

AUTOMATIZAÇÃO NA LEITURA DE HIDROMETROS DE FORMA INDIVIDUALIZADA EM UM CONDOMÍNIO RESIDENCIAL

Gabriel Guimarães Alves de Araújo, Guilherme Eler Mendes de Souza, Matheus Barbosa Lau Cavalcante, Richard Pinheiro Oliveira, Prof. Me. Marco Antônio Baptista de Sousa

Faculdade de Tecnologia de São Bernardo do Campo

gabriel.araujo36@fatec.sp.gov.br, guilherme.souza158@fatec.sp.gov.br,
matheus.cavalcante@fatec.sp.gov.br, richard.oliveira14@fatec.sp.gov.br,
marco.sousa@fatec.sp.gov.br

RESUMO

A gestão eficiente e sustentável de recursos hídricos em condomínios esbarra na ineficiência das leituras manuais, que atrasam a detecção de vazamentos. Para solucionar esse problema, este trabalho apresenta um protótipo funcional de baixo custo para automação predial utilizando a plataforma arduino. A problemática técnica central, caracterizada pela instabilidade mecânica devido à turbulência da água em reservatórios, foi solucionada empregando-se uma Máquina de Estados Finitos para gerenciar os ciclos de estabilização. Paralelamente, a medição individualizada de consumo foi desenvolvida utilizando interrupções de hardware, garantindo a precisão dos dados. Os resultados demonstram um sistema robusto e confiável, que elimina o trabalho manual, aperfeiçoa o controle de gastos e promove a modernização. Como extensão do supervisório local, foi desenvolvido e validado um Portal do Morador, interface web acessível em dispositivos móveis que disponibiliza o consumo individualizado em tempo real, comprovando a viabilidade de uma arquitetura de três camadas: hardware embarcado, supervisório SCADA e acesso remoto.

Palavras-chave: Automação Predial. Microcontroladores. Arduino. Gestão Hídrica. Sistemas Supervisórios. Internet das Coisas.

ABSTRACT

Efficient and sustainable water resource management in residential condominiums is hindered by the inefficiency of manual readings, which delay leak detection. To address this issue, this study presents a low-cost functional prototype for building automation using the Arduino platform. The central technical challenge, characterized by mechanical instability caused by water turbulence in reservoirs, was solved through the implementation of a Finite State Machine to manage stabilization cycles. In parallel, individualized water consumption measurement was developed using hardware interrupts, ensuring data accuracy. The results demonstrate a robust and reliable system capable of eliminating manual labor, improving expense control, and promoting modernization. As an extension of the local supervisory system, a Resident Portal was developed and validated — a web interface accessible on mobile devices that provides individualized real-time consumption data, confirming the viability of a three-layer architecture: embedded hardware, SCADA supervisory system, and remote access.

Keywords: Building Automation. Microcontrollers. Arduino. Water Management. Supervisory Systems.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização e Justificativa

A gestão de recursos hídricos em ambientes coletivos, como condomínios residenciais, enfrenta um desafio histórico: a ineficiência das leituras manuais e a ausência de medição individualizada. O sistema de rateio global, onde o consumo total é dividido equitativamente, desestimula o uso consciente. Segundo Coelho (2004), a medição individualizada elimina medições coletivas e incentiva o uso racional, pois cada morador passa a ter consciência de seu próprio consumo. Além disso, a automação das medições reduz custos operacionais e viabiliza a detecção precoce de anomalias, como vazamentos ocultos (SZELĄG et al., 2024).

O presente projeto tem como objetivo desenvolver e validar um protótipo funcional de baixo custo para automação predial, capaz de realizar a medição

individualizada do consumo hídrico por unidade habitacional, o controle automatizado e seguro do sistema de recalque e o acesso remoto aos dados de consumo pelos moradores, por meio da integração da plataforma Arduino ao software supervisor Elipse E3 via protocolo Modbus RTU.

1.2. Automação Predial e a Aplicação de Microcontroladores

Para superar as ineficiências do modelo manual e os desafios operacionais descritos, a automação predial apresenta-se como a alternativa mais viável. Segundo Costa e Neves (2018), o principal objetivo da automação é aperfeiçoar o uso de recursos e proporcionar eficiência operacional aos usuários. No contexto deste trabalho, a aplicação de microcontroladores de baixo custo permite não apenas a leitura em tempo real por meio de sensores, mas também o controle inteligente do acionamento de bombas e reservatórios (ARDUINO, 2023).

Diante desse cenário, o que o trabalho se propõe a abordar de modo claro é a transição do método de leitura tradicional para um sistema eletrônico preciso. Para tanto, a pesquisa utiliza a abordagem metodológica Design Science Research (DSR). O artefato desenvolvido consiste em um protótipo funcional de baixo custo focado na medição hídrica individualizada e na automação do reservatório, integrando hardware e uma lógica de software (Máquina de Estados Finitos) capaz de estabilizar o sistema e filtrar interferências mecânicas.

Consolidar um protótipo de controle e medição automatizada para condomínios, garantindo uma leitura hídrica individualizada precisa e um controle de reservatório imune a interferências mecânicas.

Implementar a leitura de hidrômetros com alta precisão utilizando interrupções de hardware no micro controlador, garantir o intertravamento de segurança e a estabilização do sistema por meio de sensores de nível e tratamento via software (Máquina de Estados Finitos) e demonstrar a viabilidade técnica e financeira da solução para modernização de infraestruturas existentes.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Cenário Hídrico, Perdas e o Enquadramento Normativo da Medição Individualizada.

A gestão dos recursos hídricos no século XXI deixou de ser uma preocupação meramente administrativa para se tornar um imperativo estratégico global. No Brasil, embora o país detenha aproximadamente 12% da água doce superficial do planeta, a distribuição irregular e a eficiência precária dos sistemas de distribuição urbana criam cenários de escassez severa em regiões densamente povoadas. Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2020), a sustentabilidade do setor de saneamento depende da transição de um modelo de oferta (focado em construir novas represas) para um modelo de gestão da demanda, onde o foco é o controle rigoroso do consumo e a eliminação de desperdícios.

No âmbito dos sistemas prediais e condomínios, o desperdício é potencializado pela invisibilidade do consumo. O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2022) aponta que o índice de perdas de água na distribuição no Brasil atinge patamares próximos a 40%. Tecnicamente, essas perdas são segmentadas em duas frentes interligadas: as perdas reais e as perdas aparentes. As perdas reais, ou físicas, correspondem aos volumes de água que não chegam ao ponto de consumo devido a vazamentos em adutoras, redes de distribuição e reservatórios. No contexto condominial, a falta de monitoramento contínuo permite que pequenos vazamentos em boias ou fissuras em tanques passem despercebidos por meses, gerando prejuízos financeiros e estruturais crônicos.

Por outro lado, as perdas aparentes, ou não físicas, representam a água que é efetivamente consumida pelos usuários, mas que não é contabilizada pelo sistema. Esse desvio ocorre majoritariamente devido a imprecisões nos hidrômetros antigos (submedição por desgaste mecânico ou de vazamentos), erros sistêmicos de leitura humana e fraudes. Nesse cenário, a automação surge como o mecanismo fundamental capaz de mitigar as perdas aparentes, uma vez que a introdução de sensores de alta sensibilidade e a transmissão digital de

dados eliminam a subjetividade e a margem de erro intrínseco à transcrição manual em pranchetas (TSUTIYA, 2021).

