

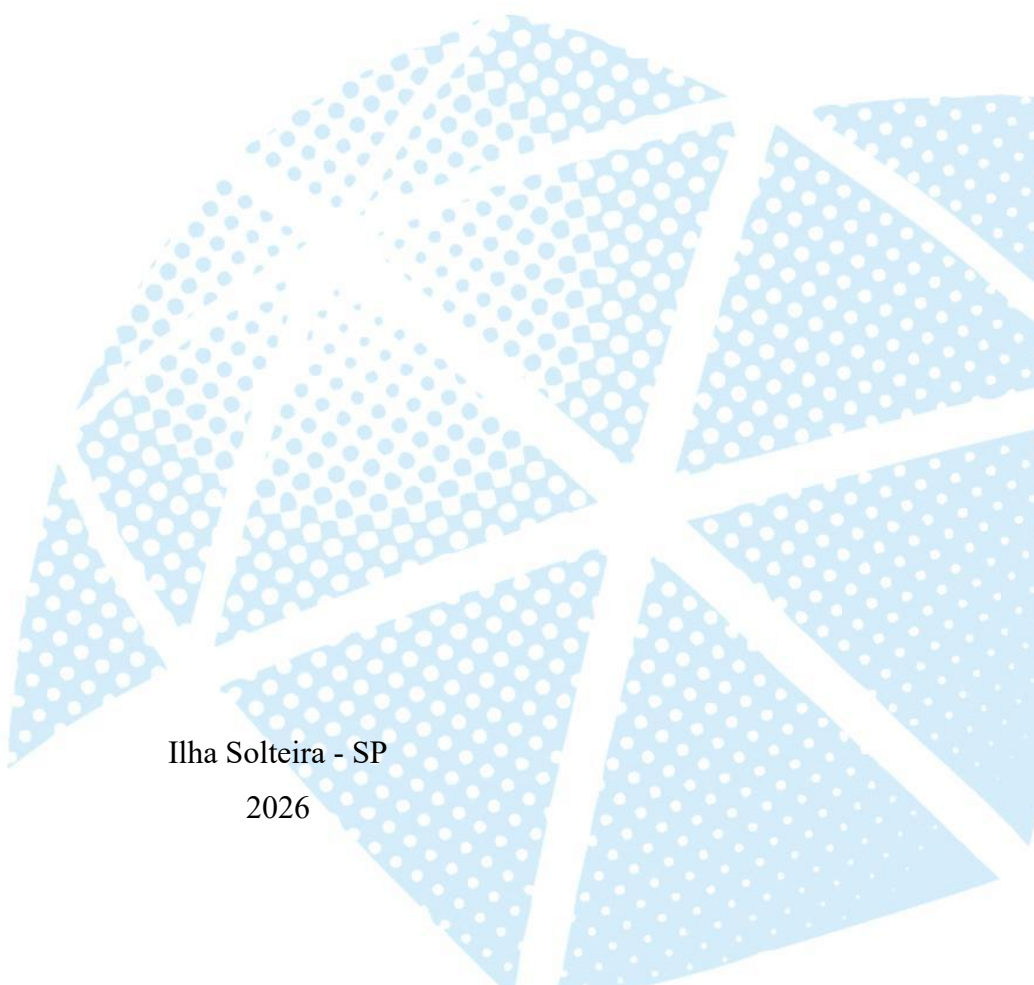
**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

Vinícius de Paula Silva e Souza

**Avaliação experimental de uma arquitetura multimodal de baixo custo para
monitoramento hidráulico residencial baseada em sensores piezoelétricos e de vazão.**

Ilha Solteira - SP

2026



Vinícius de Paula Silva e Souza

Avaliação experimental de uma arquitetura multimodal de baixo custo para monitoramento hidráulico residencial baseada em sensores piezoelétricos e de vazão.

