SISTEMA INTELIGENTE DE MONITORAMENTO DO CONSUMO DE ÁGUA COM IOT: ESTUDO DE CASO PARA MONITORAMENTO, ANÁLISE E APOIO À DECISÃO EM AMBIENTE RESIDENCIAL

Felipe Antunes Alves[(1)]
Estudante do curso de Engenharia Mecânica - Faculdade Multivix - Vitória, ES.
Caio Frizzera Rossoni[(2)]
Estudante do curso de Engenharia da Computação - Faculdade Multivix - Vitória, ES.

Endereço[(1)]**:** Rua José Anchieta Fontana, 320 - Jardim Camburi - Vitória - ES - CEP: 29090-400 - Brasil - Tel: +55 (27) 99523-5712 - e-mail: felipe.fmantunes@gmail.com.

RESUMO

A gestão eficiente do consumo de água constitui um desafio relevante para o setor de saneamento, especialmente diante da necessidade de redução de perdas, identificação de vazamentos e ampliação da visibilidade operacional sobre o uso do recurso. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um aplicativo relacionado à aplicação inteligente de monitoramento hídrico integrada a uma arquitetura de Internet das Coisas (IoT). A solução contempla autenticação de usuários, cadastro de dispositivos, visualização operacional, alertas, relatórios, *backend serverless*, banco de dados em nuvem e mecanismos de segurança para ingestão de telemetria. A camada digital encontra-se desenvolvida e refatorada em arquitetura organizada por domínio, infraestrutura, aplicação, funcionalidades e componentes de interface, com validação automatizada, controle de acesso e funções de *backend* responsáveis por receber leituras, validar dispositivos e processar comandos. A integração físico-embarcada prevê integração com sensores de fluxo e qualidade da água, bem como a possibilidade futura de atuação automática por meio de válvula solenoide. O estudo evidencia que uma aplicação digital bem estruturada pode transformar medições de consumo em informação operacional para apoio à tomada de decisão e gestão eficiente da água.

PALAVRAS-CHAVE: Consumo de Água, Monitoramento Hídrico, IoT

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para a manutenção da vida, para o desenvolvimento econômico e para a organização das atividades urbanas. Apesar de sua relevância, o acompanhamento do consumo hídrico em ambientes residenciais, prediais e institucionais ainda ocorre, em muitos casos, por meio de leituras periódicas ou pela análise posterior da fatura. Esse modelo limita a capacidade de identificar rapidamente vazamentos, desperdícios e alterações anormais de consumo, fazendo com que a tomada de decisão seja frequentemente tardia e reativa (MACIEL; LEITE; MENEZES, 2020).

No contexto do saneamento, de acordo com Almeida, Lopes Júnior e Araujo (2025), a redução de perdas e a melhoria da eficiência operacional dependem não apenas da medição do volume consumido, mas também da capacidade de transformar essas medições em informação útil. Leituras isoladas possuem valor limitado quando não são armazenadas, comparadas e interpretadas ao longo do tempo, por esse motivo, sistemas digitais integrados a dispositivos de IoT tornam-se relevantes, pois permitem conectar a camada física de medição à camada computacional de análise, visualização e alerta.

O avanço de microcontroladores com conectividade sem fio, sensores de baixo custo, plataformas em nuvem e aplicações web possibilita a criação de soluções capazes de ampliar a visibilidade sobre o consumo de água. Nesse tipo de arquitetura, o sensor identifica o comportamento físico do sistema hidráulico, o módulo embarcado processa e transmite as leituras, o *backend* recebe e valida os dados, o banco de dados preserva o histórico e a aplicação apresenta as informações ao usuário. Essa cadeia permite que a medição deixe de ser apenas um registro pontual e passe a compor um processo contínuo de monitoramento (NOLÊTO, 2021).

No âmbito da instrumentação, Balbinot e Brusamarello (2019) definem que a precisão no monitoramento está vinculada a estruturação correta no processo de medição, iniciando-se na transformação do fenômeno físico

em sinais elétricos processáveis, a exemplo do caso de medição de fluxo, essa envolve a conversão de energia cinética do fluido em pulsos digitais. Dessa forma, em consonância com Cabral *et al*. (2025), o tratamento desses sinais gerados são pilares para a consistência dos dados e redução de certezas, além da demonstração de viabilidade da utilização de algoritmos de processamento com capacidade de identificação de padrões de consumo para geração de alertas preditivos.

Não obstante, essa transição para uma gestão hídrica eficaz passa por entraves relacionadas à precisão da coleta e tratamento de dados, além de problemas de interconectividade na operação de dispositivos de *hardware*. Diferentemente dos métodos de medição convencionais que dependem diretamente de leituras manuais, a integração com sistemas embarcados e IoT permitem a transformação de dados brutos para analíticos, auxiliando assim na melhor tomada de decisão (FUENTES; MAURICIO, 2020).

Desse modo, este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma aplicação inteligente para monitoramento do consumo de água, estruturada como estudo de caso de uma solução digital integrada a dispositivos IoT, aplicada ao ambiente residencial. Diferentemente de uma proposta apenas conceitual, o sistema já possui uma camada de software desenvolvida, organizada em módulos de autenticação, cadastro de dispositivos, visualização operacional, alertas, relatórios, *backend serverless* e políticas de segurança. A aplicação foi refatorada em camadas para melhorar manutenibilidade, rastreabilidade, testabilidade e isolamento das responsabilidades do sistema.

No que se refere ao aspecto físico do projeto, integra-se sensores de fluxo e de qualidade da água como pH, temperatura, além da presença de cálculos complementares baseados nas medições base, interconectados por meio da utilização de microcontrolador programável com conexão via *Wi-Fi*. Do mesmo modo, a camada de *Business Intelligence* (BI), destinada à análise de dados, apresenta os dados de forma gráfica, com presença das estratificações dos diferentes parâmetros medidos, além de identificação de comparações percentuais entre essas granularidades.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Apresentar o desenvolvimento de uma aplicação inteligente para monitoramento do consumo de água, integrada a uma arquitetura IoT composta por sensores e dispositivo embarcado, backend em nuvem, banco de dados e interface digital de acompanhamento.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICO

- Descrever a arquitetura geral da aplicação;
- Explicar o fluxo lógico de dados entre dispositivos, *backend*, banco de dados e interface;
- Apresentar as funcionalidades digitais e arquitetura física desenvolvidas;
- Discutir a lógica de tomada de decisão baseada em leituras de consumo;
- Apresentar a camada de BI em formato de relatório;
- Evidenciar os mecanismos de segurança, autenticação e controle de acesso.

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho foi organizada como um estudo de caso aplicado ao desenvolvimento de uma solução digital para monitoramento hídrico. Dessa maneira, o projeto foi realizado seguindo os procedimentos abaixo.

1. Análise de referencial teórico existente sobre o tema;
2. Seleção de dispositivos e componentes além da integração física;
3. Desenvolvimento da arquitetura e aplicação digital;
4. Desenvolvimento da Camada de BI.

3.1 ARQUITETURA FÍSICA

No que cerne a parte física do projeto, em suma, envolveu a presença primariamente do sensor de fluxo e microcontrolador, sensores de temperatura e qualidade da água, além de possibilidade futura de atuação automática por meio de válvula solenóide.

A literatura recente aponta para relevância da integração entre monitoramento de consumo e qualidade da água, uma vez que amplia-se o valor analítico e operacional dessas soluções. Contudo, para este desenvolvimento também exige-se maior garantia no aspecto da calibração e consequente da confiabilidade dos valores medidos perante as limitações intrínsecas dos sensores utilizados (DE CAMARGO XAVIER *et al.*, 2022).

A partir disso, apresenta-se abaixo, na Figura 1, o diagrama dos componentes utilizados e suas respectivas conexões com o núcleo central de envio de dados que é o microcontrolador, além dos sensores utilizados, desde o sensor de fluxo, temperatura e pH até o servidor e camada de BI para desenvolvimento de relatórios.

