

Tendências e Tecnologias em Monitoramento Ambiental: Uma Revisão de Sensores, Comunicação e Sistemas habilitados por IA

Klaus Dieter Kupper
*Programa de Pós-Graduação
em Computação (PPGC)*

extitUniversidade do Vale do Itajaí (UNIVALI)
Itajaí, Brasil
klausdk1999@gmail.com

Jordan Passinato Sausen
*Programa de Pós-Graduação
em Computação (PPGC)*

extitUniversidade do Vale do Itajaí (UNIVALI)
Itajaí, Brasil
jordan@univali.br

Mauricio de Campos
*Programa de Pós-Graduação
em Computação (PPGC)*

extitUniversidade do Vale do Itajaí (UNIVALI)
Itajaí, Brasil
mauricio.campos@univali.br

Resumo—As Redes de Sensores Sem Fio (WSNs) são fundamentais para enfrentar os desafios modernos do monitoramento ambiental impulsionados pelas mudanças climáticas. Esta revisão fornece uma análise integrada das tendências e dos desafios, examinando tecnologias de sensoriamento para água, solo e ar, juntamente com protocolos de comunicação e boas práticas. Consolidamos avanços em sensores, redes e desafios em nível de sistema, incluindo eficiência energética, segurança e a integração da Inteligência Artificial das Coisas (AIoT). Ao conectar esses domínios multidisciplinares, este trabalho serve como um guia fundamental para pesquisas futuras e para o desenvolvimento de sistemas de monitoramento de próxima geração.

Index Terms—Monitoramento ambiental, Redes de Sensores Sem Fio, Internet das Coisas (IoT), LoRaWAN, Inteligência Artificial das Coisas (AIoT).

I. INTRODUÇÃO

O aumento da urbanização e as mudanças climáticas produzem impactos diversos em diferentes camadas da sociedade, ameaçando indivíduos em situação de vulnerabilidade durante desastres como enchentes ou afetando a produção agrícola devido a variações climáticas [1]. Esses fenômenos destacam a necessidade de sistemas de monitoramento capazes de fornecer mais dados sobre as condições ambientais e auxiliar no acompanhamento, análise e previsão de tais eventos [2].

Quando falamos em monitoramento ambiental, referimo-nos a uma ampla gama de aplicações e dispositivos. Particularmente em áreas remotas e de difícil acesso, isso representa um desafio técnico significativo. A extensão territorial, combinada com condições ambientais adversas e a crescente demanda por dados em tempo real, exige soluções tecnológicas robustas, economicamente viáveis e escaláveis [3], [4].

Este trabalho foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Embora muitas revisões enfoquem aspectos específicos, como sensores de solo ou medição de nível d'água, poucas fornecem uma perspectiva integrada combinando tecnologias de sensoriamento, infraestruturas de comunicação, eficiência energética, inteligência artificial e segurança. Esta revisão aborda essa lacuna ao consolidar avanços nos domínios de monitoramento de solo, água e ar, destacando tecnologias pouco exploradas e orientando pesquisas futuras rumo a soluções escaláveis, inteligentes e resilientes.

II. SENSORES DE NÍVEL DE ÁGUA

A. Sensores de Pressão Hidrostática

Métodos tradicionais de monitoramento de nível d'água, como réguas graduadas e linígrafos, permanecem comuns em ambientes naturais. Linígrafos operam pelo princípio da pressão hidrostática, onde transdutores de pressão medem a altura da coluna d'água usando a relação $P = \rho gh$, em que ρ é a densidade da água, g a aceleração gravitacional e h a altura. Sua confiabilidade diminui em condições de cheia devido a riscos de danos ou obstruções [5].

B. Sensores Ultrassônicos de Nível

Sensores ultrassônicos estimam distância via tempo de voo acústico: um pulso curto (tipicamente 4–10 ciclos em 20–200 kHz) é emitido e o atraso do eco t é convertido em distância por $d = \frac{vt}{2}$.