Historicamente, o modelo de medição coletiva adotado em edifícios residenciais, onde um único medidor registra o consumo de todo o prédio gera o fenômeno social conhecido como "Tragédia dos Comuns". Como o custo da água é rateado igualmente entre as unidades, o comportamento individual não reflete no custo pessoal. Gonçalves (2018) argumenta que esse modelo inibe a consciência ecológica: se um morador reduz seu banho em 5 minutos, a economia diluída no condomínio é insignificante em sua fatura, enquanto o morador que esbanja é financeiramente subsidiado pelos vizinhos mais econômicos.

Para sanar essa distorção ética e econômica, o Brasil estabeleceu um marco regulatório robusto. A Lei Federal nº 13.312, de 12 de julho de 2016, alterou as diretrizes nacionais de saneamento (Lei nº 11.445/2007), tornando obrigatória a medição individualizada em todos os novos condomínios entregues a partir de 2021. A legislação reconhece que a individualização é a ferramenta mais eficaz de Gestão da Demanda de Água (GDA). Estudos indicam que a simples instalação de medição individualizada pode reduzir o consumo global de um edifício em até 35% nos primeiros meses (ANA, 2020).

No entanto, a implementação tecnológica enfrenta desafios de padronização. A norma NBR 15806 (ABNT, 2010) estabelece os requisitos para sistemas de medição individualizada, porém, a maioria dos sistemas de mercado ainda utiliza tecnologias proprietárias de alto custo, dificultando a adoção em condomínios de baixa renda ou em reformas de edifícios antigos (*retrofit*).

2.2 Arquitetura de Microcontroladores e a Precisão por Interrupções de Hardware

O desenvolvimento de sistemas de automação para medição de fluidos exige uma unidade de processamento que concilie baixo consumo energético, custo acessível e, primordialmente, alta precisão na aquisição de dados em

tempo real. Nesse cenário, o microcontrolador ATmega328P, que compõe a arquitetura de plataformas como o Arduino Uno e Nano, destaca-se pela sua versatilidade e robustez. Segundo McRoberts (2018), a arquitetura RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) deste componente permite a execução de instruções complexas em um único ciclo de *clock*, tornando-o ideal para aplicações onde a contagem de pulsos externos é crítica para a fidedignidade do sistema.

A utilização de Interrupções de Hardware (External Interrupts) para a leitura dos sensores de fluxo. Diferente da técnica de *Polling* (varredura), onde o processador verifica constantemente o estado de um pino em um laço de repetição, as interrupções permitem que o microcontrolador "pause" sua execução principal instantaneamente assim que um sinal elétrico é detectado nos pinos digitais específicos. Como explica Monk (2017), essa técnica garante que nenhum pulso enviado pelo sensor seja perdido, mesmo que o processador esteja ocupado executando outras tarefas, como a comunicação Modbus ou a atualização de displays. Essa precisão é o que permite converter ciclos de rotação mecânica em volume exato de água acumulado, assegurando a integridade da medição individualizada.

Entretanto, a precisão digital precisa coexistir com as instabilidades físicas do meio. Em reservatórios de água, a entrada de fluxo gera turbulência e ondulações superficiais que podem causar leituras erráticas ou acionamentos indevidos de sensores de nível (boias). Para mitigar esse ruído mecânico, o projeto programa uma lógica de temporização estratégica. Ao estabelecer um ciclo de estabilização, então o sistema garante que a medição e o controle de nível ocorram apenas quando o fluido apresenta um estado laminar ou estático.

Essa integração entre o tratamento de sinais por interrupção e o gerenciamento de tempo por software permite que o protótipo opere com alta confiabilidade metrológica. Enquanto as interrupções cuidam das micromedições (os pulsos), a lógica de temporização cuida da estabilidade do sistema, filtrando as interferências causadas pela dinâmica da água. Essa abordagem de controle híbrido é fundamental para evitar o desgaste prematuro de componentes

eletromecânicos, como relés e bombas, que seriam submetidos a ciclos excessivos de liga-desliga caso as oscilações da água não fossem devidamente tratadas pela programação do microcontrolador (DORF; BISHOP, 2017).

2.3 Protocolo Modbus RTU e a Integração com Sistemas Supervisórios (SCADA)

A eficiência de um sistema de automação não se limita apenas à coleta precisa de dados, mas também à forma como essas informações são transmitidas, armazenadas e apresentadas ao usuário final. No contexto da gestão hídrica, a utilização de sistemas de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados (SCADA — *Supervisory Control and Data Acquisition*) é o que permite a transição de um monitoramento local para uma gestão centralizada e inteligente. Segundo Sortino (2025), os sistemas SCADA são fundamentais para a modernização de processos industriais e prediais, pois oferecem uma Interface Homem-Máquina (IHM) que facilita a tomada de decisão através de gráficos, históricos e alarmes em tempo real.

Para que a comunicação entre o microcontrolador e o software de supervisão ocorra de forma confiável, é necessária a adoção de um protocolo de comunicação robusto e padronizado. O protocolo Modbus, desenvolvido originalmente pela Modicon em 1979, consolidou-se como o padrão *de facto* na automação industrial devido à sua simplicidade e eficiência. Operando sob a arquitetura mestre-escravo (*Master-Slave*), o protocolo permite que um mestre como um computador executando o sistema supervisório solicite dados de diversos escravos, como as unidades de controle baseadas em microcontroladores instaladas nas colunas de água do condomínio.

Neste projeto, a implementação utiliza a variante Modbus RTU (*Remote Terminal Unit*), que transmite os dados de forma binária, otimizando a velocidade de comunicação e a integridade das mensagens através de checagem de erros (CRC — *Cyclic Redundancy Check*). A integração técnica é realizada através de bibliotecas especializadas, como a `modbusino_slave`, que converte o microcontrolador em um nó endereçável na rede de dados. A lógica de software organiza as informações coletadas como os estados dos sensores e o volume

acumulado de cada apartamento em uma tabela de registradores (tab_reg). Essa estrutura permite que o sistema supervisor acesse endereços de memória específicos para ler o consumo ou enviar comandos de controle, como o acionamento remoto da eletrobomba.

A simbiose entre o hardware livre e softwares de supervisão profissionais (SCADA), eleva o patamar de confiabilidade do sistema. Enquanto o microcontrolador processa as rotinas de interrupção e temporização em nível de campo, o sistema supervisor processa a inteligência de negócios, permitindo a geração de relatórios de consumo por unidade e a detecção de padrões anômalos que indiquem vazamentos. Conforme destaca Dorf e Bishop (2017), a digitalização de processos de controle através de protocolos industriais é o primeiro passo para a implementação de conceitos de Cidades Inteligentes (*Smart Cities*), onde a infraestrutura urbana responde de forma dinâmica e eficiente às necessidades da população.

2.4. Abordagem Metodológica Design Science Research (DSR)

Para que o desenvolvimento de um protótipo de automação seja reconhecido como uma contribuição científica, é necessário que ele siga um rigor metodológico que vá além da simples montagem eletrônica. Este trabalho adota a *Design Science Research* (DSR) como paradigma de pesquisa. Diferente das ciências naturais, que buscam explicar fenômenos existentes, a DSR foca na criação e avaliação de "artefatos" destinados a resolver problemas práticos e melhorar o desempenho de sistemas complexos (DRESCH; LACERDA; ANTUNES JÚNIOR, 2015).