Figura 1 - Diagrama Esquemático da Arquitetura Física



Fonte: Autoria própria (2026)

De forma específica, o sensor de fluxo possuí, em suma, a função da medição da vazão volumétrica, sendo baseado no efeito Hall, conforme consta em manual da DATAQ Instruments (2020), que consiste na exposição da corrente elétrica a um campo magnético, resultando em pulsos nas quais podem ser convertidos em vazão e volume com base na equação 1.

$$\mathbf{Q = n_P/(c \cdot 60)}$$ equação (1)

Nessa equação, o Q é definido como vazão em L/s, o n_P é o número de pulsos em Hz e a constante adimensional de calibração c, definida por manual como 7,5 (DATAQ INSTRUMENTS, 2020). Além disso, também é importante salientar que o sensor selecionado possuí precisão de ± 3% na sua medição e com durabilidade operacional prevista de 300 mil rotações, o que resulta em aproximadamente 666 L, calculada em função da rotação por litro.

Além do mais, no âmbito do processamento de dados, desenvolveu-se código em linguagem de programação própria, no Arduino IDE, nesse aspecto para fins de ganhos em desempenho operacional do dispositivo,

readequou-se o equacionamento base do ponto de vista de fluxo, fora da estrutura de repetição principal do código, utilizando como base a vazão por pulso para posterior adequação dentro do *loop*.

Não obstante, considerou-se a arquitetura física e sensores como um todo, aplicados em diferentes pontos no ambiente residencial, sendo estratificados por região para fins de registro na aplicação digital, bem como para posterior análise na camada de BI, auxiliando na identificação de locais de possíveis vazamentos.

Quanto ao sensor de temperatura, este serviu como forma de métrica de controle de qualidade além de utilização para cálculo de parâmetros secundários como concentração de oxigênio dissolvido na água baseada na equação 2, sendo válida para faixa entre 0 °C e 30 °C que em contexto residencial, torna-se factível essa consideração (VON SPERLING, 1996).

$$C_S = 14{,}625 - 4{,}102 \cdot 10^{-1} \cdot T + 7{,}9910 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 7{,}7774 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 \quad \text{equação (2)}$$

A concentração de oxigênio reduz devido ao aumento de temperatura, ou seja ocorre uma maior agitação entre as moléculas e consequentemente uma menor pressão é exercida por parte dos gases dissolvidos. Sendo um parâmetro importante no aspecto metodológico, principalmente como parâmetro de controle de proliferação de bactérias (VON SPERLING, 1996).

De forma semelhante, o sensor de pH também possuí esse papel de controle de qualidade, na qual o modelo em questão, no aspecto da transmissão de sinal, baseado na conversão do potencial elétrico, em relação a um determinado range, para o pH, baseado na equação 3 abaixo, conhecido como equação de Nernst (HARRIS; LUCY, 2023).

$$pH = 7{,}0 + (2{,}5 - V_{lido})/pH_{slope} \quad \text{equação (3)}$$

O primeiro termo compreende o ponto de partida de pH neutro, enquanto o valor de 2,5 utilizado é definido como tensão de referência em relação ao pH padrão, em função da configuração elétrica do módulo associado ao sensor, podendo ser variado manualmente no próprio módulo a partir de potenciômetro (DFROBOT, 2017). Desse modo se estabelece uma correlação linear entre as variáveis envolvidas, conforme elucidado por Harris e Lucy (2023), funcionando em suma como uma regressão linear.

Outro componente considerado essencial para funcionamento do sistema físico é o microcontrolador, que funciona como núcleo principal de processamento do sistema, conectando *hardware* e rede, sendo sua função dividida em aquisição, na qual ocorre a coleta de sinais analógicos e digitais a partir das conexões físicas externas os sensores envolvidos, além do processamento de dados, mencionado anteriormente, por meio da conversão desses sinais em em variáveis analíticas como vazão e volume. Por fim, ocorre a transmissão via *Wi-Fi* devido a presença de um módulo integrado capaz de enviar as informações processadas previamente para um servidor central e posteriormente para a interface de monitoramento (SHENZHEN DOCTORS OF INTELLIGENCE & TECHNOLOGY, 2015).

3.2 ARQUITETURA DIGITAL

A análise parte do estado atual do sistema, considerando a documentação técnica encaminhada e o pacote de código referente às políticas, funções *Supabase* e estrutura de *backend*. A abordagem metodológica privilegia a descrição da arquitetura, o encadeamento funcional das camadas digitais e a relação entre ingestão de dados, armazenamento, visualização e tomada de decisão.

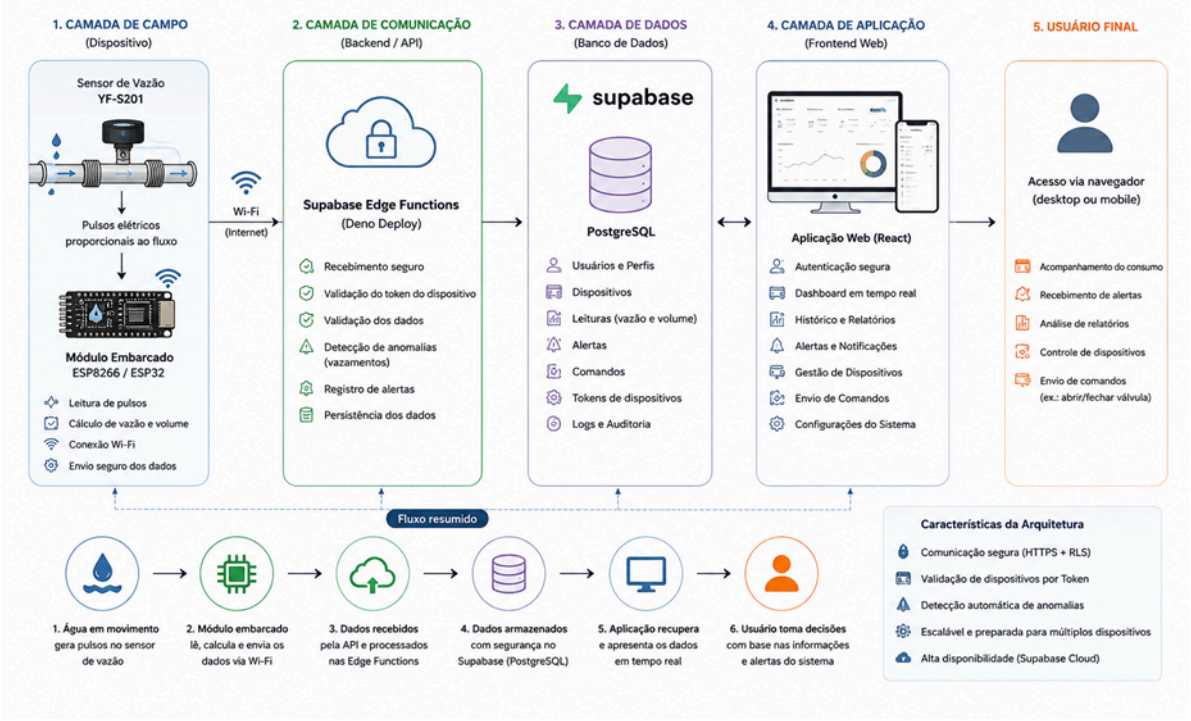
O sistema foi concebido segundo uma lógica de separação de responsabilidades. Na camada de domínio concentram-se funções puras, independentes de React, *Supabase* ou *Browser*, relacionadas a alertas, comandos, dispositivos, leituras, tempo e validação de IP. Essa separação favorece a estabilidade das regras de negócio e impede que decisões essenciais da aplicação fiquem misturadas diretamente à interface visual. Na camada de infraestrutura ficam os pontos de comunicação com o mundo externo, incluindo cliente *Supabase*, funções criptográficas, repositórios de dados e *gateways* para autenticação, dispositivos, leituras, alertas e comandos.

A camada de aplicação é responsável pela orquestração do estado e das consultas assíncronas, reunindo contextos de autenticação, configurações de fluxo, tema e *hooks* de *dashboard* e relatórios. As funcionalidades foram organizadas por vertical, contemplando alertas, autenticação, configurações, *dashboard*, dispositivos e relatórios. A camada de *shell*, por sua vez, atua como moldura transversal da aplicação, reunindo elementos como barra lateral, topo, navegação inferior e tratamento de erros. Essa divisão permite que cada parte do sistema tenha uma responsabilidade clara, reduzindo o acoplamento e facilitando futuras evoluções.

