

Desenvolvimento e avaliação funcional em ambiente simulado de sistema inteligente de monitoramento e controle de reservatórios de água com ESP32

Development and functional evaluation in a simulated environment of an intelligent water reservoir monitoring and control system with ESP32

Gabriel Silva Santana

Universidade de Vassouras
gsantana.dev@gmail.com

Ana Clara Moledo Neves

Universidade de Vassouras
anamoledo26@gmail.com

Daniel Alvarez Gonçalves

Universidade de Vassouras
alvarezgonca@gmail.com

José Felipe de Mattos Alves

Universidade de Vassouras
jfmalves@gmail.com

Sara Gonçalves Pereira

Universidade de Vassouras
eusaragoncalves@gmail.com

Márcio Alexandre Dias Garrido

Universidade de Vassouras
marciogarrido@id.uff.br

RESUMO

O consumo racional de água e a automação residencial têm ganhado relevância na gestão sustentável de recursos. Este artigo apresenta um sistema de monitoramento de caixa d'água baseado em ESP32, sensor ultrassônico HC-SR04, módulo relé, display OLED e indicadores luminosos, integrado a uma arquitetura de Internet das Coisas (IoT). Desenvolvido por prototipagem rápida e simulado no ambiente Wokwi, o sistema estima o nível do reservatório e controla automaticamente o abastecimento, acionando a bomba em aproximadamente 25% e desligando-a em 95%. Os resultados indicaram funcionamento estável da lógica de controle e redução da necessidade de supervisão manual. A interface permite acompanhar o nível, o estado da bomba e parâmetros operacionais. Os achados não mensuram economia real de água ou energia. A contribuição consiste na proposição e avaliação inicial de uma arquitetura de baixo custo e potencialmente escalável, cuja validação física permanece como etapa futura.

* Recebido em 10 de abril de 2025, aprovado em 01 de agosto de 2025, publicado em 31 de agosto de 2025.

Palavras-chave: ESP32. Automação Residencial. Internet das Coisas. Monitoramento de Nível. Inovação Frugal.

ABSTRACT

Rational water use and home automation have gained relevance in sustainable resource management. This article presents a water tank monitoring system based on an ESP32 microcontroller, an HC-SR04 ultrasonic sensor, a relay module, an OLED display and visual indicators, integrated into an Internet of Things (IoT) architecture. Developed through rapid prototyping and simulated in the Wokwi environment, the system estimates the reservoir water level and automatically controls the water supply, activating the pump at approximately 25% and deactivating it at 95% of capacity. Results indicated stable operation of the control logic and reduced reliance on manual supervision. The interface allows users to track water level, pump status and operational parameters. The findings do not measure actual water or energy savings. The main contribution is the proposal and initial functional evaluation of a low-cost, potentially scalable architecture, whose physical validation remains a subject for future work.

Keywords: ESP32. Home Automation. Internet of Things. Level Monitoring. Frugal Innovation.

1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água potável é um componente essencial da qualidade de vida e da sustentabilidade dos sistemas urbanos. O Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos de 2023 aponta que o progresso em direção ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6, referente ao acesso universal à água e ao saneamento, está atrasado em relação às metas previstas, o que reforça a necessidade de mecanismos capazes de melhorar o gerenciamento desse recurso em diferentes escalas (UNESCO, 2023). Em ambientes domésticos, parte das perdas está associada não apenas ao consumo em si, mas a falhas no acompanhamento de reservatórios, transbordamentos, acionamentos inadequados de bombas e ausência de supervisão automatizada. Em redes de abastecimento, o problema tem magnitude semelhante: um levantamento tecnológico e patentário brasileiro sobre detecção de vazamentos identificou que a redução de perdas na distribuição de água tem impacto direto tanto na disponibilidade do recurso quanto na receita das prestadoras de serviço (FARIA et al., 2023). Ainda que o presente estudo trate de um reservatório doméstico e não de redes de distribuição, o diagnóstico de fundo é o mesmo: parte relevante da perda de água decorre de falta de monitoramento contínuo, não da escassez do recurso em si.

Tecnologias de automação e Internet das Coisas (IoT) podem contribuir para deslocar tarefas de supervisão do usuário para sistemas capazes de realizar aquisição de dados,

processamento local e tomada de decisão segundo parâmetros previamente definidos. A automação de um reservatório doméstico pode permitir que a operação da bomba seja condicionada ao nível efetivamente detectado, reduzindo a dependência de intervenções manuais. Entretanto, a existência de uma solução tecnológica não implica, por si só, a demonstração de economia de recursos; é necessário distinguir entre o potencial de uma arquitetura automatizada e a comprovação experimental dessa economia em condições reais.

Convém esclarecer, desde já, o sentido em que o termo "inteligente" é empregado neste trabalho. O sistema não incorpora aprendizado de máquina, redes neurais ou qualquer forma de inferência estatística sobre padrões de consumo. Sua operação decorre inteiramente de regras condicionais fixas, aplicadas sobre a leitura do sensor: quando o nível estimado atinge um limiar inferior, a bomba é acionada; quando atinge um limiar superior, é desligada. Trata-se, portanto, de inteligência funcional, no sentido de automação de decisão programada, e não de inteligência artificial. Essa distinção evita que o título do trabalho sugira capacidades que o protótipo não possui.

Essa cautela conceitual é particularmente relevante em projetos de baixo custo. A literatura sobre inovação frugal caracteriza esse campo pela busca de soluções capazes de gerar valor e otimizar processos diante de restrições de recursos. Em revisão sistemática realizada nas bases Scopus e Web of Science, Alves e Nodari (2023) identificaram quatro dimensões recorrentes da inovação frugal em pequenas e médias empresas: agregar valor, otimizar processos, capital humano e modelo de negócios. A perspectiva é pertinente ao desenvolvimento de sistemas embarcados de monitoramento porque permite compreender a utilização de componentes acessíveis, como microcontroladores e sensores, como parte de uma estratégia de otimização de recursos, e não apenas como escolha técnica. No presente estudo, essa perspectiva não sustenta a afirmação de que o sistema constitui, de forma definitiva, uma inovação frugal validada em mercado; oferece, em vez disso, um enquadramento para discutir o potencial de uma solução construída com componentes acessíveis e modularidade.

A eficiência energética constitui outro eixo relevante. Sistemas de bombeamento dependem de energia elétrica, e a adoção de mecanismos que evitem acionamentos desnecessários pode contribuir para uma operação mais racional. Contudo, a redução efetiva do consumo energético depende de variáveis não mensuradas neste estudo, como potência da bomba, duração dos ciclos e frequência de acionamentos. Hersen e Santos (2024), em estudo de caso sobre viabilidade econômica de geração distribuída em uma indústria madeireira de

pequeno porte, concluíram que a alternativa energética analisada era, para o caso investigado, economicamente inviável. O resultado é relevante para a presente discussão porque demonstra que a adoção de uma tecnologia associada à energia não deve ser presumida vantajosa sem avaliação do contexto específico de aplicação.

