

16º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2025

SISTEMA DE MONITORAMENTO DE FLUIDOS POR MEDIÇÃO MÁSSICA

CAIO MARCILIO DOS SANTOS¹, JOÃO VICTOR GOMES DE MATOS², MATHEUS YUJI
OTAGURO NEVES³, JOSÉ WILLIAM RODRIGUES PEREIRA⁴

¹ Graduando em Engenharia de Controle e Automação, IFSP, Câmpus Salto, caio.marcilio@aluno.ifsp.edu.br

² Graduando em Engenharia de Controle e Automação, IFSP, Câmpus Salto, joao.victor@aluno.ifsp.edu.br

³ Graduando em Engenharia de Controle e Automação, IFSP, Câmpus Salto, matheus.yuji@aluno.ifsp.edu.br

⁴ Mestre em Automação e Controle de Processos, IFSP, Campus Salto, jose.pereira@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.02.05-0 Sistemas Eletrônicos de Medida e de Controle

RESUMO: O monitoramento de fluidos por massa é essencial em aplicações industriais onde o controle preciso de consumo e o fornecimento contínuo são críticos. A prova de conceito desenvolvida estabelece uma metodologia replicável que preenche a lacuna entre protótipos acadêmicos limitados e soluções comerciais de alto custo, demonstrando o funcionamento de um conceito de sistema para monitoramento de múltiplos vasos. O sistema foi projetado para garantir fornecimento contínuo através de comutação automática entre reservatórios quando atingidos os setpoints pré-configurados. A metodologia consistiu no desenvolvimento de duas balanças customizadas equipadas com células de carga, controlador ESP32 com comunicação MQTT, módulo atuador com relés fotoacoplados e interface de monitoramento desenvolvida em Python. A validação experimental demonstrou funcionalidade adequada com tempos de acionamento inferiores a 200 ms e precisão das balanças com erro médio de 1%. Os testes comprovaram a viabilidade do conceito de fornecimento contínuo, apresentando comutação automática eficiente entre vasos e capacidade de reabastecimento sem interrupção do sistema.

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento de fluidos; células de carga; fornecimento contínuo; sistema embarcado; comunicação MQTT; internet das coisas.

FLUID MONITORING SYSTEM BY MASS MEASUREMENT

ABSTRACT: Fluid monitoring by mass is essential in industrial applications where precise consumption control and continuous supply are critical. The developed proof of concept establishes a replicable methodology that fills the gap between limited academic prototypes and high-cost commercial solutions, demonstrating the operation of a system concept for multi-vessel monitoring. The system was designed to ensure continuous supply through automatic switching between reservoirs when pre-configured setpoints are reached. The methodology consisted of developing two custom scales equipped with load cells, an ESP32 controller with MQTT communication, an actuator module with optocoupled relays, and a monitoring interface developed in Python. Experimental validation demonstrated adequate functionality with actuation times under 200 ms and scale precision with an average error of 1%. Tests proved the viability of the continuous supply concept, presenting efficient automatic switching between vessels and refilling capability without system interruption.

KEYWORDS: Fluid monitoring; load cells; continuous supply; embedded system; MQTT communication; internet of things.

INTRODUÇÃO

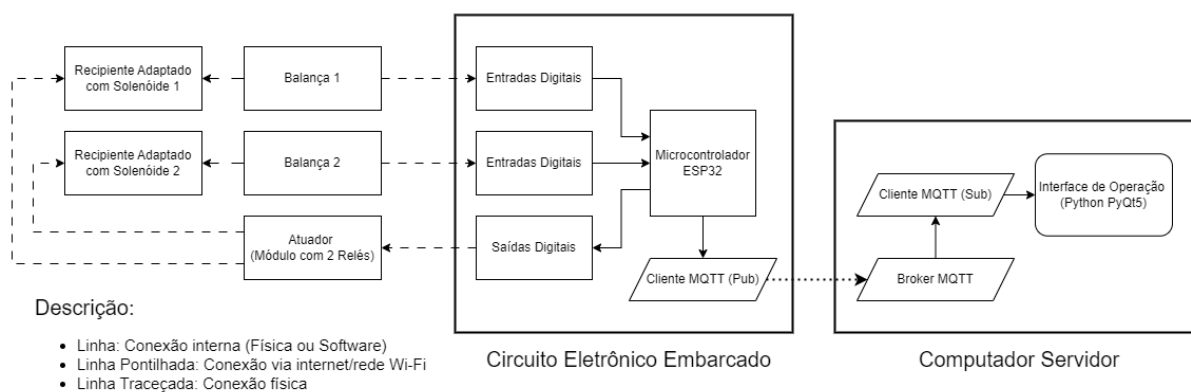
O monitoramento de fluidos por massa é fundamental em aplicações industriais onde controle preciso de consumo e fornecimento contínuo são essenciais, desde GLP até líquidos industriais e