A aplicação digital foi planejada para receber leituras de dispositivos *IoT* por meio de funções *serverless*. O *backend* foi organizado em *Edge Functions*, cada uma com entrada própria, *handler*, validação, repositório e, quando necessário, regras de domínio. Essa estrutura foi aplicada a funções como ingestão de leituras, consulta e confirmação de comandos, envio de comandos a dispositivos e validação de cadastro. O padrão adotado melhora a legibilidade do *backend*, facilita testes e centraliza validações antes da persistência de dados.

A metodologia também contempla mecanismos de segurança. A entrada de telemetria deve ocorrer por funções de *backend*, não por inserções diretas realizadas pela aplicação web. As leituras provenientes de dispositivos são protegidas por *tokens* do dispositivo, validação da origem, controle de taxa e regras de acesso no banco. Já os comandos destinados a atuadores exigem autenticação de usuário e verificação de vínculo entre usuário e dispositivo. Essa combinação reduz o risco de manipulação indevida das leituras ou acionamento não autorizado de comandos. Dessa maneira, segue abaixo arquitetura digital do projeto, contendo cada uma das camadas mencionadas, apresentada na Figura 2.

Figura 2 - Arquitetura Digital Geral do Projeto



Fonte: Autoria própria (2026)

O desenvolvimento da aplicação digital constitui o núcleo já consolidado do estudo de caso. A aplicação foi construída para atuar como interface entre o usuário e a infraestrutura de monitoramento, permitindo que dados de consumo sejam consultados, interpretados e utilizados para apoio à decisão. Em vez de limitar o projeto à leitura de um sensor, a solução estrutura um ambiente completo para autenticação, cadastro de dispositivos, *dashboard*, alertas e relatórios.

A autenticação permite associar usuários a seus respectivos dispositivos e leituras. Essa relação é essencial porque o monitoramento hídrico envolve dados vinculados a residências, unidades consumidoras ou ambientes específicos. Sem controle de acesso, leituras de diferentes usuários poderiam ser expostas indevidamente. Por

isso, a aplicação foi estruturada para carregar sessão, perfil e permissões, mantendo a navegação interna protegida e associando as informações ao contexto correto do usuário.

O cadastro de dispositivos representa outro componente central. Cada ponto de medição precisa estar vinculado a um identificador lógico, que será utilizado para associar as leituras recebidas pelo *backend* ao dispositivo correspondente. Essa modelagem permite que o sistema opere com múltiplos pontos de monitoramento, mantendo rastreabilidade entre dispositivo, usuário, histórico de leituras, alertas e comandos. A geração e validação de *tokens* de dispositivo reforçam essa rastreabilidade, pois a aplicação não depende apenas de um identificador público para aceitar dados de telemetria.

3.3 FLUXO DE DADOS E PROCESSAMENTO DAS INFORMAÇÕES

O fluxo de dados do sistema foi estruturado para conectar a leitura física ao ambiente digital de forma segura e rastreável. Em termos funcionais, o processo inicia-se no dispositivo IoT, que coleta uma leitura física, processa o dado localmente e transmite o registro ao *backend*. A função de ingestão recebe o *payload*, validando sua estrutura, verifica a existência e a situação do dispositivo, valida o *token* enviado e aplica regras de segurança antes de persistir a leitura.

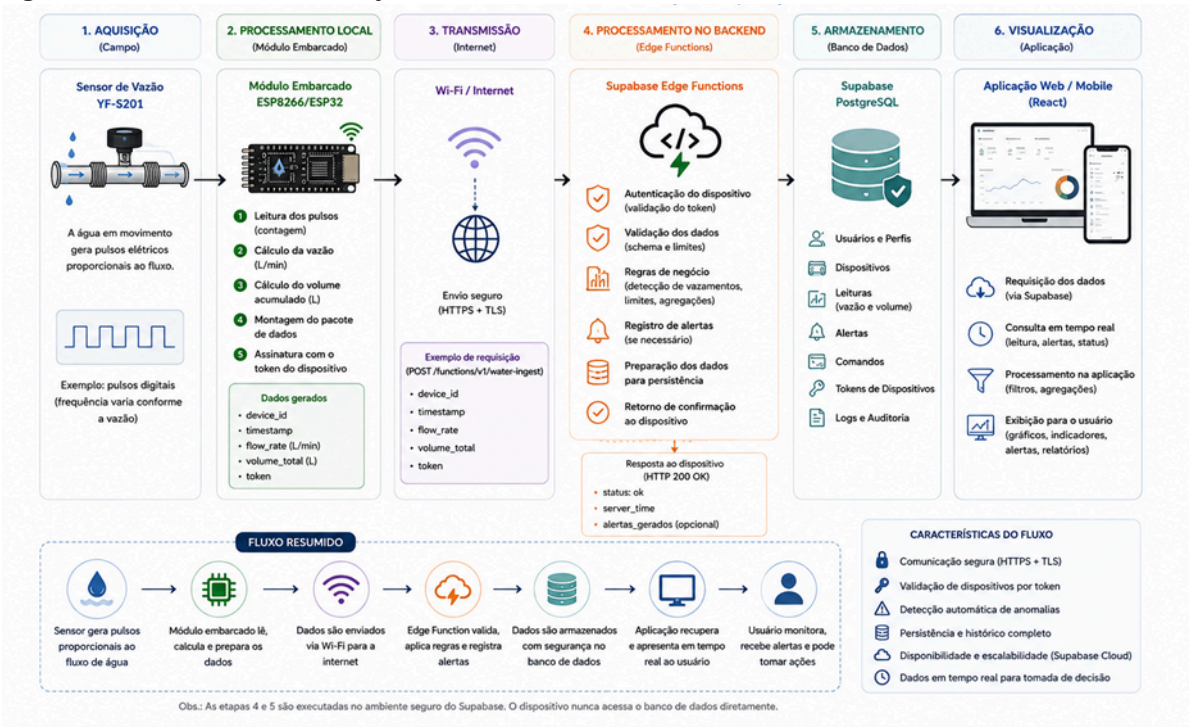
A função de ingestão de água foi organizada para lidar com *payloads* multi-sensores. Ela consolida as leituras recebidas em uma estrutura adequada ao banco, separando a vazão, eventuais informações de bateria e demais parâmetros de qualidade. Essa consolidação permite que o sistema armazene uma linha de leitura associada ao dispositivo e preserve, quando necessário, informações complementares no formato de objeto de qualidade. A solução também considera a importância por meio de identificador de ingestão, evitando duplicidade quando uma mesma leitura é enviada mais de uma vez.

Depois de validado, o registro é persistido no banco de dados e associado ao dispositivo interno correspondente. O dispositivo também tem seu estado atualizado por meio de *heartbeat*, indicando comunicação recente com o sistema. Em seguida, a função verifica condições de alerta com base nos dados recebidos. Esse processamento torna a ingestão mais do que uma simples gravação: ela passa a ser um ponto de avaliação operacional do comportamento do consumo.

A detecção de vazamento foi isolada em módulo específico, combinando leituras recentes do próprio dispositivo com o contexto de outros dispositivos vinculados ao mesmo usuário. A lógica considera fluxo contínuo, número mínimo de amostras, duração mínima e comparação com outros pontos monitorados. Com isso, o sistema tenta reduzir falsos positivos e indicar maior probabilidade de vazamento quando um ponto apresenta fluxo persistente e isolado. Quando a probabilidade ultrapassa determinado limiar, o alerta pode ser classificado com severidade maior e preparado para eventual atuação automática.

A função de comandos complementa esse fluxo ao permitir que usuários autenticados criem comandos para dispositivos que lhes pertencem. O sistema verifica a identidade do usuário, valida o dispositivo e impede que comandos sejam emitidos para dispositivos de terceiros. Já a função de *polling* permite que o *firmware* consulte comandos pendentes mediante *token* de dispositivo e confirme sua execução posteriormente. Essa separação cria um fluxo mais seguro para atuação, pois a aplicação emite comandos, o dispositivo consulta, executa e retorna a confirmação.

Figura 3 - Fluxo de Dados do Projeto



Fonte: Autoria própria (2026)

3.4 TOMADA DE DECISÃO E APOIO AO USUÁRIO

A tomada de decisão no sistema resulta da transformação de sinais e registros em informação operacional. Em sistemas convencionais de acompanhamento do consumo de água, a decisão costuma ocorrer tardiamente, após a consolidação do consumo em uma fatura ou após a percepção visual de um problema. A arquitetura proposta busca deslocar esse processo para uma lógica preventiva, na qual o usuário recebe informações organizadas e alertas baseados no comportamento dos dados.

