

Proposta de estação IQA para análise dos rios da cidade Marabá/PA com monitoramento via rede Wi-Fi

Pedro A. F. O. Neto, Maria E. A. Massa, Kamyly V. A. Carneiro, João G. T. Breder, Livia A. Lopes e Leslye E. C. Eras

Resumo— Este artigo propõe um sistema IoT para monitorar a qualidade da água em rios amazônicos, com protótipo testado em Marabá-PA. Utiliza sensores de baixo custo (turbidez, temperatura e pressão atmosférica) em plataforma flutuante, transmitindo dados via Wi-Fi/MQTT. Campanhas de medição avaliaram a comunicação em diversas condições, incluindo chuvas, mostrando transmissão estável até 50m e comparando resultados com modelos teóricos. A solução visa fornecer dados acessíveis sobre qualidade hídrica, apoiando gestão ambiental e engajamento comunitário na região.

Palavras-Chave— Qualidade da água, IoT, monitoramento ambiental, comunicação sem fio, Amazônia.

Abstract— This paper proposes an IoT system to monitor water quality in Amazonian rivers, with a prototype tested on Marabá-PA. It uses low-cost sensors (turbidity, temperature, and atmospheric pressure) on a floating platform, transmitting data via Wi-Fi/MQTT. Measurement campaigns evaluated communication under various conditions, including rainfall, showing stable transmission up to 50m and comparing results with theoretical models. The solution aims to provide accessible data on water quality, supporting environmental management and community engagement in the region.

Keywords— Water quality, IoT, environmental monitoring, wireless communication, Amazon.

I. INTRODUÇÃO

Os rios do estado do Pará, especialmente na região amazônica, são vitais para o equilíbrio ecológico e as atividades humanas. Para a avaliação geral da qualidade da água, utiliza-se o Índice de Qualidade da Água (IQA) – um indicador único que varia de 0 a 100, calculado com base em nove parâmetros físicos, químicos e biológicos. Conforme o mapa na Figura 1 [1], o Pará enfrenta uma carência de medidores e pontos de monitoramentos dos parâmetros para o IQA de seus rios.

Dentre as cidades do estado com rios relevantes, Marabá – foco central deste estudo – é banhada pelos rios Itacaiúnas e Tocantins. Estes têm apresentado aumento na irregularidade da qualidade da água, em especial o rio Tocantins, conforme dados coletados entre 2019 e 2025 [2][3]. Segundo [2], 81,81% das 480 amostras de água do Tocantins continham coliformes totais, um grupo de bactérias gram-negativas que indicam contaminação e risco de presença de patógenos. Em 2024,

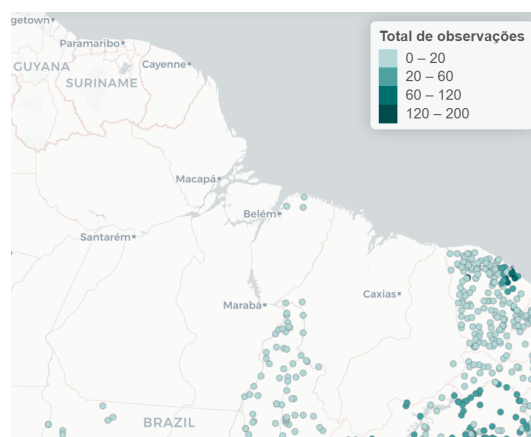


Fig. 1. Mapa de pontos de monitoramento com valores de IQA

uma ponte sobre o rio Tocantins cedeu [4], o que ocasionou no vazamento de 76 toneladas de ácido sulfúrico, 22 mil litros de defensivos agrícolas, e materiais MDF (material derivado da madeira) em suas águas, que estavam sendo transportados por caminhões no momento. Apesar do Ministério da Saúde ter divulgado a ausência de contaminação crítica [5], a falta de monitoramento contínuo e transparente após o acidente gera preocupação quanto à segurança hídrica. A escassez de dados acessíveis à população local pode agravar problemas de saúde devido à desinformação.