A metodologia DSR foi estruturada seguindo os três ciclos fundamentais propostos por Hevner et al. (2004). O ciclo de relevância consistiu na identificação do problema real: a ineficiência das leituras manuais e o desperdício hídrico em ambientes coletivos. O ciclo de rigor fundamentou-se na busca de conhecimentos técnicos em microcontroladores, protocolos industriais de comunicação e mecânica dos fluidos. O ciclo de design envolveu a construção e a avaliação iterativa do artefato, incluindo a programação da Máquina de Estados Finitos (FSM) para garantir a estabilidade do controle do sistema.

A aplicação da DSR justifica-se pela natureza pragmática da Automação Industrial. Segundo Peffers et al. (2007), a pesquisa baseada em *Design Science* deve produzir um objeto que possa ser testado e validado em seu contexto de uso. Ao integrar hardware embarcado de prototipagem rápida com plataformas de supervisão industrial, este trabalho não apenas propõe uma solução teórica, mas materializa um artefato técnico capaz de transformar a gestão hídrica em um processo digital, auditável e eficiente. A validação deste artefato ocorre por meio da análise de precisão dos dados coletados e da estabilidade operacional da lógica de controle frente às perturbações do sistema hidráulico, fechando assim o ciclo metodológico de produção de conhecimento tecnológico.

3. METODOLOGIA

Esta pesquisa adota a abordagem *Design Science Research* (DSR) como esteira metodológica primária, uma vez que o foco do estudo não é apenas a observação de um fenômeno, mas o desenvolvimento, a implementação e a avaliação de um artefato tecnológico voltado à resolução de um problema prático no cenário hídrico condominial. O artefato proposto configura-se como um protótipo de hardware e software capaz de realizar a leitura individualizada de consumo e o controle automatizado do nível de reservatórios, mitigando os gargalos operacionais e mecânicos associados a esses processos.

A escolha da DSR como metodologia central justifica-se pela natureza construtivista do presente estudo. Diferentemente de abordagens descritivas — como o estudo de caso ou a pesquisa de levantamento —, que se limitam à observação e análise de fenômenos já existentes, a DSR orienta-se à produção de conhecimento científico por meio da concepção, construção e avaliação de artefatos tecnológicos inovadores (HEVNER et al., 2004). Para Peffers et al. (2007), a DSR é especialmente adequada quando existe um problema prático claramente identificado cuja solução não pode ser encontrada nas abordagens convencionais. No presente trabalho, a ineficiência dos processos manuais de medição hídrica e a ausência de soluções automatizadas de baixo custo para o ambiente condominial configuram exatamente esse hiato — tornando a DSR não

apenas a abordagem mais adequada, mas a metodologicamente mais rigorosa para conduzir esta pesquisa aplicada em Engenharia de Automação.

3.1. Delineamento de Pesquisa

O desenvolvimento e a validação do artefato foram conduzidos em ambiente laboratorial controlado, seguindo as etapas estruturadas da DSR. Na etapa de identificação do problema, constatou-se que a gestão hídrica em condomínios apresenta duas deficiências crônicas: a vulnerabilidade das medições manuais, propícias a erros de faturamento e lentidão na detecção de vazamentos, e a instabilidade eletromecânica dos sistemas de recalque tradicionais, agravada pelo fenômeno de bouncing nos sensores de nível, que induz a eletrobomba a sucessivos ciclos danosos de acionamento.

Na etapa de definição dos objetivos da solução, estabeleceu-se que o artefato deveria garantir precisão metrológica na contagem volumétrica e incorporar inteligência de controle capaz de blindar o hardware contra as perturbações mecânicas do fluido. A etapa de projeto e construção do artefato resultou em uma arquitetura híbrida, unindo componentes de proteção elétrica industrial com microcontroladores de prototipagem rápida e lógica de controle baseada em Máquina de Estados Finitos (FSM). Por fim, a etapa de avaliação consistiu na análise de precisão dos dados coletados e na verificação da estabilidade operacional da lógica de controle frente às perturbações do sistema hidráulico.

3.2. Procedimentos de Construção do Protótipo/Artefato

O processo de construção do artefato foi conduzido em ciclos iterativos de prototipagem, conforme preconizado pela DSR (PEFFERS et al., 2007). O ambiente de desenvolvimento constituiu-se em bancada laboratorial controlada, projetada para simular a infraestrutura hidráulica e elétrica de uma edificação vertical em escala reduzida. A seleção dos componentes baseou-se em dois critérios metodológicos centrais: acessibilidade econômica, visando à replicabilidade da solução, e adequação técnica, garantindo precisão metrológica e robustez operacional. Optou-se pela plataforma Arduino UNO

como unidade de processamento, sensores baseados no Efeito Hall para medição individualizada de consumo, chaves boia magnéticas para monitoramento de nível e painel eletromecânico para acionamento seguro da motobomba, integrados ao software supervisor Elipse E3 via protocolo *Modbus* RTU, formando uma arquitetura de três camadas: campo, supervisor e acesso remoto.

3.3. Protocolos de Teste e Avaliação

A validação do artefato foi conduzida segundo os critérios definidos pela fase de avaliação da DSR. O êxito do sistema foi estabelecido pelo atendimento simultâneo a três requisitos verificáveis: (i) ausência de perda de pulsos na micromedição de consumo hídrico durante simulações de fluxo contínuo nas duas unidades habitacionais (AP1 e AP2); (ii) eliminação do fenômeno de *bouncing* no acionamento da eletrobomba, comprovada pela ausência de ciclos redundantes de partida em curto intervalo de tempo; e (iii) transmissão íntegra e em tempo real dos dados ao supervisor via *Modbus* RTU, com registro persistente em banco de dados relacional. Os ensaios foram realizados em circuito fechado de recirculação, com monitoramento contínuo pelo Elipse E3 e análise comparativa entre o comportamento esperado e o real do artefato.

4. Desenvolvimento do Projeto

Nesta seção, descreve-se detalhadamente a construção do projeto proposto, o desenvolvimento do sistema de medição individualizada e controle

hídrico foram estruturados em três pilares fundamentais: a arquitetura e concepção mecânica do protótipo físico, o dimensionamento eletroeletrônico e a arquitetura de software embarcado. O objetivo desta etapa é materializar os conceitos teóricos de automação predial e hidrologia em uma solução tecnológica funcional e escalável.

A concepção física do protótipo foi projetada para emular o comportamento do sistema de abastecimento de um condomínio residencial. A estrutura principal foi construída em um suporte de madeira dimensionado para organizar os componentes hidráulicos e elétricos em dois níveis topográficos sendo possível visualizar nas figuras 4.1.

