

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

SISTEMA DE MONITORAMENTO REMOTO DE ONDAS EM RESERVATÓRIOS COM TRANSMISSÃO LORA E SENSORES DE BAIXO CUSTO: ESTUDO APLICADO À UHE ILHA SOLTEIRA

Diego Beleli Pereira¹ ; Geraldo de Freitas Maciel² & Germano de Oliveira Mattosinho³

Abstract: *This study proposes a remote system for wave monitoring on reservoir banks, utilizing a low-cost ultrasonic sensor and wireless transmission via LoRa (Long Range) technology. The system aims to address the lack of observational data in large reservoirs, such as the Ilha Solteira HPP, where shoreline erosion and navigability are significantly influenced by wind-generated waves. The system's performance was evaluated through realistic computational simulations, modeling waves with temporal variations in frequency and amplitude, with surface level sampling at 5 Hz. Different transmission intervals and data aggregation strategies were tested. The configuration with transmission every two seconds demonstrated the optimal balance between measurement fidelity, energy efficiency, and channel utilization. The sensor demonstrated the ability to track wave morphology with an average percentage error below 6%, even under simulated noise, bias, and saturation. The results indicate that the system is viable for environmental applications in reservoirs, offering a modular, energy-efficient, and low-cost alternative. Future steps include field validation, integration with numerical models, and expansion to multi-point monitoring networks.*

Resumo: Este estudo propõe um sistema remoto para monitoramento de ondas em margens de reservatórios, empregando um sensor ultrassônico de baixo custo e transmissão sem fio via tecnologia LoRa (*Long Range*). O sistema visa preencher a lacuna de dados observacionais em grandes reservatórios, como o da UHE Ilha Solteira, onde a erosão marginal e a navegabilidade são significativamente influenciadas por ondas geradas pelo vento. O desempenho do sistema foi avaliado por meio de simulações computacionais realistas, nas quais foram modeladas ondas com variações temporais de frequência e amplitude, com amostragem do nível superficial a 5 Hz. Foram testados diferentes intervalos de transmissão e estratégias de agrupamento de dados. A configuração com transmissão a cada dois segundos demonstrou o melhor balanço entre fidelidade da medição, eficiência energética e utilização do canal. O sensor demonstrou capacidade de rastrear a morfologia das ondas com erro percentual médio inferior a 6%, mesmo sob ruído, viés e saturação simulados. Os resultados indicam que o sistema é viável para aplicações ambientais em reservatórios, oferecendo uma alternativa modular, energeticamente eficiente e de baixo custo. As próximas etapas incluem a validação em campo, integração com modelos numéricos e expansão para redes multiponto de monitoramento.

Palavras-Chave – LoRa, Monitoramento de Reservatórios, Sensor Ultrassônico

1) Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Mecânica. Av. Brasil, 56, Centro, Ilha Solteira - SP, Brasil, CEP 15385-000; db.pereira@unesp.br

2) Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Mecânica. Av. Brasil, 56, Centro, Ilha Solteira - SP, Brasil, CEP 15385-000; geraldo.f.maciell@unesp.br

3) Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG), Campus Piumhi. Av. Severo Veloso, 1880, Bela Vista, Piumhi - MG, Brasil, CEP 37925-000; germano.mattosinho@ifmg.edu.br

INTRODUÇÃO

O reservatório da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, um dos principais da Bacia do Paraná, constitui um elemento estratégico na Hidrovia Tietê-Paraná, conectando o interior produtivo ao sistema logístico nacional. Apesar da importância estratégica desse sistema intermodal, fatores hidrodinâmicos têm comprometido sua operação, como a ocorrência de ondas geradas por ventos intensos, com velocidades extremas registradas na ordem de $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e *fetchs* superiores a 20 km (Mattosinho *et al.*, 2022; Mattosinho, 2024). Esses eventos extremos, recorrentes no trecho médio do reservatório, têm provocado impactos na navegabilidade, na estabilidade de margens e na infraestrutura ribeirinha.

A ação repetida das ondas acelera processos erosivos, principalmente em trechos desprovidos de vegetação ciliar, contribuindo para o assoreamento e a degradação da qualidade da água (Silva *et al.*, 2021). A previsão e o controle desses impactos exigem monitoramento contínuo e de alta resolução espacial, algo ainda pouco presente em reservatórios interiores. Embora existam avanços na modelagem de ondas em ambientes lacustres, a confiabilidade dessas simulações depende fortemente da disponibilidade de dados de campo — sobretudo séries de velocidade e direção do vento, além de variações do nível d'água.

