

Sistema de monitoramento IoT de nível de reservatórios e engarrafamento de água mineral

IoT-based monitoring system for reservoir level and mineral water bottling

Andriéria Azevedo Dantas¹

Carla Dayane Rodrigues Alves²

Cauã Chaves Brito³

Izabelle Cavalcante de Medeiros⁴

Mario Marques de Lima Neto⁵

Everson Mizael Cortez Silva⁶

Leonardo Gomes de Paiva Amorim⁷

Diego da Silva Pereira⁸

Resumo

O presente projeto propõe uma solução de automação baseada em Internet das Coisas (IoT) voltada ao monitoramento do nível de água nos reservatórios da Água Mineral Cristalina de Natal, bem como à contagem automatizada de garrações na linha de produção. A motivação do trabalho está relacionada à substituição de procedimentos manuais de medição e anotação, os quais estão sujeitos a falhas, inconsistências e dificultam o gerenciamento eficiente da produção. A arquitetura desenvolvida contempla a integração de sensores industriais, sendo utilizados sensores de pressão com comunicação RS485 para a medição do nível dos tanques e sensores infravermelhos para a contagem dos garrações, conectados a microcontroladores ESP32 com acesso à rede Wi-Fi. O dispositivo realiza a aquisição contínua dos dados, o tratamento das informações e o envio dos valores a um broker Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). Posteriormente, os dados são armazenados e visualizados em painéis de supervisão na plataforma Home Assistant, possibilitando o acompanhamento em tempo real e a análise do histórico das medições. Os resultados indicam que a solução IoT desenvolvida proporciona maior precisão, confiabilidade e eficiência no monitoramento dos processos

¹ Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: andriera.d@escolar.ifrn.edu.br

² Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: carladayane856@gmail.com

³ Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: caua.brito@estudante.cear.ufpb.br

⁴ Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: izabelle3cia@gmail.com

⁵ Discente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: mariomlneto@hotmail.com.br

⁶ Docente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: everson.cortez@ifrn.edu.br

⁷ Docente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: leonardo.amorim@ifrn.edu.br

⁸ Docente do Curso de Formação Inicial e Continuada (Curso FIC) em Residência Tecnológica em Software Embarcado, na modalidade a distância. e-mail: diego.pereira@ifrn.edu.br

produtivos, contribuindo para a modernização da operação e para a tomada de decisões baseada no monitoramento de dados em tempo real.

Palavras-chave: IoT; Automação; Sensores; MQTT; Monitoramento industrial.

Abstract

This project proposes an automation solution based on the Internet of Things (IoT) aimed at monitoring water levels in the reservoirs of Água Mineral Cristalina de Natal, as well as the automated counting of water gallons on the production line. The motivation for the study is related to the replacement of manual measurement and recording procedures, which are subject to failures and inconsistencies and hinder efficient production management. The developed architecture includes the integration of industrial sensors, using RS485 communication pressure sensors for tank level measurement and infrared sensors for gallon counting, connected to ESP32 microcontrollers with Wi-Fi network access. The device performs continuous data acquisition, information processing, and transmission of values to a Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) broker. Subsequently, the data are stored and displayed on supervisory dashboards within the Home Assistant platform, enabling real-time monitoring and historical analysis of the measurements. The results indicate that the developed IoT solution provides greater accuracy, reliability, and efficiency in monitoring production processes, contributing to operational modernization and to decision-making based on real-time data monitoring.

Keywords: IoT; Automation; Sensors; MQTT; Industrial Monitoring.

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por eficiência, rastreabilidade e confiabilidade nos processos industriais tem impulsionado a adoção de tecnologias digitais de monitoramento e automação. Nesse contexto, a Internet das Coisas (IoT) destaca-se por permitir a integração entre dispositivos físicos e sistemas computacionais, viabilizando a coleta e análise de dados em tempo próximo ao real.

Na indústria de água mineral, essa abordagem é especialmente relevante, pois o monitoramento adequado dos reservatórios e da linha de produção é essencial para garantir a continuidade operacional e a qualidade do produto. Em muitos cenários industriais, o acompanhamento dessas variáveis ainda é realizado por meio de processos predominantemente manuais ou baseados em estimativas operacionais, o que pode resultar em informações imprecisas, atrasadas ou inconsistentes.

A ausência de medições instrumentadas do nível dos reservatórios dificulta o planejamento do envase e pode ocasionar interrupções inesperadas ou desperdício de recursos

hídricos. De forma semelhante, a falta de sistemas automatizados para a contagem da produção torna o controle da quantidade de garrações envasados dependente de intervenção humana contínua, aumentando a probabilidade de erros e reduzindo a confiabilidade dos dados. Dessa forma, evidencia-se a necessidade de sistemas automatizados que possibilitem a supervisão contínua, precisa e centralizada dessas variáveis operacionais.

Estudos anteriores indicam que soluções baseadas em IoT têm sido amplamente empregadas para monitoramento industrial, integrando sensores, dispositivos embarcados e plataformas de visualização de dados (Rose; Eldridge; Chapin, 2015). Protocolos de comunicação leves, como o MQTT, aliados a tecnologias de conectividade como Wi-Fi e padrões industriais robustos, como o RS485, permitem a transmissão confiável de dados em ambientes industriais (Hillar, 2017; Dawoud; Dawoud, 2020). Além disso, plataformas de código aberto voltadas à automação e supervisão têm ampliado as possibilidades de visualização, armazenamento histórico e automação de processos, contribuindo para uma gestão mais eficiente das informações operacionais.