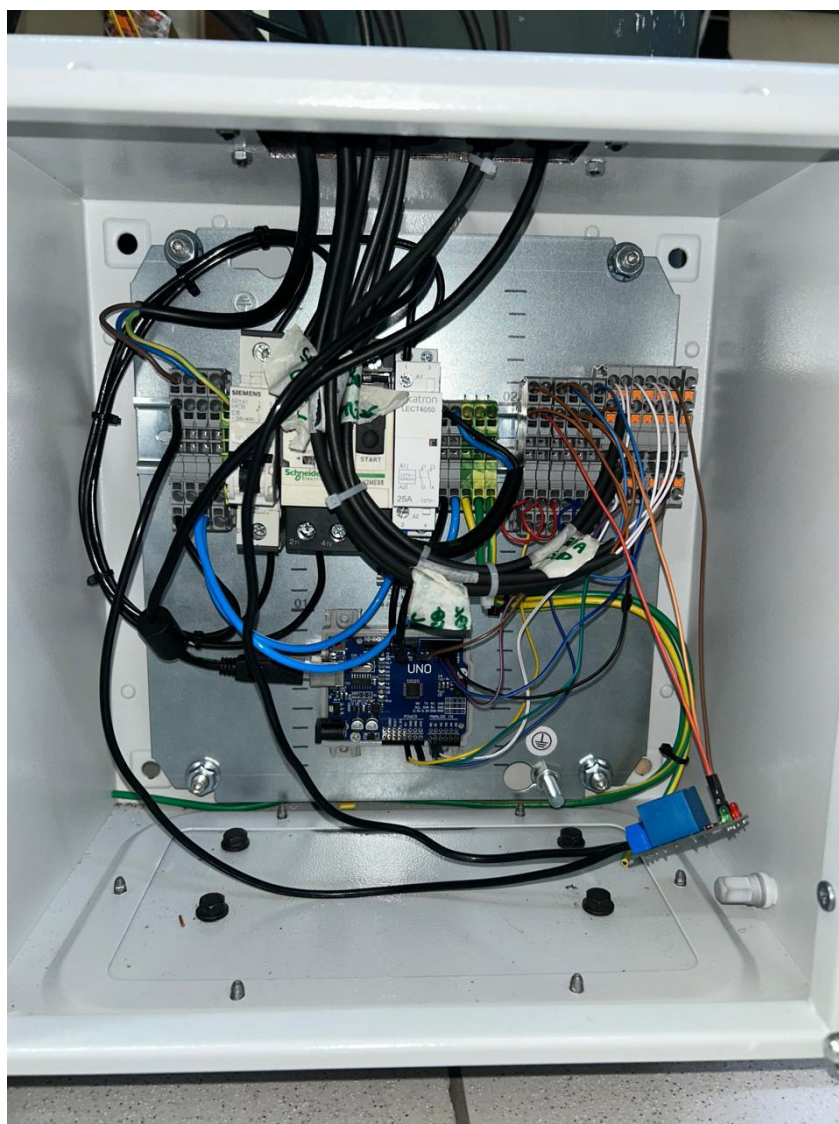
O nível superior abriga o reservatório elevado, simulando a caixa d'água principal do edifício, e serve de base para a fixação do painel elétrico de comando. O nível inferior é composto por um reservatório de retorno (simulando a cisterna) e uma bomba periférica instalada na base, responsável por garantir o recalque e a circulação do fluido no circuito fechado de testes. A interligação hidráulica foi executada com tubulações de PVC padronizadas, incorporando os hidrômetros nas ramificações que simulam o consumo individualizado dos apartamentos.

Figura 4.1 – Arquitetura mecânica e integração hidráulica do protótipo.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.2 – Arquitetura mecânica e integração hidráulica do protótipo.



Fonte: Autoria própria.

Processamento lógico do sistema é realizada por meio de sensoriamento específico, fundamentado nos princípios físicos descritos na base teórica. Para o monitoramento de nível, optou-se pela utilização de chaves boias magnética instaladas nos limites críticos (inferior e superior) dos reservatórios. Diferentemente de sensores de condutividade que estão sujeitos à corrosão galvânica e eletrólise, os sensores magnéticos operam com o fechamento de um contato seco interno (NA ou NF) promovido pelo deslocamento do flutuador. Isso garante alta durabilidade e isolamento elétrico no ambiente submerso.

Para a medição individualizada, foram acoplados aos hidrômetros sensores baseados no Efeito Hall. O escoamento do fluido rotaciona um disco magnético interno ao hidrômetro, gerando variações de campo magnético que o sensor converte em um trem de pulsos de onda quadrada. O volume consumido é determinado pela modelagem matemática que relaciona a frequência desses pulsos com a vazão volumétrica real da tubulação.

O painel de comando eletromecânico centraliza o acionamento de potência da motobomba. Ele é composto por um disjuntor monofásico para proteção geral do circuito, um contator de potência e um disjuntor-motor responsável pela proteção contra sobrecargas e curtos-circuitos no estator da bomba periférica. A interface entre este circuito de potência (corrente alternada) e o circuito de controle (corrente contínua 5V) é realizada por um módulo relé optoacoplado acionado pelo microcontrolador Arduino UNO.

4.2 Arquitetura de Software e Lógica de Controle

O software embarcado no microcontrolador Arduino foi desenvolvido em C/C++, estruturado sob o processamento não bloqueante. Em vez de utilizar funções de atraso convencionais que paralisam o processador (como a instrução `delay()`), a temporalidade lógica foi implementada por meio do monitoramento contínuo do relógio interno via função `millis()`. Esta abordagem garante que o sistema execute as rotinas de leitura de sensores, lógicas de intertravamento e comunicação de dados em tempo real, sem interrupções indesejadas no fluxo principal.

A aquisição volumétrica dos hidrômetros foi projetada para garantir total precisão, evitando o método de varredura (*polling*), que é suscetível à perda de pulsos rápidos. O sistema emprega interrupções externas de hardware configuradas através da função `attachInterrupt()` nos pinos digitais 2 e 3, acionadas na borda de descida do sinal magnético (FALLING) com base no código anexado na apêndice.

Para garantir a integridade da contagem sob concorrência de processamento, as variáveis de acumulação de pulsos foram declaradas com o

modificador *volatile*, forçando a leitura direta na memória RAM a cada ciclo. Adicionalmente, o código implementa uma rotina de segurança que grava os dados de consumo na memória não volátil do microcontrolador (EEPROM) a cada 30 segundos. Este recurso assegura que o histórico de medição individualizada de cada apartamento (AP1 e AP2) não seja perdido em caso de queda de energia ou reinicialização do sistema.

O acionamento da motobomba baseia-se em rigorosos critérios de segurança operacional e mitigação de desgastes eletromecânicos, operando com uma interface de relé em lógica invertida (*Active-Low*). O algoritmo apresenta dois níveis de proteção primordiais. O primeiro consiste no intertravamento de proteção a seco, onde a rotina verifica continuamente o estado do sensor do reservatório inferior e impede terminantemente a partida do motor (seja em modo automático ou manual) caso o reservatório esteja vazio, prevenindo a ativação da bomba. O segundo nível atua sobre a estabilização das leituras. Para evitar o fenômeno de ondulações da água acionamentos rápidos e sucessivos do contator causados pela turbulência da água sobre a boia superior, foi implementada uma malha de temporização. Ao identificar a necessidade de abastecimento, o software não aciona a carga imediatamente; ele inicia uma contagem regressiva não bloqueante de 40 segundos (*INTERVALO_RECARGA*). A partida do motor só é autorizada após a confirmação estabilizada de que este tempo transcorreu, garantindo a integridade elétrica e mecânica do sistema de recalque.