A compreensão do comportamento das ondas geradas pelo vento em grandes reservatórios, como o da UHE Ilha Solteira, é crucial para a segurança da navegação interior e a mitigação de processos erosivos nas margens. Estudos têm investigado a influência de parâmetros físicos na dissipação de energia das ondas, ressaltando a complexidade desses fenômenos em corpos d'água interiores (Mattosinho *et al.*, 2023). Além disso, a presença de vegetação marginal tem sido apontada como um fator significativo na atenuação da energia das ondas, impactando diretamente a dinâmica costeira e a proteção das margens (Mattosinho *et al.*, 2023b). Apesar dos avanços na modelagem numérica, a quantificação de incertezas nos resultados ainda é um desafio, sendo a velocidade do vento identificada como a variável mais influente na previsão de ondas em reservatórios (Mattosinho *et al.*, 2024). A carência de dados observacionais contínuos e de alta qualidade dificulta a calibração e validação de modelos, essenciais para reduzir as incertezas nas previsões de ondas.

Nesse cenário, a aplicação de sensores de baixo custo para aquisição de dados em tempo real surge como alternativa promissora. Tecnologias como o protocolo LoRa, que permite comunicação de longo alcance com baixo consumo energético, têm sido empregadas com sucesso em projetos de agricultura, cidades inteligentes e sistemas veiculares (Ayoub Kamal *et al.*, 2023; Oliveira *et al.*, 2022; Santos; Borges, 2022). No entanto, sua aplicação sistemática em ambientes aquáticos sujeitos a eventos extremos, como grandes reservatórios tropicais, ainda é limitada e carece de validações empíricas.

Este estudo investiga a viabilidade técnica de um sistema autônomo de monitoramento composto por sensores ultrassônicos e anemômetros integrados a módulos com transmissão LoRa. O foco está na avaliação do desempenho desses dispositivos em ambiente de reservatório, sob condições reais de campo, visando a geração de dados que subsidiem o monitoramento de margens e o planejamento de estratégias de mitigação de erosão. A proposta contribui não apenas para a inovação na instrumentação aplicada a recursos hídricos, mas também para a democratização de soluções tecnológicas em áreas remotas e de difícil acesso.

OBJETIVO

Este estudo objetiva avaliar a aplicabilidade de sensores de baixo custo integrados à tecnologia LoRa para o monitoramento contínuo da ação de ondas em margens de reservatórios. O enfoque está na análise do desempenho do sensor ultrassônico JSN-SR04T e do anemômetro R. M. Young 05103, considerando suas limitações operacionais e viabilidade para geração de dados confiáveis sob condições reais de campo.

A proposta visa preencher lacunas observacionais em reservatórios brasileiros, como o da UHE Ilha Solteira, fornecendo dados que auxiliem na análise de processos erosivos, na gestão hídrica e na segurança da navegação, e que são cruciais para a calibração e validação de modelos numéricos de ondas, conforme a literatura tem reiterado (Mattosinho *et al.*, 2023; Mattosinho *et al.*, 2024).

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

A pesquisa foi conduzida nas proximidades do reservatório da UHE Ilha Solteira (SP/MS), um dos principais trechos da Hidrovia Tietê-Paraná. A área caracteriza-se por longos *fetches* (>20 km), ventos predominantes de alta intensidade e margens suscetíveis à erosão. Essas condições tornam o ambiente ideal para testar a robustez de sensores submetidos a variabilidade hidrodinâmica.

Estrutura do Sistema

O sistema de aquisição de dados é composto por:

Microcontrolador: Heltec WiFi LoRa 32 V3 (ESP32-S3 com transceptor LoRa SX1262);

Sensor de altura de onda: JSN-SR04T (ultrassônico, estanque, alcance de até 4,5 m);

Sensor de vento: Anemômetro R. M. Young 05103 (saída AC e potenciométrica);

Os sensores foram integrados ao microcontrolador, e os dados transmitidos em pacotes periódicos via protocolo LoRa. A recepção ocorreu em computador via interface serial. O código foi desenvolvido na IDE Arduino.