Apesar dos avanços apresentados na literatura, ainda há uma lacuna quanto à aplicação integrada dessas tecnologias em indústrias de pequeno e médio porte, especialmente no monitoramento simultâneo de reservatórios de água e na contagem automática da produção. Muitos sistemas disponíveis são de alto custo ou não oferecem visualização centralizada das informações, o que limita sua adoção.

Nesse contexto, esta pesquisa aborda o desenvolvimento de um sistema automatizado e integrado para o monitoramento contínuo do volume de água armazenado e da quantidade de garrações envasados em uma indústria de água mineral. O problema reflete uma demanda prática do ambiente industrial estudado, com impacto direto na gestão de recursos hídricos e no controle da produção.

A justificativa deste trabalho baseia-se na necessidade de aprimorar a eficiência operacional e a confiabilidade das informações no ambiente industrial. A adoção de um sistema de monitoramento baseado em IoT possibilita a redução de falhas humanas, o acompanhamento em tempo próximo ao real de variáveis críticas e a geração de dados históricos para suporte à tomada de decisão. Além disso, a proposta apresenta relevância prática ao oferecer uma solução acessível e aplicável, bem como relevância teórica ao demonstrar a integração de sensores, protocolos de comunicação e plataformas de supervisão em um cenário industrial real.

Dessa forma, o objetivo geral deste trabalho é desenvolver e implementar um sistema de monitoramento industrial baseado em Internet das Coisas para o acompanhamento do nível

de água em reservatórios e da contagem de garrações envasados. Como objetivos específicos, busca-se integrar sensores de pressão e sensores infravermelhos a uma arquitetura IoT, transmitir os dados por meio do protocolo MQTT, armazenar e visualizar as informações em uma plataforma de supervisão e avaliar o desempenho do sistema em condições reais de operação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 A Internet das Coisas aplicada à indústria

A Internet das Coisas (Internet of Things – IoT) refere-se ao sistema no qual objetos físicos são dotados de sensores, atuadores, capacidade de processamento e conectividade, permitindo a coleta, transmissão e análise de dados por meio da internet. O termo foi inicialmente utilizado para descrever aplicações baseadas em identificação por radiofrequência (RFID), voltadas ao rastreamento de mercadorias, e evoluiu significativamente com o avanço das tecnologias de comunicação e dos sistemas embarcados (Rose; Eldridge; Chapin, 2015).

No contexto industrial, a IoT tem papel fundamental na automação de processos, no monitoramento remoto de variáveis e no suporte à tomada de decisão baseada em dados. A integração entre sensores, dispositivos embarcados e plataformas de supervisão possibilita maior rastreabilidade, confiabilidade das informações e redução de intervenções manuais. Dessa forma, o ganho de produtividade contribui diretamente para o aumento da eficiência operacional, especialmente em ambientes que demandam monitoramento contínuo e em tempo real, além de mitigar a ocorrência de falhas humanas.

2.2 Protocolos de comunicação em sistemas IoT

A comunicação eficiente entre dispositivos é um dos pilares das aplicações de IoT. Em ambientes industriais, essa comunicação deve ser confiável, robusta e capaz de operar em redes com limitações de largura de banda ou sujeitas a interferências eletromagnéticas. Para atender a esses requisitos, diversos protocolos são empregados, cada um adequado a uma camada ou necessidade específica do sistema.

O Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) é um protocolo de comunicação leve, baseado no modelo publicador/assinante (publish/subscribe), amplamente utilizado em aplicações de IoT (Hillar, 2017). Sua arquitetura é centrada em um broker, responsável por

intermediar as mensagens trocadas entre os dispositivos, desacoplando produtores e consumidores de dados.

Uma das principais vantagens do MQTT é o baixo consumo de recursos computacionais e de largura de banda, tornando-o adequado para microcontroladores e redes instáveis. O protocolo também oferece diferentes níveis de Qualidade de Serviço (QoS), permitindo ajustar a confiabilidade da entrega das mensagens conforme os requisitos da aplicação. Essas características fazem do MQTT uma solução amplamente adotada em sistemas de monitoramento industrial e automação distribuída.

O Wi-Fi é um conjunto de padrões de comunicação sem fio definidos amplamente utilizado para interconexão de dispositivos em redes locais baseadas em IP. Essa tecnologia permite a troca de dados sem a necessidade de cabeamento físico, oferecendo flexibilidade na instalação de dispositivos embarcados (Dawoud; Dawoud, 2020).

Em sistemas IoT, o Wi-Fi possibilita que microcontroladores transmitam dados para servidores locais ou em nuvem, integrando sensores e plataformas de supervisão. Sua utilização é especialmente vantajosa em ambientes onde já existe infraestrutura de rede instalada, reduzindo custos e complexidade de implantação. No entanto, fatores como alcance, interferências e segurança devem ser considerados no projeto da arquitetura de comunicação, principalmente em ambientes industriais.

Por outro lado, o RS485 é um padrão de comunicação serial amplamente utilizado em ambientes industriais devido à sua robustez e imunidade a ruídos eletromagnéticos (Dawoud; Dawoud, 2020). Sua principal característica é a transmissão diferencial de dados, na qual dois fios transportam sinais complementares, permitindo que interferências externas sejam minimizadas.

Esse padrão é adequado para comunicação em longas distâncias e em ambientes com elevado nível de ruído elétrico, sendo frequentemente empregado na interligação de sensores industriais e dispositivos de campo. Por essas características, o RS485 é amplamente adotado em sistemas de automação e monitoramento, especialmente quando se exige confiabilidade na transmissão dos dados. Tendo isso em vista, o uso de sensores que usam esse padrão como saída de dados podem se adequar a diversas aplicações em ambiente industrial.