Trabalhos recentes focados em monitoramento de cheias em canais abertos mostram que módulos de baixo custo podem alcançar erro médio abaixo de 3% após compensações direcionadas. MasoudiMoghaddam *et al.* [6] validaram um projeto baseado no GY-Us42 em laboratório e em campo

turbulento (incluindo superfícies espumosas e aeradas) empregando: correção da velocidade do som baseada em temperatura, filtragem de ecos espúrios (multipercursos ou respingos) com filtros mediana/Hampel e alinhamento mecânico para minimizar reflexões laterais. Pereira *et al.* [7] identificaram o HC-SR04 como opção técnica e economicamente viável para vãos curtos (<5 m) quando a geometria de montagem e a proteção contra obstruções são controladas. Bresnahan *et al.* [8] enfatizam a acessibilidade da tecnologia, destacando adoção em educação, ciência cidadã e pesquisa inicial devido ao baixo custo unitário (US\$5–15) e interface simples.

C. Medição de Nível Baseada em LiDAR

Sistemas LiDAR (Light Detection and Ranging) para aplicações hidrométricas derivam distância medindo as características de propagação da radiação laser emitida e seu retorno retroespalhado a partir da superfície alvo. Duas arquiteturas dominantes de tempo de voo (TOF) são empregadas em implementações modernas (frequentemente de estado sólido): (i) TOF pulsado e (ii) TOF de onda contínua modulada em amplitude (AMCW) [9]. Em sistemas TOF pulsados, pulsos ópticos curtos (tipicamente largura de nanossegundos ou sub-nanossegundos em 905 nm ou 1550 nm) são emitidos e o atraso de ida e volta Δt é medido com conversores tempo-digital (TDCs) de alta resolução. A distância é obtida por

$$d = \frac{c \Delta t}{2} \quad (1)$$

onde c é a velocidade da luz. No LiDAR AMCW, em vez disso, emite-se continuamente uma portadora óptica modulada em amplitude; a distância é inferida a partir do deslocamento de fase medido $\Delta \phi$ entre os envelopes transmitido e recebido:

$$d = \frac{c \Delta \phi}{4\pi f} \quad (2)$$

onde f é a frequência de modulação. TOF pulsado se destaca em longo alcance e resiliência à luz ambiente intensa, enquanto AMCW pode alcançar alta precisão em distâncias curtas a médias com eletrônica por pixel mais simples [9]. Avanços em varredura de feixe em estado sólido (espelhos MEMS, matrizes ópticas em fase, substituição de polígonos rotativos) reduzem complexidade mecânica, permitindo módulos compactos e de baixo consumo adequados para nós distribuídos de monitoramento fluvial. Principais fontes de erro incluem especularidade da superfície (retorno difuso baixo), ângulo de incidência, deriva térmica interna do driver laser e ganho do detector, além de dispersão atmosférica sob neblina ou chuva intensa.

Estudos de campo destacam o desempenho de LiDAR de baixo custo no infravermelho próximo para hidrometria. Uma configuração de feixe inclinado demonstrada por Tamari e Guerrero-Meza explora sedimentos suspensos e turbidez para aumentar o sinal retroespalhado; maiores concentrações de partículas melhoraram a estabilidade de alcance, permitindo recuperar estágios de enxurradas com erro de $\pm 0,08$ m mantendo o hardware seguro na margem [10]. Paul *et al.* mostraram que, apesar da baixa refletividade intrínseca da

água calma, um módulo comercial de baixo custo alcançou erros relativos de 0,1% em distâncias de 30–35 m, superando sensores ultrassônicos típicos em alcance máximo; contudo, a sensibilidade pronunciada à temperatura interna ressaltou a necessidade de compensação térmica (termistores embarcados com tabelas de calibração ou modelagem em tempo real) [11]. Santana *et al.* compararam um LiDAR de baixo custo diretamente contra uma instalação limnográfica (pressão hidrostática), reportando equivalência dentro de $\pm 0,05$ m a uma escala física métrica e degradação negligenciável devido a sedimentos, reforçando robustez para condições de rios tropicais [5].

Do ponto de vista de engenharia de sistemas, LiDAR oferece operação sem contato, imunidade a interferência eletromagnética, alta precisão (repetibilidade típica <0,1% da escala) e maior segurança em canais suscetíveis a enchentes ou detritos. Compromissos incluem custo de capital mais alto, susceptibilidade a fatores meteorológicos adversos (neblina densa, chuva forte) e deriva térmica que exige compensação. Revisões comparativas de tecnologias de nível líquido posicionam abordagens ópticas (LiDAR e correlatas) como superiores em precisão e manutenção frente a muitos métodos de contato, reconhecendo limitações de custo e vulnerabilidade ambiental [12].

