma, recomenda-se realizar simulações intervaladas sucessivas utilizando os modelos

hidrológico e hidrodinâmico calibrados e os dados de precipitação acumulados nos últimos períodos, captados pelos nós-sensores meteorológicos.

Recomenda-se que as simulações sejam realizadas por técnicos durante os eventos de chuva, mas não se descarta a automatização por meio de RPA. No entanto, a obtenção do tempo de resposta pode ser um desafio para a RPA, pois requer visualização da evolução das manchas ao longo do período, conforme demonstrado na Figura 51, processo este que é mais intuitivo para um humano.

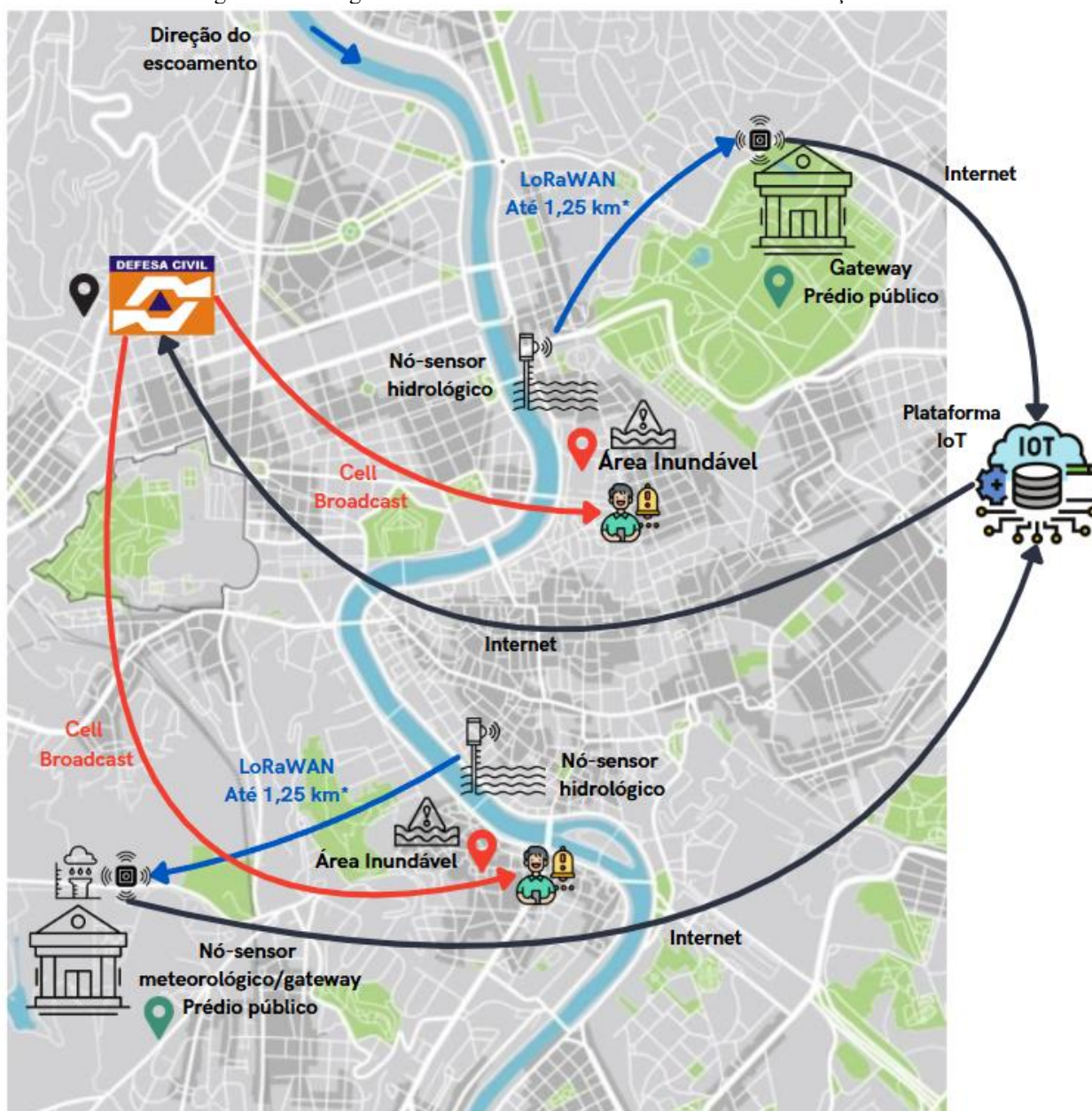
O procedimento de emissão do alerta deve ser iniciado pelo técnico que realizou a simulação, acionando os protocolos estabelecidos pela Defesa Civil conforme a magnitude das inundações acusadas pela simulação, que podem incluir desde o isolamento de vias e desvio do tráfego, até a evacuação de pessoas de seus imóveis, interdição de áreas e planejamento de possíveis resgates.

Os alertas podem ser emitidos à população por meio da tecnologia *Cell Broadcast*, já em funcionamento no sistema “Defesa Civil Alertas” do governo federal desde 2024, que permite o envio de mensagens de texto para todos os dispositivos móveis em uma região geográfica específica, conectados a uma antena de telefonia e recebendo sinal 4G ou 5G. Essa tecnologia é eficaz porque não depende de cadastro prévio ou créditos, e o alerta não pode ser ignorado, pois aparece na forma de *pop-up*, sobre qualquer aplicação e pode emitir um sinal sonoro a depender da classificação de risco (BRASIL, 2024).

Pode-se conferir redundância ao sistema, fazendo o uso de aplicativos, propagando os alertas também por meio de notificações *push* ou por meio de outras ferramentas, como: Whatsapp, Telegram e Google Public Alerts.

A Figura 73 apresenta um infográfico do sistema contendo os locais, itens e agentes envolvidos. As setas também indicam a forma de comunicação entre os itens/agentes. A informação da distância da comunicação via *LoRaWAN* é aquela obtida nos testes realizados, a qual pode ser maior em condições diferentes.

Figura 73 – Infográfico do Modelo de Sistema de Alertas de Inundações



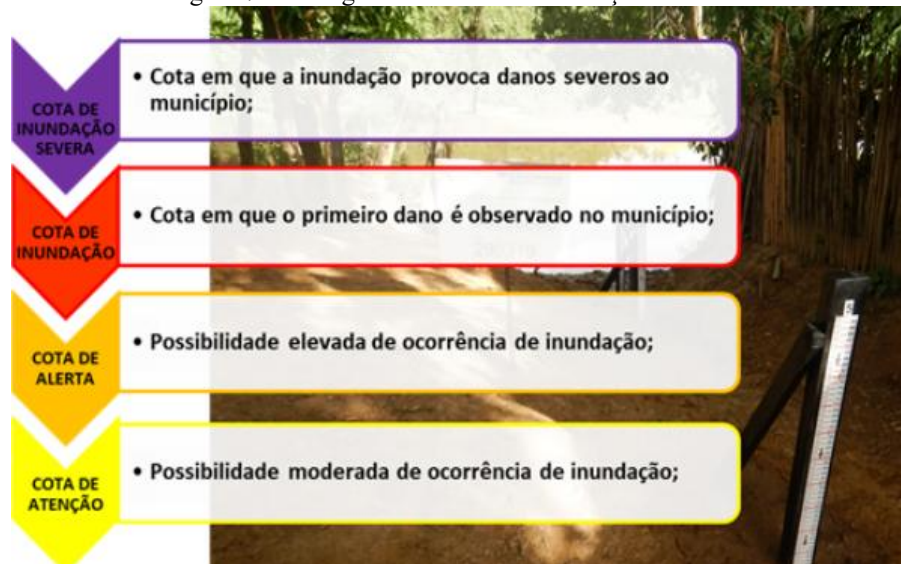
Fonte: Autor (2025)

Os dados coletados pelo nó-sensor hidrológico também podem auxiliar no acompanhamento em tempo real do progresso da inundação nas regiões de risco. Este acompanhamento é importante tanto para a população, que pode evitar determinadas rotas em suas viagens auxiliando na evacuação voluntária e segura de regiões, quanto para a Defesa Civil, que pode fazer a utilização no mesmo sentido e acompanhar a progressão e recessão da inundação, aprimorando o gerenciamento das ocorrências.

No mesmo sistema de acompanhamento no nível de água, o qual deve ser aberto para o público, podem ser inseridas classificações de risco. O ‘Guia prático de utilização de alertas do

governo federal para ações de preparação para desastres' apresenta as cotas de referências utilizadas nos Sistemas de Alerta Hidrológico (SAHs) do SGB-CPRM (BRASIL, 2021a), já apresentadas na página 21 desta dissertação, as quais podem ser novamente conferidas na Figura 74.