aplicações médicas como em Gantam (2023) e Walensdziuk (2018). A literatura revela que sistemas desenvolvidos são prototípicos e limitados a cargas baixas (até 5kg), inadequados para aplicações industriais e comerciais onde fornecimento contínuo é crítico como é visto em Electronic Clinic (2024) e IoT Design Pro (2024). Persiste déficit de funcionalidades como ausência de sistemas multi-vaso integrados, limitações na validação de conceitos operacionais e falta de framework escalável, mostrado em Tang e Wang (2024) e Ghosh, Edwards e Hosseini (2021). O estado atual baseia-se em células de carga com amplificadores conectados à interface microcontrolada com comunicação wi-fi, oferecendo universalidade para diferentes fluidos variando apenas parâmetros de calibração (SparkFun Learn, 2024) e (Robotique.tech, 2024). Este projeto objetiva desenvolver e validar experimentalmente um sistema para monitoramento de fluidos por medições de massa, criando um framework conceitual para implementar controle de fornecimento contínuo. A principal contribuição consiste na validação experimental de metodologia a fim de mostrar que pode ser replicável e que preenche a lacuna entre protótipos acadêmicos limitados e soluções comerciais de alto custo (Grand View Research, 2024) e (IoT Analytics, 2025).

MATERIAL E MÉTODOS

A abordagem metodológica adotada baseia-se em pesquisa aplicada experimental com desenvolvimento de prova de conceito para validação do sistema proposto. A arquitetura do sistema, apresentada na FIGURA 1, compreende cinco componentes principais: (i) duas balanças customizadas equipadas com células de carga de flexão e módulo amplificador de sinais HX711 para quantificação da massa de fluido; (ii) uma unidade controladora baseada em ESP32 responsável pela aquisição, processamento e tratamento dos dados de medição; (iii) um sistema atuador para gerenciamento automatizado dos vasos através de acionamento de válvulas; (iv) uma interface de monitoramento desenvolvida em Python para supervisão local dos dados operacionais; e (v) duas garrafas de 5 litros com saídas controladas por válvulas solenoides. Para simulação experimental do fornecimento contínuo de fluidos também foi desenvolvido um sistema simples de reabastecimento dos recipientes por meio de uma bomba de movimentação de água pequena e externa à arquitetura da prova de conceito.

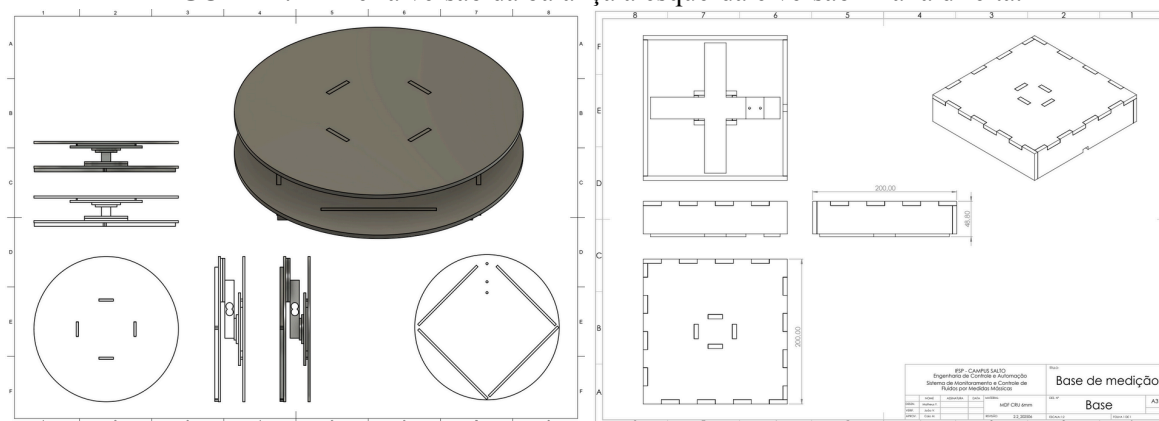
FIGURA 1. Arquitetura da prova de conceito.