D. Sensoriamento Remoto Baseado em Satélite

Outra forma de monitorar níveis d'água em ambientes abertos é o uso de sensoriamento remoto via satélite. O trabalho [13] empregou fusão de dados multiorigem na plataforma Google Earth Engine para estimar área de superfície e variações de nível em nove lagos de planalto em Yunnan, China, entre 2003 e 2022. Os resultados mostraram alta consistência com medições in situ, com desvios abaixo de 0,3 m, destacando a influência da variabilidade climática e de atividades humanas na dinâmica lacustre.

De forma semelhante, [14] utilizaram altimetria radar Sentinel-3A para avaliar o impacto da operação de barragens nos níveis do rio Mekong, validando níveis derivados de satélite com telemetria in situ e obtendo correlação de 0,98.

Vantagens incluem ampla cobertura espacial, consistência de longo prazo e acessibilidade a regiões remotas. Desvantagens: resolução espacial limitada, alto custo inicial de infraestrutura e dependência da disponibilidade orbital.

E. Sensores de Nível para Ambientes Controlados

Embora os mesmos sensores usados em rios e lagos possam ser adequados, métodos mais simples como sensores resistivos e capacitivos são comumente empregados para monitoramento de nível em tanques e cisternas. Sensores resistivos operam medindo mudanças de resistência elétrica conforme o nível varia, tipicamente com materiais condutivos e consumo na faixa de microwatts.

Sensores de onda acústica de superfície (SAW) representam tecnologias passivas emergentes capazes de detectar variações de nível ao medir deformações ou pressões nas paredes do reservatório, convertendo-as em deslocamentos de frequência ou

respostas em amplitude [15], [16]. Operam sem alimentação ativa, colhendo energia do sinal de RF interrogador, sendo ideais para aplicações de IoT e Indústria 5.0 com mínima manutenção.

Outra abordagem promissora envolve sensores baseados em fibra óptica, que se apoiam no princípio hidrostático de Arquimedes: um elemento flutuante altera a transmissão luminosa pela fibra para refletir mudanças no nível [17]. Embora altamente precisos (resolução de ± 1 mm), esses sistemas tendem a possuir alcance limitado e calibração mais complexa, exigindo componentes ópticos especializados e unidades de processamento de sinal.

III. SISTEMAS DE SENSORES PARA DETECÇÃO DE SUBSTÂNCIAS QUÍMICAS E POLUENTES

A. Sensores de Qualidade da Água

Avanços recentes em tecnologias de sensores aprimoraram significativamente o monitoramento da qualidade da água. Ferreira *et al.* [18] apresentam o desenvolvimento de um nó de rede de sensores sem fio capaz de integrar sensores de pH, turbidez e condutividade elétrica (EC) e classificar poluentes em ambientes aquáticos usando sistemas embarcados, IoT e aprendizado de máquina. O sistema mostrou resultados promissores em testes controlados com amostras de água do mar contendo derivados de petróleo, oferecendo baixo consumo e classificação eficaz por processamento distribuído e redes neurais embarcadas. Complementarmente, [19] revisam a aplicação de inteligência artificial (IA) na avaliação da qualidade da água.

B. Tecnologias Alternativas para Monitoramento de Solo

Tecnologias de sensoriamento sem bateria surgem como alternativas promissoras para solos em locais remotos ou de difícil acesso. Um sensor de solo baseado em NFC que colhe energia do campo magnético do leitor foi introduzido por Boada *et al.* [20], permitindo medições de temperatura, umidade e teor de água no solo sem baterias. O sistema integra um microcontrolador e armazena dados em formato NDEF para recuperação posterior.

Para monitoramento contínuo e de alta resolução, a Reflexometria de Domínio de Frequência Óptica com Aquecimento Ativo (AH-OFDR) fornece capacidades distribuídas ao longo de cabos de fibra óptica [21]. A tecnologia combina cabos aquecidos com sistemas OFDR, explorando o princípio de que a condutividade térmica do solo varia com o teor de umidade. O sistema aquece ativamente seções da fibra enquanto monitora mudanças de temperatura. Testes validaram o método frente a sistemas tradicionais de temperatura distribuída (DTS) e termografia infravermelha [21].