Figura 74 - Categorias de risco de inundação dos SAHs



Fonte: Brasil (2021)

Esta categorização pode ser aprimorada para o caso de Ribeirão Preto, incluindo uma nova categoria:

- **Cota de Normalidade:** Nesta cota, o nível da água está dentro dos limites normais, sem risco de inundação.

Outras informações poderiam ser adicionadas na interface do sistema para complementar as categorias:

- **Gráfico de cotas:** O gráfico permite visualizar se o nível está aumentando ou diminuindo, o que auxilia no planejamento da manutenção do isolamento ou retorno às áreas, por exemplo.
- **Status da chuva nas sub-bacias contribuintes:** Saber se está chovendo ou não nas regiões à montante dos locais de risco é um parâmetro que pode auxiliar no acompanhamento das inundações e também no planejamento da resposta com vistas à prevenção e redução dos impactos.

Outras informações podem ser adicionadas com base na experiência e no Plano de Contingência da Defesa Civil, que deve se aproveitar da escalabilidade do sistema para o aprimoramento constante da gestão de eventos climáticos e desastres. Alguns exemplos incluem os dados medidos pelos sensores testados neste trabalho, entre eles:

- Velocidade do vento (anemômetro);
- Umidade (DHT22 – incluso no pluviômetro, ou AHT-10);
- Temperatura (DHT22 – incluso no pluviômetro, ou AHT-10);
- Velocidade do escoamento (YF-S201).

Outros sensores não usados nesse trabalho, que possuem valores acessíveis, igualmente podem ser facilmente adicionados:

- Biruta (direção do vento);
- Qualidade do ar (PMS5003, SDS011, MQ-13, MQ-7, MQ-2);
- Radiação UV (ML8511, SI1145, GUVVA-S12SD);
- Pressão (BME280, BMP280);
- Umidade do solo.

5 CONCLUSÕES

Após a elaboração do presente trabalho, concluiu-se que a utilização de RSSF aliada a execução de modelagens intervaladas sucessivas (hidrológica e hidrodinâmica) podem ser capazes de promover o alerta antecipado de inundações urbanas. A RSSF hidrometeorológica proposta pode dar apoio ao estabelecimento e melhoria de protocolos da Defesa Civil e servir como ferramenta de promoção de resiliência aos efeitos de eventos hidrometeorológicos.

Os nós-sensores hidrológicos são contribuições da pesquisa que podem ser implantadas de modo imediato, como instrumento de monitoramento hidrológico para a Defesa Civil, poder público e sociedade. Já os nós-sensores meteorológicos e a previsão de inundações por meio do método de modelagens intervaladas sucessivas necessitam de aplicação prática com modelos hidrológicos e hidrodinâmicos calibrados e avanço da pesquisa que inclua as etapas a partir do envio dos dados medidos para a plataforma IoT, englobando configurações do servidor da RSSF e eventuais medidas de segurança de rede.

A utilização de modelos virtuais já é empregada em diversos setores da indústria (gêmeo digital, do inglês *digital twin*), e a exploração das modelagens hidrológica e hidrodinâmica neste trabalho utilizando dados coletados em tempo real se aproxima do uso realizado na indústria.

O emprego de IoT e RSSF para o monitoramento hidrometeorológico mostrou-se uma alternativa de grande potencial, uma vez que sua escalabilidade e versatilidade são fatores importantes que adicionam diversas possibilidades para os sistemas microcontrolados, como os exemplos de sensores elencados na última seção desta dissertação, os quais permitem o monitoramento de diversas variáveis climáticas e ambientais utilizando a mesma infraestrutura de RSSF; e a possibilidade da utilização de diversos protocolos de comunicação na mesma rede proporcionando a capacidade de superar limitações de determinados protocolos. Nesta perspectiva, a utilização de RSSF e IoT pode ser benéfica em diversos setores urbanos. Além disso, os baixos custos dos dispositivos e o consumo energético reduzido justificam a adoção dessas tecnologias na gestão de cidades inteligentes.

A pesquisa limitou-se à bacia hidrográfica do Ribeirão Preto e foram realizadas modelagens hidrológica e hidrodinâmica das 24 horas de um dia que ocorreu inundação. Apesar do modelo hidrodinâmico resultar em inundações nos mesmos locais onde aconteceram, os modelos não foram calibrados, logo, os resultados podem não ser precisos. Neste contexto, os resultados aproximados da modelagem representam uma situação hipotética, a qual se assemelha aos efeitos decorrentes de eventos pluviométricos. Dito isso, novos estudos que

envolvam a calibração dos modelos hidrológico e hidrodinâmico, assim como o refinamento da proposta com a configuração da rede e previsão de protocolos de operação e manutenção do sistema devem ser realizados em uma aplicação prática, a fim de atestar o funcionamento desse modelo de sistema de alertas de inundações.

As pesquisas mostraram que a utilização de RSSF e de *machine learning* para tratamento dos dados observados pelos sensores pode fornecer previsões assertivas e com maior antecedência. Essa tendência é promissora e pode ser explorada em trabalhos futuros, principalmente em aplicações práticas, visando o aprimoramento dessa proposta.

A utilização de RPA e de outras tecnologias de comunicação entre os nós-sensores e *gateways*, também são alternativas que podem ser exploradas em trabalhos futuros, visando, respectivamente, a celeridade dos processos e a economia de recursos.

Finalmente, em trabalhos futuros também é possível a verificar a aplicabilidade da metodologia para outras extensões de bacias hidrográficas, a fim de responder em quais contextos é possível sua replicação.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA BRASIL. **Litoral paulista teve maior volume de chuva registrado no Brasil**. 2023. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2023-02/litoral-paulista-teve-maior-volume-de-chuva-registrado-no-brasil>. Acesso em: 16 mai. 2023.
- AGUIRRE, T. F. DE A. **Gerência de risco de enchentes em cidades inteligentes**. 2017. Dissertação (Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicações) - Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2017.
- 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)**, v. 13, n. 3, p. 2695, 1 jun. 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**, v. 25, p. 101053, abr. 2024.
- ALJOHANI, F. H. *et al.* A Smart Framework for Managing Natural Disasters Based on the IoT and ML. **Applied Sciences**, v. 13, n. 6, p. 3888, 18 mar. 2023.
- AMARAL, R.; RIBEIRO, R. R. Em: TOMINAGA, L. K. *et al.* (EDS.). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. 3a. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2015.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Capacitação em gestão de recursos hídricos: volume - 1 Comitê de bacia hidrográfica: o que é e o que faz?**. 2011. Disponível em: <https://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2012/CadernosDeCapacitacao1.pdf#page=5.85>. Acesso em: 23 jul. 2024.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2022**. 2023. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portais-centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>. Acesso em: 16 mai. 2023.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Portal SNIRH - Sistema HIDRO-Telemetria**. 2024. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria/serieHistorica.aspx>. Acesso em: 15 nov. 2024a.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **ANADEM – Modelo Digital de Terreno para a América do Sul**. 2024. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/93664c15-1ff8-4e87-bbed-2bb69d321309> >. Acesso em: 10 jan. 2025b.
- ANA – Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico. **Curva Número na Base Ottocodificada (1985, 2014 e 2022)**. 2024. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/d1c36d85-a9d5-4f6a-85f7-71c2dc801a67>. Acesso em: 10 jan. 2024c.

ARDUINO. **What is Arduino?**. 2021. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/about>>. Acesso em: 16 mai. 2023.

ARSHAD, B. *et al.* Computer Vision and IoT-Based Sensors in Flood Monitoring and Mapping: A Systematic Review. **Sensors**, v. 19, n. 22, p. 5012, 16 nov. 2019.

BATTY, M. *et al.* Smart cities of the future. **The European Physical Journal Special Topics**, v. 214, n. 1, p. 481–518, nov. 2012.

BLENKINSOP, S.; ALVES, L. M.; SMITH, A. J. P. **Climate change increases extreme rainfall and the chance of floods**. [s.l.] Zenodo, 7 jun. 2021. Disponível em: <<https://zenodo.org/record/4779119>>. Acesso em: 29 mai. 2023.

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. Decreto Federal nº 9.854, de 25 de junho de 2019. **Institui o Plano Nacional de Internet das Coisas e dispõe sobre a Câmara de Gestão e Acompanhamento do Desenvolvimento de Sistemas de Comunicação Máquina a Máquina e Internet das Coisas**. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2019/decreto/d9854.htm>. Acesso em: 16 mai. 2023.

