

PROTÓTIPO DE MONITORAMENTO DE CONSUMO DE ÁGUA PARA CONDOMÍNIOS UTILIZANDO APLICAÇÃO WEB

Bruno Monteiro Evaldt¹, Sergio Coral²

Resumo: O crescimento do modelo condominial de habitação no Brasil, aliado ao elevado índice de desperdício de água no país, onde 37,8% da água tratada é perdida antes de chegar às residências, evidencia a necessidade de soluções tecnológicas que promovam o monitoramento individualizado do consumo hídrico. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um protótipo de hidrômetro digital baseado em Internet das Coisas (IoT), integrando hardware e software de baixo custo para monitorar, em tempo real, o consumo de água em unidades habitacionais de condomínios. O dispositivo utiliza o sensor de fluxo YF-S201 acoplado ao microcontrolador ESP32, que converte pulsos gerados pelo fluxo de água em dados volumétricos e os transmite via protocolo MQTT para uma aplicação web desenvolvida em Laravel. Os dados são persistidos em banco de dados PostgreSQL, permitindo consultas e agregações diárias, mensais e anuais. A aplicação oferece dashboards intuitivos para visualização do consumo em tempo real, envio de alertas automáticos por e-mail quando limites configuráveis de volume ou vazão são ultrapassados, incluindo detecção de possíveis vazamentos. A solução demonstra viabilidade técnica e econômica ao utilizar componentes acessíveis e software de código aberto, contribuindo para a individualização do consumo prevista pela Lei nº 13.312/2016, para a redução do desperdício hídrico e para uma gestão mais consciente dos recursos de água em condomínios residenciais.

Palavras-chave: internet das coisas; condomínios; individualização; monitoramento de água; ESP32; laravel.

ABSTRACT: The growth of the condominium housing model in Brazil, combined with the country's high water waste index, where 37.8% of treated water is lost before reaching residences, highlights the need for technological solutions that promote individualized monitoring of water consumption.

¹Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc), Criciúma - Santa Catarina - Brasil. bruno.monteiroe@gmail.com

²Orientador(a), Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc), Criciúma - Santa Catarina - Brasil. sergiocoral@gmail.com

This work proposes the development of a digital water meter prototype based on the Internet of Things (IoT), integrating low-cost hardware and software to monitor, in real time, water consumption in condominium housing units. The device uses the YF-S201 flow sensor coupled to the ESP32 microcontroller, which converts pulses generated by water flow into volumetric data and transmits them via the MQTT protocol to a web application developed in Laravel. The data are stored in a PostgreSQL database, enabling daily, monthly, and annual queries and aggregations. The application offers intuitive dashboards for real-time consumption visualization, automatic e-mail alerts when configurable volume or flow limits are exceeded, including detection of possible leaks. The solution demonstrates technical and economic feasibility by using accessible components and open-source software, contributing to the individualization of consumption required by Law No. 13.312/2016, to the reduction of water waste, and to more conscious management of water resources in residential condominiums.

Keywords: internet of things; condominiums; individualization; water monitoring; ESP32; laravel.

1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água potável representa um dos maiores desafios da atualidade. Apesar de possuir cerca de 12% das reservas mundiais de água doce, o Brasil apresenta uma distribuição desigual desse recurso e níveis de desperdício alarmantes. De acordo com o Instituto Trata Brasil (2022), cerca de 8 mil piscinas olímpicas de água tratada são desperdiçadas diariamente no país, o que seria suficiente para abastecer cerca de 67 milhões de brasileiros por um ano. No contexto habitacional, o IBGE (2024) aponta que cerca de 13,3 milhões de endereços residenciais no Brasil correspondem a condomínios, representando um em cada oito endereços do país. Nesses ambientes, o modelo tradicional de medição coletiva, em que uma única fatura é dividida entre os moradores, estimula o desperdício e dificulta a identificação de vazamentos individuais, penalizando os moradores que fazem uso consciente do recurso.

Para enfrentar esse problema, o Governo Federal sancionou a Lei nº 13.312/2016, que estabelece a obrigatoriedade da individualização do consumo de água em novos condomínios, com vigência a partir de junho de 2021 (Brasil, 2016). A legislação representa um avanço importante, porém a simples instalação de hidrômetros individuais não garante, por si só,

uma gestão eficiente dos recursos hídricos. É necessário que os dados de consumo sejam coletados, transmitidos e apresentados de forma acessível aos moradores. Nesse sentido, a Internet das Coisas (IoT) surge como uma tecnologia habilitadora relevante, permitindo que dispositivos físicos se conectem à internet e compartilhem dados em tempo real sem intervenção humana (Santos et al., 2016). A adoção de medidores inteligentes já demonstrou resultados concretos em outros países: na Austrália e na Nova Zelândia, mais de 250 mil medidores inteligentes foram instalados, trazendo maior transparência aos usuários e reduzindo os custos associados à medição tradicional (Beal; Flynn, 2015, tradução nossa).

Diversos trabalhos investigaram soluções para o monitoramento hídrico com uso de tecnologias digitais, porém ainda com lacunas relevantes para o contexto condominial. Medeiros et al. (2021) propuseram um protótipo inteligente para detecção de vazamentos em edificações, utilizando um sensor turbina acoplado a um microcontrolador NodeMCU com conectividade Wi-Fi e alimentação por energia solar. O sistema monitorava o fluxo de água em tempo real por meio da contagem de pulsos gerados pelo sensor, identificando anomalias de forma automática. Os experimentos comprovaram a eficácia do protótipo, que identificou perdas equivalentes a aproximadamente 12,81 litros de água desperdiçados em um único dia. No entanto, a solução não contemplava o monitoramento individualizado por unidade habitacional nem oferecia uma interface de visualização de consumo para os moradores.

Avançando nessa direção, Mascarenhas (2024) desenvolveu um medidor de água inteligente fundamentado na integração entre uma placa Arduino, um sensor de vazão e o módulo Wi-Fi ESP8266, incorporando não apenas a detecção de anomalias, mas também o acompanhamento contínuo do consumo e o envio de alertas por e-mail. Os dados coletados eram registrados automaticamente em planilhas do Google, permitindo a visualização de históricos diários, semanais e mensais. Apesar dos resultados positivos, o sistema apresentou limitações relevantes de autonomia energética e estabilidade de comunicação, além de não contar com uma aplicação web dedicada ao contexto condominial.