Diante desse contexto, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de caixa d'água baseado em ESP32, sensor ultrassônico HC-SR04, módulo relé, bomba hidráulica, display OLED e indicadores luminosos, com integração a uma interface de monitoramento por IoT. O objetivo central é desenvolver e avaliar, em ambiente simulado, uma arquitetura de baixo custo capaz de realizar o monitoramento do nível de água e o acionamento automatizado da bomba, reduzindo a necessidade de supervisão manual. Como objetivos específicos, pretende-se: medir o nível do reservatório por meio de sensor ultrassônico; processar os dados utilizando ESP32; estabelecer limites automáticos para acionamento e desligamento da bomba; apresentar informações operacionais por meio de display e indicadores luminosos; e estruturar uma interface de monitoramento remoto compatível com uma arquitetura IoT.

A questão orientadora do estudo é a seguinte: uma arquitetura de automação baseada em ESP32 e sensores de baixo custo é capaz de monitorar o nível de uma caixa d'água e controlar automaticamente o abastecimento, mantendo o reservatório dentro de limites operacionais previamente estabelecidos? A contribuição pretendida é de natureza aplicada e tecnológica. O estudo não pretende demonstrar, a partir da simulação, uma taxa específica de economia de água ou energia, nem generalizar o desempenho do sistema para todas as instalações residenciais. Sua contribuição consiste em apresentar e avaliar a lógica funcional de uma solução automatizada que possa, posteriormente, ser submetida a validação física e testes em condições reais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Perdas de água e a motivação para automação

A automação residencial pode ser compreendida como a aplicação integrada de sensores, atuadores, sistemas de processamento e mecanismos de comunicação destinados a executar ou supervisionar funções anteriormente dependentes de intervenção humana. No gerenciamento de água, essa arquitetura pode ser aplicada ao monitoramento de reservatórios, ao acionamento de bombas e à geração de alertas. A lógica básica consiste em estabelecer uma

relação entre o estado detectado pelo sensor e uma ação de controle, de modo que o sistema deixe de depender exclusivamente da percepção do usuário.

A sustentabilidade, entretanto, não deve ser reduzida à simples presença de automação. Uma solução só pode ser considerada ambientalmente eficiente em sentido empírico quando seus efeitos sobre consumo e desperdício forem efetivamente mensurados. No presente trabalho, a relação entre automação e sustentabilidade é tratada como hipótese de aplicação: o controle automático pode reduzir situações de transbordamento e operação inadequada da bomba, mas a magnitude desses benefícios requer validação experimental, ainda não realizada.

2.2 Sistemas de monitoramento e controle de nível baseados em IoT

Diferentes trabalhos já investigaram arquiteturas de monitoramento e controle de nível de água apoiadas em microcontroladores e conectividade IoT, com resultados que ajudam a situar a contribuição do presente estudo. Alves, Manera e Campos (2019) propuseram uma rede de sensores sem fio de baixo custo para monitoramento e controle em tempo real do consumo de água em residências brasileiras, com feedback ao usuário por aplicativo móvel; o projeto foi avaliado, entre outros aspectos, por meio de simulações de taxa de transmissão e qualidade de sinal, sem chegar a uma instalação residencial completa. Perez, Claudio e Delgado (2021) desenvolveram, para o contexto de escassez hídrica em Lima, um sistema de monitoramento e controle de nível em caixas elevadas utilizando Arduino Uno, sensor ultrassônico, display LCD e uma minibomba, com o objetivo explícito de evitar vazamentos e permitir visualização do nível pelo usuário; diferentemente do presente trabalho, aquele sistema foi montado fisicamente, embora em escala reduzida.

Schwartz et al. (2021) apresentaram um método de baixo custo para medição remota de nível de reservatório utilizando um microcontrolador NodeMCU baseado em ESP8266, sensores de contato em vez de sensor ultrassônico, protocolo MQTT para envio dos dados à nuvem e acionamento de relé para a bomba. A opção por MQTT naquele estudo contrasta com a comunicação via HTTP adotada na implementação aqui descrita, e ilustra uma alternativa arquitetural já testada por outros autores para o mesmo tipo de problema. Rahmat e Looi (2022) monitoraram, em uma cisterna de aproveitamento de água de chuva instalada em um hospital na Malásia, não apenas o nível, por sensor ultrassônico, mas também pH e turbidez da água armazenada, o que amplia o escopo de variáveis possíveis em relação ao sistema aqui descrito, que trata exclusivamente do nível.

Em escala mais ampla, Jan et al. (2022) revisaram soluções de IoT voltadas a monitoramento de nível, detecção de vazamento e controle de motor em tanques de água, destacando a diversidade de abordagens de sensoriamento e comunicação já exploradas na literatura internacional. Zulkifli et al. (2022), em revisão sistemática sobre sistemas de monitoramento de água baseados em IoT publicados entre 2018 e 2022, concentraram-se principalmente em parâmetros de qualidade da água, como turbidez e pH, e discutiram sensores de baixo custo utilizados para esse fim, ainda que sua ênfase não recaia sobre o monitoramento de nível propriamente dito. Ramos et al. (2020), em estudo de caso sobre redes de água inteligentes em escala de concessionária, associaram medidas de monitoramento e controle a reduções mensuradas de perdas de água e energia; tratando-se, contudo, de uma escala de rede de abastecimento e não de reservatório doméstico, seus resultados não são diretamente transponíveis para o protótipo aqui apresentado, mas ilustram o potencial do campo quando a validação experimental é realizada. Olodu, Inegbedion e Ihenyen (2025) revisaram, de forma mais recente, inovações em engenharia para conservação e distribuição de água apoiadas em sensores IoT e válvulas automatizadas, reforçando que a literatura sobre o tema segue em expansão.

Em conjunto, esses trabalhos mostram que soluções de monitoramento de nível com microcontroladores de baixo custo já foram testadas com diferentes sensores, protocolos de comunicação e graus de validação física, do simulado ao efetivamente instalado. A oportunidade identificada para o presente estudo está menos na novidade dos componentes, já amplamente empregados por outros autores, e mais na combinação específica adotada, sensor ultrassônico associado a lógica de histerese explícita entre dois limiares, display local, indicadores luminosos e interface remota, integrada em um único protótipo avaliado de forma simulada e sistemática antes de qualquer investimento em montagem física.

2.3 ESP32 e sensor ultrassônico HC-SR04: princípios e limitações

O ESP32 foi adotado como unidade central do sistema por reunir capacidade de processamento e recursos de comunicação sem fio em um único microcontrolador, característica que o torna adequado a projetos que precisam integrar aquisição de dados, processamento local e comunicação com uma interface digital (KURNIAWAN, 2019). Essa versatilidade não se limita a aplicações de água: Almeida et al. (2023), por exemplo, utilizaram o mesmo microcontrolador para desenvolver um dispositivo de controle e monitoramento de consumo de energia elétrica residencial, acionando tomadas via Wi-Fi a partir de um aplicativo

móvel. O paralelo é útil para situar o presente projeto dentro de um uso mais amplo do ESP32 em automação residencial, sem que isso implique qualquer equivalência entre os domínios de aplicação.