BRASIL. **Guia prático de utilização de alertas do governo federal para ações de preparação para desastres**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/protecao-e-defesa-civil-sedec/copy_of_guiapraticodesastres.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2024a.

BRASIL. **Carta Brasileira para Cidades Inteligentes**. 2021. Disponível em: <<https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/desenvolvimento-urbano-e-metropolitano/projeto-andus/carta-brasileira-para-cidades-inteligentes/CartaBrasileiraparaCidadesInteligentes2.pdf>>. Acesso em: 16 mai. 2023b.

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Secretaria de Proteção e Defesa Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. **Atlas Digital de Desastres no Brasil**. Brasília: MIDR, 2023.

BRASIL. **Defesa Civil Alerta**. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/protecao-e-defesa-civil/defesa-civil-alerta>>. Acesso em: 30 jan. 2025.

CANHOLI, A.P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 384 p.

CARDOSO, M. A. R. **Alerta Poá - um sistema de comunicação apoiado em redes de sensores sem fio para monitoração do córrego Itaim**. 2016. Dissertação (Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicações) - Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2016.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Drenagem Urbana**: Manual de Projeto. 3. ed. São Paulo: CETESB, 1986.

CUNGE, J. A. On the Subject of a Flood Propagation Computation Method (Muskingum Method). **Journal of Hydraulic Research**, v. 7, n. 2, p. 205–230, jan. 1969.

CLIMATE-DATA. **Clima Caxias do Sul**. 2024. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-sul/caxias-do-sul-1385/>>. Acesso em: 23 jul. 2024.

CRED. **2023 Disasters in Numbers: A Significant Year of Disaster Impact**. 2024. Disponível em: <https://files.emdat.be/reports/2023_EMDAT_report.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2024.

CSUKÁS, M.S.; BUKOVSKY, V.; REITH, A. Challenges and Solutions for Organizational Design in Urban Digitalization. **European Journal of Sustainable Development**. 9, 615–629, 2020.

EBYTE. **220-900T30D Ebyte LLCC68 10km Long Distance Wireless Transmitter Module 915MHz LoRa Rf Module**. s.d. Disponível em: <<https://www.cdebyte.com/products/E220-900T30D>>. Acesso em: 20 fev. 2025.

EPTV. **Chuva provoca alagamentos em avenidas e causa interdições em Ribeirão Preto**. 2022. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/ribeirao-preto-franca/noticia/2022/12/26/ribeirao-preto-registra-alagamentos-durante-chuva-nesta-segunda-feira-26.ghtml>>. Acesso em: 2 jun. 2024.

FIALHO, Beatriz Campos. **Design for smart maintenance enabled by BIM and IoT**. 2021. Tese (Doutorado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021. doi:10.11606/T.102.2021.tde-10032022-100137. Acesso em: 2024-06-20.

G1 RS. **Após mês de chuva recorde e volumes superiores a mil milímetros, RS tem previsão de dias secos em sequência**. 2024. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2024/05/29/apos-mes-de-chuva-recorde-e-volumes-superiores-a-mil-milimetros-rs-tem-previsao-de-dias-secos-em-sequencia.ghtml>>. Acesso em: 20 jul. 2024.

GIORGI, F.; RAFFAELE, F.; COPPOLA, E. The response of precipitation characteristics to global warming from climate projections. **Earth System Dynamics**, v. 10, n. 1, p. 73–89, 6 fev. 2019.

GROOT, T.; DEZFOULI, B. **Flomosys: A Flood Monitoring System**. 2020 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC). **Anais...** Em: 2020 IEEE GLOBAL HUMANITARIAN TECHNOLOGY CONFERENCE (GHTC). Seattle, WA, USA: IEEE, 29 out. 2020. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9342943/>>. Acesso em: 28 jul. 2024.

HASSAN, H. *et al.* IOT System: Water Level Monitoring for Flood Management. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 917, n. 1, p. 012037, 1 set. 2020.

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

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Panorama de Ribeirão Preto**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/ribeirao-preto/panorama>>. Acesso em: 16 mai. 2023.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios**. Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007. 176 p.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Manual de procedimentos metodológicos delimitação de planícies de inundação e de áreas inundáveis**. 2023. Disponível em: <<https://ipt.br/wp-content/uploads/2024/08/Delimitacao-de-planicies-de-inundacao.pdf>>. Acesso em: 15 fev. 2025.

JULEDI, A. P. *et al.* **Performance Evaluation of LoRa 923 MHz for the Internet of Things**. 2024 IEEE 10th Information Technology International Seminar (ITIS). **Anais...** Em: 2024 IEEE 10TH INFORMATION TECHNOLOGY INTERNATIONAL SEMINAR (ITIS). Surabaya, Indonesia: IEEE, 6 nov. 2024. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/10845693/>>. Acesso em: 15 fev. 2025

KAVITHA, P. *et al.* **The Development of Early Flood Monitoring and a WhatsApp-Based Alert System for Timely Disaster Preparedness and Response in Vulnerable Communities**. CC 2023. **Anais...** Em: CC 2023. MDPI, 20 mar. 2024. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2673-4591/62/1/18>>. Acesso em: 28 jul. 2024.

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

KIRPICH, T.P. **Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds**. J. of Civ. Eng., v.10, n.6, p. 362, 1940.

LOFTIS, J. D. *et al.* StormSense: A New Integrated Network of IoT Water Level Sensors in the Smart Cities of Hampton Roads, VA. **Marine Technology Society Journal**, v. 52, n. 2, p. 56–67, 1 mar. 2018.

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. 2025.

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. 2025.

MARTINS, R. M. **Antenas e propagação**. 2016. Disponível em: <https://wiki.sj.ifsc.edu.br/images/d/d4/5_1IFSC_Engenharia_ANT_2016_1.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2025.

MEDEIROS, O. B. **Estudo da distribuição na área de chuvas intensas em bacias de médio porte**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

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

MEIJER, A.; BOLÍVAR, M. P. R. Governing the smart city: a review of the literature on smart urban governance. **International Review of Administrative Sciences**, v. 82, n. 2, p. 392–408, jun. 2016.

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.

METRÓPOLES. **Tragédia no litoral e apagão na capital: chuvas castigaram SP em 2023**. 2023. Disponível em: <<https://www.metropoles.com/sao-paulo/tragedia-no-litoral-e-apagao-na-capital-chuvas-castigaram-sp-em-2023>>. Acesso em: 16 jun. 2024.

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

MIORANDI, D. *et al.* Internet of things: Vision, applications and research challenges. **Ad Hoc Networks**, v. 10, n. 7, p. 1497–1516, set. 2012.

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.

NOAR, N. A. Z. M.; KAMAL, M. M. **The development of smart flood monitoring system using ultrasonic sensor with blynk applications**. 2017 IEEE 4th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Application (ICSIMA). **Anais...** Em: 2017 IEEE 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART INSTRUMENTATION, MEASUREMENT AND APPLICATION (ICSIMA). Putrajaya: IEEE, nov. 2017. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8312009/>>. Acesso em: 28 jul. 2024.

ORTIZ, F. M. **Análise de desempenho de uma rede sem-fio de baixa potência e longo alcance para a Internet das Coisas**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

PATNAIK PATNAIKUNI, Dinkar R. A Comparative Study of Arduino, Raspberry Pi and ESP8266 as IoT Development Board. **International Journal of Advanced Research in Computer Science**, v. 8, n. 5, 2017.

PAWAR, U. B. *et al.* IoT Based Flood Monitoring and Alert System. **International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science**, 2 jan. 2024.

PECHOTO, M. M.; UEYAMA, J.; PEREIRA, J. P. A. **E-noé: Rede de sensores sem fio para monitorar rios urbanos**. In: Congresso Brasileiro Sobre Desastres Naturais, 2012, Rio Claro, SP.

PINTO, E. J. A. **Metodologia para definição das equações Intensidade-Duração-Frequência do Projeto Atlas Pluviométrico**. CPRM. Belo Horizonte. Mar., 2013.