2.3 Sensores utilizados no sistema de monitoramento

Sensores infravermelhos são amplamente utilizados para detecção e contagem de objetos em linhas de produção. Esses dispositivos operam por meio da emissão de um feixe

de luz infravermelha e da detecção da radiação refletida por um objeto presente no campo de sensoriamento (Allelco, 2024).

Quando um objeto intercepta ou reflete o feixe infravermelho, o sinal recebido pelo fototransistor interno é processado, resultando em uma saída digital ou analógica interpretável por um microcontrolador. Devido ao seu baixo custo, tamanho reduzido e facilidade de integração, sensores infravermelhos são frequentemente empregados em sistemas de automação industrial para tarefas de contagem e detecção de presença.

Outro tipo a ser analisado é o sensor de pressão hidrostática. Essa medição de nível de líquidos em reservatórios pode ser realizada por meio da medição da pressão hidrostática exercida pela coluna de fluido. Sensores de pressão industriais utilizam, em geral, um diafragma sensível acoplado a elementos piezoresistivos, cuja resistência varia conforme a deformação causada pela pressão (Marques, 2020).

A partir da pressão medida, é possível calcular a altura da coluna de líquido com base no Teorema de Stevin. Este teorema descreve a variação da pressão hidrostática em um fluido em repouso, estabelecendo que a diferença de pressão entre dois pontos é proporcional à densidade do fluido, à aceleração da gravidade e à diferença de altura entre esses pontos, conforme a relação $P = \rho \cdot g \cdot h$. Esse comportamento ocorre devido ao peso da coluna de líquido situada acima do ponto considerado, fazendo com que a pressão aumente linearmente com a profundidade.

O princípio é amplamente aplicado na engenharia para a determinação indireta do nível de líquidos em reservatórios por meio da medição da pressão, desde que o fluido seja homogêneo e incompressível (Marques, 2018). Como o objetivo do projeto é utilizar o citado teorema para medir o volume de água, as propriedades deste líquido se adequam aos requisitos materiais para validar o uso dessa relação.

Sensores de pressão com interface RS485 são amplamente utilizados em ambientes industriais devido à sua precisão, estabilidade e facilidade de integração com sistemas de automação e plataformas IoT, permitindo o monitoramento contínuo e confiável do nível de reservatórios de água.

2.4 Plataforma de visualização de dados

O Home Assistant é uma plataforma de código aberto amplamente utilizada em aplicações de automação e IoT, permitindo a integração de dispositivos de diferentes fabricantes e protocolos (HOME ASSISTANT, 2025). Por meio da integração com o

protocolo MQTT, o Home Assistant pode receber dados publicados por dispositivos embarcados e tratá-los como entidades nativas do sistema.

Essa abordagem possibilita não apenas a visualização em tempo real, mas também o armazenamento histórico das informações, a criação de dashboards interativos e a implementação de automação baseada em regras e condições. Dessa forma, a utilização de plataformas de supervisão contribui para a centralização das informações, facilita o acompanhamento operacional e fornece suporte à tomada de decisão, tornando-se um componente essencial em sistemas IoT aplicados à automação industrial.

3 METODOLOGIA

3.1 Levantamento de Requisitos

Antes da implementação prática do sistema, foram realizadas entrevistas com os responsáveis pelo processo produtivo da empresa, com o objetivo de compreender os principais desafios enfrentados, as necessidades operacionais e as soluções tecnológicas esperadas. Este período de coleta de informações acerca dos desafios da empresa explicitou que havia uma demanda pelo monitoramento automatizado das linhas de produção e do nível dos reservatórios de água. Nesse sentido, o trabalho gasto para realizar as contagens e verificar manualmente o nível dos reservatórios, os quais se encontram em uma estrutura elevada, prejudica a produtividade dos funcionários que desempenham estas funções e poderia ser mitigado com acesso a um sistema automatizado e com acesso em toda a planta fabril.

A partir desse levantamento inicial, foram pesquisados os materiais, sensores e tecnologias mais adequados para atender aos requisitos identificados, além de haver uma preocupação em implementar o sistema de forma paralela à linha de produção existente na fábrica. Para a questão da linha de produção, a contagem deveria ser feita por meio de um sensor que identificasse os produtos finalizados em um local específico da linha e enviasse essas informações para uma plataforma online de fácil visualização. Sobre a localização do sensor, foi identificado que o local mais propício ao sensoriamento para corresponder aos valores reais seria na esteira anterior aos caminhões de transporte, para que apenas os produtos finalizados sejam contabilizados.

Outro fator a ser analisado foi a presença de um *access point* nesta área, que poderia ser utilizado para replicar a rede Wi-Fi dedicada à conexão do sistema com a internet, apesar de que testes deveriam ser feitos com o sistema pronto para verificar a interferência

eletromagnética das máquinas à conexão do microcontrolador com a plataforma online proposta. Por fim, a escolha pelo sensor infravermelho foi feita com base nas especificações técnicas e devido a empresa já trabalhar com sensores dessa natureza na fábrica.

Em seguida, analisando a questão dos reservatórios, certos obstáculos geraram desafios às escolhas de estratégias na arquitetura. Principalmente, a necessidade de um sensoriamento que consiga coletar o nível dos reservatórios sem ter risco de contato direto com a água, devido ao risco de contaminação.

Tendo em vista que essas informações coletadas necessitam de uma unidade de processamento integrada, a escolha pelo microcontrolador Esp32 se deu devido à sua robustez, versatilidade e documentação ampla, adequando-se ao escopo do projeto para ser a unidade a processar e transmitir os dados para a internet. Além disso, segundo as informações coletadas juntamente com os operadores da empresa, a principal requisição é a visualização das informações de forma acessível, então após analisar alternativas para isso, optou-se por utilizar o Home Assistant, por ter uma grande capacidade de customização a fim de atender os requisitos especificados do projeto e ter uma boa integração com os hardwares trabalhados.