Além dos impactos sanitários, a presença de recursos hídricos em áreas urbanas também exercem grande influência direta na cultura e a economia locais, como destacado nas pesquisas realizadas em Marabá. Em [3], é apurado que 47% da comunidade entrevistada informou que utilizam o rio Tocantins para lazer, enquanto 75% para a realização de atividades diárias. Já em [6], o estudo mostrou que 97,4% dos ribeirinhos entrevistados utilizam o pescado tanto para consumo próprio quanto para fins econômicos, enquanto os demais destinam-no exclusivamente ao consumo familiar. Tais dados reforçam a necessidade de investimentos em pesquisas e soluções para preservação desses recursos.

Nesse cenário, diversas iniciativas tecnológicas buscam automatizar o monitoramento de parâmetros de qualidade da água. Adriman et al. [7] desenvolveram um sistema para aquicultura de camarões com sensores submersos e uma plataforma de visualização de dados via aplicativo Android, incluindo alertas automáticos para parâmetros fora da faixa ideal. Govin-

dasamy et al. [8] propuseram um kit IoT para gestão hídrica urbana em Puducherry, integrando monitoramento residencial e de reservatórios com acesso remoto a dados. Embora ambas as soluções ofereçam coleta autônoma e transparência informacional, foram implementadas em ambientes controlados, com pouca interferência externa na comunicação. Em contraste, o projeto de Nunes Neto [9] introduziu um sistema móvel para coleta autônoma em corpos hídricos naturais, superando desafios logísticos em áreas remotas, contudo com limitação na divulgação de dados (restrita a SMS).

Diante desse contexto, este artigo propõe o estudo de rede e o desenvolvimento do protótipo de um sistema IoT de análise da qualidade da água, baseado em microcontrolador ESP Lilygo T3_1.6.1 e sensores, com comunicação Wi-Fi, visando monitoramento automático e remoto, que servirá como um precursor da utilização de comunicação sem fio no auxílio do controle da qualidade da água da região amazônica. O sistema prioriza eficiência energética, e servirá como uma fonte de informações sobre a qualidade dos rios da região para a população de forma acessível, através da disposição dos dados em um *software*, que servirá como forma de democratização ao acesso dos dados coletados. Além de contribuir para o controle da qualidade hídrica regional, a solução busca servir como ferramenta de conscientização e engajamento comunitário.

O trabalho foi subdividido nas seguintes seções: II. Fundamentação teórica, que aborda as equações utilizadas; O desenvolvimento, materiais e arquitetura de rede são descritos em III. Protótipo; a seção IV. Metodologia descreve os testes de conexão realizados; em V. são discutidos os resultados; e em VI. É apresentada a conclusão e planos para trabalhos futuros.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. RSSI - Receive Signal Strength Indicator

O RSSI é um parâmetro utilizado para medir a intensidade de um sinal, desde seu ponto de origem até o destino [10]. Essa métrica, expressa em decibéis (dBm), neste trabalho valida o alcance da conexão em diferentes condições ambientais. Além disso, o RSSI também indica a qualidade do sinal até certo limite - valores mais próximos de 0 dBm representam uma conexão mais forte, enquanto números mais negativos indicam menor potência e, consequentemente, pior conectividade [10].

Seu valor é estimado a partir da seguinte equação:

$$\text{RSSI} = P_t + G_t + G_r - L_{\text{FSPL}} \quad (1)$$

- RSSI: potência recebida (dBm)
- P_t : potência transmitida (dBm)
- G_t : ganho da antena transmissora (dBi)
- G_r : ganho da antena receptora (dBi)
- L_{FSPL} : perda em espaço livre (dB)

B. Perda em Espaço Livre (Free Space Path Loss - FSPL)

A perda em espaço livre é um modelo teórico empregado para estimar a atenuação de ondas eletromagnéticas em condições ideais, sem interferências externas. Essa dispersão ocorre à medida que o sinal se propaga, reduzindo sua intensidade conforme a distância aumenta.