Diante dessa lacuna, este trabalho propõe o desenvolvimento de um protótipo de hidrômetro digital IoT integrado a uma aplicação web voltada a condomínios residenciais. O objetivo geral é desenvolver um protótipo de medidor de água inteligente para condomínios, capaz de transmitir dados de consumo hídrico em tempo real para análise e monitoramento.

Para alcançar esse objetivo, pretende-se desenvolver um protótipo de hidrômetro digital utilizando sensores de fluxo e dispositivos IoT para realizar a medição individualizada do consumo de água em unidades residenciais, bem como implementar um sistema de comunicação sem fio entre o protótipo e a aplicação web, permitindo o envio e armazenamento dos dados em tempo real. Busca-se ainda criar uma aplicação web para monitoramento do consumo hídrico, possibilitando a visualização de dados e históricos de consumo pelos usuários e administradores do condomínio, além de desenvolver funcionalidades de alerta automático para identificação de possíveis vazamentos ou consumo anormal de água, auxiliando na redução de desperdícios. Por fim, pretende-se avaliar a eficiência, confiabilidade e viabilidade do protótipo desenvolvido.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada neste trabalho foi conduzida em ambiente controlado, no qual se buscou simular o consumo de água em unidades habitacionais de um condomínio. Para isso, foi montada uma estrutura experimental que permitiu reproduzir cenários de uso real e validar o funcionamento do protótipo.

O desenvolvimento consistiu na integração de componentes de hardware e software de baixo custo, organizado em etapas que contemplaram a definição dos dispositivos utilizados, a configuração da comunicação entre os módulos, a implementação da aplicação web e, por fim, a coleta e análise dos dados de consumo. A seguir, cada uma dessas etapas é descrita em detalhe, de forma a possibilitar a replicação do estudo.

2.1 HARDWARE

A placa controladora utilizada foi a Kincony KC868-A4, baseada no microcontrolador ESP32. A placa conta com quatro canais relé para acionamento de dispositivos externos, entradas digitais para leitura de sinais dos sensores e entradas, além de conectividade Wi-Fi e Bluetooth integradas. O ESP32, desenvolvido pela Espressif Systems, destacou-se pelo baixo consumo de energia e pelas interfaces de conectividade integradas (Systems, 2025), características essenciais para a transmissão dos dados de consumo em tempo real. A programação da placa foi realizada por meio da Arduino IDE, utilizando linguagem C++.

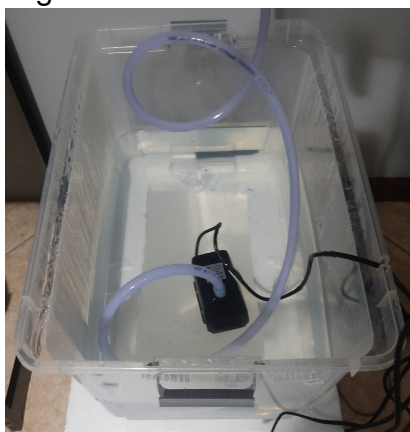
Para o controle do fluxo de água, foram instaladas duas válvulas solenoides normalmente fechadas (NF) de 12V com conexão de 1/2 pole-

gada. As válvulas solenoides são dispositivos eletromecânicos que controlam o fluxo de fluidos por meio de uma bobina que, ao ser energizada, gera um campo magnético responsável por deslocar um núcleo metálico ferromagnético, alterando o estado dos canais fluídicos e possibilitando a abertura ou o fechamento da válvula (Silva; Lago, 2002). O acionamento das válvulas foi realizado remotamente pela aplicação web, tanto de forma manual pelo usuário quanto de forma automática pelo sistema em caso de detecção de vazamento.

A alimentação de todos os componentes foi fornecida por uma fonte bivolt 110/220V com saída DC de 12V, corrente de 5A e potência de 50W, operando em frequências de 50 a 60Hz, garantindo energia estável para o funcionamento simultâneo da placa, dos sensores e das válvulas solenoides.

A bomba submersa foi posicionada no interior da caixa plástica de 50 L, permanecendo totalmente submersa durante a operação. A caixa recebeu um orifício lateral para passagem do cabo de alimentação da bomba e um orifício na tampa para acomodar um tubo transparente vertical que conduziu a água até a superfície, conforme mostra a Figura 1. Na tampa foi instalado um conector em T que distribuiu o fluxo para duas saídas, simulando dois apartamentos distintos.

Figura 1 - Bomba Submersa.



Fonte: Do autor.

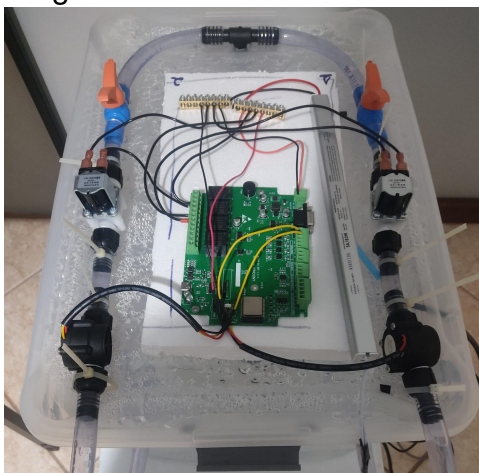
A partir do divisor em T, cada ramal seguiu a sequência funcional definida para a simulação: registro manual, válvula solenoide, sensor de fluxo e saída simulando o ponto de consumo. O registro manual permitiu interromper o fluxo para manutenção e calibração. A válvula solenoide normalmente fechada foi instalada antes do sensor para possibilitar o controle de abertura e fechamento programado, enquanto o sensor de fluxo foi

posicionado após a válvula, em trecho retilíneo, para reduzir efeitos de turbulência sobre a medição. Em todas as junções foram utilizados bicos de torneira e adaptadores roscados para facilitar a montagem e a substituição dos componentes.

A placa controladora e a fonte foram fixadas sobre uma base de isopor apoiada na tampa da caixa, elevando os componentes e reduzindo o risco de contato com respingos, mantendo a placa acessível para programação e inspeção. Fitas Hellermann foram utilizadas para firmar as válvulas e os sensores, garantindo estabilidade frente à pressão da água. A Figura 2, mostra como ficou a montagem do circuito do ambiente controlado.

Após a montagem hidráulica e elétrica, foi realizado um teste de estanqueidade com enchimento parcial do reservatório e inspeção visual de todas as junções. Em seguida, foram executados testes funcionais de acionamento manual dos registros e válvulas, verificação de resposta dos sensores por contagem de pulsos e acionamento remoto. A calibração inicial dos sensores foi realizada por meio da coleta de volumes de referência e do cálculo do fator de conversão de pulsos para litros.