No protótipo aqui descrito, o ESP32 recebe as informações do sensor ultrassônico HC-SR04, cujo princípio de funcionamento consiste na emissão de uma onda acústica e na medição do intervalo necessário para o retorno do sinal refletido. A distância estimada entre o sensor e a superfície da água é então utilizada para inferir a altura do líquido no reservatório. Considerando uma caixa de geometria aproximadamente conhecida, essa distância pode ser convertida em uma estimativa de nível percentual e, a partir da capacidade nominal do reservatório previamente informada ao sistema, em um volume estimado em litros. Essa conversão depende de calibração adequada: a distância física medida não corresponde diretamente ao volume de água sem que sejam considerados a geometria do reservatório e a posição do sensor.

A confiabilidade dessa conversão está, por sua vez, condicionada à precisão do próprio sensor. Em estudo metrológico específico sobre o HC-SR04, Nakatani, Guimarães e Neto (2014) identificaram erros significativos de medição em condições de bancada, o que limita a aplicação do sensor sem correção adicional e sugere a adoção de algoritmos de compensação ou estudos mais específicos sobre sua área de aplicação. Esse resultado reforça, com base em fonte técnica direta, a cautela já adotada neste trabalho quanto à necessidade de calibração experimental antes de qualquer afirmação sobre exatidão da estimativa de nível.

O ESP32 processa a informação de distância e compara o nível calculado com os limiares estabelecidos, adotando uma lógica de histerese operacional: a bomba é acionada quando o nível cai para aproximadamente 25% e permanece ligada até que o nível alcance aproximadamente 95%. A diferença entre os limites reduz a possibilidade de acionamentos repetitivos próximos a um único ponto de decisão, o que é relevante para a operação de equipamentos eletromecânicos. O módulo relé atua como elemento de interface entre o circuito de controle e o acionamento da bomba; em uma implementação física, essa etapa deverá ser acompanhada de requisitos de segurança elétrica compatíveis com as características da bomba.

O display OLED conectado por I2C fornece feedback local, complementado por três indicadores luminosos associados às faixas de aproximadamente 5%, 50% e 100% do reservatório. Essa redundância informacional permite ao usuário obter uma indicação local do estado do sistema mesmo quando a interface remota não está acessível.

2.4 Inovação frugal e recursos acessíveis em pequenas e médias empresas

A literatura sobre inovação frugal ajuda a interpretar a escolha de componentes acessíveis feita neste projeto, sem transformar essa escolha em uma classificação automática. Alves e Nodari (2023) identificaram a agregação de valor e a otimização de processos como dimensões centrais da inovação frugal em pequenas e médias empresas; no presente projeto, o sistema busca realizar uma função específica, monitorar e controlar o nível de um reservatório, sem depender de infraestrutura tecnológica complexa, o que aproxima a proposta dessas dimensões sem, contudo, configurar por si só uma inovação frugal validada, já que essa classificação exigiria avaliação mais ampla de valor gerado, custos e contexto de adoção.

A frugalidade, além disso, não deve ser confundida com baixo preço isoladamente: uma solução economicamente acessível também precisa apresentar desempenho suficiente, confiabilidade e segurança, o que exigirá, na futura transformação do protótipo em dispositivo físico, avaliação de proteção elétrica, durabilidade do sensor e confiabilidade da alimentação. Alves, Aires e Salgado (2023), ao analisarem ações do Programa Agentes Locais de Inovação em micro e pequenas empresas do Rio Grande do Norte, verificaram que, das doze ações estudadas, apenas seis apresentaram potencial de gerar vantagem competitiva, sendo uma classificada como sustentável e cinco como temporárias. Esse resultado não permite afirmar que a solução aqui desenvolvida gere vantagem competitiva, pois objeto, contexto e método são diferentes; reforça, porém, que a existência de uma tecnologia não deve ser tratada como sinônimo de desempenho superior, princípio que se aplica igualmente ao sistema de monitoramento de água descrito neste artigo.

2.5 Eficiência energética e avaliação econômica de soluções tecnológicas

A eficiência energética é uma das dimensões declaradas do projeto, mas a relação entre automação e economia de energia precisa ser estabelecida com cautela. O controle automático pode evitar períodos de funcionamento desnecessário da bomba, mas o consumo elétrico real depende do comportamento hidráulico e eletromecânico do sistema, não podendo ser inferido exclusivamente da lógica de programação. Hersen e Santos (2024), em estudo de caso sobre uma indústria madeireira de pequeno porte, avaliaram a viabilidade de geração distribuída a partir de biomassa florestal por meio de indicadores como Valor Presente Líquido, Taxa Interna de Retorno e payback descontado, concluindo que, para o caso analisado, a alternativa era economicamente inviável. Sua contribuição para este estudo é metodológica, não factual: não se deve presumir que uma tecnologia associada à energia seja automaticamente vantajosa, e a mesma cautela se aplica à água, já que o mecanismo destinado a evitar enchimento além de 95% reduz a possibilidade de transbordamento no cenário simulado, mas sua eficácia em condições reais ainda não foi mensurada.

2.6 IoT, digitalização e sistemas de controle

A IoT acrescenta uma camada de conectividade à automação tradicional, permitindo transmitir informações a uma interface, armazenar registros e, dependendo da arquitetura, disponibilizar mecanismos de controle remoto. No presente projeto, essa camada foi concebida

para permitir o acompanhamento do nível do reservatório e do estado da bomba, apresentando o volume estimado em percentual e litros, o modo de operação e a possibilidade de configuração dos limites.

Batista, Arouca e Lobato (2024), em estudo sobre digitalização comunicacional de micro e pequenas empresas conduzido em Santarém, verificaram que a existência de tecnologia disponível não significa necessariamente seu aproveitamento pleno, identificando barreiras relacionadas à capacitação e ao planejamento. No sistema de monitoramento de água, essa constatação reforça a necessidade de uma interface compreensível: uma plataforma que apenas disponibilize dados técnicos pode não produzir benefício operacional se o usuário não conseguir interpretar os níveis ou o estado da bomba.

A comunicação implementada utiliza HTTP por meio de uma API, com o ESP32 conectado à rede Wi-Fi; a arquitetura também prevê a possibilidade de utilização futura de MQTT, protocolo já adotado por Schwartz et al. (2021) em sistema semelhante de monitoramento de tanque. Essa distinção evita apresentar como resultado uma funcionalidade ainda não validada no presente estudo. Jimenez Franco, Santos e Costa (2024), ao investigarem a relação entre capacidades de inovação e sistemas de controle de gestão em micro e pequenas empresas do Sul do Brasil, encontraram relação direta entre capacidade de gestão e controles de planejamento e cibernéticos. Embora o contexto seja organizacional, existe uma convergência conceitual com a arquitetura proposta: a informação coletada pelo sensor só adquire função operacional quando incorporada a uma lógica de controle, o que, no presente sistema, ocorre de forma simplificada segundo a sequência sensoriamento, processamento, decisão, acionamento e visualização.