A equação para a FSPL é:

$$L_{\text{FSPL}}(\text{dB}) = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32,44 \quad (2)$$

- $L_{\text{FSPL}}(\text{dB})$: perda em espaço livre (dB)
- d : distância entre transmissor e receptor (km)
- f : frequência do sinal (MHz)

Embora simplificado, esse modelo serve como referência para comparar valores teóricos com medições reais de RSSI. Diferenças significativas entre os resultados calculados e os observados em campo indicam a influência de variáveis ambientais, como vegetação, relevo e umidade do solo, aspectos fundamentais para este estudo.

C. Modelos de Propagação

1) *ITU-R P.1546-6: Propagação sobre terrenos terrestres e marítimos*: A recomendação ITU-R P.1546-6, da União Internacional de Telecomunicações (ITU), descreve um modelo empírico para estimar a perda de propagação em sistemas ponto-área, aplicável a frequências entre 30 MHz e 4000 MHz [11]. Este estudo utiliza o modelo do Anexo 16, apropriado para distâncias inferiores a 1 km, o que se alinha ao monitoramento ambiental em rios com sensores distribuídos em pequena escala.

Esse modelo incorpora fatores de propagação mais próximos da realidade, considerando irregularidades do terreno e variações atmosféricas, tornando-se mais preciso que o FSPL para aplicações práticas.

2) *ITU-R P.833-10: Atenuação causada pela vegetação*: A presença de densa vegetação influencia diretamente a propagação do sinal, causando perdas adicionais devido à absorção por folhas, troncos e umidade ambiente. A recomendação ITU-R P.833-10 fornece um modelo baseado em medições empíricas, permitindo estimar a atenuação causada pela vegetação [12].

A equação para a perda por vegetação é:

$$A_{ev} = A_m \left[1 - \exp \left(-\frac{d\gamma}{A_m} \right) \right] \quad (3)$$

- A_{ev} : atenuação por vegetação (dB)
- A_m : atenuação máxima em um tipo específico de vegetação (dB)
- γ : atenuação específica para caminhos curtos na vegetação (dB/m)
- d : comprimento do caminho dentro da floresta (m)

$$A_m = A_1 \cdot f^\alpha \quad (4)$$

Onde A_m representa a atenuação máxima (dB), A_1 é o coeficiente empírico baseado no tipo de vegetação, f é a frequência do sinal (MHz), e α é o expoente empírico que depende do tipo de vegetação. Para ambientes florestados similares ao local de estudo, utiliza-se os parâmetros de referência $A_1=0,18$ e $\alpha=0,752$, obtidos em estudos no estado do Rio de Janeiro.

Os valores de RSSI coletados em campo foram comparados com as previsões dos modelos teóricos discutidos. As diferenças observadas entre os dados medidos e os valores calculados destacam a importância de considerar fatores ambientais

específicos, tais como vegetação densa, relevo acidentado e proximidade de corpos d'água, que não são contemplados no modelo de espaço livre.

Essa abordagem é fundamental para validar a viabilidade da comunicação sem fio em regiões ribeirinhas, contribuindo para o desenvolvimento de soluções de monitoramento ambiental acessíveis e eficientes, por meio de tecnologias como LoRa, Wi-Fi e outras redes de transmissão de dados.

III. PROTÓTIPO

A. Materiais e sensores

A fim de acomodar os sensores, desenvolveu-se uma base flutuante. Para sua construção, utilizaram-se duas garrafas PET de 2 litros e três tubos de PVC com 30 centímetros de comprimento cada, responsáveis pela conexão entre as garrafas. Adicionalmente, empregou-se um recipiente hermético para abrigar os sensores, garantindo uma vedação eficiente contra a umidade e infiltrações.

O dispositivo foi montado em uma protoboard, conforme ilustrado na Figura 2, que integra um sensor ultrassônico HC-SR04, utilizado para medição da turbidez da água, e um sensor BMP180, para captação de dados de pressão e temperatura atmosférica. Ambos os sensores foram alojados no interior do recipiente, enquanto um terceiro sensor, o DS18B20, foi posicionado de forma submersa para monitoramento da temperatura da água. O sistema é controlado pelo microcontrolador ESP Lilygo T3_V1.6.1, responsável pelo gerenciamento dos sensores e envio dos dados através da rede Wi-Fi.