Trabalho de Graduação apresentado à
Universidade
Estadual Paulista (UNESP), “Júlio de
Mesquita Filho”, Ilha Solteira, para
obtenção do título de Grau acadêmico
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Prof. Dr. Alexandre César
Rodrigues da Silva

Ilha Solteira - SP

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S586a Silva e Souza, Vinícius de Paula.
Avaliação experimental de uma arquitetura multimodal de baixo custo para monitoramento hidráulico residencial baseada em sensores piezoelétricos e de vazão / Vinícius De Paula Souza. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2026
85 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Iha Solteira,
2026

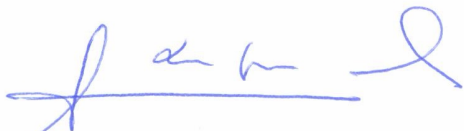
Orientador: Alexandre César Rodrigues da Silva

Inclui bibliografia

1. Vazamentos hidráulicos. 2. Sensor piezoelétrico. 3. ESP32. 4.
Processamento digital de sinais. 5. Sensor de vazão.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos dezesseis dias do mês de junho do ano de dois mil e vinte e seis, o discente **Vinícius de Paula Silva e Souza**, matriculado sob o nº 201054191, tendo como banca examinadora o seu orientador, o *Prof. Dr. Alexandre Cesar Rodrigues da Silva*, o *Prof. Dr. Carlos Antonio Alves* e o *Eng. Eletricista Bruno Hiromoto Oikawa*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**Avaliação experimental de uma arquitetura multimodal de baixo custo para monitoramento hidráulico residencial baseada em sensores piezoelétricos e de vazão**", obtendo a nota 9,0 (NOVE) e conceito APROVADO.



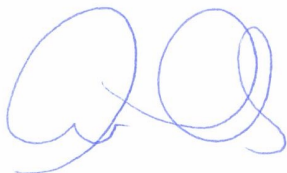
Prof. Dr. Alexandre Cesar Rodrigues da Silva



Vinícius de Paula Silva e Souza

- Orientador -

- Discente -



Prof. Dr. Carlos Antonio Alves

- Membro da Banca -



Eng. Eletricista Bruno Hiromoto Oikawa

- Membro da Banca -

Dedico este trabalho a Deus e à minha família pois sem eles nada disso teria sido possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente ao meu professor, orientador e tutor, Prof. Dr. Alexandre César Rodrigues da Silva, por sua contribuição significativa para a minha formação acadêmica. Além de sua orientação neste trabalho, teve papel importante em meu desenvolvimento durante o curso como professor tutor do grupo PET (Programa de Educação Tutorial) do qual fiz parte.

Agradeço também ao Prof. Dr. Ricardo Tokio Higuti, pela oportunidade de atuar como monitor em suas disciplinas de Princípios de Comunicação e Processamento Digital de Sinais, experiência que contribuiu diretamente para o aprofundamento de conceitos que são amplamente discutidos no presente trabalho, além de sua contribuição através do ensino de matérias que cativaram a minha aproximação ao curso.

Aos meus pais e às minhas irmãs, agradeço por todo o apoio, incentivo e presença ao longo da minha trajetória acadêmica. Sem o suporte deles e de Deus, a conclusão deste trabalho e o desenvolvimento dos conhecimentos aqui apresentados não seriam possíveis.

“O valor educacional destes experimentos é frequentemente inversamente proporcional à complexidade do aparato.” (*Maxwell, 1871, tradução nossa*).