O desenvolvimento do protótipo foi conduzido por prototipagem rápida, permitindo a construção e avaliação iterativa da lógica de funcionamento antes de uma possível implementação física. Oliveira et al. (2024), em revisão sistemática de 138 estudos sobre gerenciamento de projetos em pequenas e médias empresas, identificaram abordagens preditivas, ágeis e híbridas associadas a benefícios de eficiência e atendimento de requisitos. O presente estudo não aplicou formalmente uma metodologia de gerenciamento de projetos, mas esse resultado dá suporte à utilização de processos iterativos de desenvolvimento, especialmente quando a solução ainda está em estágio de protótipo. O comportamento observado no Wokwi demonstra a coerência da lógica simulada, mas não permite antecipar integralmente o desempenho de sensores, bomba, alimentação elétrica e comunicação em ambiente físico, distinção que será particularmente importante na transição futura para uma placa física.

3. DESCRIÇÃO DE CASOS

3.1 Caracterização do estudo

O estudo apresenta caráter aplicado e tecnológico, com desenvolvimento de protótipo e avaliação funcional em ambiente simulado. A estratégia adotada foi a prototipagem rápida, utilizada para construir a arquitetura, implementar a lógica de controle e verificar seu comportamento diante de diferentes níveis do reservatório. O estudo não foi conduzido como

experimento de campo em residência e não realizou medição física de consumo de água ou energia elétrica; os resultados devem, portanto, ser interpretados como evidências de funcionamento da lógica de automação em ambiente simulado.

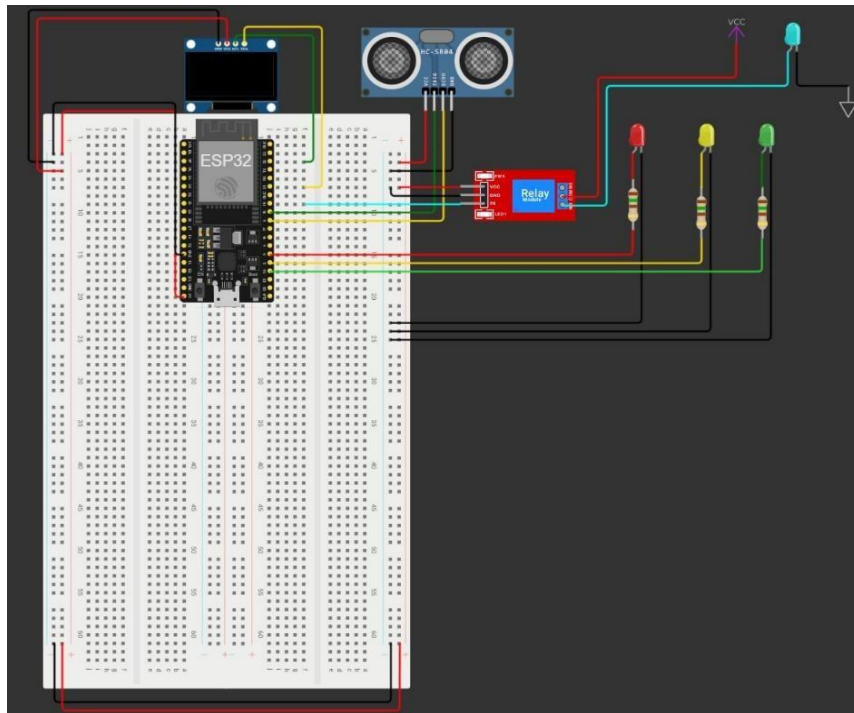
A arquitetura foi composta pelos seguintes elementos principais: ESP32, unidade central responsável pela aquisição, processamento e tomada de decisão; HC-SR04, sensor ultrassônico destinado à estimativa da distância entre o sensor e a superfície da água; módulo relé, elemento de acionamento da bomba; bomba hidráulica, representação do equipamento responsável pelo abastecimento; display OLED I2C, interface local para apresentação das informações; LEDs indicadores, representação visual das faixas de nível; e interface IoT, camada de monitoramento remoto e configuração dos parâmetros operacionais.

O sistema foi configurado com dois limiares principais: quando o nível estimado atinge aproximadamente 25%, o comando de acionamento é enviado ao relé, e o abastecimento permanece ativo até aproximadamente 95%, quando a bomba é desligada. O projeto contempla também a possibilidade de configuração manual do nível desejado para situações de racionamento, funcionalidade cuja eficácia em condições reais de escassez não foi medida neste estudo.

3.2 Arquitetura funcional do protótipo

A arquitetura funcional pode ser representada pela sequência HC-SR04, ESP32, algoritmo de controle, relé e bomba, associada, em paralelo, à conexão do ESP32 com display OLED e LEDs, e à conexão do ESP32 com a interface IoT por meio de comunicação de dados. O sensor realiza a aquisição da distância; o ESP32 interpreta essa informação e calcula a estimativa de nível com base em parâmetros geométricos previamente definidos. A partir do percentual calculado, o algoritmo verifica a condição do reservatório: quando o nível está abaixo do limite mínimo, o estado da bomba é alterado para ligado; quando o limite superior é atingido, o estado é alterado para desligado. A utilização de limites distintos cria uma faixa operacional entre 25% e 95%, o que evita que pequenas variações em torno de um único ponto produzam acionamentos repetitivos.

Figura 1: Protótipo do sistema de monitoramento da caixa d'água.