Figura 2 - Ambiente controlado.



Fonte: Do autor.

2.2 COMUNICAÇÃO

A comunicação entre o protótipo de hardware e o sistema foi implementada por meio do protocolo MQTT, operando sobre a rede Wi-Fi local. O MQTT é um protocolo de camada de aplicação que utiliza o TCP para a transmissão de mensagens, sendo projetado para ambientes com redes e dispositivos restritos, com foco em leveza e baixo consumo de banda (Xu; Veeramani; Radhakrishnan, 2016, tradução nossa).

Seu funcionamento baseou-se na arquitetura de publicação e assinatura, na qual os clientes se registraram no broker especificando sua função e o tópico de interesse, cabendo ao broker criar os tópicos e gerenciar o fluxo de mensagens entre publicadores e assinantes (Zolett; Ramirez, 2020).

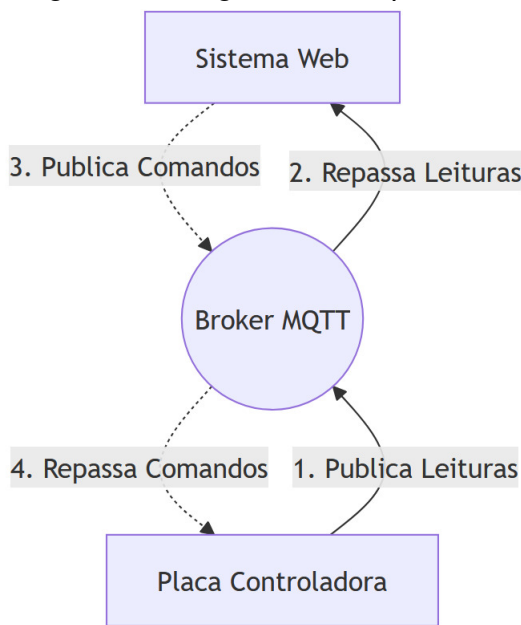
No contexto do protótipo, o broker MQTT foi executado localmente no servidor on-premise, ao qual tanto a placa controladora quanto o backend da aplicação web se conectaram para a troca de mensagens. Essa abordagem eliminou a necessidade de conectividade com a internet externa durante os testes, garantindo comunicação em tempo real dentro da mesma rede Wi-Fi.

O fluxo de comunicação ocorreu em duas direções. No sentido do hardware para a aplicação web, a placa controladora realizou a leitura dos pulsos gerados pelos sensores de fluxo, calculou o volume de água consumido e publicou os dados em um tópico específico no broker a cada 60 segundos. O backend atuando como assinante desse tópico, capturou as mensagens recebidas e as persistiu no banco de dados para posterior consulta e geração de relatórios.

No sentido inverso, da aplicação web para o hardware, o backend publicou comandos em tópicos específicos no broker sempre que um morador ou síndico solicitou uma ação pelo painel web, como o fechamento remoto de uma válvula solenoide ou a requisição de uma leitura imediata. A placa controladora, por estar inscrita nesses tópicos, recebeu os comandos e executou as ações físicas correspondentes por meio do acionamento dos relés integrados à placa.

O funcionamento descrito pode ser melhor compreendido por meio do diagrama apresentado na Figura 3, que ilustra a arquitetura de comunicação entre o protótipo de hardware, o broker MQTT e a aplicação web, bem como o fluxo bidirecional de mensagens entre publicadores e assinantes.

Figura 3 - Diagrama exemplificado.



Fonte: Do autor.

2.3 SISTEMA WEB

A aplicação web foi desenvolvida utilizando o *framework* Laravel 12, baseado na linguagem PHP 8.3. O Laravel, conforme descrito por Subecz (2021, tradução nossa), é um framework de código aberto amplamente utilizado para o desenvolvimento de aplicações web, conhecido por sua arquitetura baseada no padrão MVC (*Model-View-Controller*) e por facilitar a criação de sistemas robustos e escaláveis. No contexto deste trabalho, o framework foi responsável pelo núcleo da aplicação, incluindo as regras de negócio, autenticação dos usuários, comunicação com o broker MQTT e envio de notificações por e-mail.

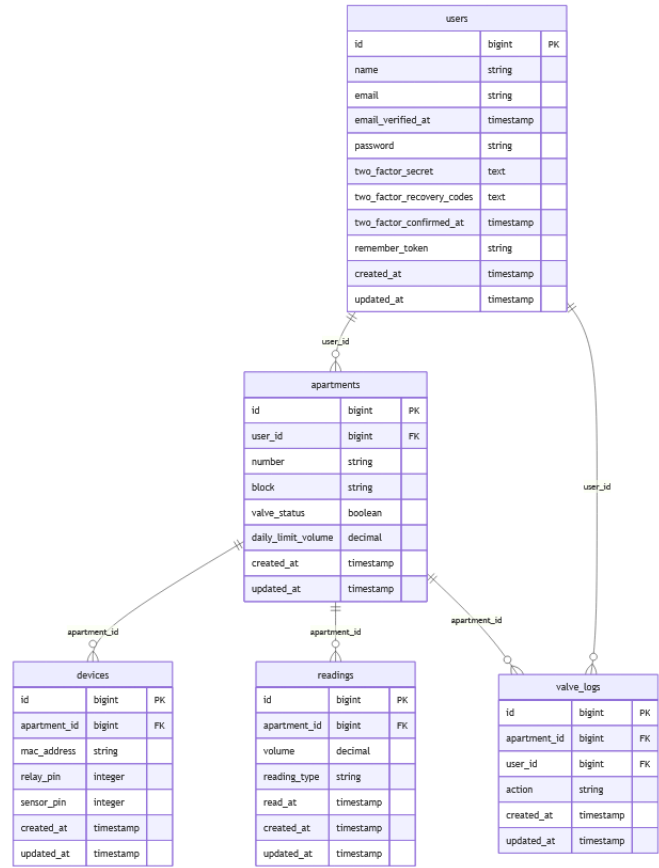
O painel web foi construído com o Filament, um *framework* de interface orientado ao servidor para o Laravel. Segundo a documentação oficial do Filament (Filament, 2024), o framework permite definir interfaces de usuário inteiramente em PHP por meio de objetos de configuração estruturados, sem a necessidade de escrever código JavaScript personalizado.