RESUMO

O desperdício de água em instalações hidráulicas residenciais representa um problema relevante do ponto de vista econômico, ambiental e estrutural, especialmente quando associado a vazamentos de difícil identificação visual. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar experimentalmente um sistema de monitoramento de vazamentos hidráulicos residenciais utilizando sensores de baixo custo, microcontrolador ESP32 e técnicas de aquisição e processamento digital de sinais. A proposta baseou-se em uma abordagem multimodal, integrando sensores piezoelétricos, utilizados para captação de vibrações mecânicas na tubulação, e sensores de vazão baseados em efeito Hall, empregados para medição do fluxo hidráulico. Para a realização dos ensaios, foi construída uma maquete hidráulica em escala reduzida, composta por tubulações de PVC e módulos de vazamento ajustáveis. O sinal proveniente do sensor piezoelétrico foi condicionado por circuitos de pré-amplificação, polarização em tensão contínua e filtragem analógica, sendo adquirido pelo conversor analógico-digital do ESP32 e posteriormente analisado em ambiente computacional externo. Foram aplicadas rotinas de processamento em Python, incluindo remoção da componente contínua, cálculo do valor RMS, identificação de quedas abruptas para 0 V, análise espectral por Transformada Rápida de Fourier e classificação preliminar dos estados do sistema. Os resultados experimentais evidenciaram limitações relacionadas à baixa amplitude do sinal vibracional, elevada impedância do sensor piezoelétrico, ruídos elétricos, saturações transitórias, influência de impactos mecânicos e instabilidades do ponto de polarização. Verificou-se que métricas como RMS e FFT, quando utilizadas isoladamente, não foram suficientes para caracterizar de forma robusta eventos associados a vazamentos, sendo necessária sua interpretação conjunta com parâmetros como tensão pico a pico, ocorrência e duração de quedas de tensão para 0 V, presença de vazão e validade do bloco adquirido. Conclui-se que o sistema desenvolvido permitiu validar a arquitetura de aquisição, condicionamento e análise dos sinais, além de identificar limitações práticas relevantes para a aplicação de sensores piezoelétricos em tubulações residenciais. Embora a detecção automática robusta de vazamentos não tenha sido plenamente consolidada nesta etapa, o trabalho estabelece uma base experimental importante para futuras melhorias no condicionamento analógico, no acoplamento mecânico dos sensores, na calibração do sistema e na implementação de algoritmos embarcados de detecção inteligente.

Palavras-chave: vazamentos hidráulicos; sensor piezoelétrico; ESP32; processamento digital de sinais; sensor de vazão.

ABSTRACT

Water waste in residential hydraulic installations represents a relevant economic, environmental, and structural problem, especially when associated with leaks that are difficult to identify visually. In this context, this work aimed to develop and experimentally evaluate a residential hydraulic leak monitoring system using low-cost sensors, an ESP32 microcontroller, and digital signal acquisition and processing techniques. The proposed approach was based on multimodal architecture, integrating piezoelectric sensors, used to capture mechanical vibrations in the pipe, and Hall-effect flow sensors, used to measure hydraulic flow. For the experimental tests, a reduced-scale hydraulic test bench was built using PVC pipes and adjustable leak modules. The signal generated by the piezoelectric sensor was conditioned through pre-amplification, DC biasing, and analog filtering circuits, acquired by the ESP32 analog-to-digital converter, and subsequently analyzed in an external computational environment. Python processing routines were applied, including DC component removal, RMS calculation, detection of abrupt drops to 0 V, Fast Fourier Transform analysis, and preliminary classification of system states. The experimental results revealed limitations related to the low amplitude of the vibrational signal, the high impedance of the piezoelectric sensor, electrical noise, transient saturation, the influence of mechanical impacts, and instabilities in the bias point. It was found that metrics such as RMS and FFT, when used individually, were not sufficient to robustly characterize events associated with leaks, requiring joint interpretation with parameters such as peak-to-peak voltage, occurrence and duration of drops to 0 V, flow presence, and acquisition block validity. It is concluded that the developed system made it possible to validate the signal acquisition, conditioning, and analysis architecture, while identifying relevant practical limitations for the application of piezoelectric sensors in residential piping. Although robust automatic leak detection was not fully consolidated at this stage, this work establishes an important experimental basis for future improvements in analog conditioning, sensor mechanical coupling, system calibration, and embedded intelligent detection algorithms.