PINTO, E. J. de A.; AZAMBUJA, A. M. S. de; FARIAS, J. A. M.; SALGUEIRO, J. P. de B.; PICKBRENNER, K. (Coords.). **Atlas pluviométrico do Brasil: isoietas mensais, isoietas trimestrais, isoietas anuais, meses mais secos, meses mais chuvosos, trimestres mais secos, trimestres mais chuvosos**. Brasília: CPRM, 2011. 1 DVD. Escala 1.5:000.000. Equipe Executora: Da Costa, Margarida Regueira; Dantas, Carlos Eduardo de Oliveira; Melo, De Azambuja, Andressa Macêdo Silva; De Rezende, Denise C.; Do Nascimento, Jean Ricardo da Silva; Dos Santos, André Luis M. Real; Farias, José Alexandre Moreira; Machado, Érica C.; Marcuzzo, Francisco Fernando Noronha; Medeiros, Vanesca Sartorelli; Rodrigues, Paulo de Tarso R.; Weschenfelder, Adriana Burin; SIG - versão 2.0 - atualizada em 11/2011; Levantamento da Geodiversidade. Disponível em: <<https://rigeo.sgb.gov.br/jspui/handle/doc/22220>>. Acesso em: 18 jun. 2024.

PONTES, P. R. M. *et al.* MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. **Environmental Modelling & Software**, v. 94, p. 1–20, ago. 2017.

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

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

RASHID, B.; REHMANI, M. H. Applications of wireless sensor networks for urban areas: A survey. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 60, p. 192–219, jan. 2016.

RFI. **Mobile Antenna Selection**. s.d. Disponível em: <<https://products.rfi.com.au/en-au/mobile-antenna-selection>>. Acesso em: 20 fev. 2025.

RIBEIRÃO PRETO. **Localização das barragens e canais propostos na atualização do Plano Diretor de Macrodrenagem de Ribeirão Preto - SP (2010)**. 2015. Disponível em: <<https://www.ribeiraopreto.sp.gov.br/portal/pdf/obras07202402.pdf>>. Acesso em: 16 mai. 2023a.

RIBEIRÃO PRETO. **Plano Municipal de Saneamento Básico e Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Ribeirão Preto. Relatório Final (Caderno 2/2)**. 2015. Disponível em: <<https://www.ribeiraopreto.sp.gov.br/portal/pdf/obras05202209.pdf>>. Acesso em: 16 mai. 2023b.

RIBEIRÃO PRETO. **Macrodrenagem**. 2015. Disponível em: <<https://www.ribeiraopreto.sp.gov.br/portal/obras/macrodrenagem>>. Acesso em: 16 mai. 2023c.

RIBEIRÃO PRETO. **Workshop Smart City Ribeirão Preto**. 2018. Disponível em: <<https://www.ribeiraopreto.sp.gov.br/portal/pdf/planejamento85202111.pdf>>. Acesso em: 16 mai. 2023.

RIBEIRÃO PRETO. **Plano de Contingência de Proteção e Defesa Civil**. 2022. Disponível em: <<https://www.ribeiraopreto.sp.gov.br/portal/pdf/casa-civil-06202207.pdf>>. Acesso em: 16 mai. 2023>.

RIBEIRÃO PRETO. **Lei Complementar nº 3175, de 17 de abril de 2023**. Disciplina o parcelamento, o uso e a ocupação do solo no município de Ribeirão Preto, de acordo com as diretrizes estabelecidas pela Lei Complementar nº 2.866, de 27 de abril de 2018, que dispõe sobre o Plano Diretor, e dá outras providências. Diário Oficial do Município, Ribeirão Preto, ano 51, n. 11.650, p. 4-69, 19 abr. 2023. Disponível em: <https://publico.camararibeiraopreto.sp.gov.br/pysc/download_norma_pysc?cod_norma=11712&texto_original=1>. Acesso em: 23 jul. 2024.

RIBEIRÃO PRETO. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Ribeirão Preto. Caderno 5 – Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas**. 2024. Disponível em: <<https://www.ribeiraopreto.sp.gov.br/portal/pdf/planejamento2063202405.pdf>>. Acesso em: 23 jul. 2024a.

RIBEIRÃO PRETO. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Ribeirão Preto. Caderno 1 – Introdução e Diagnóstico Geral**. 2024. Disponível em: <<https://www.ribeiraopreto.sp.gov.br/portal/pdf/planejamento2059202405.pdf#page=52.47>>. Acesso em: 23 jul. 2024b.

RIGHETTO, A.M.; MOREIRA, L.F.F.; SALES, T.E.A. (2009) **Manejo de águas pluviais urbanas**. In: RIGHETTO, A.M. (Org.). Manejo de águas pluviais urbanas. PROSAB 5. Rio de Janeiro: ABES. 396p. p. 19-73.

RIO GRANDE DO SUL. **Defesa Civil atualiza balanço das enchentes no RS**. 2024. Disponível em: <<https://www.estado.rs.gov.br/defesa-civil-atualiza-balanco-das-enchentes-no-rs-10-7-11h>>. Acesso em: 20 jul. 2024.

ROUNDY, J. K.; DUAN, Q.; SCHAAKE, J. C. Hydrological Predictability, Scales, and Uncertainty Issues. Em: DUAN, Q. *et al.* (Eds.). **Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019. p. 3–31.

SÃO PAULO. **Alertas de emergência**. 2017. Disponível em: <<http://www.spalerta.sp.gov.br/topicos/alertas/>>. Acesso em: 18 mai. 2023.

SGB-CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Atlas Pluviométrico do Brasil**. Equações Intensidade-Duração-Frequência. 2023. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/24527/1/ribeirao_preto_sp_rel%C3%B3rio_idf_2023.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2024.

SENDRA, S. *et al.* LoRaWAN Network for Fire Monitoring in Rural Environments. **Electronics**, v. 9, n. 3, p. 531, 23 mar. 2020.

SILVA JÚNIOR, F. V. D.; CUNHA, M. X. C. D.; SOUZA JÚNIOR, M. F. D. IOTFlood: hardware and software platform using internet of things to monitor floods in real time. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 16, n. 4, p. 1, 27 jul. 2021.

SILVEIRA, M. V. D.; BARTHEM, R. B.; SANTOS, A. C. D. Proposta didático experimental para o ensino inclusivo de ondas no ensino médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 1, 21 set. 2018.

SINGH, R. LoRaWAN for Remote Monitoring Applications in the Smart Grid - A Utility Perspective. 2024 IEEE PES/IAS PowerAfrica. Anais... Em: 2024 IEEE PES/IAS POWERAFRICA. Johannesburg, South Africa: IEEE, 7 out. 2024. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/10759451/>>. Acesso em: 18 mar. 2025

SONG, Q.; NUAYMI, L.; LAGRANGE, X. Survey of radio resource management issues and proposals for energy-efficient cellular networks that will cover billions of machines. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, v. 2016, n. 1, p. 140, dez. 2016.

SUBASHINI, M. J. *et al.* **Development of Smart Flood Monitoring and Early Warning System using Weather Forecasting Data and Wireless Sensor Networks-A Review**. 2021 Third International Conference on Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks (ICICV). Anais... Em: 2021 THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND VIRTUAL MOBILE NETWORKS (ICICV). Tirunelveli, India: IEEE, 4 fev. 2021. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9388418/>>. Acesso em: 31 jul. 2024

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**, v. 2022, n. 1, p. 15, dez. 2022.

TOMINAGA, L. K. *et al.* (EDS.). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. 3a. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2015.

TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. de (Org.). **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH/UFRGS, 1995. 428 p. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 5). ISBN 85-7025-364-8.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. **Inundações Urbanas na América do Sul**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 1ª ed., 2003.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de Inundações Urbanas**. Brasília: Ministério das Cidades – Global Water Partnership - Wolrd Bank – Unesco, 2005. 269 p.

TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas**. Porto Alegre: ABRH 2007. 389 p.

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.

UNIC RIO. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. 2016. Disponível em: <https://www.mds.gov.br/webarquivos/publicacao/Brasil_Amigo_Pesso_Idosa/Agenda2030.pdf#page=38.78>. Acesso em: 31 jul. 2024

USDA-NRCS - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. **Urban Hydrology for Small Watersheds**. TR-55. 1986. Disponível em: <<https://www.nrc.gov/docs/ML1421/ML14219A437.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2025.

USACE - U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-HMS User's Manual**. 2024. Disponível em: <<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/4.12>>. Acesso em: 20 nov. 2024a.

USACE - U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **HEC-RAS User's Manual**. 2024. Disponível em: <<https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasum/6.5>>. Acesso em: 20 nov. 2024b.

USGS - UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Roughness Characteristics of Natural Channels**. 1987. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/hgt/latest/web-resources?preview=/76910722/86902634/wsp_1849.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2024.

USINAINFO. **Projeto Sensor Ultrassônico HC-SR04 Arduino**. 2016. Disponível em: <<https://www.usinainfo.com.br/blog/projeto-sensor-ultrassonico-hc-sr04-com-arduino/>>. Acesso em: 20 jul. 2024.