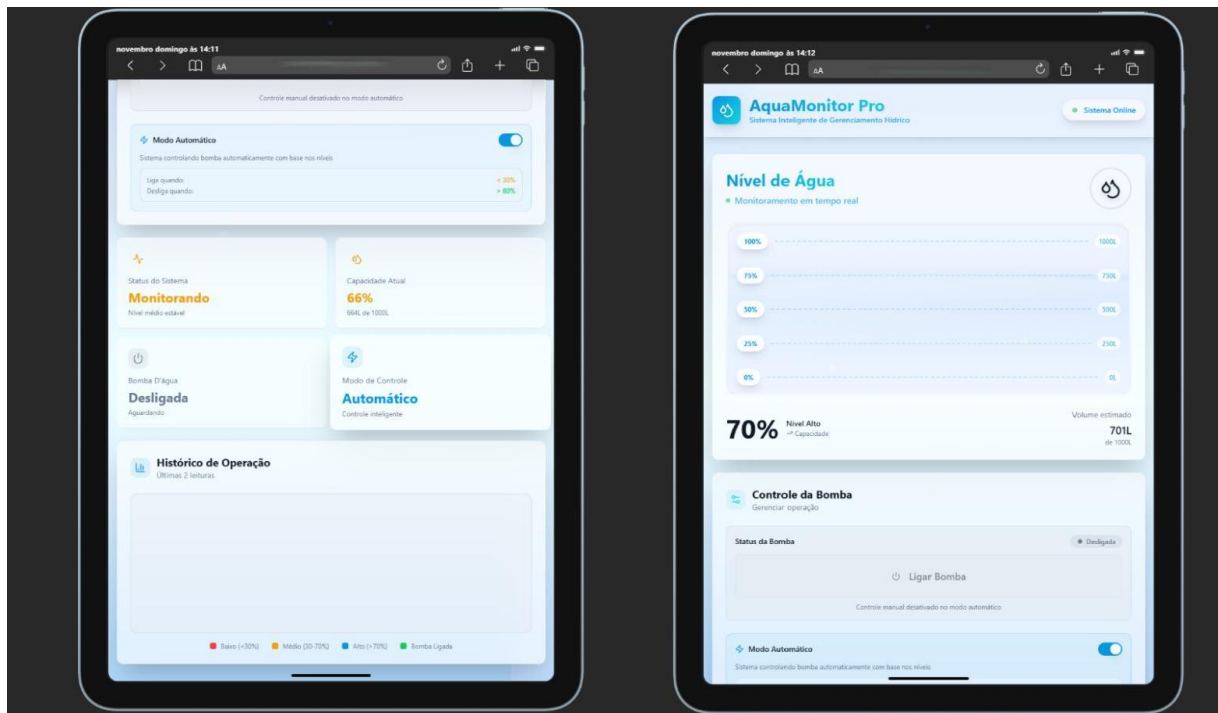
Fonte: Os autores

A Figura 1 apresenta o protótipo de bancada utilizado para representar a arquitetura proposta, com a função de demonstrar a organização física ou simulada dos principais componentes, sem implicar que o sistema já tenha sido validado em uma instalação residencial definitiva.

3.3 Interface de monitoramento e controle via IoT

A interface de monitoramento foi concebida como aplicação web responsiva, destinada a apresentar ao usuário as informações produzidas pelo sistema e a permitir a configuração dos principais parâmetros. A interface contempla o nível estimado em percentual, o volume estimado em litros, a condição atual da bomba, o modo manual ou automático, um gráfico de variação do nível, os limites mínimo e máximo, a possibilidade de acionamento manual e a consulta ao histórico de operação.

Figura 2: Interface do sistema para monitoramento remoto do nível de água e controle da bomba.



Fonte: Os autores

A comunicação descrita nos resultados utiliza HTTP por meio de uma API, com o ESP32 conectado à rede Wi-Fi. A arquitetura também considera a possibilidade de utilização de MQTT em versões futuras, alternativa cuja viabilidade prática já foi demonstrada por Schwartz et al. (2021) em sistema de monitoramento de tanque de água. A interface web amplia o acesso ao sistema por poder ser consultada em computadores, tablets e smartphones, mas essa disponibilidade não deve ser confundida com garantia de disponibilidade contínua, já que a conectividade depende da rede e da infraestrutura empregada. Essa dependência é uma das limitações reconhecidas pelo estudo: em uma implementação física, o sistema deverá manter uma estratégia local de controle que permita à bomba continuar obedecendo aos limites mesmo em caso de perda temporária da conexão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Funcionamento geral do sistema

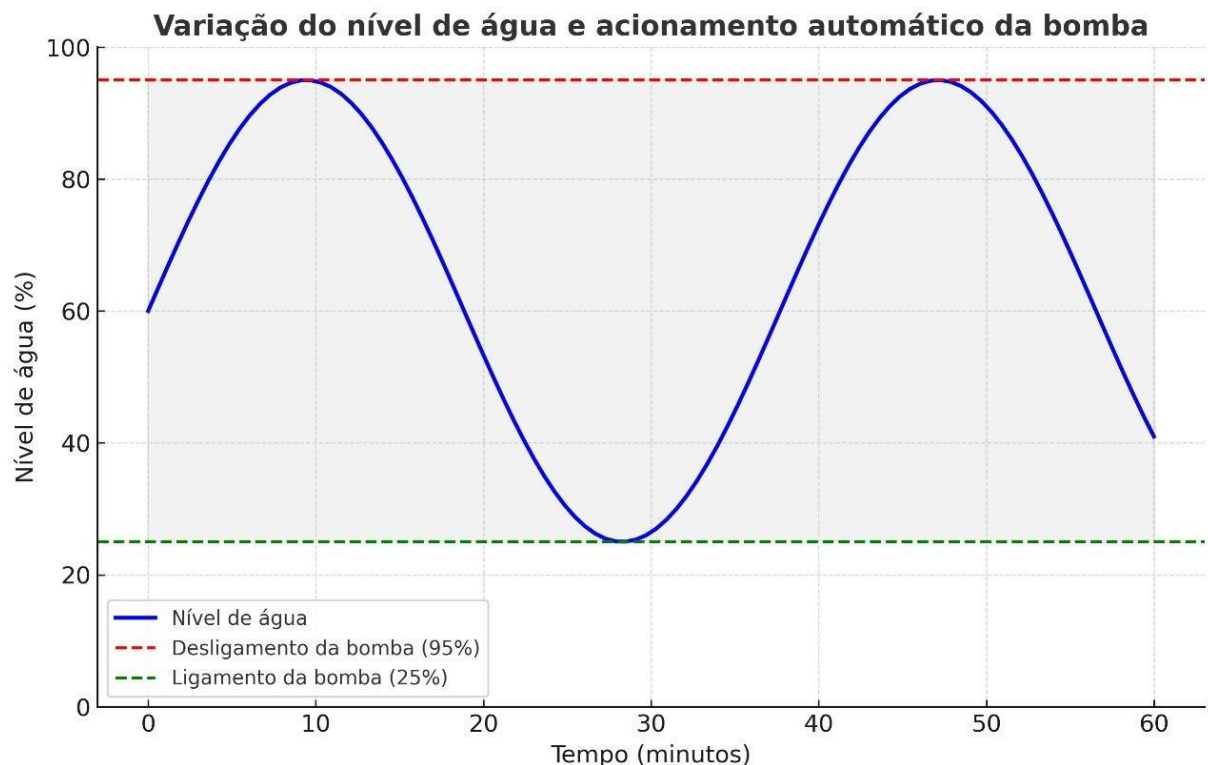
Os testes simulados no Wokwi indicaram que o sistema executou a lógica de controle prevista. A leitura do sensor foi utilizada pelo ESP32 para estimar o nível e determinar o estado da bomba de acordo com os limites programados. O comportamento observado foi consistente com a lógica definida: à medida que o nível diminui e alcança o limite de aproximadamente 25%, o sistema passa ao estado de abastecimento; quando o nível alcança aproximadamente 95%, o sistema retorna ao estado de bomba desligada. Esse resultado responde diretamente à questão orientadora do estudo: dentro do ambiente simulado e dos parâmetros implementados, a arquitetura foi capaz de monitorar o nível e controlar automaticamente o abastecimento segundo limites predefinidos. A principal evidência produzida pelo estudo é, portanto,

funcional, e não deve ser extrapolada para afirmar quantidade específica de água ou energia economizada, já que a simulação não fornece, por si só, medição experimental de consumo residencial.