A escolha dos sensores considerou critérios de custo-benefício, disponibilidade no mercado e adequação às condições do projeto, principalmente tratando-se do sensor HC-SR04, originalmente desenvolvido para medição de distância por ondas ultrassônicas, foi adaptado para avaliar a turbidez da água. Mesmo que essa abordagem não seja tão precisa quanto sensores ópticos especializados, mostrou-se eficaz para medições comparativas em um sistema de baixo custo.

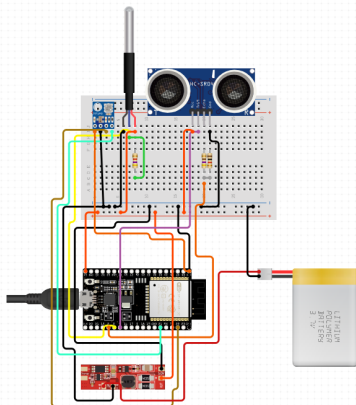


Fig. 2. Esquema de sensores do protótipo parcial

B. Arquitetura de rede

Com o intuito de estabelecer a comunicação entre os servidores (dispositivos de medição) e o receptor de dados

referentes aos recursos hídricos, foi utilizado o protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*). Tal protocolo oferece suporte econômico e organizacional às aplicações Iot (*Internet of Things*) como o respectivo sistema de monitoramento da qualidade da água. A configuração desse recurso é caracterizada pelo baixo consumo energético, o qual é traduzido em mínimo esforço no momento da transmissão e recepção de dados [13].

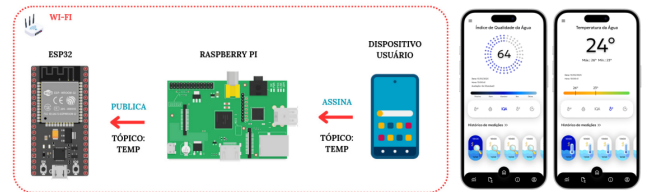


Fig. 3. Mapa da arquitetura de rede e interface gráfica da aplicação web.

A nível de organização, o MQTT dispõe do molde publicador-assinante, que permite aos dispositivos enviarem mensagens, ou assinarem o recebimento delas, por meio de tópicos, como observado na Figura 3. Esses tópicos funcionam como endereços virtuais, garantindo a não defasagem ou perda de conteúdo [14].

Para encaminhar essas mensagens aos inscritos de cada tópico, o conceito de *broker* é aplicado [14].

No contexto dessa aplicação, o mecanismo de conexão entre dispositivos, seguindo o modelo MQTT, ocorre de modo a formar um fluxo de demandas e entregas. À vista disso, as coletas das métricas de qualidade, turbidez e temperatura da água, bem como temperatura e pressão do ar extraídas pelos sensores, são enviadas via Wi-fi pela placa ESP32, onde atua como publicadora. Por sua vez o microcontrolador Raspberry Pi, o *broker* da rede, envia os dados para os dispositivos que desempenham o papel de assinantes recebendo a amostragem dessas medidas de acordo com os respectivos tópicos por uma plataforma web como mostrada na Figura 3.

IV. METODOLOGIA

Foram realizados dois testes no protótipo para validar seu funcionamento. Uma campanha de medições para validar o desempenho da conexão Wi-Fi entre o transmissor e o receptor em diferentes distâncias em espaço livre, com o objetivo de verificar a estabilidade da comunicação; e outro para validar os sensores e parâmetros de IQA.

Os equipamentos utilizados na campanha da conexão incluem uma placa ESP32 (modelo Lilygo T3_V1.6.1) como transmissor e um roteador Huawei (modelo HG8145v5) como receptor, ambos operando na frequência de 2,4 GHz.