WRFCOMERCIAL. **Pluviômetro Automático P11 + Abrigo Externo P/ Sensores Ideal P/ Arduino E Etc**. s.d. Disponível em: <https://wrfcomercial.mercadoshops.com.br/MLB-1302025394-pluvimetro-automatico-p11-abrigo-externo-p-sensores-ideal-p-arduino-e-etc-_JM#position%3D2%26search_layout%3Dgrid%26type%3Ditem%26tracking_id%3Da5669714-0865-4d23-8d4d-94015df55862>. Acesso em: 20 jul. 2024.

VASCONCELOS, Y. **Dispositivo emite em tempo real alertas contra enchentes**. 2022. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/dispositivo-emite-em-tempo-real-alertas-contras-enchentes/>>. Acesso em: 16 jun. 2023.

WIXTED, A. J. *et al.* **Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks.** 2016 IEEE SENSORS. **Anais...** Em: 2016 IEEE SENSORS. Orlando, FL, USA: IEEE, out. 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7808712/>>. Acesso em: 5 mar. 2025.

YULIANDOKO, H. *et al.* Design of Flood Warning System Based IoT and Water Characteristics. **TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)**, v. 16, n. 5, p. 2101, 1 out. 2018.

ZENZORCONTROL. **LoRaWAN - O que é?**. 2024. Disponível em: <<https://zenzorcontrol.pt/pt/lorawan-o-que-e#:~:text=O%20termo%20LoRaWAN%20adv%C3%A9m%20da,de%20manuten%C3%A7%C3%A3o%20e%20elevada%20seguran%C3%A7a.>>. Acesso em: 20 jul. 2024.

APÊNDICE A

Neste apêndice estão os códigos finais dos nós-sensores. Os códigos de *range test* podem ser obtidos no repositório da dissertação no GitHub.

Nó-sensor meteorológico

```
#include "LoRaWan_APP.h"
#include "Arduino.h"
#include "HT_SSD1306Wire.h"
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <DHT.h>
#include <DHT_U.h>
#include <queue>
#include "FS.h"
#include "SD.h"
#include "SPI.h"
#include <WiFi.h>
#include <time.h>

// Configurações LoRa
#define RF_FREQUENCY          915200000 // Hz
#define TX_OUTPUT_POWER     22         // dBm
#define LORA_BANDWIDTH      0         // [0: 125 kHz, 1: 250 kHz, 2: 500
kHz, 3: Reserved]
#define LORA_SPREADING_FACTOR 9         // [SF7..SF12]
#define LORA_CODINGRATE     1         // [1: 4/5, 2: 4/6, 3: 4/7, 4: 4/8]
#define LORA_PREAMBLE_LENGTH 8         // Same for Tx and Rx
#define LORA_SYMBOL_TIMEOUT 0         // Symbols
#define LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON false
#define LORA_IQ_INVERSION_ON false
#define RX_TIMEOUT_VALUE    5000
#define BUFFER_SIZE         52

// Configurações do display OLED
#define OLED_RST 21 // Pino RST do OLED

// Pinos dos Sensores
#define PIN_PLUVIOMETRO 45
```

```

#define PIN_ANEMOMETRO 46
#define PIN_DHT22 47
#define SD_CS_PIN 34 // Pino CS do cartão SD
SPIClass spi1; // Instância da classe SPI para o cartão SD

// Definições do DHT22
#define DHTTYPE DHT22
DHT dht(PIN_DHT22, DHTTYPE);

const char* ssid = "Rede"; // Substitua pelo seu SSID
const char* password = "39435100"; // Substitua pela sua senha

// Variáveis para data e hora
long timezone = -3; // Fuso horário de Brasília
byte daysavetime = 0; // Não temos horário de verão

SSD1306Wire oledisplay(0x3c, 500000, SDA_OLED, SCL_OLED, GEOMETRY_128_64, OLED_RST);

unsigned long displayStartTime = 0;
bool displayActive = false;

char rxpacket[BUFFER_SIZE];

static RadioEvents_t RadioEvents;

bool lora_idle = true;

// Variáveis para os dados recebidos
int16_t txNumber;
float inclinacaoX, inclinacaoY, temp, humidity, velocidade;
long altura;
float busvoltage, current_mA;

// Variáveis do pluviômetro
volatile uint16_t reedCount = 0; // Contador de pulsos (modificado na interrupção)
bool novoPulsoChuva = false; // Flag para indicar novos pulsos
float acumuladoChuva = 0.0;
float chuvaInstante = 0.0;

```

```

// Variáveis do anemômetro
volatile int counter = 0;
const float pi = 3.14159265;
unsigned long proximaMedicaoAnemometro = 0; // Tempo da próxima medição do anemômetro
const unsigned long intervaloMedicaoAnemometro = 120000; // 2 minutos em milissegundos
const int raio = 105; // Raio do anemômetro em mm
float velocidadeVento;

// Variáveis do do DHT22
float temperatura;
float umidade;

const int periodo = 5000;

std::queue<String> sdWriteQueue;

bool conectarWifi() {
    int tentativas = 0;
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED && tentativas < 3) {
        WiFi.begin(ssid, password);
        Serial.print("Tentando conectar ao Wi-Fi...");
        delay(1000);
        tentativas++;
    }
    return WiFi.status() == WL_CONNECTED;
}

// Função de interrupção do pluviômetro
void IRAM_ATTR contarPulsoChuva() {
    reedCount = reedCount + 1;
    novoPulsoChuva = true; // Apenas sinaliza que há novos pulsos
}

// Função de interrupção do anemômetro
void IRAM_ATTR contarPulsoVento() {
    counter = counter + 1;
}

void writeFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message){

```

```

Serial.printf("Escrevendo o arquivo: %s\n", path);

File file = fs.open(path, FILE_WRITE);
if(!file){
    Serial.println("Falha em abrir o arquivo para escrita");
    return;
}
if(file.println(message)){
    Serial.println("Arquivo escrito");
} else {
    Serial.println("Falha na escrita");
}
file.close();
}

void appendFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * message){
    Serial.printf("Adicionando dados ao arquivo: %s\n", path);

    File file = fs.open(path, FILE_APPEND);
    if(!file){
        Serial.println("Falha em abrir o arquivo para adiçao de dados");
        return;
    }
    if(file.println(message)){
        Serial.println("Dados adicionados");
    } else {
        Serial.println("Falha na adiçao");
    }
    file.close();
}

void VextON() {
    pinMode(Vext, OUTPUT);
    digitalWrite(Vext, LOW);
}

void VextOFF() {
    pinMode(Vext, OUTPUT);
    digitalWrite(Vext, HIGH);
}

```

```

}

String formatarDataHora() {
    struct tm tmstruct;
    if (!getLocalTime(&tmstruct)) {
        Serial.println("Falha ao obter data e hora");
        return "Data e hora não disponíveis";
    }
    char formattedDateTime[30];
    strftime(formattedDateTime, sizeof(formattedDateTime), "%Y-%m-%d %H:%M:%S", &tmstruct);
    return String(formattedDateTime);
}

void OnRxDone( uint8_t *payload, uint16_t size, int16_t rssi_correto, int8_t snr ) {

    // Desativar interrupções do pluviômetro a do anemômetro
    detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_PLUVIOMETRO));
    detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_ANEMOMETRO));

    memcpy(rxpacket, payload, size );
    rxpacket[size]='\0';
    Radio.Sleep( );

    int16_t velocidade_int;

    // Processamento dos dados recebidos
    sscanf(rxpacket, "%hd,%f,%f,%f,%f,%hd,%ld,%f,%f",
           &txNumber, &inclinacaoX, &inclinacaoY, &temp, &humidity, &velocidade_int, &altura,
           &busvoltage, &current_mA);
    yield();
    // Converter velocidade para float antes de formatar a string
    if (velocidade_int != 0) { // Verifica se não é zero para evitar divisão por zero
        velocidade = (float)velocidade_int / 100.0; // Converte para float e divide por 100.0
        (literal float)
    } else {
        velocidade = 0.0; // Ou outro valor padrão, se necessário
    }

    char linha[350]; // Ajuste o tamanho conforme necessário