Keywords: hydraulic leaks; piezoelectric sensor; ESP32; digital signal processing; flow sensor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Sensores Piezoelétricos.....	27
Figura 2 – YF-S201 e YF-S401	28
Figura 3 – Esquemático elétrico do circuito de condicionamento — pré-amplificador, referência Vbias e filtro Sallen-Key	31
Figura 4 – ESP32 utilizado no trabalho	32
Figura 5 – Pinagem da placa ESP32 DevKit V1.....	33
Figura 6 – Circuito simulado do sistema de condicionamento analógico	36
Figura 7 – Comportamento temporal do circuito simulado	37
Figura 8 – Resposta em frequência do circuito de condicionamento	37
Figura 9 – Montagem da maquete hidráulica experimental.....	38
Figura 10 – Detalhamento das derivações da maquete	39
Figura 11 – Dimensões da maquete hidráulica experimental.....	40
Figura 12 – Comportamento Biestável do sistema.....	50
Figura 13 – Comportamento do sistema com menor constante de tempo	51
Figura 14 – Sinal medido após vibrações induzidas no piezoelétrico	53
Figura 15 – Sinal FFT medido após impacto induzido no piezoelétrico	53
Figura 16 – Bancada de ensaios do sensor piezoelétrico	55
Figura 17 – Bancada de ensaios do sensor de vazão YF-S201.....	55
Figura 18 – Ensaio 1 realizado com Piezo elétrico em repouso.....	56
Figura 19 – Ensaio 2 realizado com Piezo elétrico em repouso.....	57
Figura 20 – Ensaio 1 realizado com Piezo elétrico sob leves impactos	58
Figura 21 – Ensaio 2 realizado com Piezo elétrico sob leves impactos	58
Figura 22 – Ensaio 1: sensor piezoelétrico sob impacto forte	60
Figura 23 – Ensaio 2: sensor piezoelétrico sob impacto forte	60
Figura 24 – Ensaio 1: sensor piezoelétrico sob vibração contínua induzida	62
Figura 25 – Ensaio 2: sensor piezoelétrico sob vibração contínua induzida	62
Figura 26 – Ensaio 1: sensor de vazão com fluxo baixo	64
Figura 27 – Ensaio 2: sensor de vazão com fluxo alto	65
Figura 28 – Ensaio 1: análise multimodal com escoamento e impacto leve	67
Figura 29 – Ensaio 2: análise multimodal com escoamento e impacto forte	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Cenários Experimentais	41
Tabela 2 - Limiares utilizados na classificação dos sinais adquiridos	44
Tabela 3 - Regras de decisão multimodal do sistema	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Corrente Alternada (Alternating Current)
ADC	Conversor Analógico-Digital (Analog-to-Digital Converter)
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
DC	Corrente Contínua (Direct Current)
ESP32	Microcontrolador de 32 bits da Espressif Systems
FFT	Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform)
FIR	Filtro de Resposta Finita ao Impulso (Finite Impulse Response)
GND	Terra / Referência Elétrica (Ground)
GPIO	Entrada/Saída de Propósito Geral (General Purpose Input/Output)
IIR	Filtro de Resposta Infinita ao Impulso (Infinite Impulse Response)
IoT	Internet das Coisas (Internet of Things)
MOSFET	Transistor de Efeito de Campo Metal-Óxido-Semicondutor (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)
PVC	Policloreto de Vinila (Polyvinyl Chloride)
RMS	Valor Eficaz (Root Mean Square)
SoC	Sistema em Chip (System on Chip)
USB	Barramento Serial Universal (Universal Serial Bus)
Wi-Fi	Rede sem Fio (Wireless Fidelity)

LISTA DE SÍMBOLOS

Q	Carga elétrica gerada pelo sensor piezoelétrico	C
F	Força mecânica aplicada ao material piezoelétrico	N
d	Coefficiente piezoelétrico do material	C/N
V_{out}	Tensão elétrica de saída do sensor piezoelétrico	V
C_p	Capacitância interna do elemento piezoelétrico	F
Z_{out}	Impedância de saída do sensor piezoelétrico	Ω
j	Operador imaginário	—
ω	Frequência angular	rad/s
f_c	Frequência de corte do filtro passa-baixa	Hz
R	Resistência elétrica	Ω
C	Capacitância elétrica	F
A_v	Ganho de tensão do amplificador não inversor	—
R_f	Resistor de realimentação do amplificador	Ω
R_i	Resistor da entrada inversora do amplificador	Ω
V_{bias}	Tensão de polarização contínua de referência	V
τ	Constante de tempo do circuito RC	s
x_i	i -ésima amostra do sinal adquirido	V
$\bar{x}$	Valor médio do sinal	V
N	Número total de amostras do bloco analisado	—
$ X_k $	Magnitude espectral da k -ésima componente de frequência	—
$Re(X_k)$	Parte real da componente espectral X_k	—
$Im(X_k)$	Parte imaginária da componente espectral X_k	—
f	Frequência dos pulsos do sensor de vazão	Hz
K	Fator de calibração do sensor de vazão	pulsos/L
π	Constante	$\pi \approx 3,1415$