Para garantir a confiabilidade dos dados, foi realizada uma calibração preliminar comparando os resultados experimentais com os cálculos teóricos baseados nas equações apresentadas na seção de Fundamentação Teórica. Os dispositivos foram posicionados frente a frente, fixados a 0,70 m de altura, e coletaram-se 10 medições de RSSI em cada distância, das quais foi calculada a média. Obteve-se um RSSI médio de

-15 dBm e a perda de espaço livre de 34,15 dB, próxima ao valor teórico calculado de 25,41 dB.

Para validar o funcionamento dos sensores do protótipo, realizou-se uma série de testes controlados. Foi utilizado um recipiente hermético contendo 400 ml de líquido em três condições distintas: vazio, com água limpa (número 1), e com água contendo detritos em cinco níveis de turbidez (número 2 ao 6) (como pode ser visto na Figura 4 a seguir).

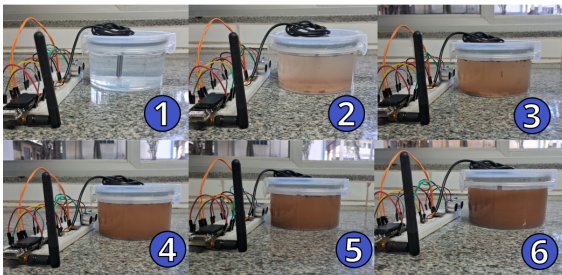


Fig. 4. Níveis de turbidez utilizados no teste do protótipo.

V. RESULTADOS OBTIDOS

A. Propagação do sinal

Para a etapa de medição do alcance máximo em espaço livre, como na Figura 5, os equipamentos mantiveram a altura padrão de 0,70 m e foram distanciados a cada 2 metros. Em cada posição, coletaram-se 20 amostras para calcular a média do RSSI, garantindo assim robustez estatística aos resultados.

A Figura 6 compara os valores de RSSI obtidos na campanha de medição (conforme descrito na seção de metodologia) com o modelo ITU-R P.1546. Observa-se uma discrepância entre os valores medidos e o modelo teórico, devido a interferências eletromagnéticas ambientais (como redes Wi-Fi próximas) e a fatores naturais (como condições de vento). Os dados de RSSI possuem uma potência recebida maior que os valores do modelo ITU-R P.833-10 por terem sido coletados em uma área de vegetação aberta.



Fig. 5. Configuração e disposição dos equipamentos na campanha de medições.

Além disso, foram realizados testes adicionais em uma chuva intensa como observado na Figura 7. Foram recolhidas 10 amostras em cinco distâncias diferentes. Pode-se observar

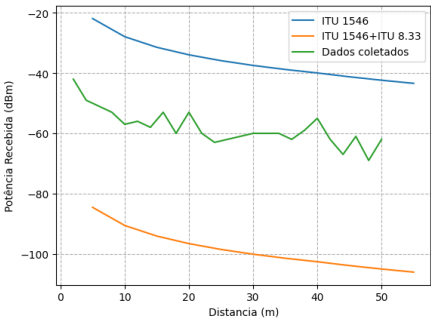


Fig. 6. Gráfico dos dados de RSSI coletados nas medições comparados em relação ao ITU 1546.

que a chuva aumentou a atenuação em média 22 dB devido ao espalhamento do sinal. A perda de pacotes em cada distância medida neste teste pode ser observada na Tabela I.



Fig. 7. Teste adicional de transmissão em uma chuva intensa.

TABELA I
MEDIÇÕES EM CHUVA INTENSA.

Distância (m)	RSSI (dBm)	Pacotes perdidos (%)
30	-80	40.00
32	-83	10.00
34	-84	20.00
36	-84	10.00
38	-86	30.00

A detecção de perda de pacotes foi realizada por meio de testes de ping, cujo retorno indicava a recepção (valor 1) ou falha (valor 0) na comunicação entre os dispositivos. Esse procedimento foi aplicado em todas as medições, para assegurar a consistência dos resultados.

Destaca-se que as perdas apresentadas na Tabela I ocorreram exclusivamente durante o teste em condição de chuva intensa. Nas mesmas distâncias e no mesmo local sob tempo seco, não foram observadas falhas de comunicação, o que reforça a associação das perdas às condições climáticas adversas.