C. Detecção de Elementos Químicos e Gases

Em [22], investiga-se sensores SAW para detecção passiva de gases e vapores químicos no ar, baseados na interação dos compostos com a antena, que altera o sinal acústico recebido.

Sensores SAW mostram-se viáveis para detectar gases inorgânicos como NH_3 , NO_2 , SO_2 , CO , vapores orgânicos como tolueno, etanol, acetona e até agentes de guerra química.

O estudo destaca a importância da estabilidade dos materiais em ambientes extremos, o uso de antenas para operação sem fio e o baixo consumo energético, indicando direções futuras em materiais sensíveis, sensores flexíveis e arranjos multielemento para monitoramento simultâneo. Vantagens: operação passiva sem fio, ausência de consumo para o ato de detecção e tempos de resposta rápidos (segundos). Limitações: sensibilidade à temperatura, seletividade restrita e deriva em longo prazo por saturação do substrato.

D. Monitoramento de Poluição e Qualidade do Ar

Karagulian *et al.* [23] analisam o desempenho de sensores de baixo custo para monitorar diversos poluentes, incluindo monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO e NO_2), ozônio (O_3) e material particulado ($\text{PM}_{2.5}$). A revisão destaca o potencial desses sensores para ampliar a cobertura espacial em áreas urbanas e remotas e avalia diferentes métodos de calibração (MLR, ANN, SVR, RF), considerando fatores como umidade relativa, que afeta significativamente a medição de particulados.

Em [24], os autores apresentam uma revisão de sistemas de monitoramento de poluição atmosférica baseados em WSNs, classificando-os em três categorias principais: Redes de Sensores Estáticos (SSN), Redes de Sensores Comunitários (CSN) e Redes de Sensores Veiculares (VSN). A análise mostra que muitas soluções atuais já são viáveis em termos de resolução espaço-temporal, custo, eficiência energética, facilidade de implantação, manutenção e acessibilidade pública dos dados. Persistem desafios como ausência de aquisição 3D, limitações em capacidade de monitoramento ativo e uso de portadores não controlados ou semicontrolados, pontos a melhorar nas próximas gerações de sistemas.

IV. DESAFIOS E TENDÊNCIAS

A. Comunicação e Arquitetura de Sistema Energeticamente Eficientes

O amadurecimento das redes de sensores sem fio para monitoramento ambiental deslocou prioridades de projeto para longo alcance, baixa manutenção e autonomia de vários anos [25]. Paradigmas LPWAN (Sigfox, LoRa/LoRaWAN, NB-IoT) competem oferecendo cobertura de quilômetros a baixas taxas de dados para hidrologia, solo e qualidade do ar [26]. Análises comparativas mostram diferenciação estratégica: Sigfox usa quadros de banda estreita e limites rigorosos de duty cycle para minimizar energia por uplink em cargas pequenas e pouco frequentes, mas impõe restrições de payload e downlink. LoRaWAN provê taxas adaptativas e classes: Classe A (iniciada por uplink, menor energia), Classe B (janelas programadas) e Classe C (escuta quase contínua com menor latência bidirecional a custo energético maior). NB-IoT, integrado à infraestrutura celular, oferece QoS aprimorada, mobilidade gerenciada e menor latência; porém overhead de sincronização, procedimentos de attach e formas de onda

OFDM/FDMA elevam correntes de pico e médias, reduzindo vida útil frente a Sigfox ou LoRa Classe A em intervalos idênticos [26].

Eficiência energética é gargalo primário: comunicação domina orçamento energético, baterias são caras para manutenção em escala e nós remotos precisam operar por anos [27]. Tecnologias LPWAN mitigam o compromisso alcance-energia, mas requerem reduzir uplinks via extração local de características e amostragem adaptativa [26]. Colheita (solar e microrrecursos auxiliares) combinada a orçamentação preditiva permite neutralidade energética (energia colhida \geq consumida) apesar da variabilidade [27].

B. Monitoramento de Grandes Áreas com Veículos

Embora LoRaWAN e WSNs tradicionais sejam comuns em grandes áreas agrícolas, arquiteturas alternativas surgiram para superar desafios de infraestrutura, energia e escalabilidade [4]. Deng *et al.* [28] desenvolveram sistema híbrido usando sensores de solo RFID passivos e um veículo de patrulha para coleta móvel. A abordagem oferece baixo custo e eficiência energética aproveitando retroespalhamento para enviar dados ambientais.