Construído sobre as tecnologias Livewire, Alpine.js e TailwindCSS, o Filament disponibiliza um conjunto de componentes prontos para uso, como tabelas, formulários, widgets e notificações, permitindo a criação de painéis administrativos e dashboards de forma ágil e organizada. Por ser integrado nativamente ao Laravel, foi possível aproveitar recursos já existentes na aplicação, como autenticação e controle de acesso por perfil de

usuário, sem a necessidade de tecnologias adicionais. O resultado foi uma interface responsiva, adaptada para diferentes tamanhos de tela, incluindo dispositivos móveis, o que facilitou o acesso dos moradores ao painel de consumo por meio de smartphones.

Para o armazenamento dos dados, foi utilizado o banco de dados relacional PostgreSQL. Sua escolha se justificou por sua expansibilidade e versatilidade, sustentadas por um ecossistema de extensões capaz de atender a casos de uso especializados, o que reforçou sua adequação a um sistema com potencial de expansão futura (IBM, 2021). A modelagem relacional organizou os registros por unidade consumidora, viabilizando consultas e agregações de consumo nos períodos diário, mensal e anual, conforme ilustrado no modelo entidade-relacionamento apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Modelo ER.



Fonte: Do autor.

A aplicação funcionou como uma ponte em tempo real entre o ponto de medição de água e o painel web. Os dados de consumo transmitidos pelo protótipo foram recebidos pelo backend, processados e armaze-

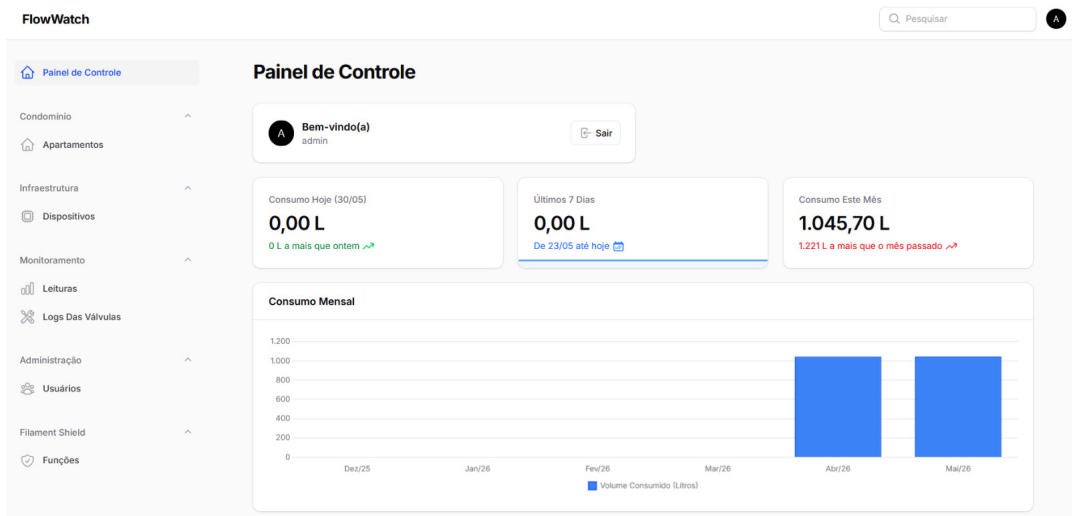
nados no banco de dados, sendo então apresentados ao usuário por meio de gráficos interativos e indicadores de consumo. Em paralelo, rotinas automáticas foram executadas em segundo plano para monitorar padrões de fluxo e detectar possíveis vazamentos.

Para a detecção de anomalias, o sistema monitorou continuamente o fluxo de água por meio do mecanismo de cache do Laravel. Quando foi identificado fluxo ininterrupto por três minutos, o sistema registrou uma anomalia classificada como alerta de atenção. Caso o fluxo contínuo atingisse oito minutos sem interrupção, a ocorrência foi classificada como vazamento. Em ambos os casos, o sistema utilizou filas assíncronas para o disparo imediato de um e-mail de alerta ao morador correspondente, sem comprometer o desempenho da navegação na aplicação web. O envio dos e-mails foi realizado por meio do protocolo SMTP do Gmail.

O sistema também disponibilizou funcionalidades de controle direto sobre o hidrômetro. Os dados de volume consumido foram recebidos automaticamente a cada 60 segundos, porém o painel também permitiu que o usuário solicitasse uma leitura imediata por meio de um botão dedicado, que enviou um comando via MQTT à placa controladora para retornar o valor exato consumido naquele instante. Além disso, foi possível acionar remotamente a abertura ou o fechamento da válvula solenoide de cada unidade habitacional diretamente pelo painel web, tanto pelo próprio morador quanto pelo síndico.

O acesso ao sistema foi segmentado em três perfis de usuário. O administrador teve acesso completo ao sistema, Figura 5, sendo responsável pela configuração dos pinos da placa controladora e pelo vínculo desses pinos aos apartamentos cadastrados, além de gerenciar as regras de permissão dos demais perfis e consultar os logs de leitura do sistema. Esse perfil também teve acesso ao dashboard com os gráficos de consumo total de água do condomínio.

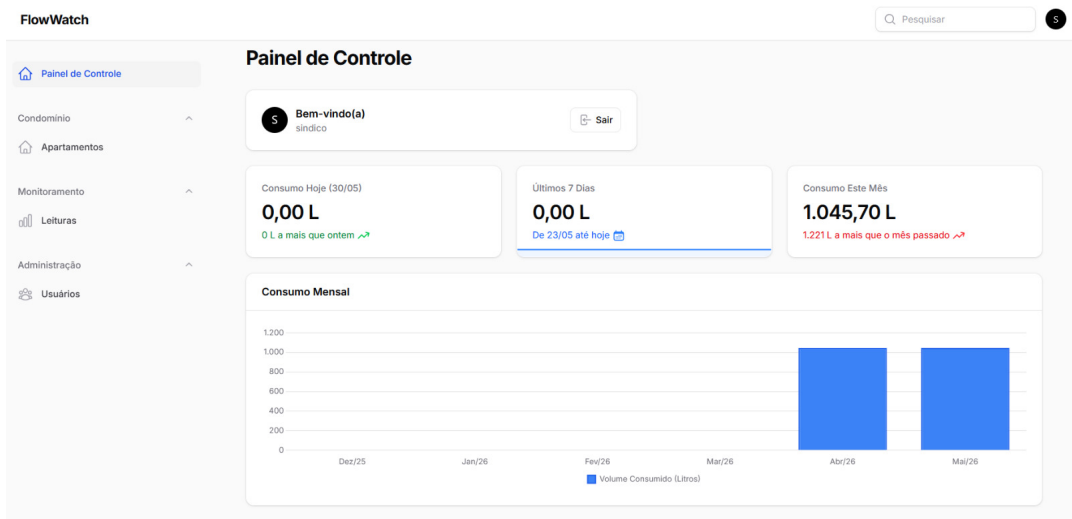
Figura 5 - Tela do sistema na visão do administrador.