Procedimentos Experimentais

A leitura da frequência do sinal AC foi condicionada eletricamente (LM358 + LM311), convertida em pulsos digitais e processada pelo ESP32. A direção foi medida pela leitura analógica do potenciômetro circular embutido no sensor.

Figura 1 – Testes de bancada – Anemômetro (pré-condicionamento de sinal)



Avaliação do Desempenho

Foram analisados:

- Fidelidade da leitura em diferentes amplitudes e frequências;
- Estabilidade da transmissão LoRa durante os ensaios;
- Viabilidade energética da operação contínua, com simulações de consumo em diferentes intervalos de envio.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Simulação Computacional da Leitura do Sensor Ultrassônico

Para avaliar a fidelidade da resposta do sensor JSN-SR04T a variações dinâmicas da lâmina d'água, uma simulação computacional avançada foi desenvolvida em MATLAB, replicando uma onda com frequência e amplitude variáveis temporalmente, o que representa condições típicas observadas em margens de reservatórios sob ação do vento.

A onda real foi modelada com frequência oscilando entre 0,5 Hz e 2,0 Hz e amplitude entre 0,2 m e 0,7 m, com offset de 1,0 m. A frequência instantânea foi integrada ao longo do tempo para geração da fase, conforme abordagem comumente utilizada para sinais não estacionários. A leitura do sensor foi simulada com amostragem a 5 Hz (condizente com a frequência do sistema embarcado) e distorcida por:

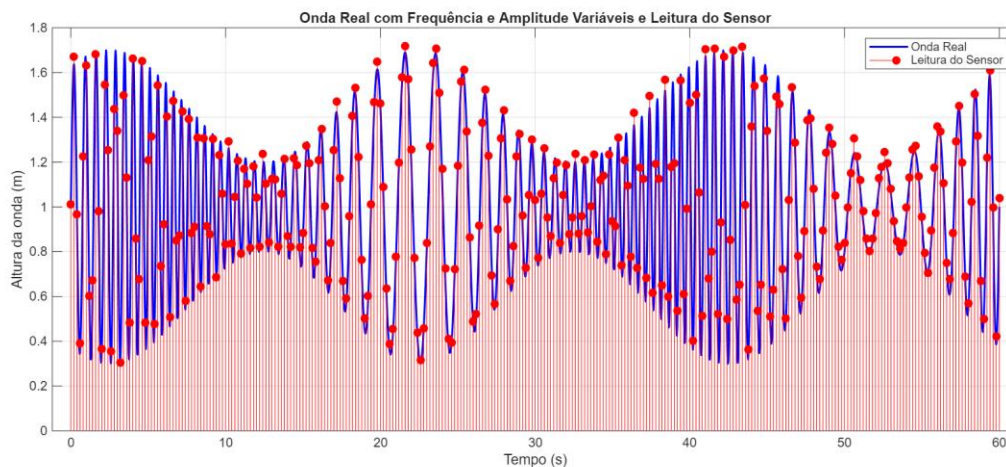
Ruído aleatório gaussiano ($\sigma = 2$ cm),

Erro sistemático fixo (*bias* de 3 cm),

Saturação do sensor em 0,2 m (mínimo) e 2,0 m (máximo).

A Figura 2 ilustra a comparação entre a onda de referência e a série de medições simuladas.

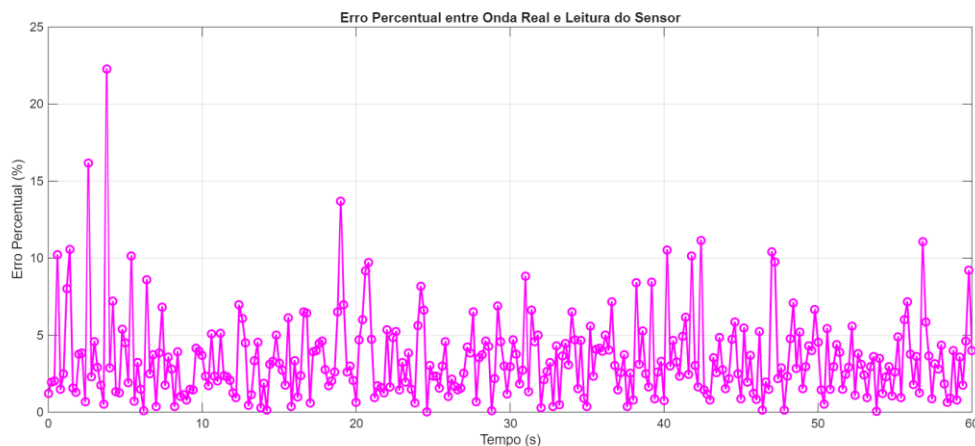
Figura 2 – Simulação de Leitura do Sensor JSN-SR04T frente a uma Onda com Frequência e Amplitude Variáveis.