Caruso *et al.* [29] introduziram sistema baseado em drones onde VANTs com rádios LoRa coletam periodicamente dados de sensores de solo. Ideal para áreas sem infraestrutura fixa ou onde atualizações em tempo real não são essenciais, o método inclui modelo adaptável para otimização de rotas e disposição de sensores, suportando vários tipos de drones e protocolos.

C. Sensores Beat

Sensores Beat representam abordagem inovadora no campo de IoT, concebidos para minimizar consumo e custo. Introduzidos em 2017, operam transmitindo apenas códigos de ID; a unidade receptora decodifica dados a partir dos intervalos entre transmissões (“batidas”). Aplicações incluem monitoramento de energia residencial e comercial (Power Beat, DC Current Beat) visando redução de consumo [30].

Estudos subsequentes demonstram eficiência de longo prazo em cenários críticos energeticamente. Avaliação de 2019 mostrou sensor alimentado por bateria CR2032 transmitindo mais de 3,8 milhões de IDs (mais de sete anos de operação), superando sensores IoT convencionais com duty cycles intermitentes [31]. Em 2025, o conceito foi aplicado a monitoramento de nível d’água com sistema solar, BoM de US\$ 72,5, comunicação LoRa e antena quase isotrópica Ω , operando 21 dias continuamente sem bateria, com alcance de 2 km e consumo inferior a 100 μ W [32].

D. Inteligência Artificial com Internet das Coisas (AIoT)

A integração de Inteligência Artificial em sistemas IoT (AIoT) viabiliza aplicações mais autônomas e inteligentes em cidades inteligentes, indústria e monitoramento ambiental. Conforme [33], isso marca transição para sistemas ciberfísicos combinando dispositivos embarcados, interação humana e análise em tempo real. Embora a IA amplie capacidades preditivas e adaptativas, introduz desafios de segurança de dados e complexidade sistêmica.

Sensores habilitados por IA tornam-se mais contextuais e eficientes energeticamente, suportando manutenção preditiva e roteamento inteligente [34]. No monitoramento ambiental, [18] desenvolveram nó com redes neurais embarcadas para classificação de poluentes, enquanto [19] revisam o papel da IA na análise de qualidade da água, apontando benefícios e limitações ligadas a dados.

E. Desafios de Segurança e Privacidade

A ampla integração de sistemas embarcados em arquiteturas IoT introduz desafios críticos de segurança, especialmente ao realizar sensoriamento e tomada de decisão em tempo real em contextos sensíveis. A natureza restrita desses dispositivos e a tendência de tratar segurança como secundária tornam-nos vulneráveis [35]. À medida que suportam aplicações críticas, garantir confiabilidade e resiliência é essencial [36]. Um dispositivo comprometido pode ameaçar toda a rede, destacando a necessidade de segurança robusta e integrada, sobretudo no edge, onde redução de transferência também diminui superfície de ataque [37].

Além de riscos de software, ameaças em nível de hardware como ataques microarquiteturais ganham atenção, explorando vulnerabilidades furtivas que contornam proteções tradicionais [38]. Middleware conectando sistemas heterogêneos fica exposto se o hardware não for protegido. Fabricantes devem adotar princípios secure-by-design e entregar correções tempestivas, enquanto arquitetos precisam compreender a taxonomia completa de ataques para implementar proteções ponta a ponta [35], [38].

V. CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

Tecnologias de monitoramento ambiental evoluem rapidamente para enfrentar desafios de mudanças climáticas, urbanização e gestão de recursos. Esta revisão apresentou o panorama atual e direções emergentes no desenvolvimento de sensores, abrangendo desde soluções convencionais (nível de água, poluição do ar) até alternativas avançadas, eficientes energeticamente e sem bateria.

A integração de Eletrônica de Potência e Controle com sensoriamento ambiental representa mudança de paradigma rumo a soluções sustentáveis. Estratégias de projeto de baixo consumo atingem potências abaixo de 100 μ W, enquanto colheita de energia possibilita operação quase perpétua sem substituição de baterias — crucial em aplicações de baixa manutenção.