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	A EVOLUÇÃO PARA O DIAGNÓSTICO MULTIMODAL	19
2.2	SENSORES PIEZOELÉTRICOS APLICADOS AO MONITORAMENTO VIBRACIONAL	20
2.3	MEDIÇÃO DE VAZÃO POR SENSORES BASEADOS EM EFEITO HALL.....	23
2.4	PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS PARA DIAGNÓSTICO CONTÍNUO	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	PIEZOELÉTRICO.....	27
3.2	SENSOR DE VAZÃO E INTEGRAÇÃO COM O SISTEMA	28
3.3	CIRCUITO DE PRÉ-AMPLIFICAÇÃO DO SINAL PIEZOELÉTRICO	29
3.4	FILTRO PASSA-BAIXA SALLÉN KEY	30
3.5	MICROCONTROLADOR ESP32.....	32
3.6	AQUISIÇÃO E FILTRAGEM DIGITAL	33
3.7	SIMULAÇÕES	35
3.8	MAQUETE.....	38
3.9	PROTOCOLO EXPERIMENTAL	40
3.10	LÓGICA DO PROGRAMA, AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1	DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DA CADEIA DE CONDICIONAMENTO E AQUISIÇÃO	48
4.2	ENSAIOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE MULTIMODAL DOS SINAIS ..	54
4.2.1	Sensor piezoelétrico em repouso	56
4.2.2	Sensor piezoelétrico sob impactos leves.....	58
4.2.3	Sensor Piezo sob impactos fortes	59
4.2.4	Sensor Piezo sob vibração induzida.....	61
4.2.5	Validação funcional do sensor de vazão	64
4.2.6	Análise multimodal combinada	66
5	CONCLUSÃO	70

APÊNDICE A – CÓDIGO EMBARCADO NO ESP32.....	76
APÊNDICE B – CÓDIGO PYTHON DE AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE SINAIS.....	78

1 INTRODUÇÃO

O uso indevido de água potável tem se tornado uma preocupação crescente em escala global. Mesmo em países com ampla disponibilidade hídrica, como o Brasil, o desperdício em redes domésticas é recorrente e constitui um dos principais desafios para a gestão sustentável dos recursos hídricos (ANA, 2024). Entre os desperdícios mais significativos, destacam-se os vazamentos, que muitas vezes passam despercebidos por serem invisíveis, ocasionando não apenas o uso desnecessário de água, mas também danos à estrutura das edificações e aumento de custos para o consumidor. Segundo o Instituto Trata Brasil (2024), aproximadamente 37,78% da água tratada no país é desperdiçada, sendo parte significativa desse volume associada a vazamentos em redes prediais e residenciais. Essas perdas representam não apenas prejuízo econômico, mas também impacto ambiental relevante, devido ao desperdício de energia e insumos utilizados nos processos de tratamento e distribuição da água.

Além das perdas quantitativas, vazamentos hidráulicos podem favorecer infiltrações e contribuir indiretamente para processos de contaminação ambiental, especialmente em regiões onde redes de abastecimento e esgoto coexistem em proximidade. Relatórios da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2021) indicam a presença de contaminantes em águas subterrâneas associados à infiltração de efluentes e às deficiências em sistemas de saneamento, reforçando a importância do monitoramento contínuo das instalações hidráulicas, inclusive em ambientes residenciais.