Esses componentes passaram por testes preliminares, incluindo testes de bancada, visando validar seu funcionamento, confiabilidade e compatibilidade com o ambiente industrial antes da instalação definitiva em campo. Portanto, o sistema proposto é baseado em uma arquitetura de Internet das Coisas (IoT) e automação, com o objetivo de monitorar os tanques de armazenamento de água e realizar a contagem automática dos garrafões envasados, integrando sensores, dispositivos embarcados e uma plataforma de supervisão e controle, que foram descritos a seguir.

3.2 Monitoramento dos reservatórios de água

Antes da definição da solução adotada para o monitoramento do nível de água nos reservatórios, foram estudadas e avaliadas diferentes possibilidades de sensores capazes de atender às necessidades do projeto. Inicialmente, considerou-se a utilização de sensores ultrassônicos, por serem amplamente empregados em medições de nível sem contato direto com o fluido. No entanto, essa alternativa foi descartada devido à inviabilidade de instalação destes sensores na parte superior dos reservatórios, uma vez que tal solução poderia representar riscos de contaminação da água, além do desgaste dos componentes em função da presença de ozônio no ambiente.

Adicionalmente, durante a fase de pesquisa, não foram encontrados sensores ultrassônicos que atendessem simultaneamente aos requisitos técnicos do sistema, como a necessidade de um feixe com ângulo suficientemente estreito para evitar interferências das paredes internas do tanque e, ao mesmo tempo, com alcance adequado para medir níveis de até 6,1 m de altura. Diante dessas limitações, optou-se pela utilização de sensores de pressão, que apresentaram melhor compatibilidade com o ambiente industrial e com as características físicas dos reservatórios, além de já existir um ponto de instalação apropriado para eles nos tanques, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Encaixe do sensor de pressão



Fonte: Autoria própria (2026).

Um dos desafios enfrentados nessa etapa foi a compatibilidade mecânica do sensor com a conexão existente nos reservatórios, que possuía rosca de 1/2 polegada. Após um longo período de pesquisa, foi possível encontrar um modelo de sensor de pressão compatível com essa especificação, viabilizando sua instalação sem a necessidade de adaptações estruturais no tanque.

Definido o uso de sensores de pressão, foram avaliadas duas alternativas de comunicação: sensores com saída de corrente no padrão industrial de 4 a 20 mA e sensores com comunicação digital via RS485. Ambos os modelos foram adquiridos e submetidos a testes de bancada, nos quais apresentaram funcionamento adequado. No entanto, considerando a altura dos reservatórios e as distâncias envolvidas na transmissão dos dados, segundo indica a Figura 2, optou-se pela utilização do sensor com interface RS485, uma vez que esse padrão apresenta maior imunidade a ruídos e melhor desempenho em transmissões a longas distâncias, reduzindo a probabilidade de erros de comunicação.

Figura 2 - Distância dos tanques para a sala dos ESPs



Fonte: Autoria própria (2026).

Além disso, o protocolo RS485, associado ao Modbus, possibilita a leitura de múltiplos sensores por meio de endereçamento em um único microcontrolador. Apesar dessa possibilidade, decidiu-se pela utilização de um microcontrolador ESP dedicado para cada sensor, de acordo com a Figura 3, visando simplificar a aplicação, facilitar a manutenção e aumentar a robustez do sistema. Dessa forma, caso ocorra uma falha em um dos dispositivos, apenas o sensor correspondente é afetado, permitindo a identificação mais rápida do problema e evitando impactos no restante do sistema.

Figura 3 - Quadro elétrico com os três microcontroladores



Fonte: Autoria própria (2026).

Após a definição da arquitetura do sistema, conforme exemplifica a Figura 4, foram desenvolvidos os códigos, realizadas as instalações em campo e executados testes de funcionamento, os quais indicaram o correto desempenho da solução proposta. Ressalta-se, contudo, que, em função do tempo necessário para a aquisição e entrega dos sensores, esses testes puderam ser realizados apenas nos meses finais do programa. Dessa forma, não foi possível dedicar um período específico para o esvaziamento completo dos reservatórios, o que permitiria a realização de calibrações mais detalhadas e a validação experimental completa em diferentes níveis de operação.

Figura 4 - Diagrama da arquitetura de comunicação dos sensores de pressão



Fonte: Autoria própria (2026).

Ainda assim, a determinação do nível de água por meio da pressão hidrostática é amplamente fundamentada por modelos físicos consolidados, sendo possível prever o nível do tanque de forma confiável a partir das equações matemáticas que relacionam pressão, altura da coluna de água e geometria do reservatório. Os valores obtidos pelo sistema durante os testes apresentaram-se dentro das faixas esperadas, estando de acordo com a verificação empírica realizada pelo gerente da empresa, que avaliou o nível de água por meio do tato, observando a região do tanque com menor temperatura externa, o que indica a altura aproximada da coluna de água.

Os sensores de pressão instalados realizam a medição contínua do nível do líquido e enviam os dados coletados para a rede IoT por meio do protocolo MQTT, permitindo o acompanhamento em tempo próximo ao real do volume disponível em cada tanque. Com base nos valores obtidos, o sistema possibilita a visualização detalhada da variação do nível de água ao longo do tempo, evidenciando os períodos de enchimento e esvaziamento dos reservatórios. Os dados são transmitidos para a nuvem sempre que a variação de volume

ultrapassa 50 L ou em intervalos regulares de 5 minutos, garantindo atualização adequada e consistente das informações.