O texto também auxilia a identificar tecnologias apropriadas conforme o contexto: para nível d’água, ultrassônicos em curtas distâncias (<5 m), LiDAR em alcances maiores; sensoriamento remoto por satélite para grandes áreas ou regiões inacessíveis. No solo, sensores alimentados por NFC e fibra óptica fornecem capacidades distribuídas, enquanto implantações em larga escala podem usar coleta móvel via veículos ou VANTs.

Em qualidade do ar (e em outros domínios), custo e maturidade de sensores deixam de ser o principal limitador; os desafios deslocam-se para expansão de aquisição de dados,

maximização de valor informacional e proteção comunicacional em redes distribuídas.

Combinações de inovações ampliam potencial: AIIoT melhora classificação de poluentes; sensores Beat viabilizam monitoramento longo em áreas remotas; segurança by design torna-se crítica na escalabilidade. IA é ferramenta poderosa para predição, detecção de anomalias e resposta autônoma, dependendo de dados extensos e qualificados — sinergia com a tendência a implantações densas em cidades inteligentes, agricultura e ecossistemas.

À medida que redes crescem em tamanho e complexidade, assegurar segurança e integridade dos dados torna-se vital. Ameaças podem comprometer não apenas a acurácia, mas a confiabilidade de sistemas decisórios em cenários críticos, gerando falsos alertas ou distorções analíticas. Segurança deve ser tratada como componente fundacional de projeto.