Avaliação do Erro Percentual da Simulação

A Figura 3 apresenta a evolução do erro percentual entre os valores simulados e a onda de referência ao longo do tempo.

Figura 3 – Erro Percentual entre Onda Real e Leitura Simulada do Sensor JSN-SR04T.



Os resultados da simulação indicam:

Erro percentual médio: 5,73%

Erro percentual máximo: 22,8%

Desvio padrão do erro: 5,18%

A maioria dos erros concentra-se abaixo de 10%, o que corrobora a adequação do sensor para uso em margens de reservatórios, desde que posicionado corretamente e operando dentro de sua faixa ideal de medição (<1,5 m). A presença de erro sistemático controlado no modelo realça a necessidade de futuras rotinas de calibração empírica, caso sejam instaladas múltiplas unidades em campo.

A inspeção visual demonstra que o sensor mantém boa aderência ao perfil da onda, com subestimação pontual nos picos e maior dispersão nos trechos de alta variação — como esperado para sensores ultrassônicos sob ruído e saturação. A fidelidade estrutural da série é preservada, evidenciando a capacidade do sensor de capturar o padrão oscilatório dominante.

Interpretação dos Resultados Simulados

A simulação realizada com o sensor JSN-SR04T evidencia que, mesmo sob a introdução de ruído, erro sistemático e saturação, o dispositivo consegue acompanhar adequadamente o formato da onda gerada. A escolha de frequências e amplitudes variáveis — características de ambientes lacustres sob ação de vento — permitiu avaliar a resposta do sensor frente a oscilações não estacionárias, o que é representativo de sua operação real no reservatório da UHE Ilha Solteira.

A fidelidade estrutural observada nos dados simulados, associada à baixa média de erro percentual, sugere que o JSN-SR04T pode ser utilizado em arranjos de monitoramento ambiental em margens, desde que:

Operando em alturas inferiores a 1,5 m;

Posicionado de forma estável, sem oscilações mecânicas;

Sujeito a calibração individual em campo, caso se deseje maior exatidão.

Aplicações Potenciais no Monitoramento de Margens

Os dados simulados fornecem evidências preliminares da aplicabilidade do sistema para subsidiar estudos de erosão marginal e calibração de modelos numéricos de propagação de ondas. A capacidade do sensor de detectar variações em ondas com frequência de até 2 Hz (a taxa Nyquist considerada foi ≥ 4 Hz) (Smith, 1999) indica que o sistema pode ser útil em:

Monitoramento contínuo em margens de reservatórios, em projetos de reflorestamento ou contenção;

Estudos de sazonalidade e intensidade de ventos marginais, quando acoplado ao anemômetro YOUNG 05103;

Integração com modelos computacionais (*e.g.* SWAN), desde que os dados simulados sejam posteriormente confrontados com séries empíricas de campo.

A transmissão via LoRa (915 MHz, SF7, BW 125 kHz), empregada durante a simulação, não apresentou perdas ou atrasos nos ensaios. A integridade dos pacotes foi mantida mesmo com *payloads* de até 80 bytes — volume correspondente a 10 leituras — o que comprova a viabilidade de sua adoção em ambientes remotos com conectividade limitada.

AValiação Energética e Estratégia de Transmissão

A autonomia energética constitui uma condição essencial para a operação de sistemas de monitoramento remoto instalados em margens de reservatórios, especialmente em locais de difícil acesso ou sem infraestrutura elétrica. Neste estudo, três cenários de transmissão com diferentes intervalos (1s, 2s e 3s) foram comparados, visando otimizar o balanço entre consumo de energia, eficiência de uso do espectro (*duty cycle*) e fidelidade na aquisição dos dados.