O primeiro nível de decisão é a visualização direta. O usuário acompanha indicadores na aplicação e pode observar consumo atual, histórico e status do dispositivo. Essa camada já contribui para a gestão do recurso, pois torna o consumo mais visível e reduz a dependência de inspeções manuais. Uma variação incomum ou uma leitura persistente pode orientar a verificação de uma instalação antes que o problema se agrave.

O segundo nível é composto por regras de alerta. O sistema avalia condições como consumo elevado, fluxo contínuo, baixa bateria e parâmetros complementares fora de faixa. O alerta de consumo elevado utiliza limite de vazão para sinalizar comportamento acima do esperado. O alerta de vazamento, por sua vez, considera persistência temporal do fluxo e contexto de outros dispositivos. Essa diferenciação é importante porque nem toda vazão elevada indica vazamento, e nem todo vazamento ocorre como evento brusco.

O terceiro nível envolve a preparação para atuação. A arquitetura prevê comandos pendentes e confirmação de execução pelo dispositivo, o que permite futuramente acionar válvulas ou outros atuadores com maior controle. Entretanto, a automação deve ser tratada com cautela, pois ações como fechamento de válvula podem afetar diretamente o fornecimento de água. Por isso, o sistema separa alerta, comando e confirmação, permitindo rastreabilidade entre decisão, envio e execução.

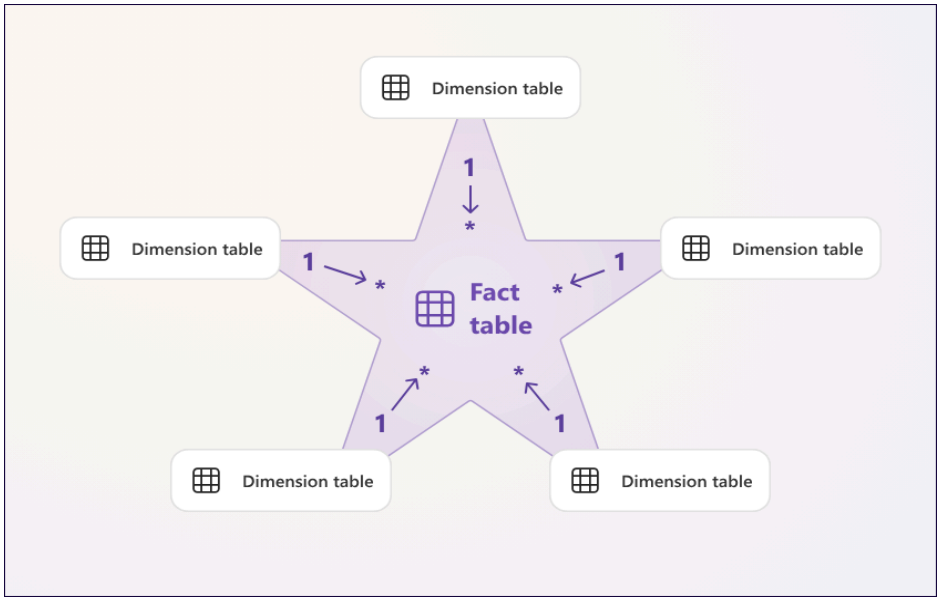
A tomada de decisão também se beneficia do histórico armazenado. À medida que o banco acumula leituras, torna-se possível observar recorrências, comparar períodos e identificar padrões. Essa capacidade é relevante para saneamento e gestão de consumo porque perdas pequenas, mas contínuas, podem gerar impacto expressivo ao longo do tempo. O armazenamento estruturado transforma a leitura individual em base para análise longitudinal.

3.5 BUSINESS INTELLIGENCE

De forma complementar, o relatório desenvolvido na camada de BI possui papel fundamental e estratégico no que se refere a visualização inteligível dos dados, transformando dados brutos como os de consumo, transformando-os em *insights* relevantes para investigação de padrões, identificando picos, comparado em diferentes granularidades de tempo.

Desse modo, este desenvolvimento se dividiu nas etapas de ETL (*Extract, Transformation and Load*), na qual a primeira etapa consistiu na extração dos dados, oriundos do banco de dados do projeto, especificamente o *Data Warehouse* que representa uma cópia do banco original. No segundo processo, definiu-se a limpeza e tratamento dos dados, sendo conceituado como processo de normalização parcial dos dados, unificando, por exemplo, tabelas dimensões para fins de modelagem de dados no formato estrela (*Star Schema*), padrão definido pela Microsoft como abordagem mais adequada para processos em BI, sendo definida relação de muitos (fato) para um (dimensão), com direção unidimensional de filtro, na qual as tabelas dimensões do modelo que armazenam dados conforme demonstrado na, na Figura 4.

Figura 4 - Representação do Esquema Estrela na Modelagem de Dados no Power BI



Fonte: Microsoft (2026)

Não obstante, foi realizado o carregamento de dados para o modelo, como terceira etapa metodológica do processo, em que a partir das transformações anteriores realizadas, utilizou-se de linguagem DAX (*Data Analysis Expressions*) para desenvolvimento de medidas que pudessem realizar cada uma das análises temporais comparativas.

No aspecto da visualização de dados, os indicadores chave de consumo, qualidade e custo de água foram consolidados na forma de KPIs (*Key Performance Indicators*) e com utilização de técnicas para apresentação de dados em formato intuitivo de navegação no relatório, com presença por exemplo, da possibilidade de utilização simplificada em dispositivos móveis e dentre outros recursos de acessibilidade além de identificação de picos e linhas de tendência também foram utilizados.

Por fim o processo final de governança desse relatório também teve participação presente, principalmente no gerenciamento de acesso adequado a cada um dos usuários, utilizando-se o método de RLS (*Row Level Security*), sendo definido pela Microsoft, como ferramenta de restrição de acessos, conectando com a arquitetura prévia de dados definida, por meio da utilização dos chamados ID, gerados na camada digital.

3.6 SEGURANÇA, GOVERNANÇA E CAPACIDADE OPERACIONAL

A segurança é um aspecto essencial do sistema, pois a aplicação lida com dados de consumo vinculados a usuários e dispositivos. A arquitetura adotada evita que a aplicação web insira diretamente leituras no banco de dados. Em vez disso, a telemetria dos dispositivos deve passar por *Edge Functions*, nas quais são validados o *token* do dispositivo, a estrutura do *payload*, a situação do dispositivo e os limites de uso. Essa abordagem reduz o risco de manipulação indevida por clientes não autorizados.

As políticas de acesso no banco foram consolidadas para reforçar o isolamento entre usuários. Dispositivos, leituras, alertas e comandos passam a ser associados ao usuário responsável, permitindo que cada usuário acesse apenas os dados vinculados ao próprio contexto. A gravação de leituras por clientes autenticados ou anônimos foi restringida, concentrando a entrada de telemetria nas funções específicas de ingestão. Essa decisão melhora a governança, pois o caminho de escrita passa a ser controlado por validação de dispositivo.

O sistema também utiliza controle de taxa em funções críticas. A função de ingestão possui limite de chamadas por dispositivo em janela temporal, enquanto a validação pública de cadastro possui limite por identificador de solicitação. A tabela de *rate limit* possui mecanismo de limpeza periódico para evitar crescimento indefinido. Essa estrutura busca reduzir abuso, tentativas de força bruta e excesso de requisições sem comprometer o funcionamento regular dos dispositivos.

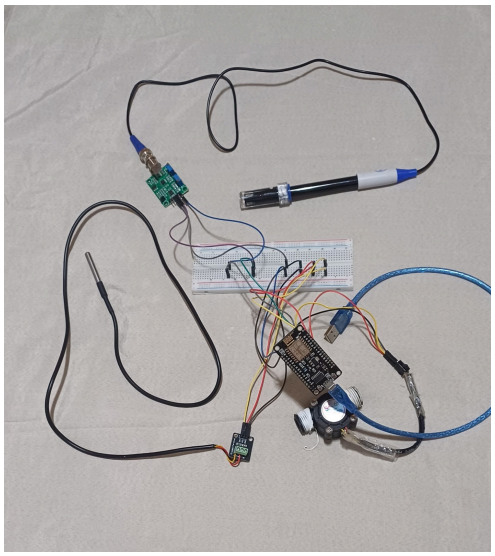
A função de comandos exige autenticação de usuário e validar manualmente se o dispositivo pertence ao usuário autenticado. A função de consulta e confirmação de comandos pelo dispositivo utiliza *token* próprio do dispositivo, criando uma distinção entre ações realizadas por usuários e ações executadas pelo equipamento. Essa separação fortalece a segurança do fluxo de atuação, pois impede que um usuário crie comando para dispositivo de terceiro e impede que um dispositivo confirme comando sem autenticação adequada.