REFERÊNCIAS

- [1] S. N. Jonkman, "Global Perspectives on Loss of Human Life Caused by Floods," *Natural Hazards*, vol. 34, pp. 151–175, Feb. 2005. doi: 10.1007/s11069-004-8891-3.
- [2] J. Hall *et al.*, "Understanding Flood Regime Changes in Europe: A State-of-the-Art Assessment," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 18, pp. 2735–2772, Jul. 2014. doi: 10.5194/hess-18-2735-2014.
- [3] D. Chen, Z. Liu, L. Wang, M. Dou, J. Chen, and H. Li, "Natural Disaster Monitoring with Wireless Sensor Networks: A Case Study of Data-Intensive Applications upon Low-Cost Scalable Systems," *Mobile Networks and Applications*, vol. 18, pp. 651–663, Aug. 2013. doi: 10.1007/s11036-013-0456-9.
- [4] S. Yellampalli, "Wireless Sensor Networks - Design, Deployment and Applications," *IntechOpen*, Sep. 2021. doi: 10.5772/intechopen.77917. [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/books/8086>
- [5] V. Santana, R. E. Salustiano, and R. Tiezzi, "Development and Calibration of a Low-Cost LIDAR Sensor for Water Level Measurements," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 2024, pp. 102729–102729, Oct. 2024. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2024.102729.
- [6] M. MasoudiMoghaddam, J. Yazdi, and M. Shahsavandi, "A Low-Cost Ultrasonic Sensor for Online Monitoring of Water Levels in Rivers and Channels," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 102, p. 102777, Dec. 2024. Elsevier BV. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2024.102777.
- [7] T. S. R. Pereira, T. P. de Carvalho, T. A. Mendes, and K. T. M. Formiga, "Evaluation of Water Level in Flowing Channels Using Ultrasonic Sensors," *Sustainability*, vol. 14, p. 5512, May 2022. doi: 10.3390/su14095512.
- [8] P. Bresnahan, E. Briggs, B. Davis, A. Rodriguez, L. Edwards, C. Peach, N. Renner, H. Helling, and M. Merrifield, "A Low-Cost, DIY Ultrasonic Water Level Sensor for Education, Citizen Science, and Research," *Oceanography*, vol. 36, 2023. doi: 10.5670/oceanog.2023.101.
- [9] N. Li, C. P. Ho, J. Xue, L. W. Lim, G. Chen, Y. H. Fu, and L. Y. T. Lee, "A Progress Review on Solid-State LiDAR and Nanophotonics-Based LiDAR Sensors," *Laser and Photonics Reviews*, vol. 16, p. 2100511, Aug. 2022. doi: 10.1002/lpor.202100511.
- [10] S. Tamari and V. Guerrero-Meza, "Flash Flood Monitoring with an Inclined Lidar Installed at a River Bank: Proof of Concept," *Remote Sensing*, vol. 8, p. 834, Oct. 2016. doi: 10.3390/rs8100834.
- [11] J. D. Paul, W. Buytaert, and N. Sah, "A Technical Evaluation of Lidar-Based Measurement of River Water Levels," *Water Resources Research*, vol. 56, Apr. 2020. doi: 10.1029/2019wr026810.
- [12] P. Singh and R. Kumar, "Liquid Level Measurement Technologies: A Comparative Review of Conventional and Optical Methods," *Measurement and Control*, vol. 51, no. 7-8, pp. 302–313, 2018. doi: 10.1177/0020294018788495.
- [13] Z. Jiang and L. Hong, "Monitoring of Surface Water Area and Water Level Changes in Nine Plateau Lakes in Yunnan and Analysis of Influencing Factors," in *Proc. 2024 IEEE 6th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conf. (IMCEC)**, pp. 1027–1031, May 2024. doi: 10.1109/imcec59810.2024.10575197.
- [14] T. Ali, A. Zaidi, J. Rehman, F. Noor, F. Naz, and S. Jamali, "Satellite Radar Altimetry Insights into Dam-Induced Changes and Accuracy of Water Level Estimation for the Mekong River," in *Proc. IGARSS 2022 - IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp.**, vol. 570, pp. 5063–5066, Jul. 2024. doi: 10.1109/igarss53475.2024.10642418.
- [15] S. F. Ali, N. Mandal, P. Maurya, and A. Lata, "SAW Sensor Based a Novel Hydrostatic Liquid Level Measurement," in *Proc. IECON 2020 - 46th Annual Conf. IEEE Industrial Electronics Society**, pp. 724–729, Oct. 2020. doi: 10.1109/iecon43393.2020.9254540.
- [16] V. S. Sreejith and H. Zhang, "Modeling and Testing of a Highly Sensitive Surface Acoustic Wave Pressure Sensor for Liquid Depth Measurements," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 372, p. 115377, Jul. 2024. doi: 10.1016/j.sna.2024.115377.
- [17] C. C. Ramos, J. Preizal, X. Hu, C. Caucheteur, G. Woyessa, O. Bang, A. M. Rocha, and R. Oliveira, "High Resolution Liquid Level Sensor Based on Archimedes' Law of Buoyancy Using Polymer Optical Fiber Bragg Gratings," *Measurement*, vol. 252, p. 117368, Mar. 2025. Elsevier BV. doi: 10.1016/j.measurement.2025.117368.
- [18] Y. Ferreira, C. Silvério, and J. Viana, "Conception and Design of WSN Sensor Nodes Based on Machine Learning, Embedded Systems and IoT Approaches for Pollutant Detection in Aquatic Environments," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 117040–117052, Jan. 2023. doi: 10.1109/access.2023.3325760.
- [19] W. B. N.R. S. Palarimath, H. Gunasekaran, S. W. Haidar, S. G. S. Subitha, and J. Sarmila, "AI Modeling and Water Quality Sensing Technique Proffers Water Security: An Open Review," in *Proc. 2022 Int. Conf. Electronics and Renewable Systems (ICEARS)**, pp. 1028–1034, Feb. 2025. doi: 10.1109/icears64219.2025.10940077.
- [20] M. Boada, A. Lazaro, R. Villarino, and D. Girbau, "Battery-Less Soil Moisture Measurement System Based on a NFC Device With Energy Harvesting Capability," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, pp. 5541–5549, Jul. 2018. doi: 10.1109/jsen.2018.2837388.
- [21] C. Sun, C.-S. Tang, F. Vahedifard, Q. Cheng, A. Dong, T.-F. Gao, and B. Shi, "High-resolution monitoring of soil infiltration using distributed fiber optic," *J. Hydrol.*, vol. 640, p. 131691, Jul. 2024. doi: 10.1016/j.jhydrol.2024.131691.
- [22] J. Devkota, P. Ohodnicki, and D. Greve, "SAW Sensors for Chemical Vapors and Gases," *Sensors*, vol. 17, p. 801, Apr. 2017. doi: 10.3390/s17040801.
- [23] F. Karagulian, M. Barbiere, A. Kotsev, L. Spinelle, M. Gerboles, F. Lagler, N. Redon, S. Crunaire, and A. Borowiak, "Review of the Performance of Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring," *Atmosphere*, vol. 10, p. 506, Aug. 2019. doi: 10.3390/atmos10090506.
- [24] W. Yi, K. Lo, T. Mak, K. Leung, Y. Leung, and M. Meng, "A survey of wireless sensor network based air pollution monitoring systems," *Sensors*, vol. 15, pp. 31392–31427, Dec. 2015. doi: 10.3390/s151229392.
- [25] M. Pule, A. Yahya, and J. Chuma, "Wireless Sensor Networks: A Survey on Monitoring Water Quality," *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 15, pp. 562–570, Dec. 2017. doi: 10.1016/j.jart.2017.07.004.
- [26] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, "A Comparative Study of LPWAN Technologies for Large-Scale IoT Deployment," *ICT Express*, vol. 5, pp. 1–7, Mar. 2019. doi: 10.1016/j.ict.2017.12.005.
- [27] F. K. Shaikh and S. Zeadally, "Energy Harvesting in Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 1041–1054, Mar. 2016. doi: 10.1016/j.rser.2015.11.010.
- [28] F. Deng, P. Zuo, K. Wen, and X. Wu, "Novel soil environment monitoring system based on RFID sensor and LoRa," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 169, p. 105169, Feb. 2020. doi: 10.1016/j.compag.2019.105169.
- [29] A. Caruso, S. Chessa, S. Escobar, J. Barba, and J. C. Lopez, "Collection of Data with Drones in Precision Agriculture: Analytical Model and LoRa Case Study," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 2021, pp. 1–1, 2021. doi: 10.1109/IIOT.2021.3075561.
- [30] K. Ishibashi, R. Takitoge, and S. Ishigaki, "Beat sensors IoT technology suitable for energy saving," in *Proc. 2017 7th Int. Conf. on Integrated Circuits, Design, and Verification (ICDV)**, pp. 52–55, Oct. 2017. doi: 10.1109/icdv.2017.8188637.
- [31] K. Ishibashi, R. Takitoge, D. Manyone, N. Ono, and S. Yamaguchi, "Long battery life IoT sensing by Beat Sensors," in *Proc. 2019 IEEE Int. Conf. on Industrial Cyber Physical Systems (ICPS)**, pp. 430–435, May 2019. doi: 10.1109/icphys.2019.8780159.