```

```

String dataHora = formatarDataHora();

sprintf(linha, "%d,%s,%.2f,%.2f,%.2f,%.2f,%.2f,%.2f,%.2f,%.2f,%.2f,%.2f,%.2f,%.2f",
        txNumber, dataHora.c_str(), inclinacaoX, inclinacaoY, temp, humidity, velocidade,
altura,
        busvoltage, current_mA, velocidadeVento, temperatura, umidade, chuvaInstante,
acumuladoChuva);

String dataToWrite = String(linha); // Converte char[] para String
sdWriteQueue.push(dataToWrite);

chuvaInstante = 0;

Serial.printf("\r\nPacote recebido: %s, RSSI %d , Tamanho
%u\r\n",rxpacket,rssi_correto,size);//tempSize);

// Imprime os valores individuais
Serial.println("-----");
Serial.print("txNumber: "); Serial.println(txNumber);
Serial.print("Inclinação X: "); Serial.print(inclinacaoX); Serial.println(" °"); // Unidade de
medida: graus (°)
Serial.print("Inclinação Y: "); Serial.print(inclinacaoY); Serial.println(" °"); // Unidade de
medida: graus (°)
Serial.print("Temperatura Nó-sensor Hidrológico: "); Serial.print(temp); Serial.println(" °C");
// Unidade de medida: graus Celsius (°C)
Serial.print("Umidade Nó-sensor Hididrológico: "); Serial.print(humidity); Serial.println("
%"); // Unidade de medida: porcentagem (%)
Serial.print("Velocidade do escoamento: "); Serial.print(velocidade); Serial.println(" m/s");
// Unidade de medida: metros por segundo (m/s)
Serial.print("Nível do rio: "); Serial.print(altura); Serial.println(" cm"); // Unidade de
medida: centímetros (cm)
Serial.print("Tensão: "); Serial.print(busvoltage); Serial.println(" V"); // Unidade de medida:
Volts (V)
Serial.print("Corrente: "); Serial.print(current_mA); Serial.println(" mA"); // Unidade de
medida: miliamperes (mA)
Serial.print("Velocidade do vento: "); Serial.print(velocidadeVento); Serial.println(" km/h");
// Unidade de medida: quilômetros por hora (km/h)

```

```

    Serial.print("Temperatura Nó-sensor Meteorológico: "); Serial.print(temperatura);
Serial.println(" °C"); // Unidade de medida: graus Celsius (°C)
    Serial.print("Umidade Nó-sensor Meteorológico: "); Serial.print(umidade); Serial.println(" %");
// Unidade de medida: porcentagem (%)
    Serial.print("Chuva acumulada 24h: "); Serial.print(acumuladoChuva); Serial.println(" mm"); //
Unidade de medida: milímetros (mm)

oledisplay.clear();
oledisplay.drawString(0, 20, "Pacote recebido: " + String(txNumber));
oledisplay.drawString(0, 30, "Tamanho: " + String(size) + "bytes");
oledisplay.drawString(0, 40, "RSSI: " + String(rssi_correto));
oledisplay.display();

displayStartTime = millis(); // Inicia o temporizador
displayActive = true;

// Reativar interrupções do pluviômetro e do anemômetro
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_PLUVIOMETRO), contarPulsoChuva, RISING);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_ANEMOMETRO), contarPulsoVento, RISING);

lora_idle = true; // Importante: definir lora_idle como true após o recebimento
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    VextON();
    delay(100);

    // Inicialização do display OLED
    pinMode(OLED_RST, OUTPUT);
    digitalWrite(OLED_RST, LOW);
    delay(100);
    digitalWrite(OLED_RST, HIGH);
    delay(100);

    oledisplay.init();
    oledisplay.clear();
    oledisplay.drawString(0, 0, "Inicializando...");
    oledisplay.display();
}

```

```

if (conectarWifi()) {
    Serial.println("Conectado ao Wi-Fi!");

    // Configura o horário via NTP
    configTime(3600*timezone, daysavetime*3600, "time.nist.gov", "0.pool.ntp.org",
"1.pool.ntp.org");

} else {
    Serial.println("Falha na conexão Wi-Fi após 3 tentativas.");
    oledisplay.clear();
    oledisplay.drawString(0, 0, "Falha na conexão Wi-Fi.");
    oledisplay.display();
    delay(5000); // Aguarda 5 segundos antes de continuar
}

// Inicializar o cartão SD
SPIClass(1);
spi1.begin(36, 37, 35, 34);

if(!SD.begin(SD_CS_PIN, spi1)){
    Serial.println("Falha na montagem do Cartão SD");
    oledisplay.clear();
    oledisplay.drawString(0, 0, "Falha na montagem do Cartão SD"); // Exibe mensagem de erro no
display
    oledisplay.display();
}

uint8_t cardType = SD.cardType();

if(cardType == CARD_NONE){
    Serial.println("Sem Cartão SD inserido");
    oledisplay.clear();
    oledisplay.drawString(0, 0, "Sem Cartão SD inserido"); // Exibe mensagem de erro no display
    oledisplay.display();
}

uint64_t cardSize = SD.cardSize() / (1024 * 1024);
Serial.printf("Tamanho do Cartão SD: %lluMB\n", cardSize);

```

```

// Abrir o arquivo para escrita
File file = SD.open("/dados.txt", FILE_APPEND); // Abre o arquivo em modo de adiçao

if (!file) {
    Serial.println("Erro ao abrir o arquivo /dados.txt");
}

// Verifica se o arquivo está vazio (se for a primeira vez que está sendo criado)
if (file.size() == 0) {
    file.println("txNumber,DataHora,InclinacaoX,InclinacaoY,TempNoHid,UmidadeNoHid,VelocidadeEsco
amento,NivelAgua,Tensao,Corrente,VelocidadeVento,TempNoMet,UmidadeNoMet,ChuvaInstante,ChuvaAcumul
ada"); // Escreve o cabeçalho apenas se o arquivo estiver vazio
}

file.close();

dht.begin();
pinMode(PIN_PLUVIOMETRO, INPUT_PULLUP);
pinMode(PIN_ANEMOMETRO, INPUT_PULLUP);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_PLUVIOMETRO), contarPulsoChuva, RISING);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(PIN_ANEMOMETRO), contarPulsoVento, RISING);

Mcu.begin(HELTEC_BOARD,SLOW_CLK_TPYE);

RadioEvents.RxDone = OnRxDone;
Radio.Init( &RadioEvents );
Radio.SetChannel( RF_FREQUENCY );
Radio.SetRxConfig( MODEM_LORA, LORA_BANDWIDTH, LORA_SPREADING_FACTOR,
                    LORA_CODINGRATE, 0, LORA_PREAMBLE_LENGTH,
                    LORA_SYMBOL_TIMEOUT, LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON,
                    0, true, 0, 0, LORA_IQ_INVERSION_ON, true );
}

void loop() {
    static unsigned long ultimaMedicao = 0;
    unsigned long tempoAtual = millis();

    if (!sdWriteQueue.empty()) {

```

```

String dataToWrite = sdWriteQueue.front();
appendFile(SD, "/dados.txt", dataToWrite.c_str()); // Converte String para char*
sdWriteQueue.pop();
}

if (tempoAtual - ultimaMedicao >= periodo) {
    unsigned long tempovento = tempoAtual - ultimaMedicao;
    ultimaMedicao = tempoAtual;

    noInterrupts(); // Desativa interrupções para leitura segura
    int pulsosAnemometro = counter;
    counter = 0;    // Reinicia a contagem de pulsos
    interrupts();  // Reativa interrupções

    // Cálculo da velocidade do vento
    int rpm = (pulsosAnemometro * 60) / (tempovento / 1000);
    velocidadeVento = (((4 * pi * raio * rpm) / 60) / 1000) * 3.6;
    counter = 0;

    // Leitura do DHT22
    temperatura = dht.readTemperature();
    umidade = dht.readHumidity();

    if (reedCount > 0) { // Processa apenas se houver novos pulsos
        noInterrupts(); // Desativa interrupções temporariamente
        uint16_t pulsos = reedCount; // Copia o valor da interrupção
        reedCount = 0; // Reseta a contagem
        novoPulsoChuva = false; // Reseta a flag
        interrupts(); // Reativa interrupções

        acumuladoChuva += pulsos * 0.25; // Soma ao total acumulado

        // Exibir dados no Serial Monitor
        Serial.println("-----");
        Serial.print("Chuva medida: ");
        Serial.print(pulsos * 0.25);
        Serial.println(" mm");
        Serial.print("Velocidade do vento: ");
        Serial.print(velocidadeVento);
    }
}