4.2 Comportamento do nível e acionamento da bomba

A Figura 3 apresenta o gráfico com a variação simulada do nível do reservatório ao longo do tempo e os respectivos estados de operação da bomba.

Figura 3: Variação do nível de água e acionamento automático da bomba.



Fonte: Os autores

A representação evidencia dois estados principais, esvaziamento, associado ao consumo de água, e enchimento, associado ao acionamento da bomba. Quando o nível alcança aproximadamente 25%, a bomba é acionada, e o processo permanece ativo até o limite superior de aproximadamente 95%, quando ocorre o desligamento. A distância entre os dois limites representa uma estratégia de histerese destinada a reduzir a possibilidade de alternância excessiva entre os estados ligado e desligado, característica operacionalmente relevante para evitar que pequenas oscilações de leitura produzam comandos sucessivos. O comportamento simulado apresentou transições compatíveis com a lógica programada e não indicou, no cenário representado, oscilações abruptas. Esse resultado pode ser interpretado como evidência de que a regra de controle é funcional para o cenário simulado, mas não deve ser interpretado como

comprovação de estabilidade hidráulica em instalação real, já que variáveis como vazão, pressão, tempo de resposta da bomba e comportamento do sensor sob condições físicas, incluindo os erros de medição já documentados para o HC-SR04 (NAKATANI, GUIMARÃES E NETO, 2014), não foram experimentalmente avaliadas.

4.3 Potencial de eficiência energética

A operação da bomba apenas quando o nível atinge o limite inferior constitui um mecanismo potencial de racionalização de seu funcionamento, em comparação com uma estratégia de acionamento manual sem monitoramento contínuo. Essa interpretação, contudo, deve permanecer no campo do potencial: o estudo não mediu consumo elétrico e, portanto, não permite afirmar uma redução percentual de energia. Essa cautela é reforçada pelos resultados de Hersen e Santos (2024), que demonstraram, em contexto distinto, que uma alternativa energética pode apresentar viabilidade econômica diferente da inicialmente esperada. Uma análise específica de energia, em trabalhos futuros, deverá considerar ao menos potência real da bomba, tempo de funcionamento por ciclo, número de ciclos por dia, energia consumida por ciclo, volume de água bombeado e comparação com uma estratégia convencional de controle.

4.4 Potencial de redução do desperdício de água

O limite superior de 95% foi definido para interromper o enchimento antes que o reservatório alcance sua capacidade máxima teórica, criando uma margem operacional que reduz a possibilidade de transbordamento decorrente da continuidade do bombeamento. Essa característica é coerente com a finalidade ambiental do projeto, mas a redução efetiva do desperdício não foi quantificada.

Uma avaliação futura poderia utilizar um reservatório físico e registrar o volume efetivamente desperdiçado em diferentes condições de controle, comparando, por exemplo, um sistema convencional e o sistema automatizado. A perspectiva de otimização de processos discutida por Alves e Nodari (2023) oferece um enquadramento útil para essa etapa: o controle automatizado pode ser interpretado como tentativa de otimizar o processo de abastecimento, mas sua classificação como inovação frugal em sentido completo exigiria avaliação mais ampla de valor gerado e recursos empregados.

4.5 Interface, controle e digitalização

A interface desenvolvida amplia a função do protótipo ao transformar dados de sensores em informações interpretáveis pelo usuário. A apresentação do nível em percentual e litros permite diferentes formas de interpretação, e a possibilidade de visualizar o histórico cria oportunidade para identificar padrões de consumo, ainda que essa capacidade represente uma possibilidade analítica e não uma análise estatística já realizada no presente estudo. Batista, Arouca e Lobato (2024) reforçam essa dimensão ao apontarem que a disponibilidade de tecnologia não garante seu aproveitamento pleno; a utilidade do sistema aqui descrito depende não apenas da disponibilidade de dados, mas de sua apresentação e interpretação.

O sistema prevê operação manual e automática, o que permite ao usuário manter capacidade de intervenção sem prejuízo da rotina normal de abastecimento. Em uma futura implementação, o controle manual deverá ser acompanhado por mecanismos de segurança, como limites máximos e temporizadores, já que o presente protótipo não constitui, por si só, uma certificação de segurança operacional.

4.6 Comparação com sistemas correlatos e contribuição do estudo

A combinação de sensoriamento, processamento local, acionamento e interface digital adotada neste trabalho segue um ciclo já descrito em outras arquiteturas de monitoramento de água, representado aqui pela sequência medir, interpretar, decidir, atuar e informar. Em relação a soluções físicas anteriores, como a de Perez, Claudio e Delgado (2021), que utilizou Arduino Uno e uma minibomba real em escala reduzida, ou a de Schwartz et al. (2021), que testou protocolo MQTT em campo com sensores de contato, o presente estudo se distingue por permanecer inteiramente em ambiente simulado, o que restringe a comparação direta de desempenho, mas permite testar a lógica de controle antes de qualquer investimento em componentes físicos. Já em relação a revisões amplas do campo, como as de Jan et al. (2022) e Zulkifli et al. (2022), a contribuição do presente trabalho não está na introdução de um componente inédito, mas na avaliação sistemática de uma combinação específica de sensor ultrassônico, histerese explícita entre dois limiares, indicação local redundante e interface remota, em um único protótipo cujo comportamento funcional foi verificado de ponta a ponta antes da etapa física. Jimenez Franco, Santos e Costa (2024) oferecem uma referência conceitual complementar para essa integração ao associarem capacidade de gestão a controles de planejamento em organizações inovadoras; no protótipo, essa integração ocorre em escala reduzida e automatizada, já que o ESP32 desempenha simultaneamente funções de aquisição, processamento e decisão, enquanto a interface fornece uma camada de supervisão.

A possibilidade de aplicação em residências, condomínios e pequenos estabelecimentos deve ser considerada potencial de aplicação, não resultado de validação nesses ambientes; a adaptação a cada contexto exigirá dimensionamento da bomba, do reservatório, dos sensores, da alimentação e da conectividade. O mesmo princípio vale para a competitividade: Alves, Aires e Salgado (2023) encontraram diferentes graus de potencial competitivo entre ações de inovação analisadas em micro e pequenas empresas, o que demonstra que nem toda inovação produz necessariamente uma vantagem sustentável. Portanto, embora o sistema tenha potencial de aplicação comercial, não há dados no presente estudo para afirmar vantagem competitiva, retorno sobre investimento ou viabilidade econômica.