O sistema proposto neste trabalho demonstrou capacidade de transmissão estável e segura em distâncias de até 50 metros, sem perda de pacotes, mostrando-se adequado para ambientes com vegetação moderada entre o transmissor e o receptor.

B. Análise dos parâmetros de IQA coletados

O sensor para temperatura da água demonstrou sensibilidade adequada, registrando a variação esperada entre as

medições sem água, para verificação de temperatura ambiente. As realizadas com água, tiveram mudanças de acordo com as condições ambientais durante os testes.

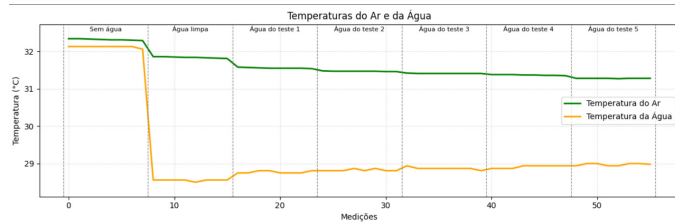


Fig. 8. Gráfico com valores medidos de temperatura do ar e água.

Para a pressão atmosférica (Figura 9), as medições apresentaram comportamento primordialmente estável, com exceção de uma variação transitória durante o teste com água limpa. Essa variação foi correlacionada às flutuações térmicas registradas pelo mesmo sensor na verificação de temperatura do ar (visível na Figura 8), cujas medições acompanharam a variação natural ao longo do período do experimento.

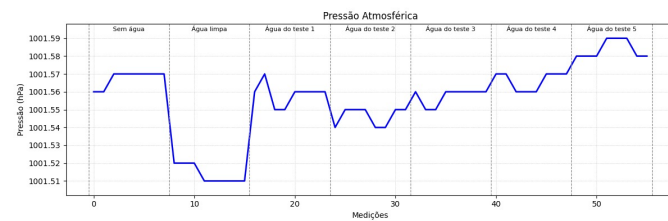


Fig. 9. Gráfico com valores medidos de pressão atmosférica.

A operação adaptada para medição de turbidez, utilizando o sensor ultrassônico, validou-se pela correlação direta entre o aumento progressivo na concentração de detritos de acordo com a distância medida entre o transmissor e receptor da onda ultrassônica. Como ilustrado na Figura 10, essa relação mostrou-se eficaz na faixa testada, confirmando a viabilidade do método para estimativa da turbidez em campo.

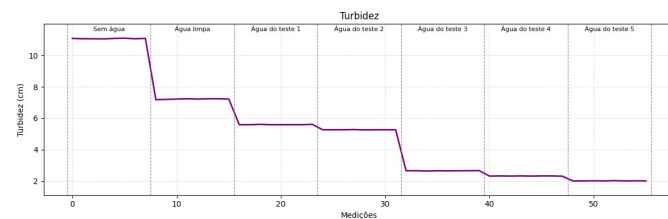


Fig. 10. Gráfico com valores medidos de turbidez.

VI. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A preservação dos recursos hídricos deve ser tratada com máxima prioridade, especialmente em regiões próximas a centros urbanos, onde os corpos d'água exercem influência direta sobre aspectos socioeconômicos e culturais, incluindo hábitos cotidianos, transporte, atividades produtivas e o desenvolvimento sustentável das comunidades.

Nesse trabalho é proposto o protótipo de uma solução IoT para a região amazônica, que envolve a coleta de informações essenciais para a medição da qualidade das águas, de forma remota e automática com comunicação Wi-Fi. O estudo demonstrou que uma conexão em ambiente de vegetação aberta consegue ser realizada com sucesso e sem perda de dados até 50 metros. Para trabalhos posteriores, serão realizados estudos adicionais que poderão explorar a integração de novos sensores e a otimização do consumo energético, ampliando assim a aplicabilidade do sistema.