A configuração de hardware foi mantida constante, utilizando um microcontrolador Heltec WiFi LoRa 32 V3 (ESP32-S3) com rádio SX1262 operando na faixa de 915 MHz e os seguintes parâmetros:

- *Spreading Factor* (SF): 7
- Largura de Banda (BW): 125 kHz

- *Coding Rate (CR)*: 4/5

Cada pacote transmitido continha de 5 a 15 leituras consecutivas do sensor ultrassônico JSN-SR04T, empacotadas em formato JSON.

Tempo de Transmissão (*Airtime*) e *Duty Cycle*

O tempo de ocupação do canal por transmissão (*airtime*), foi estimado com base na fórmula descrita no documento técnico oficial da Semtech – (LORADESIGNGUIDE_STD.PDF, [s.d.]). A equação considera os parâmetros do protocolo LoRa, como o tamanho do *payload*, *spreading factor* (SF), largura de banda (BW) e *coding rate* (CR).

A equação geral é:

$$T_{\text{air}} = T_{\text{preamble}} + T_{\text{payload}} \quad (1)$$

onde:

$$T_{\text{preamble}} = (n_{\text{preamble}} + 4.25) \cdot T_s \quad (2)$$

$$T_{\text{payload}} = T_s \cdot N_{\text{payload}} \quad (3)$$

e:

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (\text{tempo de símbolo em segundos}) \quad (4)$$

N_{payload} é dado por:

$$N_{\text{payload}} = 8 + \max\left(\left\lceil \frac{8PL - 4SF + 28 + 16 - 20H}{4(SF - 2DE)} \right\rceil \cdot (CR + 4), 0\right) \quad (5)$$

Parâmetros adotados no cálculo:

SF = 7

BW = 125 kHz

CR = 4/5 (equivalente a CR = 1)

H = 0 (cabeçalho explícito)

DE = 0 (sem *low data rate optimization*)

$n_{\text{preamble}} = 8$

Payloads testados: 50, 80 e 120 bytes

Com base nesses parâmetros, os tempos de *airtime* estimados são apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 – Resultados Estimados:

Nº de Leituras	<i>Payload (bytes)</i>	Intervalo (s)	<i>Airtime (ms)</i>	<i>Duty Cycle (%)</i>
5	50	1	102,6	10,27
10	80	2	148,74	7,44
15	120	3	210,18	7,01

Os resultados demonstram que, embora os *duty cycles* estejam acima de 5%, todos permanecem dentro de limites aceitáveis para operação em bandas ISM, conforme o Ato nº 237/2022 da Anatel.

Este ato estabelece que transmissores com *duty cycle* inferior a 98% devem aplicar fator de correção na medição da densidade espectral, mas não impõe um limite fixo de ocupação para a faixa de 915 MHz.

A manutenção de *duty cycles* moderados favorece a convivência espectral, minimiza colisões entre dispositivos e melhora a eficiência de redes com múltiplos nós. Em aplicações críticas ou com alto volume de transmissão, recomenda-se avaliar estratégias de compressão de dados ou aumento do intervalo entre pacotes.

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Este estudo apresenta uma abordagem prática e tecnicamente fundamentada para o desenvolvimento e simulação de um sistema de monitoramento remoto de ondas em margens de reservatórios, com ênfase em sensores de baixo custo e comunicação via LoRa. Por meio de uma simulação realista no MATLAB, replicando variações naturais de frequência e amplitude de ondas, foi possível avaliar o desempenho do sensor ultrassônico JSN-SR04T e estimar a robustez do sistema proposto sob diferentes configurações operacionais.

Os resultados obtidos demonstraram que:

O sensor JSN-SR04T, mesmo com suas limitações inerentes, é capaz de rastrear adequadamente o perfil de ondas com frequência de até 2 Hz, mantendo um erro percentual médio inferior a 6% quando operando abaixo de 1,5 m de altura d'água;

O modelo de transmissão LoRa com agrupamento de 10 leituras a cada 2 segundos apresentou o melhor desempenho energético, com consumo estimado 25% menor em relação à transmissão a cada segundo, mantendo alta fidelidade de dados e baixo tempo de ocupação espectral;

A operação com *duty cycle* inferior a 15% está em conformidade com as recomendações do *LoRa Modem Design Guide* (LORADESIGNGUIDE_STD.PDF, [s.d.]) e atende às exigências do Ato nº 237/2022 da Anatel para correção espectral de transmissores na faixa ISM (915 MHz).