Outro elemento relevante é a manutenção da arquitetura em camadas. A concentração do acesso ao *Supabase* na camada de infraestrutura, a separação entre domínio e interface, o uso de repositórios e a refatoração das funções serverless reduzem o acoplamento e facilitam a auditoria. Um sistema de monitoramento hídrico com possibilidade de atuação remota exige clareza sobre onde cada decisão é tomada, na qual cada dado é validado e onde cada ação é persistida.

4. RESULTADOS OBTIDOS

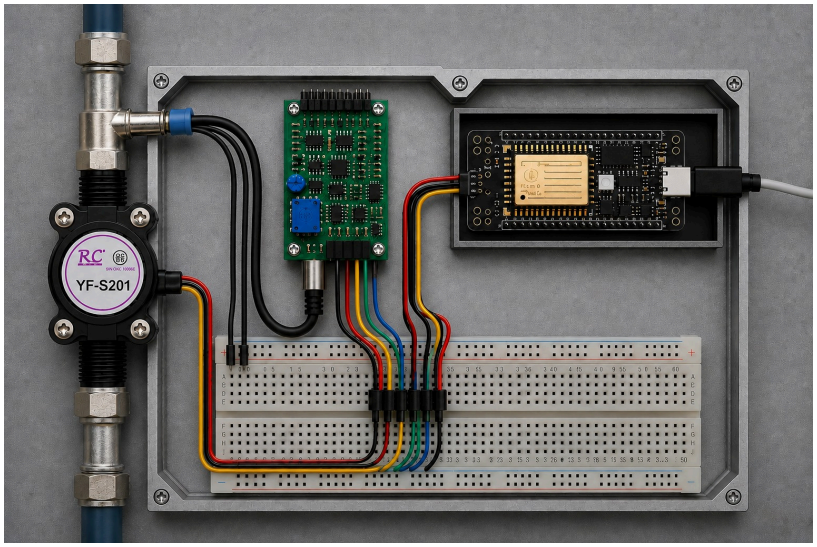
No aspecto físico do projeto foi possível a realização de esboço de protótipo do projeto baseado na integração dos dispositivos apresentada na Figura 5. Desse modo também desenvolveu-se esboço de protótipo para posterior instalação em campo, podendo ser visualizado na Figura 6, na qual visou-se garantir a separação entre componentes eletrônicos com o fluxo de água, possuindo apenas contato com as regiões de medição de fato, sendo eles o sensor de vazão e posteriormente, atuando em conjunto o sensor de pH e temperatura. Além disso, também levou-se em consideração o distanciamento relevante entre esse fluxo e o principal de núcleo de envio dados, que é o microcontrolador, além de presença de fixação para maior garantia de integridade.

Figura 5 - Integração Física do Projeto



Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 6 - Representação Visual de Protótipo Físico



Fonte: Autoria própria (2026)

No âmbito digital destaca-se o desenvolvimento avançado da aplicação digital e da estrutura de *backend* conforme documentação própria (FLOWGUARD, 2026). A documentação técnica do projeto registra a reorganização do *frontend* em cinco camadas, a refatoração de funções *serverless* em unidades de validação, repositório, regras e *handler*, a modularização do *firmware*, a paridade de funcionalidades do ESP8266, a habilitação de TypeScript strict e a implementação de *rate limit* em funções críticas.

A validação automatizada também representa resultado relevante. O projeto registrou execução de 419 testes aprovados, ausência de erros de *lint* e *build* de produção concluído. Esses indicadores não substituem validação física do protótipo, mas demonstram maturidade da camada de software e reduzem o risco de regressões na aplicação digital e nas funções de *backend*.

Outro resultado parcial é a consolidação do fluxo de segurança e governança. A nova estrutura de políticas restringe inserções diretas de telemetria pelo navegador, protege leituras por usuário, limita comandos a dispositivos pertencentes ao usuário autenticado, mantém confirmação de execução pelo *firmware* e reforça a

view de sensores para evitar exposição indevida. Esses elementos mostram que o sistema foi pensado não apenas para exibir dados, mas também para controlar acesso, validação e capacidade operacional.

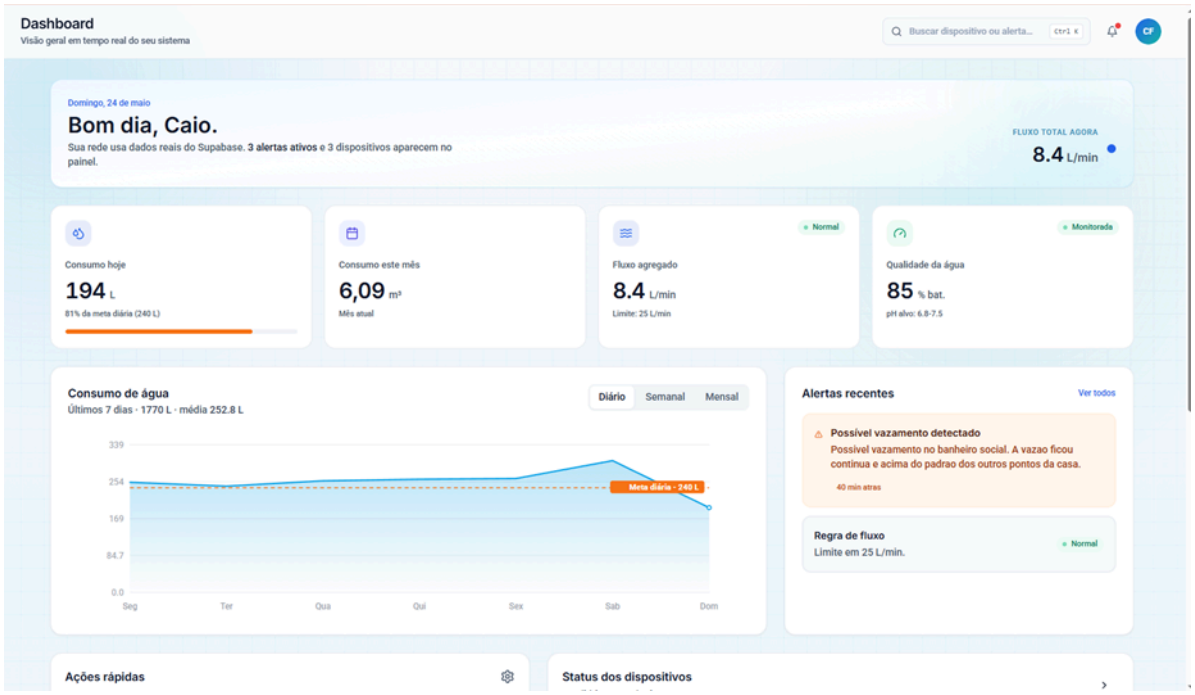
O *backend* já contempla funções específicas para ingestão de leituras, consulta de comandos, confirmação de execução, validação de cadastro e envio de comandos. A função de ingestão também possui lógica para consolidar *payloads* multi-sensor, registrar leitura, atualizar *heartbeat*, avaliar condições de alerta e retornar comandos pendentes. A detecção de vazamento foi isolada em módulo próprio, combinando persistência de fluxo, número de amostras, duração e comparação com outros dispositivos do mesmo usuário.

O *dashboard* operacional foi concebido para apresentar indicadores relacionados ao consumo, ao status de dispositivos e à ocorrência de alertas. Essa camada é importante porque transforma registros técnicos em informação compreensível ao usuário. A visualização operacional tem função distinta do simples armazenamento: ela permite acompanhar o comportamento do sistema em tempo mais próximo do real, facilitando a identificação de mudanças abruptas ou padrões fora do esperado.