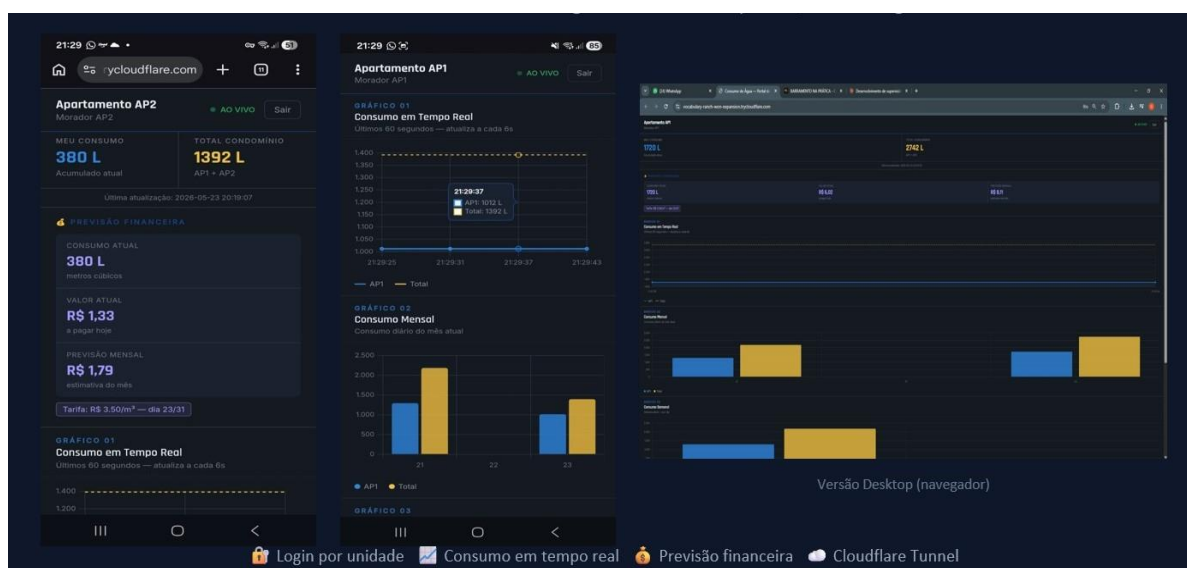
Diferente de protótipos isolados, a arquitetura de software foi concebida para integração com sistemas SCADA. Utilizou-se a biblioteca *Modbusino* para parametrizar o microcontrolador como dispositivo escravo (Slave 1) no protocolo de comunicação industrial Modbus RTU.

Através de uma tabela de registradores (*tab_reg*), o Arduino processa matematicamente os pulsos, divide-os por um fator de calibração e disponibiliza o volume final diretamente para o software supervisor Elipse E3. Essa estrutura permite o monitoramento remoto do status da bomba, nível dos reservatórios e

a execução de comandos de *reset* das medições ou alternância entre os modos automático e manual.

A arquitetura do sistema foi estruturada de modo que o software Elipse E3 atue como o servidor central de processamento e gerenciamento de dados (Data Server), sendo responsável pela aquisição das informações provenientes da plataforma Arduino e pelo armazenamento das leituras em banco de dados relacional. Para viabilizar o acesso do usuário final, o projeto incorporou uma interface de monitoramento remoto, desenvolvida para disponibilizar as informações de forma processada e intuitiva em dispositivos móveis. Esta interface funciona como um terminal de visualização que consome os dados armazenados no servidor, permitindo que cada morador acesse, de maneira segura e individualizada, o histórico e o consumo instantâneo de sua respectiva unidade habitacional por meio de um link de acesso direto.

Figura 4.3 – Interface de monitoramento remoto.



Fonte: Autoria própria.

5. Testes e resultados

A etapa de avaliação foi conduzida, objetivando validar a eficácia técnica da solução perante o problema de gestão hídrica e automação predial. O cenário de testes consistiu na operação do protótipo em malha fechada, simulando o consumo simultâneo e independente de duas frações (AP1 e AP2) e a rotina de

recalque de água entre os reservatórios inferior e superior. Os ensaios foram integralmente supervisionados através do software Elipse E3, conectado ao microcontrolador via protocolo industrial Modbus RTU. Os critérios de avaliação centraram-se na confiabilidade da medição individualizada e na resiliência do sistema de controle da bomba sob condições de frequente operação.

No que concerne à aquisição de dados volumétricos, a leitura dos hidrómetros pelos sensores, operou sem perda de pulsos durante a simulação de consumo. Este resultado comprovou a eficácia do uso de interrupções de hardware associadas a variáveis. Os dados brutos processados pelo microcontrolador foram submetidos ao fator de calibração do sistema e transmitidos em tempo real para o Elipse E3 através da tabela de registos Modbus. A interface supervisória demonstrou uma atualização síncrona e fluida, permitindo a visualização precisa do consumo independente de cada ramal e o cálculo do consumo total. Para validar a resiliência do sistema informático, introduziu-se um teste de simulação de falha de energia elétrica, caracterizado por uma queda abrupta de tensão no painel de comando. Ao reiniciar, o sistema acedeu aos endereços de memória não volátil (EEPROM) e restaurou com sucesso os últimos valores de consumo registados. Este comportamento validou o critério de segurança de dados, evidenciando que a rotina de salvar e guardar a cada 30 segundos mitigou satisfatoriamente o risco de perda do histórico de faturação em situações de contingência.

Adicionalmente, avaliou-se o comportamento da lógica de controle face aos desafios físicos da dinâmica de fluidos, com foco na proteção a seco da bomba periférica e na mitigação do efeito de "repique" do contactor. Ao forçar o esvaziamento do reservatório de retorno, simulando uma falha no abastecimento da rede pública, o sensor de nível inferior atuou imediatamente. A rotina de prioridade máxima do software bloqueou a energização do módulo relé, mantendo a bomba inoperante mesmo sob comando manual ou exigência do reservatório superior, atestando a robustez do intertravamento contra a cavitação. Num segundo cenário, simulou-se uma intensa turbulência na superfície da água do reservatório superior, causando oscilações rápidas na chave boia magnética. O projeto demonstrou elevada estabilidade ao detectar o

nível baixo, o sistema iniciou a malha de temporização não bloqueante (`millis()`), autorizando o acionamento da bomba apenas após a confirmação estabilizada de 40 segundos, absorvendo as flutuações sem acionar a carga indevidamente.

Em suma, os testes evidenciaram que a substituição do método de leitura manual pela telemetria automatizada é uma solução fiável, suportada por uma arquitetura de software tolerante a falhas mecânicas e elétricas. A utilização integrada do Arduino para o controlo de baixo nível, aliada à interface do Elipse E3, resultou numa solução com características industriais adaptada ao escopo residencial. A introdução da temporização de segurança e da lógica invertida de acionamento provou ser elementos cruciais do design, prolongando a vida útil dos componentes de manobra e garantindo a integridade elétrica do motor, o que configura um avanço significativo na gestão operacional do recurso hídrico.