4.7 Relação com o desenvolvimento de projetos

O desenvolvimento por prototipagem rápida permitiu verificar a integração dos principais componentes antes de uma possível construção física. Essa estratégia é coerente com a literatura de gerenciamento de projetos em pequenas e médias empresas, na qual Oliveira et al. (2024) identificaram abordagens preditivas, ágeis e híbridas associadas a benefícios de eficiência e atendimento de requisitos; ainda assim, o presente estudo não formalizou uma metodologia de gerenciamento de projetos, embora tenha seguido premissas da abordagem ágil SCRUM, mas não se deve atribuir ao trabalho uma abordagem ágil ou híbrida específica.

A contribuição da prototipagem está na possibilidade de identificar problemas de lógica e integração em etapa anterior à implementação física, particularmente relevante em sistemas que combinam hardware e software. A próxima etapa do desenvolvimento deverá substituir a representação simulada por uma montagem física em placa de circuito, acompanhada de testes de calibração, dos quais a correção dos erros de medição do sensor ultrassônico documentados por Nakatani, Guimarães e Neto (2014) será um componente relevante, além de avaliação de segurança elétrica.

5. DESAFIOS

Apesar dos resultados funcionais obtidos no ambiente simulado, o sistema apresenta limitações que restringem a generalização dos resultados. A primeira decorre da própria natureza da simulação: o Wokwi permite verificar a lógica do circuito e do software, mas não reproduz integralmente condições físicas como turbulência, espuma, condensação, temperatura, umidade e interferências acústicas, que podem alterar a leitura de um sensor ultrassônico, conforme já registrado experimentalmente por Nakatani, Guimarães e Neto (2014). A precisão da estimativa de nível deverá, portanto, ser avaliada experimentalmente, com possível uso de

filtros digitais, médias móveis e mecanismos de rejeição de leituras anômalas, cuja eficácia ainda precisa ser testada.

A segunda limitação refere-se à conectividade: o monitoramento remoto depende da rede de comunicação, e uma falha de Wi-Fi pode interromper a atualização da interface, embora o controle local deva permanecer operacional em uma implementação robusta. Uma arquitetura futura poderá avaliar MQTT, já testado por Schwartz et al. (2021) em contexto semelhante, ou outras estratégias de comunicação, mas o presente estudo não realizou comparação experimental entre protocolos.

A terceira limitação é energética: não foram realizadas medições de consumo do ESP32 ou da bomba, de modo que qualquer afirmação quantitativa sobre redução de energia deve ser reservada para estudos posteriores. A quarta é econômica: o artigo caracteriza a solução como de baixo custo, mas não apresenta análise econômica completa, com custo total de propriedade, retorno sobre investimento ou payback; a expressão "economicamente viável" deve ser tratada como hipótese de aplicação, não como conclusão demonstrada, cautela reforçada pelos resultados de Hersen e Santos (2024) para um caso energético distinto, mas metodologicamente análogo.

A quinta limitação envolve segurança: o acionamento de uma bomba hidráulica por relé envolve riscos elétricos e mecânicos, e uma versão física deverá incorporar componentes dimensionados, proteção elétrica e mecanismos de desligamento em situações anormais. A sexta é a ausência de validação com usuários: a interface foi concebida para ser intuitiva, mas essa característica não foi avaliada por estudo formal de usabilidade, e a literatura sobre digitalização de pequenas empresas destaca que disponibilidade tecnológica não garante utilização efetiva (Batista; Arouca; Lobato, 2024). Por fim, a aplicação em diferentes tipos de reservatórios exige calibração específica, já que a relação entre distância e volume depende da geometria da caixa e da posição do sensor, de modo que um algoritmo desenvolvido para determinada configuração não deve ser considerado universal sem validação.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresentou o desenvolvimento e a avaliação simulada de um sistema de monitoramento de caixa d'água baseado em ESP32, sensor ultrassônico HC-SR04, módulo relé, bomba hidráulica, display OLED, LEDs indicadores e uma camada de monitoramento por IoT, cuja operação decorre de regras condicionais fixas, e não de inteligência artificial. A solução foi concebida para automatizar o acompanhamento do nível do reservatório e reduzir a

dependência de supervisão manual, com acionamento da bomba em aproximadamente 25% e desligamento em aproximadamente 95%. Os resultados obtidos indicaram que a arquitetura foi capaz de executar o ciclo de monitoramento e controle previsto, integrando aquisição de dados, processamento, decisão e acionamento, com limites distintos que organizam o funcionamento da bomba em ciclos de enchimento e repouso.

A principal contribuição do estudo está na demonstração da viabilidade funcional de uma arquitetura modular de automação de reservatórios em ambiente simulado, situada em relação a soluções já publicadas com diferentes sensores, protocolos e graus de validação física (ALVES; MANERA; CAMPOS, 2019; PEREZ; CLAUDIO; DELGADO, 2021; SCHWARTZ et al., 2021; JAN et al., 2022; RAHMAT; LOOI, 2022; ZULKIFLI et al., 2022). A discussão à luz da literatura sobre inovação frugal reforça a pertinência de investigar soluções que procurem otimizar processos utilizando recursos limitados (Alves; Nodari, 2023), sem que isso configure, por si só, uma classificação definitiva do protótipo como inovação frugal, já que essa classificação exigiria avaliação adicional de custos, valor gerado e contexto de adoção. Estudos sobre inovação e controle em micro e pequenas empresas destacam a importância de transformar resultados tecnológicos em operações coerentes com a estrutura organizacional (Jimenez Franco; Santos; Costa, 2024), e estudos sobre digitalização indicam que a disponibilidade de tecnologia não garante sua utilização efetiva (Batista; Arouca; Lobato, 2024); no sistema desenvolvido, essas constatações se traduzem na cadeia entre sensor, processamento, decisão e acionamento e na necessidade de testes formais de usabilidade ainda não realizados.

A perspectiva energética e a hídrica exigem a mesma cautela: a automação pode reduzir situações de funcionamento desnecessário da bomba e o risco de transbordamento, mas o presente estudo não mediu consumo de energia nem litros de água efetivamente economizados, e a literatura sobre decisões de energia em pequenas empresas mostra que soluções tecnológicas podem apresentar resultados econômicos distintos conforme o contexto (HERSEN; SANTOS, 2024). Essas limitações não invalidam a contribuição do protótipo; delimitam, ao contrário, com maior precisão aquilo que foi efetivamente demonstrado, uma arquitetura funcional em ambiente simulado, e aquilo que permanece como hipótese de aplicação, o desempenho energético, econômico e ambiental em escala residencial real.