Diante desse cenário, o desenvolvimento de sistemas inteligentes de monitoramento utilizando sensores de baixo custo, microcontroladores e técnicas de processamento digital de sinais surge como uma alternativa promissora para a identificação precoce de anomalias hidráulicas. O avanço das áreas de automação, sistemas embarcados e Internet das Coisas (IoT) tem possibilitado a criação de soluções capazes de monitorar variáveis físicas em tempo real, ampliando o potencial de aplicação dessas tecnologias em redes hidráulicas residenciais (Espressif Systems, 2024).

Neste contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento e a avaliação experimental de um sistema de monitoramento multimodal para detecção de vazamentos hidráulicos residenciais, baseado na integração entre sensores

piezoelétricos de vibração e sensores de vazão. A proposta busca investigar a viabilidade técnica da utilização combinada dessas variáveis físicas para identificação de eventos associados a vazamentos, explorando tanto a aquisição embarcada dos sinais quanto técnicas de processamento digital aplicadas ao domínio do tempo e da frequência.

Diferentemente de abordagens fundamentadas exclusivamente em sensores de vazão ou em sistemas comerciais de alto custo, o presente trabalho concentra-se na análise experimental do comportamento do sistema de aquisição e condicionamento de sinais, investigando as limitações práticas envolvidas na utilização de sensores piezoelétricos em aplicações de monitoramento hidráulico. Essa abordagem permite compreender os desafios associados à aquisição de sinais vibracionais de baixa amplitude, à presença de ruídos e às limitações impostas pelo condicionamento analógico e pelo processamento digital.

A utilização simultânea de sensores de vibração e vazão caracteriza uma abordagem multimodal, permitindo correlacionar fenômenos hidráulicos distintos e reduzindo limitações observadas em sistemas baseados em apenas uma variável. Trabalhos como o de Yazdekhesti et al. (2017) demonstram o potencial de técnicas baseadas em vibração para detecção de vazamentos em tubulações, utilizando medições de aceleração na superfície da tubulação e análise espectral para formular índices de detecção. Embora tais abordagens sejam promissoras, sua aplicação pode ser influenciada por fatores como material da tubulação, acoplamento mecânico dos sensores, ruídos externos e condições operacionais do sistema.

Outro diferencial da proposta está na utilização de componentes eletrônicos de baixo custo e ampla disponibilidade, permitindo o desenvolvimento de uma arquitetura experimental acessível e escalável. Enquanto soluções comerciais empregam equipamentos especializados, como geofones e sistemas avançados de inspeção acústica, este trabalho busca adaptar conceitos de monitoramento vibracional para um contexto de baixo custo baseado em sistemas embarcados.

Durante o desenvolvimento experimental, foram investigados fenômenos relacionados ao condicionamento analógico do sinal, estabilidade do ponto de polarização, saturação do circuito, aquisição via conversor analógico-digital e análise espectral por Transformada Rápida de Fourier (FFT). Os resultados obtidos permitiram compreender de forma aprofundada o comportamento do sistema frente a

diferentes tipos de excitação mecânica, evidenciando tanto o potencial quanto as limitações da abordagem proposta.

Além do caráter aplicado, a construção de uma maquete experimental em escala reduzida possibilitou a realização de testes controlados e reprodutíveis, favorecendo a validação da arquitetura desenvolvida e permitindo futuras expansões do sistema, como integração com redes IoT, transmissão sem fio de dados e implementação de algoritmos embarcados de detecção inteligente.

Dessa forma, o trabalho contribui não apenas para o estudo de sistemas de monitoramento hidráulico de baixo custo, mas também para a análise prática das dificuldades envolvidas na aquisição e interpretação de sinais vibracionais em aplicações reais. Os resultados obtidos estabelecem uma base experimental importante para futuras pesquisas em detecção inteligente de vazamentos utilizando sensores piezoelétricos e processamento digital de sinais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O monitoramento e a detecção de vazamentos em tubulações evoluíram significativamente nas últimas décadas. Historicamente, a identificação de anomalias hidráulicas dependia de inspeções em campo e de métodos acústicos de escuta direta, como o uso de geofones, técnica empregada para localizar ruídos gerados por vazamentos em redes de distribuição de água. Embora funcionais, esses métodos apresentam limitações, pois dependem da experiência do operador, das condições de propagação do som no meio e do acesso físico aos pontos de inspeção (Lahlou, 2001). Com o avanço da microeletrônica e da Internet das Coisas (IoT), a pesquisa passou a explorar sistemas embarcados contínuos e automatizados, capazes de interpretar variações físicas como vazão, pressão e vibração mecânica.