A terceira frente de avaliação contemplou a validação do Portal do Morador, camada de acesso remoto e individualizado desenvolvida como extensão do sistema supervisorio. A interface, acessível via navegador em dispositivos móveis por meio de um túnel seguro (Cloudflare Tunnel), autenticou corretamente os usuários por credenciais vinculadas a cada unidade habitacional (AP1 e AP2), exibindo exclusivamente os dados da fração correspondente. Durante os ensaios, o consumo acumulado registrado pelo Arduino e processado pelo Elipse E3 foi de 1.057 L para o AP1 e de 890 L para o AP2, totalizando 1.947 L no condomínio. Esses valores foram refletidos com fidelidade na interface móvel em tempo real. O gráfico de consumo instantâneo, atualizado a cada 6 segundos via polling assíncrono ao servidor, acompanhou os incrementos de vazão sem defasagem perceptível ao operador. Adicionalmente, os gráficos de consumo mensal, semanal e diário foram renderizados corretamente a partir do histórico armazenado no banco de dados relacional. A arquitetura de três camadas — Hardware (Arduino) → Servidor local (Elipse E3) → Interface móvel (Portal do Morador) — demonstrou operação integrada e síncrona, comprovando a viabilidade técnica da solução para aplicações residenciais orientadas à transparência de consumo e gestão hídrica individualizada.

Figura 5.1 – Tela de início.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.2 – Tela de cadastro.



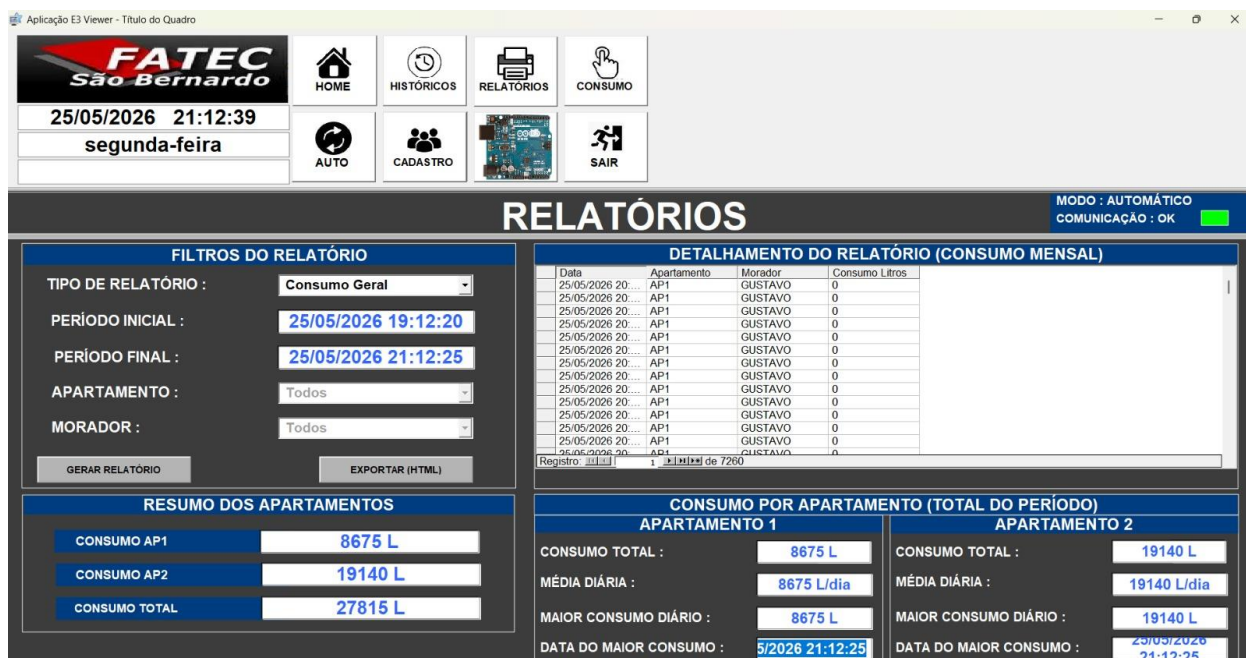
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.3 – Tela de histórico.



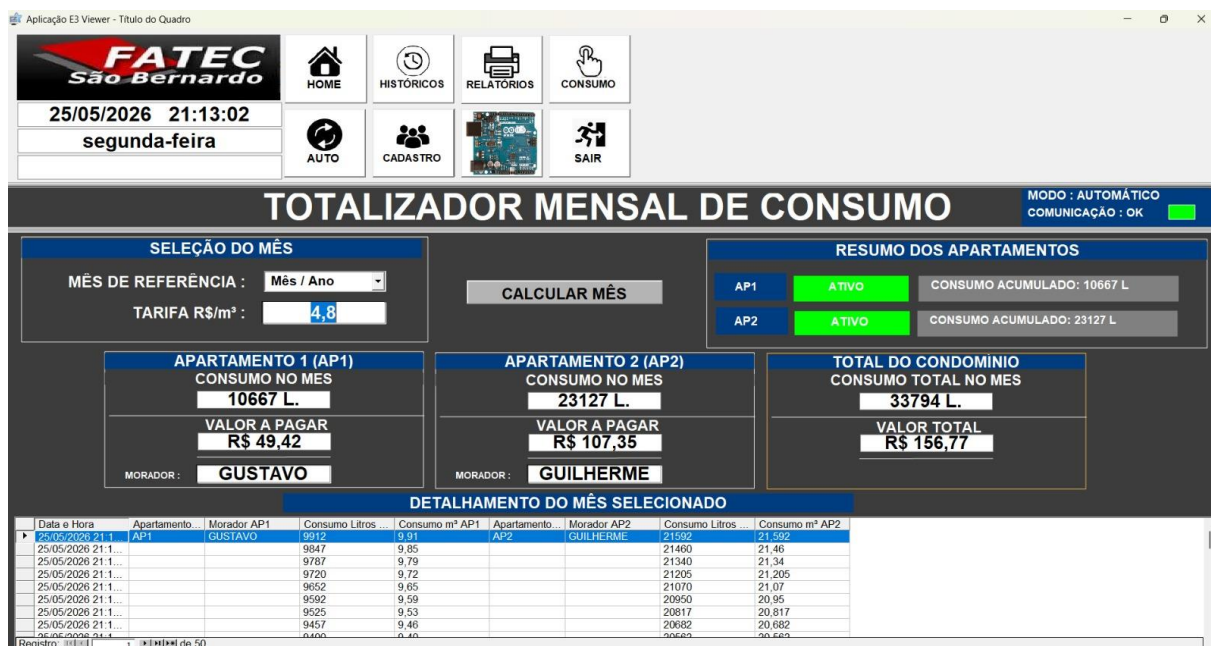
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.4 – Tela de relatório.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.5 – Tela de consumo.



Fonte: Autoria própria.

No âmbito da robustez operacional e manutenção preditiva, sugere-se a adição de um sensor de corrente elétrica (como o ACS712) acoplado à alimentação da bomba. O monitoramento contínuo do perfil de consumo energético do motor permitiria a identificação precoce de falhas no selo mecânico ou obstruções na tubulação, mitigadas a partir da detecção de alterações bruscas na corrente. Por fim, do ponto de vista do software, o sistema pode ser aprimorado com o desenvolvimento de uma rotina de calibração dinâmica. Este recurso daria ao usuário ou operador a autonomia para ajustar o fator de conversão volumétrica, por meio de botões de navegação físicos ou pelo próprio supervisor, extinguindo a necessidade de reprogramação e compilação direta no microcontrolador em eventuais manutenções dos hidrômetros.