Como continuidade, recomenda-se a construção de uma versão física do sistema, com calibração do sensor ultrassônico à luz dos erros já documentados na literatura (NAKATANI;

GUIMARÃES; NETO, 2014), avaliação de diferentes condições ambientais e testes de longa duração, incluindo medição do consumo elétrico da bomba e do sistema eletrônico e quantificação do volume de água movimentado. A comparação experimental entre HTTP e MQTT, este último já testado por Schwartz et al. (2021) em sistema correlato, e a avaliação de estratégias de operação local em caso de perda de conectividade poderão ampliar a robustez da arquitetura. A segurança deverá ser incorporada ao desenvolvimento físico, com proteção contra sobrecorrente e mecanismos de desligamento em condições de falha, e a análise econômica de implantação e manutenção será necessária antes de qualquer afirmação fundamentada de viabilidade. Por fim, a aplicação em residências, condomínios ou pequenos estabelecimentos deve ser tratada como perspectiva futura, dependente de características específicas de cada reservatório, bomba e infraestrutura.

Assim, o estudo contribui para a discussão sobre aplicações de sistemas embarcados e IoT no gerenciamento de recursos hídricos ao apresentar uma solução automatizada de baixo custo potencial, cuja principal evidência atual é sua capacidade funcional em ambiente simulado, desde que as próximas etapas sejam acompanhadas de validação experimental, análise quantitativa e avaliação de segurança.

6. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Nataly Suene de; MORAES, Raoni Rafi de Melo; CALLE, Kimberly Josy Marca; SAROKA, Enzo Secchi Grazioso; EMANUEL, Paulo Cesar da Silva. Desenvolvimento de um dispositivo IoT para controle e monitoramento de consumo de energia. **Revista FT**, v. 27, n. 128, 2023.
- ALVES, Arnon Jadir Rodrigues; MANERA, Leandro Tiago; CAMPOS, Marcel Veloso. Low-cost wireless sensor network applied to real-time monitoring and control of water consumption in residences. **Revista Ambiente & Água**, v. 14, n. 6, e2407, 2019. DOI: 10.4136/ambi-agua.2407.
- ALVES, Karen Thais; NODARI, Cristine Hermann. Evidências da Inovação Frugal em Pequenas e Médias Empresas: uma revisão sistemática da literatura. **Revista da Micro e Pequena Empresa**, v. 17, n. 2, p. 75-90, 2023. DOI: 10.6034/rmpe.v17i2.1820.
- ALVES, Ítalo Bruno Gomes; AIRES, Renan Felinto de Farias; SALGADO, Camila Cristina Rodrigues. O potencial de gerar vantagem competitiva de ações do programa agentes locais de inovação (ALI): um estudo de caso em micro e pequenas empresas do Rio Grande do Norte. **Revista da Micro e Pequena Empresa**, v. 17, n. 1, p. 5-20, 2023.
- BATISTA, Alessandra Giselle Silva; AROUCA, Marcia Waimer Spinola; LOBATO, Fábio Manoel França. Estratégias de digitalização comunicacional para Micro e Pequenas Empresas como promotoras da inovação e competitividade. **Revista da Micro e Pequena Empresa**, v. 18, n. 3, p. 60-79, 2024.
- FARIA, Thiago Rodrigues; CARVALHO, Rogério Atem de; VIANNA, William da Silva; HORA, Henrique Rego Monteiro da. Estudo prospectivo sobre tecnologias para detecção de

vazamentos em redes de abastecimento de água. **REEC — Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 19, n. 1, p. 154-166, 2023. DOI: 10.5216/reec.v19i1.68225.

HERSEN, Amarildo; SANTOS, Clayton Lima dos. Uma investigação para redução de custo da energia elétrica: um estudo de caso para uma indústria madeireira de pequeno porte. **Revista da Micro e Pequena Empresa**, v. 18, n. 2, p. 21-38, 2024.

JAN, Farmanullah; MIN-ALLAH, Nasro; SAEED, Saqib; IQBAL, Sardar Zafar; AHMED, Rashad. IoT-based solutions to monitor water level, leakage, and motor control for smart water tanks. **Water**, v. 14, n. 3, art. 309, 2022. DOI: 10.3390/w14030309.

JIMENEZ FRANCO, Maryely Andrea; SANTOS, Edicreia Andrade dos; COSTA, Flaviano. Capacidades de innovación y controles de gestión en las micro y pequeñas empresas del sur de Brasil. **Revista da Micro e Pequena Empresa**, v. 18, n. 2, p. 99-117, 2024.

KURNIAWAN, Agus. Internet of Things Projects with ESP32: build exciting and powerful IoT projects using the all-new Espressif ESP32. Birmingham: Packt Publishing, 2019.

NAKATANI, Alessandro Massayuki; GUIMARÃES, Anderson Valenga; NETO, Vicente Machado. Medição com sensor ultrassônico HC-SR04. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON MECHANICAL METROLOGY, 3., 2014, Gramado. **Proceedings 3rd International Conference on Mechanical Metrology**. Gramado, 2014.

OLIVEIRA, Ricardo Lair Franco; SILVA, Luciano Ferreira da; PENHA, Renato; BIZARRIAS, Flávio Santino. Gestão de Projetos em Pequenas e Médias Empresas. **Revista da Micro e Pequena Empresa**, v. 18, n. 2, p. 134-159, 2024.

OLODU, Dickson David; INEGBEDION, Francis; IHENYEN, Osagie Imevbore. Smart water management systems: engineering innovations for water conservation and distribution. **Journal of Studies in Advanced Technologies**, v. 3, n. 1, p. 13-31, 2025. DOI: 10.63063/jsat.1613583.

PEREZ, Christian Baldeon; CLAUDIO, Brian Meneses; DELGADO, Alexi. Water level monitoring and control system in elevated tanks to prevent water leaks. **International Journal of Advanced Computer Science and Applications**, v. 12, n. 2, p. 437-442, 2021. DOI: 10.14569/IJACSA.2021.0120255.

RAHMAT, Siti Nazahiyah; LOOI, Zhe Hui. Monitoring water level and water quality in rainwater harvesting tank using Internet of Things (IoT) device. **Journal of Advancement in Environmental Solution and Resource Recovery**, v. 2, n. 2, p. 64-74, 2022.

RAMOS, H. M.; MCNABOLA, A.; LÓPEZ-JIMÉNEZ, P. A.; PÉREZ-SÁNCHEZ, M. Smart water management towards future water sustainable networks. **Water**, v. 12, n. 1, p. 58, 2020. DOI: 10.3390/w12010058.

SCHWARTZ, Gustavo Lemos et al. Low-cost method to measure and remotely monitor water tank level. **Journal of Lean Systems**, v. 6, n. 1, p. 66-76, 2021.

UNESCO WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. The United Nations World **Water Development Report 2023: partnerships and cooperation for water**. Paris: UNESCO, 2023.

ZULKIFLI, Che Zalina et al. IoT-based water monitoring systems: a systematic review. **Water**, v. 14, n. 22, p. 3621, 2022. DOI: 10.3390/w14223621.