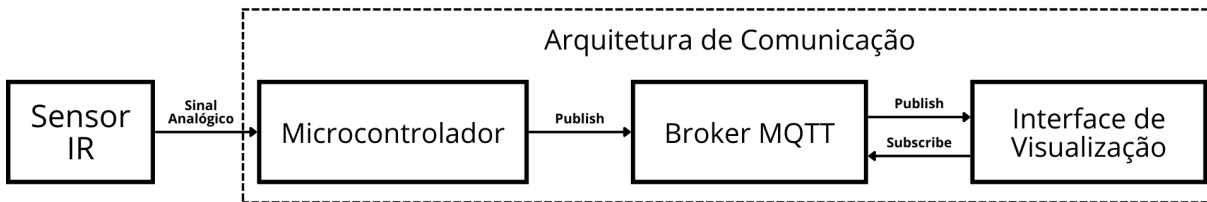
Segundo Rodrigues (2024), a média móvel é uma técnica estatística amplamente utilizada na análise de séries temporais, com o objetivo de suavizar flutuações e identificar tendências nos dados ao longo do tempo, sendo calculada a partir da média aritmética de um conjunto de valores atualizados periodicamente. Neste projeto, a média móvel foi implementada por meio de um buffer circular com 10 amostras, no qual cada nova amostra é armazenada sequencialmente. Enquanto o buffer não está completamente preenchido, o cálculo da média considera apenas as amostras disponíveis; após o preenchimento, as amostras mais antigas são sobrescritas pelas mais recentes, mantendo-se sempre 10 valores no cálculo. Essa abordagem permitiu a redução de pequenas oscilações residuais do sinal, sem comprometer a representação das variações reais do processo, resultando em leituras mais estáveis e confiáveis para a transmissão dos dados.

Por fim, o volume de água presente em cada tanque é determinado a partir da pressão hidrostática medida, a qual é convertida em altura da coluna de água utilizando o Teorema de Stevin, considerando também a altura física de instalação do sensor. O volume é então calculado com base na geometria cilíndrica do reservatório. O sensor utilizado apresenta resolução de 0,1 kPa, o que corresponde a aproximadamente 1 cm de variação na altura da coluna d'água. Para o tanque em estudo, essa variação representa cerca de 75 litros por incremento mínimo de leitura, garantindo uma estimativa contínua, confiável e adequada do volume disponível. Dessa forma, o sistema assegura um monitoramento preciso da disponibilidade hídrica, contribuindo diretamente para o fornecimento contínuo e seguro às linhas de produção.

3.3 Monitoramento da Linha de Produção

Paralelamente, o processo de envase é monitorado por meio de fotosensores, responsáveis por contabilizar cada garrafão pronto para comercialização. As informações coletadas são transmitidas continuamente ao sistema via MQTT, garantindo o registro preciso da quantidade de unidades envasadas por dia e por linha de produção. Tendo como base a arquitetura vista na Figura 5.

Figura 5 - Modelo de Arquitetura de Sistema: Sensoriamento, Processamento e Visualização



Fonte: Autoria própria (2026).

O sensor infravermelho adotado para a detecção e contagem dos garrafões foi o modelo E18-D80NK com saída NPN, escolha motivada principalmente pela sua utilização prévia na linha de produção da empresa, conforme a Figura 6. A adoção de um sensor já consolidado no ambiente industrial permitiu reduzir incertezas associadas à adaptação do sistema, uma vez que a equipe técnica já havia validado seu desempenho quanto à baixa interferência da luminosidade ambiente e à confiabilidade na contagem, apresentando índices mínimos de erro em aplicações reais. Dessa forma, optou-se por manter o mesmo modelo, priorizando a continuidade operacional e a compatibilidade com o processo produtivo existente.

O E18-D80NK possui três condutores: alimentação (VCC), referência (GND) e saída de dados. Por se tratar de um sensor com saída NPN do tipo coletor aberto, o sinal de saída permanece em nível lógico alto (HIGH) na ausência de objetos e é conduzido ao nível baixo (LOW) quando ocorre a detecção, característica que foi explorada na lógica de leitura do microcontrolador.

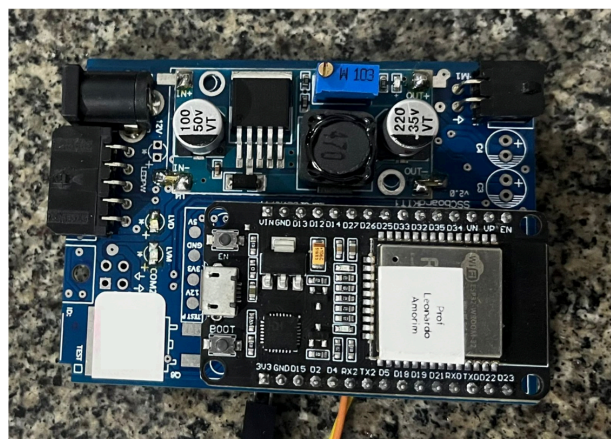
Figura 6 - Sensor Infravermelho



Fonte: Autoria própria (2026).

Durante a implementação do sistema de aquisição, foi desenvolvida uma placa de circuito impresso (PCB) dedicada, conforme a Figura 7, contendo o microcontrolador ESP32 como unidade de processamento. Entretanto, um dos principais contratempos identificados esteve relacionado à escolha do pino de entrada para leitura do sinal do sensor. A porta inicialmente disponível para conexão de sensores externos era o GPIO2, que, embora possua funcionalidade de entrada analógica (ADC), também é classificado como um pino de strapping do ESP32.