Fonte: Do autor.

O síndico teve acesso gerencial ao condomínio, podendo cadastrar novos moradores e apartamentos, realizar o vínculo entre ambos e acionar o bloqueio das válvulas de qualquer unidade habitacional em situações de emergência. Assim como o administrador, o síndico teve acesso ao dashboard com os gráficos de consumo total de água do condomínio.

Figura 6 - Tela do sistema na visão do síndico.

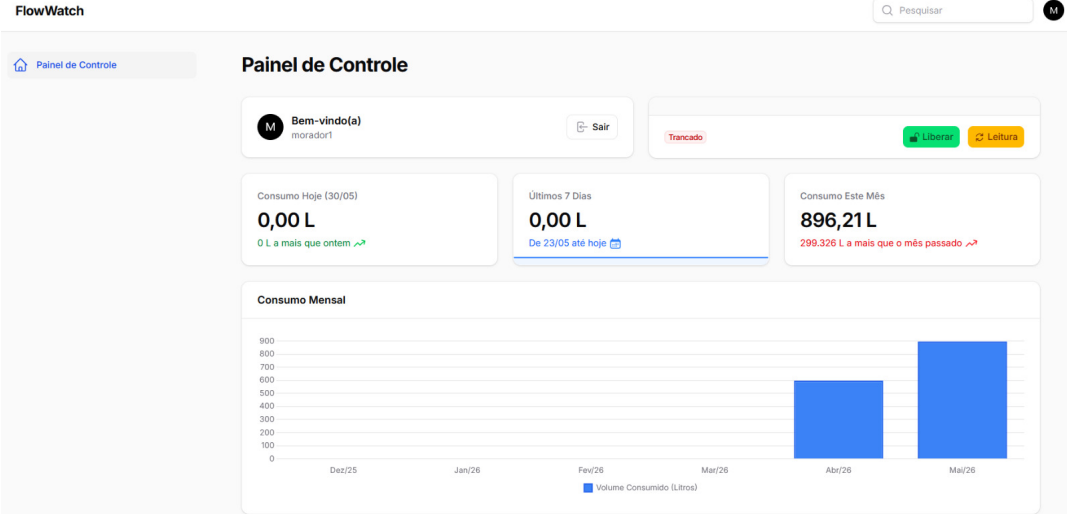


Fonte: Do autor.

O morador teve acesso restrito aos dados de sua própria unidade habitacional, podendo solicitar leituras sob demanda e acionar o bloqueio de sua própria válvula. Para acompanhamento do consumo, o perfil disponibilizou gráficos de consumo mensal e dashboards com os dados de

consumo diário da unidade como mostra na Figura 7. O funcionamento do protótipo pode ser visualizado em vídeo demonstrativo³.

Figura 7 - Tela do sistema na visão do morador.



Fonte: Do autor.

2.4 CALIBRAÇÃO DOS DADOS DE CONSUMO

A coleta de dados foi realizada pelos sensores de fluxo YF-S201, cujo funcionamento baseou-se no Efeito Hall, fenômeno que consiste na geração de uma diferença de potencial elétrico em um condutor percorrido por corrente elétrica quando submetido a um campo magnético perpendicular ao fluxo de elétrons (Soares et al., 2021). Quando a água passou pela tubulação, o fluxo fez girar um rotor interno que possuía um ímã acoplado, gerando pulsos elétricos capturados pelas portas de entrada da placa controladora. A placa contou a frequência desses pulsos e aplicou a fórmula 1 para o cálculo da vazão:

$$Q = \frac{F}{K} \tag{1}$$

Onde:

- Q é a vazão em litros por minuto (L/min);
- F é a frequência dos pulsos lidos pelo microcontrolador (Hz);
- K é o fator de calibração do sensor.

Para a obtenção do volume total consumido em litros, o microcontrolador totalizou os pulsos gerados em um determinado período e aplicou a fórmula 2:

³<https://youtu.be/aa5h6X8T-6Y>

$$V = \frac{P_{total}}{K \times 60} \quad (2)$$

Onde:

- V é o volume consumido em litros (L);
- P_{total} é o total de pulsos acumulados pelo microcontrolador;
- K é o fator de calibração do sensor;
- 60 é o fator de conversão de minutos para segundos dentro do ciclo de contagem da placa.

O sensor YF-S201 possui um fator K teórico de fábrica com valor 7,5 segundo Vieira et al. (2025), utilizado no cálculo da vazão conforme ilustrado na Figura 8. No entanto, condições reais de instalação, como variações de pressão da rede, características físicas da tubulação, curvas e resistência dos canos, afetam a velocidade de rotação do rotor e, consequentemente, a precisão das leituras. Sem um processo de calibração, o volume registrado pelo sistema poderia divergir do volume físico real consumido. Para garantir que cada litro registrado no sistema correspondesse a um litro físico de água, foi adotada a técnica de Aferição Volumétrica Direta.

Figura 8 - Trecho do código responsável pelo cálculo.

```
#define FLOW_PIN_1      36
#define FLOW_PIN_2      39
#define PULSOS_POR_LITRO 450 // Fator K teórico (7.5) * 60s = 450 pulsos por litro

// A cada 1 segundo faz a leitura interna e cálculo
if (agora - leitura1 >= 1000) {
    float intervalo = (agora - leitura1) / 1000.0;
    leitura1 = agora;

    noInterrupts();
    unsigned long p1 = pulsos1;
    unsigned long p2 = pulsos2;
    pulsos1 = 0;
    pulsos2 = 0;
    interrupts();

    // — Lógica do Sensor 1 (Apto 1) —
    if (rele1Aberto && p1 >= MIN_PULSOS) {
        // FÓRMULA DE VAZÃO (L/min):
        // 1. (p1 / PULSOS_POR_LITRO) -> Converte os pulsos lidos neste intervalo em volume (litros).
        // 2. / intervalo -> Divide pelo tempo decorrido (segundos) para obter litros por segundo (L/s).
        // 3. * 60.0 -> Multiplica por 60 para converter de litros por segundo (L/s) para litros por minuto (L/min).
        vazao1 = (p1 / PULSOS_POR_LITRO) / intervalo * 60.0;

        // FÓRMULA DE VOLUME ACUMULADO (litros):
        // Soma o volume medido neste intervalo (pulsos / 450) ao total geral acumulado.
        volume1 += (p1 / PULSOS_POR_LITRO);
    }
}
```

Fonte: Do autor.