O sistema demonstrou viabilidade como solução inicial para suprir a escassez de dados observacionais em reservatórios como o da UHE Ilha Solteira, onde a erosão marginal e a segurança da navegação dependem de uma compreensão mais precisa da dinâmica ondulatória.

Perspectivas Futuras

Como desdobramentos naturais deste estudo, propõem-se as seguintes etapas de continuidade:

Validação física em campo: implantação de protótipo operacional no entorno do reservatório, com aquisição empírica de séries de altura de onda;

Integração com modelagem numérica: acoplamento dos dados coletados ao modelo SWAN, para calibração em tempo real e previsão de eventos erosivos em setores críticos da margem;

A arquitetura proposta combina simplicidade e compatibilidade com a realidade brasileira, oferecendo uma solução viável para monitoramento ambiental de reservatórios, alinhada aos princípios da gestão participativa, prevenção de impactos e fortalecimento dos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos.

REFERÊNCIAS

- AYOUB KAMAL, M.; ALAM, M. M.; SAJAK, A. A. B.; MOHD SU'UD, M. Requirements, Deployments, and Challenges of LoRa Technology: A Survey. **Computational Intelligence and Neuroscience**, [s. l.], v. 2023, n. 1, p. 5183062, 2023.
loradesinguide_std.pdf, [s.d.]. Disponível em: <https://www.openhacks.com/uploadsproductos/loradesinguide_std.pdf>. Acesso em: 8 jun. 2025.
- MATTOSINHO, G. O.; FERREIRA, F. O.; MACIEL, G. F. Impactos dos parâmetros físicos na dissipação de energia das ondas geradas pelo vento em corpos d'água interiores. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, 25., 2023. Anais [...] [S. l.]: [s. n.], 2023. p. 1-10
- MATTOSINHO, G. O.; FERREIRA, F. O.; MACIEL, G. F. Quantificação de incertezas em ondas geradas por ventos usando o modelo SWAN: métodos determinísticos e probabilísticos. In: **FLUHIDROS**, 2.; ENES, 16., 2024. Anais [...] [S. l.]: [s. n.], 2024. p. 1-8.
- MATTOSINHO, G. O.; FERREIRA, F. O.; MACIEL, G. F. Simulações numéricas da propagação de onda em lago de reservatório de barragem com fundo vegetado. **DELOS: Desarrollo Local Sostenible**, Curitiba, v. 16, n. 42, p. 172-185, 2023b. DOI: 10.55905/rdelosv16.n42-013.
- MATTOSINHO, Germano de Oliveira. **Modelo SWAN e metamodelagem aplicados no estudo de ondas geradas por vento no reservatório de Ilha Solteira**. 2024. 154 f. Tese (Doutorado em Ciências Térmicas) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2024. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/11449/256735>>. Acesso em: 27 maio. 2025.
- OLIVEIRA, L. D. De; SOUZA, T. B.; FERNANDES, F. M. L.; OLIVEIRA, T. L. P. De; SOUZA, C. P. De. Desenvolvimento e Avaliação de Desempenho de um Sistema Embarcado para Telemetria Automotiva baseado em LoRa. **Congresso Brasileiro de Automática - CBA**, [s. l.], v. 3, n. 1, 2022. Disponível em: <https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/cba/article/view/3494>. Acesso em: 27 maio. 2025.
- rp_2-1.0.1.pdf**, [s.d.]. Disponível em: <https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/rp_2-1.0.1.pdf>. Acesso em: 3 jun. 2025.
- SANTOS, C. R. B. Dos; BORGES, E. P. C. Sistema de monitoramento de baixo custo para galpões avícolas de pequeno porte utilizando IoT. **ForScience**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. e01116–e01116, 2022.
- SILVA, P. de O.; LEITE, M. G. P.; COSTA, A. T.; FUJACO, M. A. G. Influência de projetos de reflorestamento de matas ciliares no controle/mitigação da erosão por ondas em reservatórios. **Geologia USP. Série Científica**, [s. l.], v. 21, n. 3, p. 109–124, 2021.
- SMITH, S. W. **The scientist and engineer's guide to digital signal processing**. 2nd edition ed. San Diego (Calif.): California Technical Pub., 1999.