Figura 7: Vista superior da PCB desenvolvida com o microcontrolador

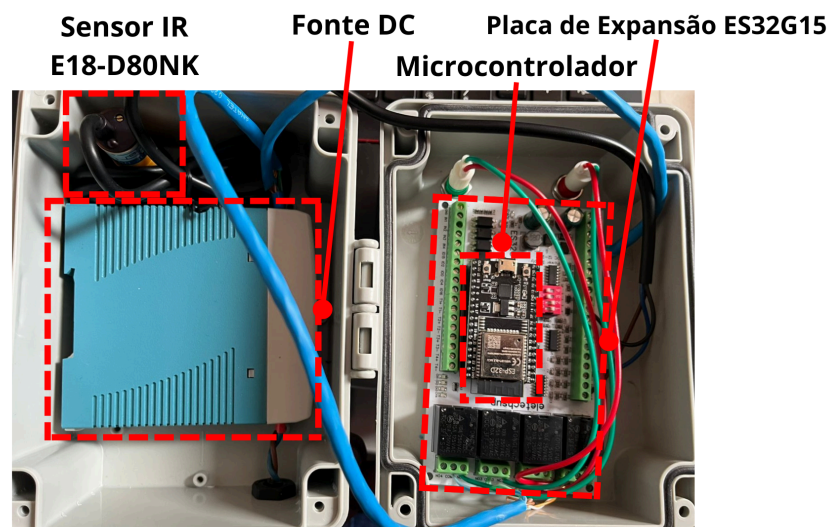


Fonte: Autoria Própria (2026).

Os pinos de strapping são lidos durante o processo de inicialização do microcontrolador (reset ou power-on) para definição do modo de boot. O uso do GPIO2 para leitura do sensor introduziu conflitos durante a inicialização do sistema, uma vez que o estado lógico imposto pelo sensor poderia interferir diretamente no processo de boot, ocasionando falhas de inicialização ou comportamento imprevisível do sistema. Além disso, observou-se instabilidade e inconsistência nas leituras analógicas, atribuídas tanto às características do ADC do ESP32 quanto ao conflito funcional do pino durante o estágio de boot.

Diante das limitações identificadas na PCB originalmente desenvolvida, optou-se pela utilização de uma placa de expansão ES32G15, visto na Figura 8, a qual possibilita a leitura de sinais na faixa de 0–10 V, além de disponibilizar portas de entrada que não apresentam conflito com o processo de inicialização (boot) do ESP32. Essa escolha ampliou a compatibilidade elétrica com o sensor infravermelho, visto que a placa desenvolvida permitia apenas leituras de até 3,3 V, restringindo o condicionamento adequado do sinal. Inicialmente, a porta foi configurada como entrada digital, abordagem que apresenta como principais benefícios resposta rápida e facilidade de interpretação do estado lógico do sensor, sendo teoricamente adequada para aplicações de detecção binária.

Figura 8- Protótipo de Hardware



Fonte: A autoria própria (2026).

Após a realização do primeiro teste de qualidade utilizando a leitura digital, observou-se um erro aproximado de 46% na contagem dos garrafões, indicando que a abordagem adotada não atendia aos requisitos de confiabilidade do processo produtivo. Esse

resultado evidenciou a necessidade de uma análise mais aprofundada do comportamento elétrico do sinal fornecido pelo sensor e de sua interpretação pelo microcontrolador.

Verificou-se que o bloco regulador de tensão da placa influenciava diretamente o nível de tensão percebido pela porta de entrada, fazendo com que, em determinados momentos, o valor lido não fosse suficientemente alto para desbloquear a lógica de contagem implementada no software. Como a estratégia adotada previa a contabilização de apenas um garrafão por passagem (utilizando uma variável de bloqueio para evitar múltiplos incrementos enquanto o objeto permanecesse diante do sensor), a atenuação do sinal resultava na não contabilização de alguns eventos. Para contornar essa limitação, a leitura da porta de entrada foi alterada de digital para analógica, permitindo a definição de um limiar lógico ajustável, o que proporcionou maior precisão na distinção entre os estados de presença e ausência do objeto e, conseqüentemente, maior confiabilidade no processo de contagem.

Por fim, após a alteração da estratégia de leitura para o modo analógico e o ajuste do limiar lógico de detecção, foram realizados novos testes de qualidade em condições reais de operação na linha de produção. Os resultados obtidos indicaram uma melhora significativa na confiabilidade do sistema, com a redução do erro de contagem para aproximadamente 4%, valor considerado aceitável para a aplicação proposta. Dessa forma, a solução implementada mostrou-se adequada ao ambiente industrial, conciliando estabilidade operacional, precisão na detecção e compatibilidade com a infraestrutura existente.

3.4 Visualização

Todos os dados provenientes dos sensores são integrados a uma plataforma de supervisão e controle, onde são armazenados e exibidos. A plataforma disponibiliza um painel de monitoramento com indicadores, histórico de dados e gráficos de consumo e produtividade, possibilitando a visualização do estado do sistema em tempo real.

Para garantir a segurança no acesso à plataforma de supervisão, foi configurado o uso do protocolo HTTPS no Home Assistant, utilizando certificados digitais. Essa configuração assegura a criptografia das comunicações entre os usuários e a plataforma, protegendo o acesso aos dados e às informações do sistema.

Para a implementação da camada de nuvem, monitoramento e automação do projeto, foi adotada a plataforma Home Assistant (HA), versão 16.2, uma solução open source amplamente utilizada em sistemas de Internet das Coisas (IoT). A plataforma foi escolhida

devido à sua capacidade de integração com diferentes dispositivos industriais, ao suporte a múltiplos protocolos de comunicação e à possibilidade de criação de dashboards.