O procedimento de calibração ocorreu em etapas. Primeiramente, utilizou-se um recipiente graduado para a realização de testes com dois volumes de referência distintos: 0,5 litro e 1,5 litro. Para cada volume, foram conduzidas cinco repetições em dois cenários de operação hidráulica: alta vazão, com o registro de água totalmente aberto, e baixa vazão, com o registro parcialmente fechado, totalizando vinte testes experimentais. Em cada execução, a válvula foi aberta para que a água fluísse através do sensor até atingir o volume de referência estabelecido, enquanto o total de pulsos contabilizados e o volume processado digitalmente eram registrados no terminal da IDE Arduino.

Havendo discrepância entre o volume físico aferido e o volume registrado pelo sistema, o fator K foi ajustado no código-fonte da placa por meio da fórmula 3:

$$K_{novo} = \frac{K_{atual} \times V_{painel}}{V_{real}} \quad (3)$$

Onde:

- K_{novo} é o novo fator de calibração a ser aplicado;
- K_{atual} é o fator de calibração vigente no momento do teste;
- V_{painel} é o volume registrado digitalmente pelo sistema (L);
- V_{real} é o volume físico aferido pelo recipiente graduado (L).

Após o ajuste do fator K, o protótipo foi integrado à aplicação web, permitindo que os dados coletados e processados pela placa controladora fossem transmitidos, armazenados e visualizados pelo sistema em tempo real

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho são apresentados em duas etapas: a avaliação da precisão do protótipo por meio dos testes de calibração realizados em diferentes condições de vazão, e a análise do funcionamento geral do sistema integrado, composto pelo hardware e pela aplicação web.

3.1 PRECISÃO DAS MEDIÇÕES

Os resultados obtidos nos vinte testes de calibração revelam diferença expressiva de precisão entre os dois regimes de pressão avaliados. Na alta vazão, conforme apresentado nas Tabelas 1 e 2, os erros médios

relativos foram de 35,00% para o volume de referência de 0,5 L e de 26,33% para 1,5 L. Na baixa vazão, conforme as Tabelas 3 e 4, os erros elevaram-se para 147,60% e 139,33%, respectivamente, representando uma piora de aproximadamente quatro vezes em relação aos resultados obtidos sob alta pressão.

Tabela 1 - Resultados dos testes de calibração — Alta vazão, volume de referência 0,5 L

Cenário	Teste	Vol. Real (L)	Pulsos	Vol. Lido (L)	Tempo (s)	Erro (%)
Alta	1	0,500	101	0,699	9,71	+39,80
Alta	2	0,500	103	0,705	9,97	+41,00
Alta	3	0,500	98	0,685	9,88	+37,00
Alta	4	0,500	99	0,678	10,80	+35,60
Alta	5	0,500	87	0,608	9,80	+21,60
Média	—	0,500	97,6	0,675	10,03	+35,00

Fonte: Do autor.

Tabela 2 - Resultados dos testes de calibração — Alta vazão, volume de referência 1,5 L

Cenário	Teste	Vol. Real (L)	Pulsos	Vol. Lido (L)	Tempo (s)	Erro (%)
Alta	1	1,500	266	1,860	27,31	+24,00
Alta	2	1,500	291	2,028	27,33	+35,20
Alta	3	1,500	268	1,874	27,05	+24,93
Alta	4	1,500	270	1,874	26,51	+24,93
Alta	5	1,500	263	1,839	26,51	+22,60
Média	—	1,500	271,6	1,895	26,94	+26,33

Fonte: Do autor.

Tabela 3 - Resultados dos testes de calibração — Baixa vazão, volume de referência 0,5 L

Cenário	Teste	Vol. Real (L)	Pulsos	Vol. Lido (L)	Tempo (s)	Erro (%)
Baixa	1	0,500	171	1,196	18,41	+139,20
Baixa	2	0,500	187	1,308	18,48	+161,60
Baixa	3	0,500	179	1,238	18,75	+147,60
Baixa	4	0,500	176	1,231	18,42	+146,20
Baixa	5	0,500	174	1,217	18,79	+143,40
Média	—	0,500	177,4	1,238	18,57	+147,60

Fonte: Do autor.

A análise cruzada entre a contagem de pulsos e o tempo de escoamento registrado em cada experimento revela a causa desse comportamento. Calculando-se a frequência média de pulsos por segundo para cada combinação de cenário e volume de referência, obtém-se 9,74 Hz (Alta / 0,5

Tabela 4 - Resultados dos testes de calibração — Baixa vazão, volume de referência 1,5 L

Cenário	Teste	Vol. Real (L)	Pulsos	Vol. Lido (L)	Tempo (s)	Erro (%)
Baixa	1	1,500	500	3,497	52,00	+133,13
Baixa	2	1,500	510	3,566	51,62	+137,73
Baixa	3	1,500	511	3,573	51,52	+138,20
Baixa	4	1,500	520	3,629	51,28	+141,93
Baixa	5	1,500	527	3,685	51,64	+145,67
Média	—	1,500	513,6	3,590	51,61	+139,33

Fonte: Do autor.

L), 10,08 Hz (Alta / 1,5 L), 9,55 Hz (Baixa / 0,5 L) e 9,95 Hz (Baixa / 1,5 L). A variação máxima entre todos os cenários é de apenas 0,53 Hz, o que indica que o rotor interno girou em frequência praticamente constante, em torno de 10 Hz, independentemente da pressão aplicada.

Esse comportamento fica evidente ao se comparar os fatores de conversão ideais calculados para cada regime: a alta vazão exigiria aproximadamente 188 pulsos por litro, ao passo que a baixa vazão demandaria cerca de 349 pulsos por litro, razão de 1,85 entre os dois valores. Esse mesmo fator corresponde à razão entre os tempos médios de escoamento dos dois cenários para o volume de 0,5 L (10,03 s na alta vazão contra 18,57 s na baixa vazão, conforme as Tabelas 1 e 3). A coincidência entre essas razões demonstra que a superestimação observada na baixa pressão não decorreu de variação na taxa de pulsos, mas sim do maior tempo necessário para escoar o mesmo volume, durante o qual o rotor continuou acumulando pulsos à mesma frequência. Em termos práticos, o sensor comportou-se como um temporizador: mediu o tempo de passagem da água, e não o volume propriamente dito.