6. Considerações finais

Este estudo propôs-se a solucionar a ineficiência, a ausência de transparência e a suscetibilidade a erros inerentes aos processos manuais de leitura de consumo hídrico em condomínios residenciais. Para tanto, sob o rigor metodológico da *Design Science Research* (DSR), foi desenvolvido e validado um artefato tecnológico de automação predial composto por um microcontrolador Arduino UNO, malha de sensoriamento magnético (chaves boias e Reed

Switches) e um painel de acionamento, totalmente integrado ao software supervisor Elipse E3 por meio do protocolo Modbus RTU.

Os resultados obtidos nos testes validaram a eficácia técnica do sistema, demonstrando que o artefato atingiu plenamente os objetivos propostos. A substituição do método de varredura convencional pelo uso de interrupções de hardware, aliada à persistência autônoma de dados em memória não volátil (EEPROM), assegurou extrema precisão e segurança na totalização volumétrica da medição individualizada. Adicionalmente, a arquitetura de software baseado em processamento assíncrono não bloqueante viabilizou a implementação de uma lógica de intertravamento e temporização de segurança (40 segundos). Essa solução de engenharia absorveu com êxito as flutuações físicas do nível d'água, eliminando o acionamento indevido e o "repique" do contator, o que reflete diretamente no prolongamento da vida útil dos equipamentos. Corroborando a confiabilidade do sensor de vazão empregado, Araújo e Ferreira (2024), em estudo publicado na revista *Research, Society and Development*, avaliaram o desempenho do sensor YF-S201 integrado à plataforma Arduino UNO e constataram que, para colunas de água superiores a 5,7 cm, os resultados obtidos pelo sensor apresentaram convergência satisfatória com os valores experimentais, com desvio padrão de 0,54 L/min — evidenciando que o sensor é adequado para aplicações de automação predial de baixo custo.

As contribuições deste projeto estendem-se aos âmbitos prático e acadêmico. Na prática, a solução entrega uma ferramenta de gestão hídrica automatizada, de baixo custo e alta confiabilidade, promovendo o uso racional da água e um rateio financeiro justo. No contexto acadêmico, o trabalho comprova a viabilidade técnica de transpor paradigmas e protocolos de comunicação consolidados na automação industrial para o escopo residencial, sem perda de robustez.

Apesar dos resultados satisfatórios, o estudo apresenta limitações relacionadas ao seu caráter de prototipagem em malha fechada, restringindo-se à validação simultânea de apenas duas frações de consumo e operando sob

dependência de infraestrutura cabeada (Modbus RTU) para a supervisão dos dados.

Dada a natureza modular do artefato, o projeto evoluiu para incorporar uma terceira camada de acesso à informação: o Portal do Morador. Esta interface web, acessível via dispositivos móveis por meio de túnel seguro (Cloudflare Tunnel), consome os dados processados e armazenados pelo Elipse E3, apresentando ao usuário final gráficos de consumo instantâneo, diário, semanal e mensal de forma individualizada por unidade habitacional. A implementação desta camada consolidou a arquitetura de três níveis do sistema — campo, supervisão e acesso remoto — demonstrando que o modelo desenvolvido transcende o escopo de um protótipo laboratorial e apresenta atributos de uma solução tecnológica escalável para edificações residenciais inteligentes.

Em relação aos trabalhos futuros, recomenda-se a incorporação de sensores de corrente elétrica no circuito de potência, como o ACS712, para viabilizar o diagnóstico de manutenção preditiva do motor, bem como o desenvolvimento de rotinas de autocalibração dinâmica via software, conferindo maior escalabilidade e autonomia à operação do sistema.

7. APÊNDICE: CÓDIGO-FONTE DOCUMENTADO

O código a seguir representa a lógica final implementada no protótipo, integrando o controle de recalque com máquina de estados e a medição por interrupção.

```
#include "Modbusino.h"
```

```
//
```

```
=====
```

```
// 1. CONFIGURAÇÃO DA COMUNICAÇÃO MODBUS
```

```

//
=====

=====

ModbusinoSlave modbusino_slave(1);

uint16_t tab_reg[10];


// Macros para manipulação de bits nos registradores

#define testBit(valor,bit) (valor & (1<<bit))

#define setBit(valor,bit) (valor |= (1<<bit))

#define clearBit(valor,bit) (valor &= ~(1<<bit))


// Variáveis de Status (Arduino -> SCADA Elipse E3)

unsigned int Status1 = 0;

unsigned int Status2 = 0;

unsigned int Status3 = 0;

unsigned int Status4 = 0;


// Variáveis de Controle (SCADA Elipse E3 -> Arduino)

unsigned int Controle1 = 0;

unsigned int Controle2 = 0;

unsigned int Controle3 = 0;


//
=====

=====

```

```

// MAPEAMENTO DE HARDWARE - SISTEMA DE RECALQUE E MEDIÇÃO

//
=====

=====

const int rele = 8;    // Pino de acionamento do relé da bomba

const int pinoBoiaSup = A0; // Sensor de nível do reservatório superior

const int pinoBoiaInf = A1; // Sensor de nível do reservatório inferior


// Pinos dos hidrômetros (alocados nos pinos com suporte a interrupção externa)

const int pinoApto1 = 2;

const int pinoApto2 = 3;


// Lógica de acionamento do módulo relé (Ativo em LOW)

const bool RELE_ATIVO_LOW = true;


// Variáveis de contagem de pulsos (volatile devido à manipulação em ISR)

volatile unsigned long consumo1 = 0;

volatile unsigned long consumo2 = 0;


// Variáveis de controle de temporização da bomba

int etapaCiclo = 0;

unsigned long tempoReferencia = 0;

```

```
const unsigned long TEMPO_ESPERA_DESCIDA = 50000; // Tempo de estabilização  
(50s)
```

```
// Temporização para debug no Monitor Serial
```

```
unsigned long tempoUltimaImpressao = 0;
```

```
const unsigned long INTERVALO_IMPRESSAO = 2000;
```

```
// Variáveis para filtro digital (debounce) dos sensores de nível
```

```
unsigned long timerOndaSup = 0;
```

```
unsigned long timerOndaInf = 0;
```

```
bool boiaSupFiltrada = 1;
```

```
bool boiaInfFiltrada = 1;
```

```
void setup() {
```

```
    Serial.begin(9600);
```

```
    // Configuração das saídas e entradas analógicas/digitais
```

```
    pinMode(rele, OUTPUT);
```

```
    pinMode(pinoBoiaSup, INPUT_PULLUP);
```

```
    pinMode(pinoBoiaInf, INPUT_PULLUP);
```

```
    // Configuração das entradas dos hidrômetros
```

```
    pinMode(pinoApto1, INPUT_PULLUP);
```

```
    pinMode(pinoApto2, INPUT_PULLUP);
```

```

// Configuração das interrupções externas (Borda de descida)

attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pinoApto1), int_apto1, FALLING);

attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pinoApto2), int_apto2, FALLING);


desligarBomba();


Serial.println("=====");

Serial.println("Sistema de Medição e Controle Inicializado");

Serial.println("Comandos via Modbus aguardando...");

Serial.println("=====");
}


void loop() {

    while(1) {

        //
        =====
        =====

        // TRATAMENTO DE SINAIS DOS SENSORES DE NÍVEL (FILTRO DIGITAL)

        //
        =====
        =====

        bool leituraSup = digitalRead(pinoBoiaSup);

        bool leituraInf = digitalRead(pinoBoiaInf);