O desenvolvimento da estrutura das balanças seguiu um processo iterativo de prototipagem e refinamento utilizando SOLIDWORKS. Os modelos estão representados na FIGURA 2, em que o primeiro design conceitual utilizou uma estrutura circular de MDF com 3 mm de espessura, composta por duas chapas (inferior e superior) que se encaixavam em um suporte parafusado na célula de carga, na parte superior, e parafusado diretamente na célula de carga, na parte inferior, com apoios de suporte encaixados. Durante os testes de validação, este modelo apresentou instabilidade estrutural significativa na plataforma superior, manifestando-se como deformação por flexão do MDF quando submetido a cargas concentradas superiores a 4 kg. A instabilidade foi atribuída à geometria circular de grande diâmetro com sistema de fixação por encaixe no centro, resultando em momentos fletores excessivos que comprometiam a rigidez estrutural. Para superar essas limitações, foi desenvolvido um segundo modelo utilizando MDF de 6 mm de espessura em configuração quadrada, mantendo o conceito de suportes parafusados na célula de carga, porém com design mais robusto e firme para o

encaixe da chapa superior. A base inferior foi redesenhada para otimização material e melhor distribuição de cargas, enquanto proteções laterais foram incorporadas através de colagem na chapa superior para confinamento e proteção da célula de carga. Este modelo aprimorado demonstrou estabilidade estrutural superior, suportando cargas de até 10 kg sem deformações significativas, validando assim o design para replicação e implementação nas duas unidades de balança necessárias para o sistema de monitoramento.

FIGURA 2. Primeira versão da balança à esquerda e versão final à direita.



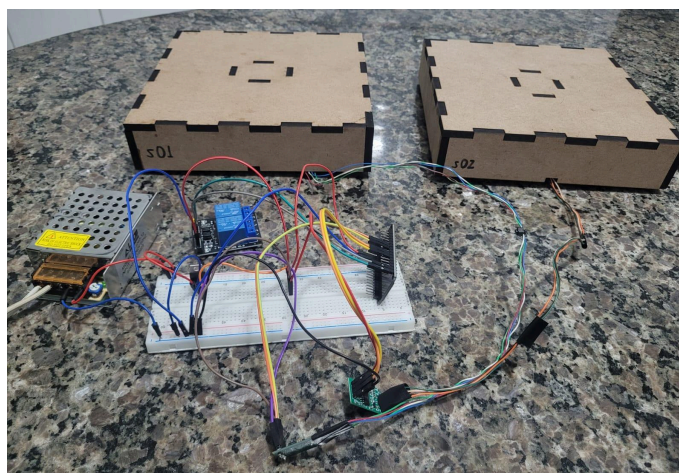
A arquitetura eletroeletrônica do sistema foi desenvolvida priorizando simplicidade e confiabilidade operacional e foi documentada por meio do software EasyEDA. A FIGURA 3 apresenta a montagem do protótipo. O sistema de alimentação utiliza uma fonte chaveada comercial com entrada universal de 100 a 240 V_{AC} e saída regulada de 12 V_{DC} para suprimento principal do circuito eletrônico. Para compatibilidade com os componentes digitais, foi implementado um circuito de regulação secundária baseado no regulador linear LM7805, incorporando filtros capacitivos para estabilização da tensão de saída em 5 V_{DC}. Esta configuração alimenta de forma integrada todos os subsistemas da placa de desenvolvimento. O sistema de atuação emprega relés eletromecânicos com acionamento por fotoacopladores para controle de válvulas solenóides de pequeno porte operando em 12 V_{DC}, responsáveis pelo controle de fluxo de água nos recipientes utilizados na simulação experimental. Esta arquitetura proporciona dupla isolamento galvânica - através dos fotoacopladores no circuito de comando e dos relés no circuito de potência - garantindo proteção adequada entre os circuitos de controle e de atuação, assegurando a proteção dos componentes eletrônicos mais sensíveis.