O Home Assistant foi implantado em ambiente virtualizado por meio do Proxmox VE, na versão 9.0.3, o que proporcionou maior controle sobre os recursos computacionais, isolamento do sistema, facilidade de gerenciamento e escalabilidade.

A integração dos dispositivos embarcados ao sistema foi realizada por meio do protocolo MQTT, adotado por sua leveza, baixo consumo de banda e eficiência em aplicações industriais de monitoramento em tempo real. O Home Assistant atuou como assinante (subscriber) dos tópicos MQTT, recebendo continuamente os dados enviados pelos sensores conectados ao sistema.

Os dados coletados foram processados e organizados no HA, considerando as características específicas de cada sensor integrado ao sistema.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Desempenho geral do sistema

O desempenho geral do sistema apresentou resultados compatíveis com os objetivos propostos no projeto. A resposta em tempo próximo ao real manteve-se dentro dos parâmetros definidos, permitindo o monitoramento contínuo das variáveis analisadas. A conexão Wi-Fi demonstrou estabilidade e boa taxa de upload, enquanto o broker MQTT, hospedado em servidor local, mostrou-se fundamental para a redução da latência e para a confiabilidade da comunicação com o Home Assistant.

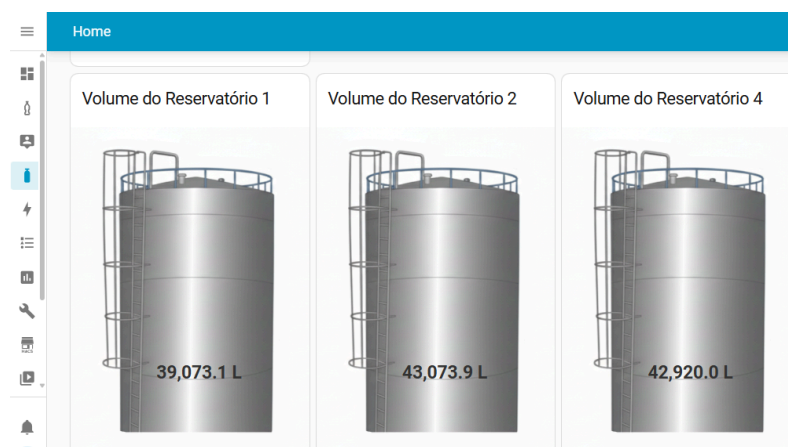
As variações das leituras foram exibidas no painel em tempo real, o que evidencia a eficiência do fluxo de comunicação, desde a aquisição dos dados pelos sensores até a sua visualização no dashboard. Esse comportamento confirma a adequação da arquitetura escolhida para aplicações de monitoramento remoto.

4.2 Interpretação dos resultados e comparação entre o esperado e o alcançado

As primeiras leituras obtidas pelo sensor de pressão apresentaram um erro inferior a 10% quando comparadas aos valores esperados. Observou-se a indicação aproximada de 45.000 L, enquanto o valor estimado real era de cerca de 42.000 L. Essa diferença foi considerada aceitável para a aplicação proposta e foi validada por um operador da empresa. Além disso, após o ajuste da área da base do reservatório no cálculo do volume, essa discrepância foi ainda mais reduzida, aumentando a confiabilidade do sistema.

A Figura 9 apresenta os resultados obtidos no Home Assistant (HA) no dia 22/01/2026, após a instalação de todos os sensores de pressão e a programação adequada dos ESPs. Os dados exibidos indicam que os sensores operaram dentro da faixa esperada, considerando que os tanques monitorados possuem capacidade máxima de até 50.000 L. Além disso, a Figura 10 apresenta os gráficos de histórico gerados no Home Assistant, os quais permitem acompanhar a evolução do nível de água ao longo do tempo, possibilitando a verificação de que os tanques mantiveram volumes adequados às diferentes condições de operação.

Figura 9 - Aba dos reservatórios no Home Assistant



Fonte: Autoria própria (2026).

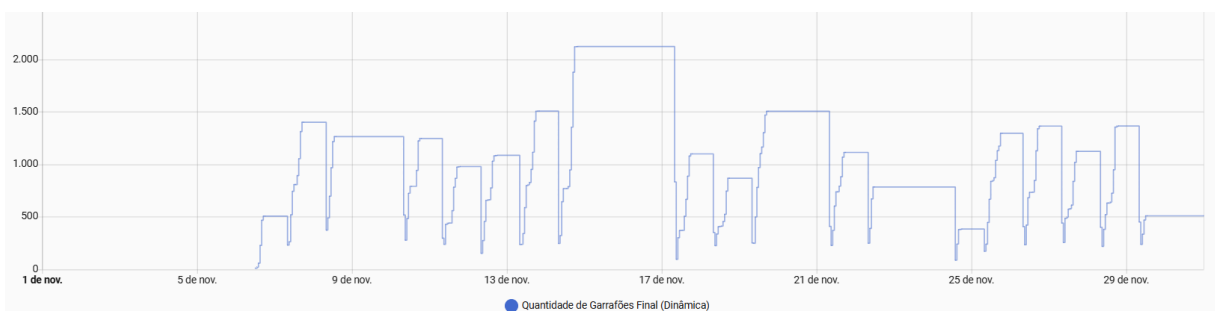
Figura 10 - Gráficos do volume a cada hora nos reservatórios



Fonte: Autoria própria (2026).

De forma semelhante, após a correção do problema relacionado à contagem digital, os dados obtidos pelo sensor infravermelho mostraram-se consistentes quando comparados à contagem manual realizada pelos funcionários. Ao longo dos testes realizados, verificou-se que a leitura analógica apresentou maior precisão e estabilidade em comparação à leitura digital, especialmente em condições reais de operação. A Figura 11 apresenta a visualização dos dados de contagem no dashboard, referentes à avaliação conduzida na linha de produção, nos quais a margem de erro variou entre 3% e 5%.