- [32] M.-H. Dao, K. Ishibashi, T.-A. Nguyen, D.-H. Bui, H. Hirayma, T.-A. Tran, and X.-T. Tran, "Low-cost, high accuracy, and long communication range energy-harvesting Beat Sensor with LoRa and Ω -antenna for water-level monitoring," *IEEE Sensors Journal*, vol. 25, pp. 1–1, Jan. 2025. doi: 10.1109/jsen.2025.3533014.
- [33] A. Ghosh, D. Chakraborty, and A. Law, "Artificial Intelligence in Internet of Things," *CAA Transactions on Intelligence Technology*, vol. 3, pp. 208–218, Dec. 2018. doi: 10.1049/trit.2018.1008. [Online]. Available: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/trit.2018.1008>
- [34] S. C. Mukhopadhyay, S. K. S. Tyagi, N. K. Suryadevara, V. Piuri, F. Scotti, and S. Zeadally, "Artificial Intelligence-Based Sensors for Next Generation IoT Applications: A Review," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, pp. 1–1, 2021. doi: 10.1109/jsen.2021.3055618.
- [35] Pimentel, A. D. (2017). Exploring exploration: A tutorial introduction to embedded systems design space exploration. *IEEE Design & Test*, 1, 77–90. doi:10.1109/MDAT.2016.2626445.
- [36] Koulamas, C., & Lazarescu, M. (2018). Real-time embedded systems: Present and future. *Electronics*, 9, 205. doi:10.3390/electronics7090205.
- [37] J. M. Tien, "Internet of Things, Real-Time Decision Making, and Artificial Intelligence," *Annals of Data Science*, vol. 4, pp. 149–178, May 2017.
- [38] Fournaris, A., Pocero Fraile, L., & Koufopavlou, O. (2017). Exploiting hardware vulnerabilities to attack embedded system devices: A survey of potent microarchitectural attacks. *Electronics*, 3, 52. doi:10.3390/electronics6030052.