O desenvolvimento do firmware do controlador seguiu uma abordagem incremental com validação progressiva das funcionalidades e foi inteiramente desenvolvido em linguagem C++. Para a codificação foi utilizado o editor Visual Studio Code, com a extensão PlatformIO. Inicialmente, foi implementado o sistema básico de aquisição de dados dos sensores HX711 e calibração das células de carga, utilizando monitoramento serial para validação das leituras sem refinamentos adicionais de interface. Posteriormente, desenvolveu-se a arquitetura de comunicação MQTT entre a ESP32 e um notebook configurado como servidor local, estabelecendo a viabilidade de transmissão de dados das células de carga e validando o protocolo de comunicação proposto para o sistema. A terceira etapa contemplou o desenvolvimento de rotinas de teste para acionamento do módulo de relés, implementando comandos de controle via MQTT para continuidade do desenvolvimento da arquitetura de comunicação integrada. Com a validação dos subsistemas individuais, foi desenvolvida a primeira versão da lógica de transmissão de medições de peso em intervalos de um segundo para uma balança, permitindo a definição da máquina de estados necessária para operação do sistema. A etapa final integrou a segunda balança ao firmware e implementou funcionalidades avançadas incluindo tara automática, configuração de setpoints operacionais e gerenciamento completo dos estados das balanças, consolidando assim o sistema de monitoramento multi-vaso proposto.

A interface de monitoramento foi desenvolvida em Python utilizando a biblioteca PyQt5 para implementação dos widgets e design gráfico da aplicação. A arquitetura de comunicação emprega a biblioteca paho-mqtt para estabelecimento da conectividade com o sistema embarcado, permitindo recepção de dados e envio de comandos de controle. Possui como funcionalidades principais a visualização em tempo real do status operacional dos vasos, monitoramento contínuo do consumo de

fluidos e controle remoto das funções de tara das balanças e gerenciamento da operação do sistema. O objetivo central da aplicação consiste em fornecer uma plataforma de supervisão para validação experimental do sistema de controle desenvolvido e verificação da integridade da comunicação MQTT, demonstrando a viabilidade de monitoramento remoto através de servidor ou computador dedicado.

FIGURA 3. Versão atual do protótipo utilizado na prova de conceito.



A validação experimental da prova de conceito foi estruturada em etapas sequenciais para demonstração do fornecimento contínuo de fluidos. O procedimento iniciou com a energização do sistema com atuadores desligados, com as balanças livres de carga e parâmetros de conectividade pré-configurados. Após estabelecimento da comunicação Wi-Fi/MQTT entre o sistema embarcado e o computador servidor, verificou-se a transmissão correta dos dados de peso de cada balança, seguida da execução de tara individual para eliminação de variações de inicialização. Os valores de alarme foram configurados individualmente para cada balança através da interface de monitoramento, estabelecendo os setpoints de comutação automática. Com o posicionamento dos recipientes abastecidos com água e configuração dos alarmes, ambas as balanças apresentaram status "STANDBY", confirmando a correta interpretação dos dados pelo sistema. A inicialização da operação através da interface ativou automaticamente a balança 1, alterando seu status para "OPERANDO" e acionando o solenóide acoplado, enquanto a balança 2 permaneceu em standby. O teste de fornecimento contínuo consistiu na simulação de consumo gradual por meio do escoamento da água do recipiente para um reservatório externo até atingir o setpoint de alarme da balança 1, ocasionando sua desativação automática (status "VAZIA") e ativação simultânea da balança 2 (status "OPERANDO"). O ciclo de operação foi validado através do reabastecimento da balança 1 por bombeamento externo, retornando ao status "STANDBY", e posterior atingimento do alarme da balança 2, demonstrando a funcionalidade de comutação automática e operação contínua do sistema enquanto os recipientes fossem adequadamente reabastecidos. Caso não houvesse reabastecimento, assim que ambos os setpoints fossem atingidos, as duas balanças retornavam ao status "VAZIA" e os solenóides eram desativados. O sistema permite ainda a interrupção manual da operação a qualquer momento através da interface, retornando todas as balanças ao status "STANDBY" e desativando qualquer consumo de água.