A área de relatórios, apresentada na Figura 7, complementa o *dashboard* ao permitir uma leitura histórica dos dados. Enquanto o *dashboard* prioriza acompanhamento imediato, os relatórios favorecem análises por período, comparação de consumo, identificação de tendências e avaliação de recorrências. Em sistemas de gestão hídrica, esse histórico é fundamental, pois perdas nem sempre aparecem como eventos súbitos; muitas vezes se manifestam como comportamentos contínuos e de baixa intensidade.

A refatoração da aplicação reforçou a organização do sistema. O *frontend* passou a ser descrito em cinco camadas, distribuindo funções puras, *gateways* externos, orquestração, funcionalidades e componentes de interface. Essa organização reduz o risco de dependências cruzadas, melhora a manutenção e facilita o desenvolvimento futuro. A auditoria técnica relatou ainda a remoção de código órfão e a padronização de nomenclatura, fortalecendo a coerência interna do projeto.

Figura 7 - Painel Principal da Aplicativo

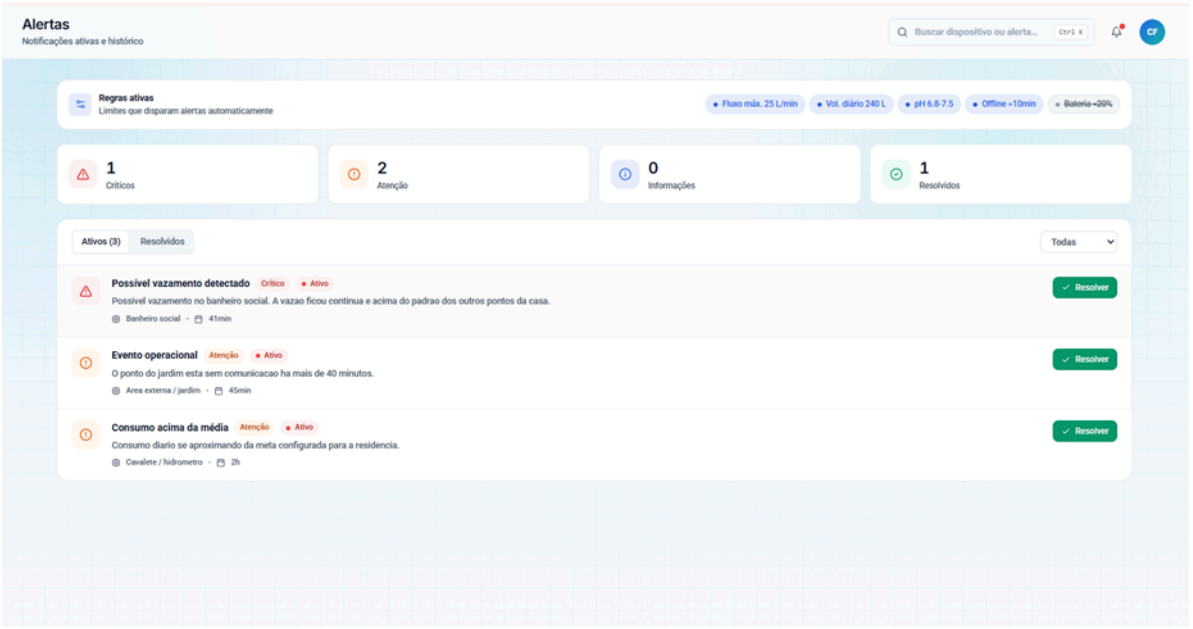


Fonte: Autoria própria (2026)

A área de alertas foi estruturada para registrar situações que exigem atenção do usuário. O sistema contempla alertas relacionados a consumo elevado, vazamento detectado, leitura de pH fora da faixa, temperatura fora da faixa e bateria baixa. Embora alguns sensores complementares dependam de validação física e ampliação posterior, a arquitetura digital já prevê a forma de registrar, classificar, exibir e resolver alertas. Essa

antecipação é importante porque prepara a aplicação para operar de forma escalável quando novos dados forem incorporados, conforme demonstrado pela Figura 8.

Figura 8 - Painel de Alertas



Fonte: Autoria própria (2026)

Além das funcionalidades de monitoramento operacional, a aplicação também contempla uma área destinada à geração de relatórios. Esse módulo permite ao usuário selecionar um intervalo de tempo específico e extrair as informações correspondentes ao período desejado. A partir dessa seleção, o sistema realiza a consulta automática dos registros armazenados no banco de dados e organiza os dados para visualização dentro da própria aplicação ou para exportação em formato CSV.

A possibilidade de exportação em CSV amplia a utilidade do sistema, pois permite que os dados sejam analisados em ferramentas externas, como planilhas eletrônicas e plataformas de análise de dados. Dessa forma, o usuário não fica restrito à visualização interna da aplicação, podendo realizar comparações, filtros, cálculos complementares e construção de gráficos em outros ambientes, como o Excel.

O funcionamento do módulo de relatórios foi pensado para respeitar o período selecionado pelo usuário. Assim, quando há registros disponíveis no intervalo informado, a aplicação retorna os dados correspondentes e os organiza para consulta ou exportação. Caso o período selecionado não possua leituras registradas, o sistema informa a ausência de dados, evitando interpretações incorretas e deixando claro que não existem registros disponíveis para aquele intervalo.

Além da geração manual de relatórios, a arquitetura também prevê a possibilidade de relatórios automatizados. Nesse formato, o usuário poderá configurar recorrências de emissão, como relatórios diários, semanais ou mensais. Essa funcionalidade é relevante para o acompanhamento contínuo do consumo, pois permite que o usuário receba ou consulte periodicamente informações consolidadas sem precisar realizar manualmente a mesma operação a cada novo período.

Com isso, o módulo de relatórios atua como uma camada complementar ao *dashboard*. Enquanto o painel principal favorece o acompanhamento imediato do consumo, os relatórios permitem uma análise histórica e documental dos dados coletados. Essa separação contribui para que a aplicação seja utilizada tanto para monitoramento em tempo real quanto para avaliação posterior do comportamento de consumo.

Na camada de BI foi possível realização de testes em cada uma das etapas do ETL bem como apresentação dos indicadores, utilizando-se do *storytelling* como guia no processo de transformação de dados brutos em KPIs que auxiliem na tomada de decisão. De forma específica, conforme apresentado na Figura 8 abaixo, realizou estratificações em diferentes granularidades do tempo, com presença de comparações percentuais de consumo, média e análise de picos de consumo

Figura 9 - Relatório de Consumo



Fonte: Autoria própria (2026)