Esse resultado é coerente com as limitações conhecidas de sensores de fluxo de baixo custo baseados em Efeito Hall, que tendem a apresentar comportamento não linear em faixas de pressão fora das condições nominais de operação. Mascarenhas (2024) identificou comportamento análogo em seu trabalho, no qual o volume medido pelo sensor mostrou-se inferior ao volume real, sendo necessária a introdução de um fator de correção. No presente estudo, o fenômeno ocorreu em sentido oposto superestimação porque o fator K foi ajustado exclusivamente para o regime de alta vazão, tornando-se inadequado para o cenário de baixa pressão. Medeiros et al. (2021) também ressaltam que a precisão desse tipo de sensor está diretamente condicionada às características hidráulicas da instalação,

o que reforça a necessidade de calibração específica para cada regime de operação previsto.

Uma limitação adicional do processo de calibração refere-se ao recipiente graduado utilizado como referência, com capacidade máxima de 2 L. O uso de provetas de laboratório com capacidade superior a 5 L e graduação mais precisa reduziria a incerteza associada à aferição manual e permitiria testes com volumes mais representativos do consumo doméstico real, contribuindo para uma calibração mais abrangente e confiável.

3.2 FUNCIONAMENTO DO SISTEMA INTEGRADO

O sistema integrado operou conforme os objetivos estabelecidos durante todo o período de testes. A transmissão dos dados ocorreu com sucesso, os valores de consumo foram persistidos e exibidos nos dashboards, e os três perfis de acesso funcionaram conforme as permissões configuradas. As funcionalidades de alerta automático foram validadas com êxito: o sistema classificou corretamente os eventos de fluxo contínuo e disparou as notificações dentro dos intervalos configurados. O acionamento remoto das válvulas solenoides respondeu em tempo real aos comandos emitidos pelo painel web.

No entanto, durante os testes foram identificadas quedas ocasionais na transmissão Wi-Fi entre a placa controladora e o *broker* MQTT. Esse comportamento, também relatado por Mascarenhas (2024), representa uma limitação relevante para a implantação do sistema em condomínios reais, onde a continuidade da comunicação é essencial para a confiabilidade do monitoramento.

3.3 COMPARAÇÃO COM TRABALHOS CORRELATOS

A análise comparativa com os trabalhos de Medeiros et al. (2021) e Mascarenhas (2024) permite situar a contribuição deste estudo dentro do estado da arte e evidenciar os avanços propostos em relação às soluções anteriores.

No que diz respeito ao hardware, os três trabalhos compartilham o uso do sensor de fluxo YF-S201 como elemento de medição, baseado no princípio do Efeito Hall. No entanto, as escolhas de microcontrolador divergem de forma relevante. Medeiros et al. (2021) utilizaram o NodeMCU ESP8266, um microcontrolador com conectividade Wi-Fi integrada, porém com menor capacidade de processamento e sem suporte nativo a múltiplas entradas digitais simultâneas. Mascarenhas (2024) adotou uma placa

Arduino Uno em conjunto com o módulo ESP8266 separado, exigindo comunicação serial entre os dois componentes, o que introduziu uma camada adicional de complexidade e foi apontado pelo próprio autor como fonte de instabilidades.

O presente trabalho utilizou a placa Kincony KC868-A4, baseada no ESP32, que integra em um único dispositivo industrial quatro canais relé, entradas digitais e analógicas e conectividade Wi-Fi e *Bluetooth*, dispensando a necessidade de módulos externos e oferecendo maior robustez para o controle simultâneo de dois sensores e duas válvulas solenoides. Adicionalmente, este trabalho incorporou válvulas solenoides normalmente fechadas ao circuito, elemento ausente nos trabalhos correlatos, o que permitiu o controle remoto e automático do fornecimento de água por unidade habitacional, funcionalidade inédita entre as soluções analisadas.

Em relação ao software, as diferenças são ainda mais expressivas. Medeiros et al. (2021) armazenaram os dados coletados diretamente em uma planilha do Google, acessível remotamente, porém sem qualquer camada de autenticação, controle de acesso por perfil de usuário ou lógica de negócio dedicada. Mascarenhas (2024) adotou solução semelhante, registrando os dados em planilhas do Google e utilizando o Microsoft Power BI para a visualização dos dados, o que, conforme apontado pelo próprio autor, impôs limitações de acesso, uma vez que a versão gratuita do Power BI *Desktop* não permite o compartilhamento de *dashboards* pela internet sem a aquisição de licença paga.

O presente trabalho desenvolveu uma aplicação web dedicada utilizando o *framework* Laravel em conjunto com o Filament, que proporcionou uma interface administrativa completa com controle de acesso segmentado em três perfis distintos, geração de relatórios históricos, *dashboards* interativos e sistema de alertas automáticos por e-mail via filas assíncronas, tudo hospedado em um servidor local e acessível por navegador sem dependência de ferramentas externas pagas.

Por fim, quanto ao contexto de aplicação, tanto Medeiros et al. (2021) quanto Mascarenhas (2024) desenvolveram soluções voltadas ao monitoramento de uma única unidade consumidora, seja uma edificação universitária ou uma residência unifamiliar. O presente trabalho, por sua vez, foi concebido desde o início para o ambiente condominial, com suporte a múltiplas unidades habitacionais, hierarquia de usuários e funcionalidades de gestão coletiva, o que representa uma contribuição inédita em relação às soluções anteriores analisadas.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um protótipo de hidrômetro digital baseado em Internet das Coisas integrado a uma aplicação web voltada ao contexto condominial, com o objetivo de monitorar o consumo hídrico por unidade habitacional em tempo real e disparar alertas automáticos de vazamento e consumo excessivo. Os objetivos propostos foram atingidos: o protótipo realizou a medição do consumo de água e transmitiu os dados via protocolo MQTT para a aplicação web, que ofereceu visualização de dados, históricos de consumo, controle de acesso segmentado em três perfis distintos e acionamento remoto das válvulas solenoides. As funcionalidades de alerta automático foram validadas com êxito.