REFERÊNCIAS

- [1] ANA, "Índice de Qualidade da Água," *Agência Nacional das Águas (ANA)*, 2024.
- [2] C. Emidio-Silva, U. B. Albino, R. B. Rodrigues e R. R. M. Marinho, "A poluição dos rios Itacaiúnas e Tocantins na altura da cidade de Marabá, estado do Pará, Amazônia Oriental: uma proposta na pedagogia por projetos e na educação pela pesquisa, para o ensino de ciências," *Academia*, 2020.
- [3] UNIFESSPA, "Pesquisadores analisam qualidade da água de rios de Marabá e promovem conscientização da comunidade local," *UNIFESSPA*, 2025.
- [4] G1 Tocantins, "Ponte entre MA e TO: o que se sabe e o que falta esclarecer sobre desabamento na BR-266," *G1*, 24 dez. 2024.
- [5] Ministério da Saúde, "Ministério divulga nota com orientações de saúde devido ao risco de contaminação no rio Tocantins," *Portal da Saúde*, 2025.
- [6] E. C. Silveira and N. V. Caldas, *A Importância da Atividade Pesqueira na Área de Influência da Hidrelétrica de Marabá-PA*. Universidade Federal de Pelotas, 2019.
- [7] R. Adriman, M. Fitria, A. Afdhal, and A. Y. Fernanda, "An IoT-Based System for Water Quality Monitoring and Notification System of Aquaculture Prawn Pond," in *Proc. 2022 IEEE Int. Conf. on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT)*, pp. 356–360, 2022.
- [8] M. Govindasamy, K. Jayanthi, and S. Rajagopan, "IoT Product on Smart Water Quality Monitoring System (IoT WQ-Kit) for Puducherry Union Territory," in *Proc. 2023 2nd Int. Conf. on Advances in Computational Intelligence and Communication (ICACIC)*, 2023.
- [9] SIWI, *Aquatic Rover: An autonomous vehicle for water quality: a low-cost portable tool*, Relatório Técnico, Stockholm International Water Institute, 2024.
- [10] L. A. de Oliveira, L. J. Chaves e E. F. Silva, "Explorando o RSSI na Geração de Chaves para LoRaWAN," *Anais do Simpósio Brasileiro de Segurança da Informação e de Sistemas Computacionais (SBSeg)*, n. 23, 2023.
- [11] ITU, "RECOMMENDATION ITU-R P.1546-6: Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 4000 MHz," *ITU-R Radiocommunication Sector of ITU*, 2021.
- [12] ITU, "RECOMMENDATION ITU-R P.833-10: Attenuation in vegetation," *ITU-R Radiocommunication Sector of ITU*, 2021.
- [13] V. E. Quincozes, S. E. Quincozes e J. F. Kazienko, "Avaliando a Sobrecarga de Mecanismos Criptográficos Simétricos na Internet das Coisas: Uma Comparação Quantitativa entre os Protocolos MQTT e CoAP," *Anais do Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação (WPerformance)*, n. 20, 2021.
- [14] V. E. Quincozes, W. K. N. Junior e M. F. L. Pereira, "Sistema baseado em rede sem fio LoRa para monitoramento agroclimático aplicado a cotonicultura," *Anais da Escola Regional de Informática de Mato Grosso (ERI-MT)*, n. 12, 2023.
- [15] L. S. Oliveira e M. A. Santos, "Análise da qualidade da água em rios urbanos: estudo de caso no município de Pelotas/RS," *Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão (SIEPE)*, v. 11, n. 3, 2019.
- [16] A. B. Silva et al., "Machine Learning Approaches for Water Quality Monitoring in IoT-enabled Smart Cities," *IEEE Internet of Things Journal*, 2024.
- [17] C. D. Pereira e R. E. Fernandes, "Remote Sensing Techniques for Water Pollution Detection: A Systematic Review," *Environmental Advances*, v. 5, 2021.
- [18] E. F. Costa e T. G. Almeida, "IoT-based Water Quality Assessment System Using Low-Cost Sensors," *IEEE Sensors Journal*, v. 22, n. 12, pp. 12045-12054, 2022.