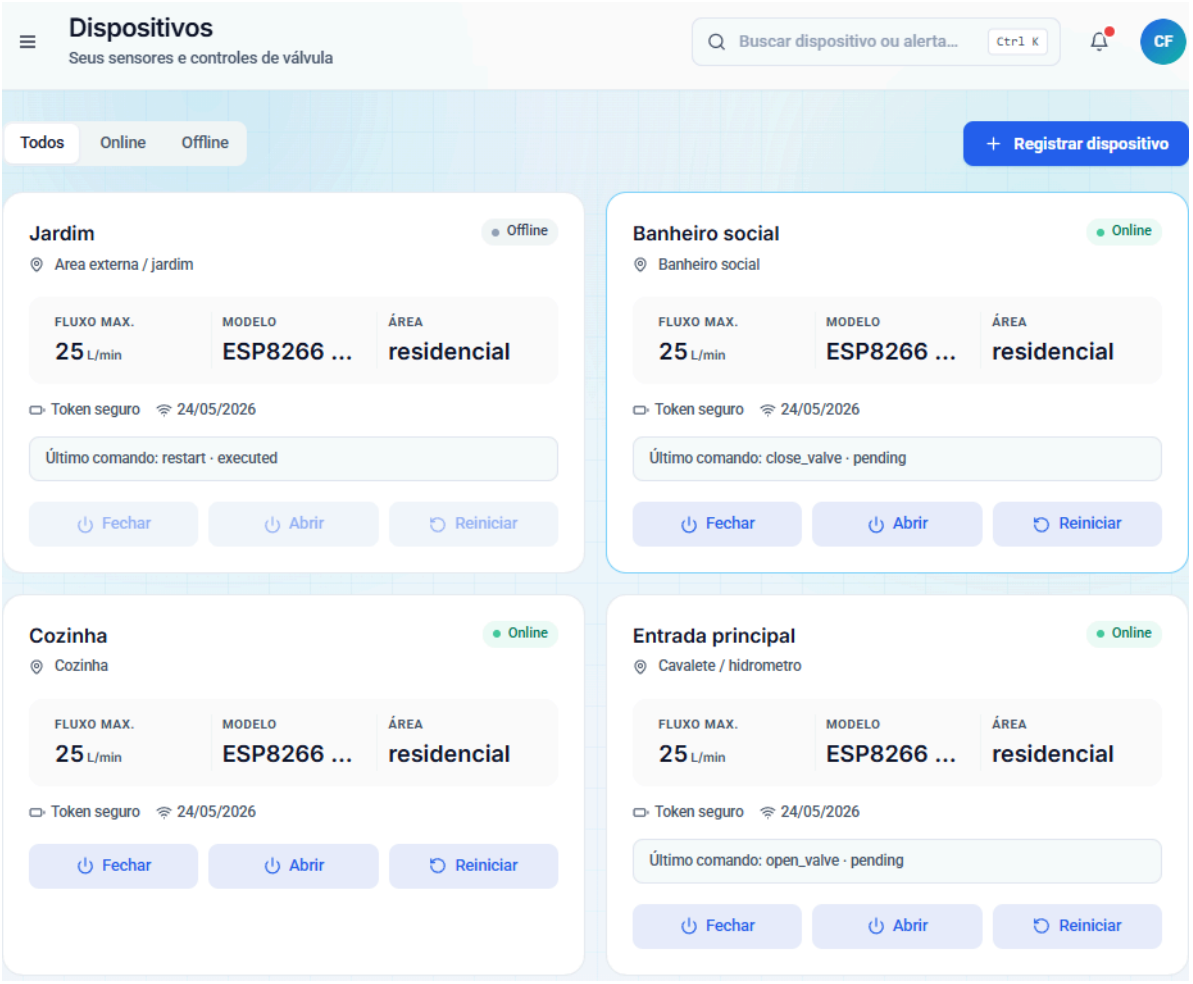
Além disso, também é possível visualizar a distribuição semanal de consumo, apresentando região destacada para o menor e maior consumo, podendo ser filtradas também por região. Essa camada também possuí análise com linha de tendência temporal, avaliação de picos de consumo e tabelas detalhadas com os eventos vinculados a possíveis vazamentos identificados, com data e hora de início e fim, além de avaliação de impacto de gasto ocasionado por esses eventos.

No que se refere a indicadores relevantes relacionados às medições de qualidade da água, foi desenvolvido formatações condicionais conforme limites dos respectivos parâmetros de qualidade, além de dados estatísticos como média ao longo do tempo, e destaque condicional para picos não esperados.

A aplicação também possui uma área destinada ao gerenciamento de dispositivos. Nesse campo, o usuário pode visualizar os dispositivos vinculados à sua conta, acompanhar informações básicas de identificação e registrar novos equipamentos de monitoramento. Essa funcionalidade é essencial para sistemas IoT, pois cada ponto físico de coleta precisa estar corretamente associado a um usuário, a uma localização e a um identificador interno do sistema.

Durante o cadastro de um novo dispositivo, o usuário informa dados como nome do equipamento e localização de instalação, demonstrado na Figura 10. Essas informações permitem organizar os dispositivos de forma compreensível dentro da aplicação, especialmente em cenários com mais de um ponto de monitoramento. Por exemplo, um mesmo usuário pode futuramente possuir dispositivos instalados em diferentes ambientes, residenciais ou setores, sendo necessário distinguir cada unidade de medição.

Figura 10 - Painel de Dispositivos



Fonte: Autoria própria (2026)

Após o preenchimento das informações de cadastro, o sistema gera um *token* de conexão para o dispositivo. Esse *token* tem a função de permitir a primeira vinculação entre o equipamento físico e a conta do usuário. Em termos práticos, ele atua como uma credencial inicial de associação, garantindo que apenas dispositivos autorizados possam se conectar e enviar dados para aquela conta específica.

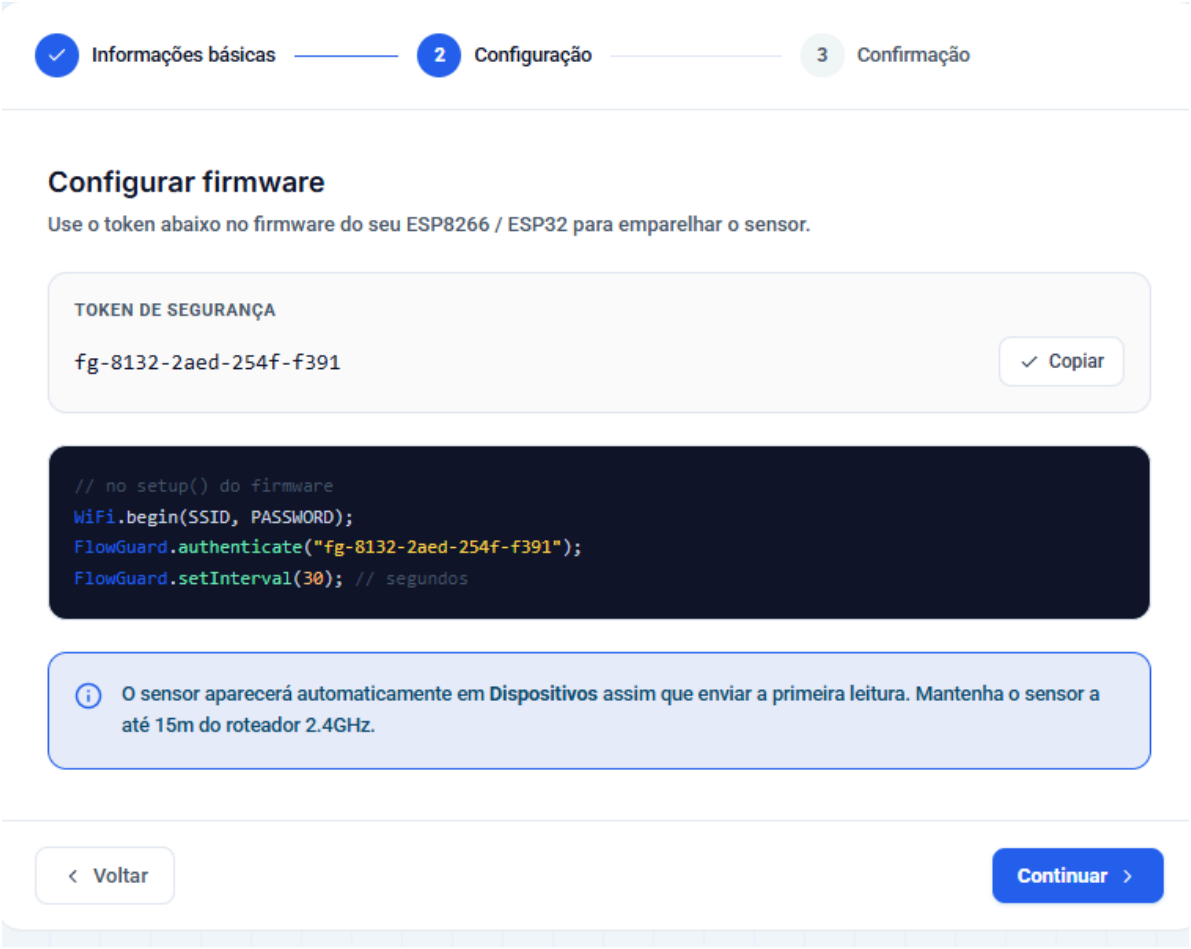
Os *tokens* são gerados de forma aleatória, reduzindo a previsibilidade e dificultando tentativas de vinculação indevida. Embora o *token* esteja associado ao dispositivo, sua função principal é viabilizar a conexão inicial e a validação do equipamento no sistema. Após a confirmação bem-sucedida da conexão, o dispositivo passa a ser reconhecido por identificadores internos próprios da aplicação, o que permite maior controle sobre sua operação, suas leituras e sua relação com o usuário.

Essa estratégia reduz o impacto de uma eventual exposição do *token* inicial, pois o funcionamento contínuo do dispositivo não depende exclusivamente desse valor como única forma de identidade. Depois da veiculação, o sistema passa a tratar o dispositivo a partir de registros internos, permitindo controlar sua associação com a conta, seu histórico de comunicação e suas permissões dentro da arquitetura da aplicação.