Os testes de calibração revelaram, porém, uma limitação relevante: o sensor YF-S201 apresentou erros médios de 35,00% e 26,33% no regime de alta vazão, e superiores a 139% no regime de baixa vazão. A análise demonstrou que esse comportamento decorreu da frequência de pulsos praticamente constante do rotor independentemente da pressão aplicada, fazendo com que o sensor medisse essencialmente o tempo de escoamento e não o volume propriamente dito. Esse achado constitui uma contribuição científica deste trabalho, ao evidenciar de forma quantitativa e analítica um comportamento não linear do sensor em faixas de pressão fora das condições nominais, aspecto não explorado com esse nível de detalhamento nos trabalhos correlatos analisados.

As principais contribuições foram: a proposição de uma arquitetura IoT de baixo custo voltada especificamente ao contexto condominial, com suporte a múltiplas unidades habitacionais e hierarquia de usuários; o desenvolvimento de uma aplicação web dedicada com alertas assíncronos e controle de acesso por perfil, sem dependência de ferramentas externas pagas; e a integração de válvulas solenoides para corte remoto e automático do fornecimento de água por unidade, funcionalidade ausente nos trabalhos correlatos analisados.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a substituição do sensor YF-S201 por sensores de maior precisão em diferentes regimes de vazão. O desenvolvimento de um aplicativo móvel dedicado ampliaria ainda mais o acesso dos moradores às informações de consumo. A adoção de placas controladoras com interface *Ethernet* cabeada (RJ-45), que oferecem maior estabilidade e menor suscetibilidade a interferências de sinal. A incorporação de alertas via SMS representaria uma camada adicional de notifica-

ção, garantindo que os moradores sejam informados sobre eventos críticos mesmo sem acesso à internet. Por fim, a implantação do sistema em ambiente de produção em nuvem e sua validação em uma instalação condominial real, com múltiplas unidades em operação simultânea, constituiriam os avanços mais relevantes para pesquisas futuras, permitindo avaliar a escalabilidade, a robustez e o impacto prático da solução sobre o consumo hídrico em contextos reais.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

O autor declara que ferramentas de Inteligência Artificial generativa foram utilizadas exclusivamente como apoio auxiliar à elaboração deste trabalho, incluindo assistência na revisão linguística, estruturação textual e organização de ideias. Nenhuma ferramenta de IA foi utilizada para substituição da autoria intelectual, análise científica, interpretação dos resultados ou tomada de decisões acadêmicas. A responsabilidade integral pelo conteúdo, originalidade, veracidade das informações e conformidade com os princípios de integridade científica permanece integralmente atribuída ao autor.

REFERÊNCIAS

- BEAL, C.; FLYNN, J. **Toward the digital water age: Survey and case studies of australian water utility smart-metering programs.** Utilities Policy, v. 32, p. 29–37. ISSN 0957-1787. 2015, Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957178714000976>>. Acesso em: 19 mai. 2025.
- BRASIL. **Lei nº 13.312, de 12 de julho de 2016.** Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2016. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2016/lei/l13312.htm>. Acesso em: 3 nov. 2024.
- Filament. **Filament Documentation.** 2024. Disponível em: <<https://filamentphp.com/docs>>. Acesso em: 29 mai. 2026.
- IBGE, I. B. d. G. e. E. **Censo 2022: Brasil tem 106,8 milhões de endereços e 22,8% deles não têm número.** 2024. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/40393-noticia-cnefe>>. Acesso em: 4 nov. 2024.
- IBM. **O que é PostgreSQL?** 2021. <<https://www.ibm.com/br-pt/think/topics/postgresql>>. Acesso em: 03 jul. 2026.
- Instituto Trata Brasil. **Perdas de Água 2022.** 2022. Disponível em: <<https://tratabrasil.org.br/perdas-de-agua-2022/>>. Acesso em: 18 mai. 2025.

MASCARENHAS, D. d. M. **Medidor de Água Inteligente para Monitoramento do Consumo de Água**. Quixadá: Universidade Federal do Ceará, Campus de Quixadá. Disponível em: <<https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/78587>>. 2024. Acesso em: 18 out. 2024.

MEDEIROS, L. E. L. d. et al. **Desenvolvimento de um protótipo inteligente utilizando sensor turbina para detecção de vazamentos em edificações**. [s.n.], v. 12. 126–134 p. Disponível em: <<https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/6836>>. 2021. Acesso em: 25 maio 2025.

SANTOS, B. P. et al. **Internet das coisas: da teoria à prática**. Belo Horizonte, MG, Brasil: Universidade Federal de Minas Gerais, v. 31. 16 p. 2016.

SILVA, J. A. F. d.; LAGO, C. L. d. **Módulo eletrônico de controle para válvulas solenóides**. [s.n.], v. 25. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/qn/a/Qn3Wygrt4yNrffvhFzkSkXn/>>. 2002. Acesso em: 01 jun. 2025.

SOARES, A. A. et al. **Polaridade magnética e sensor Hall: uma proposta de experimento para os ensinos fundamental e médio**. Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Física, Química e Matemática, Sorocaba, SP, Brazil: [s.n.], v. 43. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2021-0185>>. 2021. Acesso em: 19 mai. 2025.

SUBECZ, Z. **Web-development with Laravel framework**. [s.n.]. Disponível em: <<https://doi.org/10.47833/2021.1.CSC.006>>. 2021. Acesso em: 01 jun. 2025.

SYSTEMS, E. **ESP32**. 2025. Disponível em: <<https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>>. Acesso em: 19 mai. 2025.

VIEIRA, L. M. F. et al. **Development and calibration of a low-cost flow meter using a yf-s201 sensor connected to an arduino uno**. Revista Caderno Pedagógico, Studies Publicações e Editora Ltda., Curitiba, Brazil, v. 22, n. 12, p. 1–20. ISSN 1983-0882. 2025.

XU, Y.; VEERAMANI, M.; RADHAKRISHNAN, S. **Towards sdn-based fog computing: Mqtt broker virtualization for effective and reliable delivery**. In: . [S.l.: s.n.], 2016. 2016.

ZOLETT, D.; RAMIREZ, A. R. G. **Desenvolvimento de uma interface de monitoração remota para o sistema robótico robix, integrando o protocolo mqtt e o ros**. Anais do Computer on the Beach, v. 11, n. 1, p. 405–412. 2020, Disponível em: <<https://periodicos.univali.br/index.php/acotb/article/view/16799>>. Acesso em: 01 jun. 2025.