```

```

// 1. Debounce da Boia Superior (Filtro de 3s para turbulência)

if (leituraSup != boiaSupFiltrada) {

    if (millis() - timerOndaSup >= 3000) {

        boiaSupFiltrada = leituraSup;

    }

} else {

    timerOndaSup = millis();

}


// 2. Histerese Temporal da Boia Inferior (Delay de 50s na normalização)

if (leituraInf == 1) {

    // Nível crítico alcançado: atua imediatamente para proteger a bomba

    boiaInfFiltrada = 1;

    timerOndaInf = millis();

} else {

    // Nível normalizado: aguarda o tempo de descida antes de liberar a variável

    if (boiaInfFiltrada == 1) {

        if (millis() - timerOndaInf >= TEMPO_ESPERA_DESCIDA) {

            boiaInfFiltrada = 0;

        }

    }

}

```

```

//
=====

// ATUALIZAÇÃO DOS STATUS DE NÍVEL PARA O SCADA

//
=====

if (boiaInfFiltrada == 0) {

    clearBit(Status1, 0);

} else {

    setBit(Status1, 0);

}

if (boiaSupFiltrada == 0) {

    clearBit(Status1, 1);

} else {

    setBit(Status1, 1);

}

//
=====

// LÓGICA DE INTERTRAVAMENTO E ACIONAMENTO DA BOMBA

//
=====

```

```

bool modoAuto = testBit(Controle1, 0); // Modo Automático (COMANDO1.Bit00)

bool modoManual = testBit(Controle1, 3); // Modo Manual (COMANDO1.Bit03)


// Condição de Acionamento: Modo habilitado + Níveis operacionais seguros
if ((modoAuto || modoManual) && ((boiaInfFiltrada == 0) || (boiaSupFiltrada == 1)))
{
    ligarBomba();
}


// Condição de Parada: Sistema inativo ou intertravamento por níveis críticos
if ((!modoAuto && !modoManual) || (boiaInfFiltrada == 1) || (boiaSupFiltrada == 0))
{
    desligarBomba();
}


//
=====
=====

// ZERAMENTO DOS HIDRÔMETROS VIA SCADA

//
=====
=====

if (testBit(Controle1, 1)) {

    consumo1 = 0;

}

```

```

if (testBit(Controle1, 2)) {

    consumo2 = 0;

}

//
=====

// DEBUG E MONITORAMENTO LOCAL

//
=====

if (millis() - tempoUltimaImpressao >= INTERVALO_IMPRESSAO) {

    tempoUltimaImpressao = millis();

    // Desabilita interrupções temporariamente para garantir a
    // integridade da leitura das variáveis voláteis

    noInterrupts();

    unsigned long leituraApto1 = consumo1;

    unsigned long leituraApto2 = consumo2;

    Status2 = consumo1;

    Status3 = consumo2;

    interrupts();

```

```

Serial.print("Leitura Apto 1: ");

Serial.print(leituraApto1);

Serial.print(" pulsos | Leitura Apto 2: ");

Serial.print(leituraApto2);

Serial.println(" pulsos");

}

delay(50); // Delay de estabilidade do laço principal

//
=====
=====

// MAPEAMENTO MODBUS (ARDUINO <-> ELIPSE E3)

//
=====
=====

// Arduino -> Elipse

tab_reg[2] = Status1;

tab_reg[3] = Status2;

tab_reg[4] = Status3;

// Elipse -> Arduino

Controle1 = tab_reg[5];

Controle2 = tab_reg[6];

Controle3 = tab_reg[7];

```

```

// Atualiza a comunicação do escravo Modbus

modbusino_slave.loop(tab_reg, 10);

}

}

//
=====

=====

// ROTINAS DE SERVIÇO DE INTERRUPÇÃO (ISR) - HIDRÔMETROS

//
=====

=====

void int_apto1() {

    consumo1++;

}

void int_apto2() {

    consumo2++;

}

//
=====

=====

// FUNÇÕES AUXILIARES DE ACIONAMENTO

```

```
//
=====

=====

void ligarBomba() {

    if (RELE_ATIVO_LOW) {

        digitalWrite(rele, LOW);

    } else {

        digitalWrite(rele, HIGH);

    }

}

void desligarBomba() {

    if (RELE_ATIVO_LOW) {

        digitalWrite(rele, HIGH);

    } else {

        digitalWrite(rele, LOW);

    }

}
```

Referencias

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Manual de Conservação e Uso Racional da Água em Edificações*. 2. ed. Brasília: ANA, 2020.

ARAÚJO, G. C.; FERREIRA, F. B. Avaliação de um sistema de baixo custo para medir vazão. *Research, Society and Development*, v. 13, n. 10, e97131047153, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v13i10.47153>.

ARDUINO. *Arduino Overview*. 2023. Disponível em: <https://arduino-doc.readthedocs.io/en/latest/Chapter-1/Arduino-Overview/>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15806: Sistemas de medição individualizada interna de consumo de água em edificações — Requisitos para projeto e execução*. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

BRASIL. *Lei nº 13.312, de 12 de julho de 2016*. Altera a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para tornar obrigatória a medição individualizada do consumo hídrico. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 13 jul. 2016.

COELHO, A. C. *Medição de água individualizada: manual do condomínio*. Recife: Edição do Autor, 2004.

COSTA, F. M.; NEVES, R. A. Sistemas de automação predial: fundamentos e aplicações. *Revista Engenharia e Inovação*, São Paulo, v. 3, n. 2, p. 45-58, 2018.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. *Modern control systems*. 13. ed. Boston: Pearson, 2017.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. V. *Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia*. Porto Alegre: Bookman, 2015.

ELIPSE SOFTWARE. *Manual do Usuário Elipse E3: Introdução e Arquitetura*. Porto Alegre: Elipse Software, 2023.

GONÇALVES, O. M. *Medição Individualizada de Água em Edifícios Residenciais*. São Paulo: EPUSP, 2018.

HEVNER, A. R. et al. Design Science in Information Systems Research. *MIS Quarterly*, v. 28, n. 1, p. 75–105, 2004.

MCROBERTS, M. *Arduino Básico*. 2. ed. São Paulo: Novatec, 2018.

MODBUS ORGANIZATION. *Modbus Application Protocol Specification V1.1b3*. [S. l.]: Modbus Organization, 2012.

MONK, S. *Programação com Arduino: Começando com Sketches*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2017.

PEFFERS, K. et al. A design science research methodology for information systems research. *Journal of Management Information Systems*, v. 24, n. 3, p. 45–77, 2007.

SILVA, J. A.; OLIVEIRA, M. P. Aplicação de tecnologias IoT na gestão hídrica condominial. *Anais do Congresso Brasileiro de Automática*, p. 45–52, 2021.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). *Diagnóstico Temático de Serviços de Água e Esgoto*. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2022.

SORTINO, G. F. F. *Automação industrial como melhoria da qualidade de processo contínuo: análise da introdução de sistemas digitais de controle de processos industriais*. 2025. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2025.

TSUTIYA, M. T. *Abastecimento de Água*. 4. ed. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2021.

ZAPATA-SIERRA, A. J. et al. *The Scientific Landscape of Smart Water Meters: A Comprehensive Review*. *Water*, v. 16, n. 1, p. 113, 2024. DOI: 10.3390/w16010113.