```

```

    Serial.println(" km/h");
    chuvaInstante = pulsos * 0.25;
}
}

if(lora_idle) {
    lora_idle = false;
    Serial.println("\r\n-----");
    Serial.println("Entrando em modo de recepção");
    Radio.Rx(0);
}

// Atualização do display
if (displayActive && (millis() - displayStartTime >= 1800)) {
    oledisplay.clear();
    oledisplay.drawString(0, 0, "Incl: X=" + String(inclinacaoX, 1) + "° Y=" +
String(inclinacaoY, 1) + "°");
    oledisplay.drawString(0, 10, "Temp: " + String(temp, 1) + "C, Umid: " + String(humidity, 1)
+ "%");
    oledisplay.drawString(0, 20, "Niv: " + String(altura) + "cm, Vel: " + String(velocidade, 1)
+ " m/s");
    oledisplay.drawString(0, 30, "U: " + String(busvoltage) + " V, I: " + String(current_mA) + "
mA");
    oledisplay.drawString(0, 40, "V. vento: " + String(velocidadeVento) + " km/h");
    oledisplay.drawString(0, 50, "Chuva acum.: " + String(acumuladoChuva) + " mm");
    oledisplay.display();
    displayActive = false;
}

Radio.IrqProcess( );
}

```

Nó-sensor hidrológico

```

#include "LoRaWan_APP.h"
#include "Arduino.h"
#include "HT_SSD1306Wire.h"
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_AHTX0.h>

```

```

#include <Adafruit_INA219.h>
#include <Heltec.h>
#include <Adafruit_MPU6050.h>
#include <math.h>

// Configurações LoRa
#define RF_FREQUENCY          915200000 // Hz
#define TX_OUTPUT_POWER     20         // dBm
#define LORA_BANDWIDTH      0         // [0: 125 kHz, 1: 250 kHz, 2: 500
kHz, 3: Reserved]
#define LORA_SPREADING_FACTOR 9       // [SF7..SF12]
#define LORA_CODINGRATE     1         // [1: 4/5, 2: 4/6, 3: 4/7, 4: 4/8]
#define LORA_PREAMBLE_LENGTH 8       // Same for Tx and Rx
#define LORA_SYMBOL_TIMEOUT 0        // Symbols
#define LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON false
#define LORA_IQ_INVERSION_ON false
#define RX_TIMEOUT_VALUE    2000
#define BUFFER_SIZE         52 // Tamanho do payload LoRa

// Configurações do display OLED
#define OLED_RST 21 // Pino RST do OLED

// Pinos dos Sensores
#define BOIA_PIN 26
#define YFS201_PIN 7
#define DIAMETRO_TUBO 0.011 // Metros
#define TRIG_PIN 45
#define ECHO_PIN 46

// Constantes do sensor YF-S201
#define PULSOS_POR_LITRO 450.0

// Instâncias dos Sensores
SSD1306Wire oledisplay(0x3c, 500000, SDA_OLED, SCL_OLED, GEOMETRY_128_64, OLED_RST);
Adafruit_AHTX0 aht10;
Adafruit_INA219 ina219;
Adafruit_MPU6050 mpu;

// Variáveis dos Sensores

```

```

bool sensoresAtivados = false;
unsigned long intervalo = 5000; // Intervalo para medições (5 segundos)
volatile int contagemPulsos = 0;
unsigned long tempoUltimoPulso = 0;
float fluxoLMin = 0.0;
long duracao, distancia;
float nivelAgua = 0.0;
float inclinacaoX, inclinacaoY;
float temp, humidity;
float velocidade;
float busvoltage, current_mA;

// Variáveis LoRa
char txpacket[BUFFER_SIZE];
int16_t txNumber;
bool lora_idle=true;
static RadioEvents_t RadioEvents;

// Funções LoRa
void OnTxDone( void );
void OnTxTimeout( void );

void VextON() {
    pinMode(Vext, OUTPUT);
    digitalWrite(Vext, LOW);
}

void VextOFF() {
    pinMode(Vext, OUTPUT);
    digitalWrite(Vext, HIGH);
}

// Função para converter a vazão (L/min) para m³/s
float vazaoParaM3s(float vazaoLMin) {
    return vazaoLMin / 1000.0 / 60.0;
}

// Função para calcular a área da seção transversal do tubo (m²)
float calcularAreaTubo(float diametro) {

```

```

    return 3.14159 * (diametro / 2) * (diametro / 2);
}

// Função para calcular a velocidade do escoamento (m/s)
float calcularVelocidade(float vazaoLMin, float diametroTubo) {
    float vazaoM3s = vazaoParaM3s(vazaoLMin); // Vazão em m³/s
    float areaTubo = calcularAreaTubo(diametroTubo); // Área da seção transversal (m²)
    return vazaoM3s / areaTubo; // Velocidade em m/s
}

// Função que é chamada sempre que um pulso é gerado pelo sensor YF-S201
void contagemDePulsos() {
    contagemPulsos++;
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    VextON();
    delay(100);

    // Configurar pino RST do OLED
    pinMode(OLED_RST, OUTPUT);
    digitalWrite(OLED_RST, LOW);
    delay(100);
    digitalWrite(OLED_RST, HIGH);
    delay(100);

    // Inicializar o display OLED
    oledisplay.init();
    oledisplay.clear();
    oledisplay.drawString(0, 0, "Inicializando...");
    oledisplay.display();

    // Configuração da boia
    pinMode(BOIA_PIN, INPUT_PULLUP); // Pull-up interno para estabilizar o sinal

    Wire1.begin(41, 42, 400000);
    delay(1000);
}

```

```
// Inicialização dos sensores com tratamento de erros
// Inicializa o sensor AHT10
int tentativas = 0;
while (!aht10.begin(&Wire1) && tentativas < 3) {
    Serial.println("Falha ao inicializar AHT10! Tentando novamente...");
    oledisplay.clear();
    oledisplay.drawString(0, 0, "Falha AHT10!");
    oledisplay.drawString(0, 10, "Tentando...");
    oledisplay.display();
    delay(1000);
    tentativas++;
}
if (tentativas >= 3) {
    Serial.println("Falha ao inicializar AHT10 após 3 tentativas!");
    oledisplay.clear();
    oledisplay.drawString(0, 0, "Falha AHT10!");
    oledisplay.drawString(0, 10, "Erro!");
    oledisplay.display();
    while (1);
}

// Inicializa o sensor INA219
tentativas = 0;
while (!ina219.begin(&Wire1) && tentativas < 3) {
    Serial.println("Falha ao inicializar INA219! Tentando novamente...");
    oledisplay.clear();
    oledisplay.drawString(0, 0, "Falha INA219!");
    oledisplay.drawString(0, 10, "Tentando...");
    oledisplay.display();
    delay(1000);
    tentativas++;
}
if (tentativas >= 3) {
    Serial.println("Falha ao inicializar INA219 após 3 tentativas!");
    oledisplay.clear();
    oledisplay.drawString(0, 0, "Falha INA219!");
    oledisplay.drawString(0, 10, "Erro!");
    oledisplay.display();
    while (1);
}
```

```

}

// Inicializa o sensor MPU-6050
tentativas = 0;
Serial.println("Inicializando MPU-6050...");
while (!mpu.begin(0x68, &Wire1) && tentativas < 3) { // Endereço padrão do MPU-6050
  Serial.println("Falha ao inicializar o sensor MPU-6050! Tentando novamente...");
  oledisplay.clear();
  oledisplay.drawString(0, 0, "Falha MPU-6050!");
  oledisplay.drawString(0, 10, "Tentando...");
  oledisplay.display();
  delay(1000);
  tentativas++;
}
if (tentativas >= 3) {
  Serial.println("Falha ao inicializar o sensor MPU-6050 após 3 tentativas!");
  oledisplay.clear();
  oledisplay.drawString(0, 0, "Falha MPU-6050!");
  oledisplay.drawString(0, 10, "Erro!");
  oledisplay.display();
  while (1);
}

// Configuração do sensor
mpu.setAccelerometerRange(MPU6050_RANGE_8_G);
mpu.setGyroRange(MPU6050_RANGE_500_DEG);
mpu.setFilterBandwidth(MPU6050_BAND_21_HZ);

// Configura o pino do YF-S201 como entrada e ativa a interrupção
pinMode(YFS201_PIN, INPUT);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(YFS201_PIN), contagemDePulsos, RISING); // Contagem de
pulsos na borda de subida

// Configura o pino do AJ-SR04M
pinMode(TRIG_PIN, OUTPUT);
pinMode(ECHO_PIN, INPUT);

Serial.println("Nó-sensor hidrológico iniciado...");