Figura 11 - Teste de contagem dos garrafões



Fonte: Autoria própria (2026).

4.3 Limitações encontradas

Uma das limitações identificadas esteve relacionada ao comportamento do sensor infravermelho. A transparência dos garrafões interferiu no nível lógico interpretado pelo microcontrolador, dificultando a definição de um limiar confiável para detecção no ambiente real. Esse problema foi solucionado por meio da utilização da leitura analógica no ESP32, o que possibilitou identificar com maior precisão o ponto exato de mudança de estado do sensor.

Outra limitação relevante refere-se à medição do volume de água consumido, ou seja, à quantidade de água que efetivamente sai do tanque. Embora seja possível conhecer o volume total armazenado, não é viável calcular o consumo apenas a partir da variação do nível, pois pode ocorrer entrada e saída simultânea de água. Nessa situação, o volume pode permanecer constante, mesmo havendo consumo. Para contornar esse problema, estão sendo consideradas duas soluções: a utilização de um sensor de vazão ou a integração futura com dados provenientes de uma aplicação de telemetria nos poços.

4.4 Impacto e aplicabilidade da solução

Os resultados obtidos ao longo dos testes indicam que a solução desenvolvida atende de forma adequada às necessidades de monitoramento da empresa, fornecendo informações relevantes tanto para o acompanhamento do nível de água no reservatório quanto para a contagem de garrações por meio do sensor infravermelho. A integração desses dados possibilita a prevenção de situações críticas, como o atingimento do volume mínimo do reservatório, além de contribuir para o controle do processo produtivo. O histórico de dados registrado ao longo do período de testes também se mostrou útil para a análise do comportamento do sistema ao longo do tempo, permitindo a identificação de padrões de consumo e operação.

Apesar do bom desempenho observado, é necessária a realização contínua de testes e calibrações, a fim de manter a precisão das leituras e ampliar a robustez do sistema em condições reais de operação. Adicionalmente, a futura implementação de mecanismos para medição direta do consumo de água, como sensores de vazão ou integração com sistemas de telemetria, permitirá uma análise mais completa do processo, possibilitando a identificação de eventuais desperdícios e contribuindo para a otimização do uso dos recursos hídricos e para uma tomada de decisão mais assertiva por parte da empresa.

5 CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise do sistema desenvolvido demonstra que os principais objetivos do projeto foram alcançados, com a implementação e integração bem-sucedida dos módulos de hardware a uma arquitetura IoT. O sistema mostra-se eficaz no monitoramento do nível de água dos reservatórios e na contagem de garrações envasados, com visualização das informações em dashboard por meio do Home Assistant, atendendo às necessidades operacionais propostas.

Apesar do êxito na medição do volume de água armazenado nos reservatórios, a medição do consumo de água, correspondente à quantidade efetivamente retirada dos tanques, não foi plenamente atendida, em razão da ausência de instrumentos específicos para a medição de vazão na saída.

Dessa forma, o trabalho contribui de maneira prática para o monitoramento do processo produtivo, oferecendo uma solução funcional e aplicável ao contexto industrial da empresa. Como perspectiva de continuidade, destaca-se a incorporação de mecanismos de medição de fluxo de água, a utilização de sensores de cor para a confirmação da leitura dos

garrações e o acionamento remoto de atuadores de válvulas ligadas aos tanques por meio de botões virtuais no Home Assistant, visando ampliar a capacidade de análise e apoiar, de forma mais precisa, a tomada de decisões operacionais.

Assim, o projeto apresenta potencial para evolução e expansão, podendo ser adaptado a outras etapas do processo industrial, fortalecendo a automação e a eficiência operacional da Água Mineral Cristalina de Natal.

REFERÊNCIAS

ALLELCO. **A complete Guide to the E18-D80NK Adjustable IR Sensor**. 2024.

Disponível em:

<https://www.allelcoelec.com/blog/A-Complete-Guide-to-the-E18-D80NK-Adjustable-IR-Sensor.html?srsltid=AfmBOooknlJCXleGzfZB7qy2zh3XMbnQobrXoFBOBNIVNOEQhcsGdm3>. Acesso em: 13 de janeiro de 2026.

DAWOUD, Dawoud Shenouda; DAWOUD, Peter. **Serial Communication Protocols and Standards**. 2020. Acesso em: 12 de janeiro de 2026.

HILLAR, Gastón. **MQTT Essentials - A Lightweight IoT Protocol**. 2017. Acesso em: 12 de janeiro de 2026.

MARQUES, Gil da Costa. **Mecânica dos fluidos: Lei de Stevin e princípio de Pascal**. 2018.

Material didático, s.d. Disponível em:

https://efisica2.if.usp.br/pluginfile.php/7024/mod_resource/content/1/lei%20de%20stevin.pdf. Acesso em: 13 de janeiro de 2026.

MARQUES, S. **Como funciona um transmissor de pressão?** 2020. WIKA blog. Disponível

em: <https://blog.wika.com/pt/know-how/como-funciona-um-transmissor-de-pressao/>.

Acesso em: 13 de janeiro de 2026.

RODRIGUES, N. **Média Móvel: o que é e como calcular?** 2024. Disponível em:

<https://cmcapital.com.br/blog/media-movel/>. Acesso em: 28 de janeiro de 2026.

ROSE, Karen; ELDRIDGE, Scott; CHAPIN, Lyman. **The Internet of Things: An**

Overview Understanding the Issues and Challenges of a More Connected World. Internet

Society. 2015. Acesso em: 12 de janeiro de 2026.