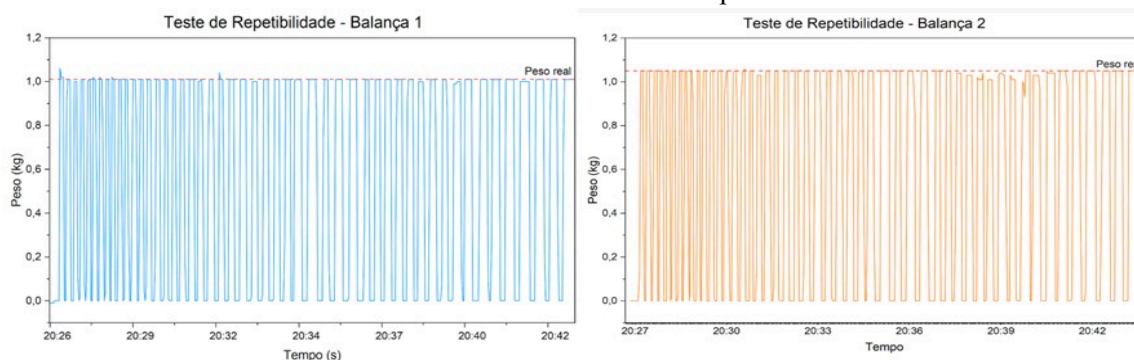
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes realizados com o sistema completo demonstraram funcionalidade adequada e atendimento às especificações de projeto estabelecidas. Os tempos de acionamento dos relés foram consistentemente inferiores a 200ms em todas as situações testadas, característica essencial para manutenção da operação ininterrupta do sistema de fornecimento contínuo. O tempo de resposta das medições na interface de monitoramento permaneceu inferior a 1 segundo, valor adequado para monitoramento de recipientes com fluidos de consumo gradual, tais como GLP, CO₂ e água, que não demandam atuações de alta velocidade, mas sim operação paulatina durante períodos prolongados.

Otimizações futuras no protocolo de comunicação MQTT e implementação de rede dedicada poderiam reduzir ainda mais a latência do sistema.

A validação metrológica das balanças demonstrou desempenho satisfatório, conforme mostrado na Figura 4, com erro médio de 10g para medições na faixa de quilogramas, resultando em precisão relativa inferior a 1% na maior parte da faixa operacional. Calibrações avançadas como correção de histerese e compensação térmica foram avaliadas, porém consideradas desnecessárias para a aplicação proposta, uma vez que a precisão requerida para monitoramento de fluidos industriais é atendida com as especificações atuais. Embora tais calibrações específicas pudessem proporcionar melhorias incrementais na precisão, a relação custo-benefício não se justifica considerando as características das células de carga empregadas, selecionadas para validação do conceito. Para aplicações industriais de maior precisão, recomenda-se a utilização de sensores de classe metrológica superior, onde técnicas de calibração avançada demonstrariam eficácia proporcional ao investimento realizado.

FIGURA 4. Resultados do teste de repetibilidade.



CONCLUSÕES

A validação experimental demonstrou a viabilidade técnica do sistema de monitoramento multi-vaso proposto para garantia de fornecimento contínuo de diferentes tipos de fluidos. A abordagem agnóstica ao tipo de fluido, fundamentada na medição por massa através de células de carga, comprovou sua universalidade e escalabilidade, requerendo apenas adaptações estruturais para suporte de cargas superiores conforme a aplicação específica. O framework desenvolvido estabelece uma metodologia replicável que preenche a lacuna identificada entre protótipos acadêmicos de capacidade limitada e soluções comerciais de alto custo, oferecendo uma plataforma intermediária adequada para validação de conceitos em diferentes contextos industriais.