```

```

Mcu.begin(HELTEC_BOARD,SLOW_CLK_TPYE);

txNumber=0;

RadioEvents.TxDone = OnTxDone;
RadioEvents.TxTimeout = OnTxTimeout;

Radio.Init( &RadioEvents );
Radio.SetChannel( RF_FREQUENCY );
Radio.SetTxConfig( MODEM_LORA, TX_OUTPUT_POWER, 0, LORA_BANDWIDTH,
                  LORA_SPREADING_FACTOR, LORA_CODINGRATE,
                  LORA_PREAMBLE_LENGTH, LORA_FIX_LENGTH_PAYLOAD_ON,
                  true, 0, 0, LORA_IQ_INVERSION_ON, 3000 );
}

void loop() {
  int estadoBoia = digitalRead(BOIA_PIN);

  // Se a boia estiver aberta (nível alto), desativar sensores
  if (estadoBoia == HIGH && sensoresAtivados) {
    sensoresAtivados = false;
    Serial.println("Boia aberta! Sensores desativados.");
    oledisplay.clear();
    oledisplay.drawString(0, 0, "Boia aberta!");
    oledisplay.drawString(0, 10, "Sensores desativados.");
    oledisplay.display();
    return; // Interrompe o loop imediatamente, sem realizar medições
  }

  // Se a boia estiver fechada (nível baixo) e os sensores não estiverem ativados, ativá-los
  if (estadoBoia == LOW && !sensoresAtivados) {
    sensoresAtivados = true;
    Serial.println("Boia fechada! Sensores ativados.");
    oledisplay.clear();
    oledisplay.drawString(0, 0, "Boia fechada!");
    oledisplay.drawString(0, 10, "Sensores ativados.");
    oledisplay.display();
    delay(1000);
  }
}

```

```

// Se os sensores estiverem ativados, realizar as medições
if (sensoresAtivados) {
  // Medições de sensores a cada intervalo
  unsigned long tempoInicio = millis();
  while (millis() - tempoInicio < intervalo) {

    // Medição do MPU-6050
    // Obter os dados do acelerômetro e giroscópio usando o método getEvent
    sensors_event_t a, g, tempe;
    mpu.getEvent(&a, &g, &tempe);

    // Cálculo da inclinação em graus
    float inclinacaoX = atan2(a.acceleration.y, a.acceleration.z) * 180.0 / M_PI;
    float inclinacaoY = atan2(a.acceleration.x, a.acceleration.z) * 180.0 / M_PI;

    // Formatação dos dados com classe String
    String inclinacaoXStr = String(inclinacaoX, 2);
    String inclinacaoYStr = String(inclinacaoY, 2);
    String tempStr = String(tempe.temperature, 2);

    // Imprime os valores de inclinação no monitor serial
    Serial.print("Inclinação X: ");
    Serial.print(inclinacaoX);
    Serial.println("");

    Serial.print("Inclinação Y: ");
    Serial.print(inclinacaoY);
    Serial.println("");

    Serial.print("Temp. MPU6050 (°C): ");
    Serial.println(tempe.temperature);

    // Exibir no display OLED
    oleddisplay.clear();
    oleddisplay.drawString(0, 0, "Incl: X=" + String(inclinacaoX, 1) + "° Y=" +
String(inclinacaoY, 1) + "°");

    // Medição do AHT10 (Temperatura e umidade)

```

```

sensors_event_t humidity, temp;
aht10.getEvent(&humidity, &temp);

String humidityStr = String(humidity.relative_humidity, 2);
String tempAHTStr = String(temp.temperature, 2);

Serial.print("Temperatura: ");
Serial.print(temp.temperature);
Serial.println(" °C");
Serial.print("Umidade: ");
Serial.print(humidity.relative_humidity);
Serial.println(" %");

// Exibir no display OLED
oleddisplay.drawString(0, 10, "Temp: " + String(temp.temperature) + "C");
oleddisplay.drawString(0, 20, "Umid: " + String(humidity.relative_humidity) + "%");

// Calcular o fluxo de água
if (millis() - tempoUltimoPulso >= 1000) { // A cada 1 segundo
  fluxoLMin = (contagemPulsos / PULSOS_POR_LITRO) * 60.0; // Calcula vazão em L/min
  contagemPulsos = 0; // Reseta o contador de pulsos
  tempoUltimoPulso = millis(); // Reseta o tempo do último pulso

  Serial.print("Vazão de água: ");
  Serial.print(fluxoLMin);
  Serial.println(" L/min");

  // Calcular a velocidade do escoamento
  float velocidade = calcularVelocidade(fluxoLMin, DIAMETRO_TUBO);
  float vazaoLsec = fluxoLMin / 60.0; // Vazão em L/s

  Serial.print("Velocidade do escoamento: ");
  Serial.print(velocidade);
  Serial.println(" m/s");

  // Exibir no display OLED
  oleddisplay.drawString(0, 30, "Vel: " + String(velocidade) + " m/s, Q: " +
String(vazaoLsec) + " L/s");
}

```

```

// Medição do AJ-SR04M (Distância)
digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);
delayMicroseconds(2);
digitalWrite(TRIG_PIN, HIGH);
delayMicroseconds(10);
digitalWrite(TRIG_PIN, LOW);

duracao = pulseIn(ECHO_PIN, HIGH);
distancia = (duracao * 0.034 / 2); // Distância em centímetros. O nível d'água deve ser
calculado pela altura do sensor até o fundo menos a distância do nível d'água medida pelo sensor.
long altura = 600 - distancia; // Altura da lâmina d'água com o leito do rio 6 m abaixo do
sensor. Substitua 600 pela distância até o fundo do córrego.

Serial.print("Distância medida: ");
Serial.print(distancia);
Serial.println(" cm");
Serial.print("Nível do rio: ");
Serial.print(altura);
Serial.println(" cm");

// Exibir no display OLED
oleddisplay.drawString(0, 40, "Nível: " + String(altura) + " cm");

// Medição do INA219 (Tensão e corrente)
float busvoltage = ina219.getBusVoltage_V(); // Tensão no barramento
float current_mA = ina219.getCurrent_mA(); // Corrente em mA
float shuntvoltage = ina219.getShuntVoltage_mV(); // Tensão no shunt

Serial.print("Tensão no barramento: ");
Serial.print(busvoltage);
Serial.println(" V");
Serial.print("Corrente: ");
Serial.print(current_mA);
Serial.println(" mA");
Serial.print("Tensão no shunt: ");
Serial.print(shuntvoltage);
Serial.println(" mV");
Serial.println("-----");

```

```

// Exibir no display OLED
oleddisplay.drawString(0, 50, "U: " + String(busvoltage) + " V, I: " + String(current_mA)
+ " mA");
oleddisplay.display();
delay(1000); // Aguarda 1 segundo

// Formatação dos dados com classes diferentes para envio
int16_t velocidade_int = (int16_t)(velocidade * 100);
String busvoltageStr = String(busvoltage, 2);
String current_mAstr = String(current_mA, 2);

// Preparação do pacote LoRa
if (lora_idle == true) {
    delay(100);
    txNumber += 1;

    // Formatação do pacote com os dados dos sensores
    snprintf(txpacket, sizeof(txpacket), "%d,%s,%s,%s,%s,%d,%ld,%s,%s",
        txNumber, inclinacaoXStr.c_str(), inclinacaoYStr.c_str(),
        tempAHTStr.c_str(), humidityStr.c_str(), velocidade_int,
        altura, busvoltageStr.c_str(), current_mAstr.c_str());

    Serial.printf("\r\nEnviando pacote \"%s\" , tamanho %d\r\n",txpacket, strlen(txpacket));
    Serial.println("-----");

    // Exibir informações no display
    oleddisplay.clear();
    oleddisplay.drawString(0, 20, "Enviando pacote: " + String(txpacket));
    oleddisplay.display();

    Radio.Send( (uint8_t *)txpacket, strlen(txpacket) ); // Envia o pacote
    lora_idle = false;
}

Radio.IrqProcess( );
delay(1000); // Aguarda 1 segundo antes da próxima medição
}
}

```

```
    delay(500); // Intervalo de 500ms antes da próxima verificação
}
```

```
void OnTxDone( void ) {
    Serial.println("Envio completado!");
    Serial.println("-----");
    lora_idle = true;
}
```

```
void OnTxTimeout( void ) {
    Radio.Sleep( );
    Serial.println("Tempo de envio excedido");
    oledisplay.clear();
    oledisplay.drawString(0, 0, "Tempo de envio excedido");
    oledisplay.display();
    lora_idle = true;
}
```