Esse modelo contribui para a segurança e a rastreabilidade do sistema, conforme ilustrado na Figura 11. Ao vincular cada leitura a um dispositivo previamente registrado, a aplicação consegue organizar os dados por origem, impedir mistura de informações entre usuários e oferecer uma base mais confiável para relatórios,

alertas e análise histórica. Dessa forma, o gerenciamento de dispositivos não atua apenas como cadastro administrativo, mas como parte essencial da segurança e da integridade dos dados coletados.

Figura 11 - Painel de Configuração de Segurança



Fonte: Autoria própria (2026)

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos indicam que a aplicação já possui uma base digital consistente para monitoramento hídrico. A existência de uma aplicação desenvolvida, combinada a *backend* organizado, políticas de segurança, testes automatizados e funções de ingestão, diferencia o projeto de um protótipo restrito à leitura local de sensores. O sistema já se encontra estruturado para receber dados, associá-los a dispositivos, armazená-los e transformá-los em informação operacional.

A principal contribuição da aplicação está na criação de uma ponte entre medição e tomada de decisão. A leitura de vazão, quando isolada, apenas informa uma condição momentânea. Quando vinculada a usuário, dispositivo, histórico, alerta e relatório, passa a compor uma base de gestão. Essa mudança é relevante para o setor de saneamento porque a redução de perdas depende tanto da medição quanto da capacidade de interpretar eventos e agir em tempo adequado.

A separação em camadas fortalece a manutenibilidade e a confiabilidade do sistema. Regras puras de domínio podem ser testadas sem interface e sem banco, repositórios concentram acesso a dados, *hooks* e contextos orquestram estados, funcionalidades mantêm suas responsabilidades e a interface apresenta as informações ao usuário. Essa organização é especialmente importante em sistemas que podem evoluir para múltiplos sensores, múltiplos usuários e comandos remotos.

O tratamento de segurança é outro ponto de destaque. A decisão de impedir inserção direta de leituras pelo navegador e concentrar a telemetria nas *Edge Functions* reduz a superfície de ataque. O uso de *tokens* de dispositivo, *rate limit*, RLS e validação de *ownership* em comandos demonstra preocupação com integridade dos dados e controle de atuação. Em um sistema que pode eventualmente comandar uma válvula, essa preocupação é indispensável.

A arquitetura digital já favorece análises futuras porque preserva histórico em banco, mas os indicadores gerenciais, o modelo de atualização e a conexão com ferramentas analíticas precisam ser definidos e documentados. A separação dessa camada permite que o artigo mantenha rigor, apresentando como consolidado apenas aquilo que já foi desenvolvido ou validado.

Desse modo, o estágio atual, o sistema pode ser compreendido como uma solução digital avançada, pronta para integração experimental com a camada física e para posterior ampliação analítica. A principal força do projeto está na combinação entre aplicação operacional, backend seguro, estrutura de dados e lógica de alerta, que cria condições para evoluir de um sistema de medição para uma ferramenta de apoio à gestão hídrica.

6. CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

O desenvolvimento do sistema inteligente, demonstra a viabilidade de estruturar uma aplicação inteligente para monitoramento do consumo de água com integração IoT. A camada digital já desenvolvida contempla autenticação, cadastro de dispositivos, visualização operacional, alertas, relatórios, backend serverless, políticas de segurança e mecanismos de validação, constituindo uma base consistente para receber dados de dispositivos embarcados.

O estudo evidencia que o valor de um sistema de monitoramento hídrico não está apenas na coleta de dados, mas na forma como esses dados são organizados, protegidos, interpretados e apresentados. A arquitetura adotada permite que leituras sejam vinculadas a dispositivos, armazenadas historicamente, avaliadas por regras e disponibilizadas ao usuário por meio de uma interface operacional.

Também se recomenda o detalhamento da camada de BI, de modo a ampliar a capacidade de análise histórica, comparação entre períodos e apoio à gestão operacional. Além disso, recomenda-se manter a estratégia de testes automatizados, revisão de políticas de segurança e validação controlada antes de qualquer atuação automatizada sobre válvulas ou dispositivos hidráulicos.

Como recomendação no aspecto físico, recomenda-se a fabricação da estrutura do protótipo para fins de testes e validação da integração realizada. Não obstante, cabe-se também desenvolvimento de diferentes modelos de protótipo, buscando levar em consideração contextos nas quais apenas determinados sensores sejam utilizados de acordo com a preferência do usuário.

Conclui-se, portanto, que o sistema como um todo, apresenta maturidade relevante na camada digital e potencial para evoluir como solução de apoio à gestão eficiente do consumo de água. A consolidação final dependerá da integração física, dos ensaios experimentais e da complementação analítica, mas a estrutura já desenvolvida demonstra coerência técnica e aplicabilidade ao contexto de monitoramento hídrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA, J.O., LOPES JÚNIOR, C.C., ARAUJO, D.M. *Gestão inteligente de consumo de água: um estudo sobre IoT e LoRaWAN para grandes consumidores*. In: Anais do 33° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), Brasília, p. 88, mai. 2025. Disponível em: https://abes-dn.org.br/anaiseletronicos/33cbesa/117_tema_xi.pdf. Acesso em: 25 mai. 2026.

2. BALBINOT, A., BRUSAMARELLO, V.J. *Instrumentação e Fundamentos de Medidas*. v.1. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

3. CABRAL, R.A. et al. *Unsupervised water leakage detection using IoT devices and anomaly detection algorithms*. In: Anais do XIII Symposium on Knowledge Discovery, Mining and Learning (KDMiLe). Porto Alegre: SBC, 2025. p. 41-48.

4. DE CAMARGO XAVIER, F. N., et al. *Evaluation of low-cost sensors for real-time water quality monitoring*. In: Simpósio Brasileiro de Engenharia de Sistemas Computacionais (SBESC). SBC, 2022. p. 56-61.

5. DFROBOT. PH meter (SKU: SEN0161): Analog pH Meter Kit SKU: SEN0161. Shanghai: DFRobot, 2017. p. 1-6. Manual técnico.

6. FLOWGUARD. *Relatório técnico do projeto FlowGuard: refatoração em camadas, políticas de segurança, capacidade e funções Supabase*. Documento interno do projeto, 2026.

7. FUENTES, H., MAURICIO, D. *Smart water consumption measurement system for houses using IoT and cloud computing.* Environmental Monitoring and Assessment, v.192, n.9, p. 602, 2020.

8. HARRIS, Daniel C.; LUCY, Charles A. *Análise química quantitativa*. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2023.

9. MACIEL, K.A., LEITE, D.M., MENEZES, J.W.M. *Protótipo de aplicação doméstica para o monitoramento de sistemas de distribuição de água baseado em internet das coisas*. Research, Society and Development, v.9, n.10, p.e2059108274, out. 2020.

10. MICROSOFT. Compreender o esquema em estrela e a importância para o Power BI. Disponível em: https://learn.microsoft.com/pt-br/power-bi/guidance/star-schema. Acesso em: 26 mai. 2026.

11. MICROSOFT. Segurança em nível de linha (RLS) com o Power BI. Disponível em: https://learn.microsoft.com/pt-br/fabric/security/service-admin-row-level-security. Acesso em: 26 mai. 2026.

12. NOLÊTO, I.A. *Desenvolvimento de medidor inteligente de parâmetros de fluxo de água com uso de Internet das Coisas*. Caraúbas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro Multidisciplinar de Caraúbas, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, 2021.

13. DATAQ INSTRUMENTS. *2000362 Flow Sensor: 1-30L/min Flow Sensor.* Akron, Ohio, 2020. Disponível em http://www.dataq.com. Acesso em: 1 jun. 2026.

14. SUPABASE. *Supabase Documentation*. Disponível em: https://supabase.com/docs. Acesso em: 2026.

15. SHENZHEN DOCTORS OF INTELLIGENCE & TECHNOLOGY (SZDOIT). *User Manual for ESP-12E DevKit: UART-WiFi Transparent Transmission Module Based on Lua.* Shenzhen, 2015. Disponível em http://www.doit.am. Acesso em: 1 jun. 2026.

16. VON SPERLING, Marcos. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 2. ed. rev. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DESA/UFMG, 1996. v. 1, 243 p.