Para evolução desta prova de conceito em direção à aplicabilidade industrial, recomendam-se desenvolvimentos complementares incluindo: (i) integração de sensores de detecção de vazamentos para incremento da segurança operacional; (ii) implementação de sistema de armazenamento de dados para geração de históricos de consumo e análises preditivas; e (iii) desenvolvimento de sistema automatizado de notificação para reabastecimento preventivo dos reservatórios. Estas melhorias implementadas consolidam o sistema como solução completa para monitoramento industrial de fluidos, mantendo os princípios de modularidade, escalabilidade e universalidade validados experimentalmente.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

J.V.G.M. e M.Y.O.N. foram responsáveis pelo desenvolvimento do projeto mecânico, incluindo design conceitual e montagem física das duas versões das balanças customizadas. C.M.S. e M.Y.O.N. conceberam e implementaram a arquitetura eletroeletrônica do sistema, abrangendo circuitos de condicionamento de sinais e controle de atuadores. J.V.G.M. e M.Y.O.N. conduziram a análise de aplicações viáveis e consolidação da lacuna científica endereçada pelo trabalho. C.M.S. desenvolveu integralmente a arquitetura de software, incluindo firmware para o sistema embarcado ESP32, interface de monitoramento em Python e protocolo de comunicação MQTT entre os subsistemas. J.V.G.M. e M.Y.O.N. realizaram a preparação dos aparatos experimentais para validação do conceito de fornecimento contínuo.

J.W.R.P. atuou na orientação técnica do projeto, participando de todas as etapas de desenvolvimento do protótipo, testes e validação do conceito do sistema.

Todos os autores participaram colaborativamente dos testes de integração, redação do artigo, revisão crítica do conteúdo e aprovação da versão final submetida.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Salto pelo suporte institucional.

REFERÊNCIAS

ELECTRONIC CLINIC. ESP32 **HX711 and Load cell based Digital Weighing Scale**, IoT Weighing Scale. Blog, out. 2024. Disponível em:

<https://www.electronicclinic.com/esp32-hx711-and-load-cell-based-digital-weighing-scale-iot-weighing-scale/>. Acesso em: 22 jul. 2025.

GANTAM, D. et al. Development of IoT Enabled Framework for LPG Gas Leakage Detection and Weight Monitoring System. **2023 International Conference on Device Intelligence, Computing and Communication Technologies (DICCT)**, p. 182-187, 2023. DOI: 10.1109/DICCT58595.2023.10110924.

GHOSH, A.; EDWARDS, D. J.; HOSSEINI, M. R. Patterns and trends in Internet of Things (IoT) research: future applications in the construction industry. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 28, n. 2, p. 457-481, 2021.

GRAND VIEW RESEARCH. Industrial Internet Of Things Market | Industry Report, 2030. **Market Research Report, 2024**. Disponível em:

<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/industrial-internet-of-things-iiot-market>. Acesso em: 22 jul. 2025.

IOT ANALYTICS. IoT 2024 in review: The 10 most relevant IoT developments of the year. **Industry Report, jan. 2025**. Disponível em: <https://iot-analytics.com/iot-2024-review/>. Acesso em: 22 jul. 2025.

IOT DESIGN PRO. IoT Based Smart Weighing Machine for Remote Weight Measurement and Monitoring. **Tutorial, 2024**. Disponível em:

<https://iotdesignpro.com/projects/smart-weighing-machine-for-remote-weight-measurement>. Acesso em: 22 jul. 2025.

ROBOTIQUE.TECH. Weighing scale using HX711 and ESP32 for remote weight monitoring (by bluetooth). **Tutorial, 2024**. Disponível em:

<https://www.robotique.tech/robotics/weighing-scale-using-hx711-and-esp32-for-remote-weight-monitoring-by-bluetooth/>. Acesso em: 22 jul. 2025.

SPARKFUN LEARN. IoT Weight Logging Scale. **Tutorial SparkFun, 2024**. Disponível em:

<https://learn.sparkfun.com/tutorials/iot-weight-logging-scale/all>. Acesso em: 22 jul. 2025.

TANG, L.; WANG, W. The applications of Internet of Things (IoT) in industrial management: a science mapping review. **International Journal of Production Research**, v. 62, n. 3, p. 771-809, 2024. DOI: 10.1080/00207543.2023.2290229.

WALENSDZIUK, W. Dynamic Outlier Detection in the Calibration by Comparison Method Applied to Strain Gauge Weight Sensors. **Sensors**, v. 18, n. 12, p. 4200, 2018. DOI: 10.3390/s18124200.