2.1 A EVOLUÇÃO PARA O DIAGNÓSTICO MULTIMODAL

Trabalhos fundamentados em apenas uma variável física demonstraram limitações importantes ao longo do tempo. Sistemas baseados exclusivamente na medição de vazão, mesmo quando associados a técnicas de aprendizado de máquina, permanecem suscetíveis a falsos positivos decorrentes de variações de consumo, oscilações de pressão da rede pública e alterações transitórias do regime hidráulico.

Como alternativa, estudos recentes têm enfatizado abordagens multimodais para aumento da robustez diagnóstica. Saqib, Mysorewala e Cheded (2017) demonstram que a integração multimodal entre parâmetros hidráulicos e sensores vibracionais permite realizar uma validação cruzada entre fenômenos físicos independentes em redes de distribuição de água. Enquanto as variáveis fluidodinâmicas quantificam o comportamento do escoamento e a pressão no sistema, os transdutores de vibração permitem identificar assinaturas mecânicas específicas na parede da tubulação, associadas à turbulência e à dissipação local de energia provocadas por vazamentos.

Essa correlação entre variáveis distintas reduz ambiguidades e amplia a confiabilidade do sistema, especialmente em aplicações residenciais, onde o comportamento hidráulico é altamente variável e sujeito a eventos transitórios.

2.2 SENSORES PIEZOELÉTRICOS APLICADOS AO MONITORAMENTO VIBRACIONAL

Os sensores piezoelétricos são amplamente empregados em aplicações de monitoramento estrutural, análise vibracional e detecção de falhas dinâmicas devido à sua elevada sensibilidade, ampla resposta em frequência e baixo custo de implementação. O princípio de funcionamento desses dispositivos baseia-se no efeito piezoelétrico direto, no qual determinados materiais geram carga elétrica quando submetidos a deformações mecânicas, como compressão, flexão, vibração ou impacto (Uchino, 2017).

Esse fenômeno ocorre em materiais cuja estrutura cristalina não apresenta centro de simetria. Em escala microscópica, suas células unitárias podem ser representadas por dipolos elétricos elementares, formados pela separação entre os centros de carga positiva e negativa. Durante o processo de fabricação, o material piezoelétrico é submetido a uma etapa de polarização elétrica, conhecida como poling, que promove o alinhamento desses dipolos e confere ao material uma polarização elétrica permanente (Callister; Rethwisch, 2020).

Quando uma força mecânica é aplicada ao material, ocorre deformação da rede cristalina, alterando a distribuição interna de cargas elétricas e produzindo uma diferença de potencial entre os eletrodos do sensor. De forma simplificada, a carga elétrica gerada pode ser expressa pela Equação 1.

$$Q = F * d \quad (1)$$

em que Q representa a carga elétrica gerada, F corresponde à força mecânica aplicada e d representa o coeficiente piezoelétrico do material (Uchino, 2017). A tensão elétrica resultante depende da capacitância equivalente do sensor, podendo ser descrita pela Equação 2.

$$V_{out} = \frac{Q}{C_p} \quad (2)$$

em que C_p representa a capacitância interna do elemento piezoelétrico. Dessa forma, para uma mesma deformação mecânica, a tensão gerada depende diretamente da carga produzida e da capacitância equivalente do sensor.

Do ponto de vista elétrico, sensores piezoelétricos podem ser modelados como fontes de carga ou corrente associadas a uma capacitância interna e a uma resistência de fuga elevada. Como consequência, apresentam impedância de saída predominantemente capacitiva e dependente da frequência do sinal mecânico aplicado (Franco, 2015). A impedância equivalente pode ser aproximada pela Equação 3.

$$Z_{out} = \frac{1}{j\omega C_p} \quad (3)$$

em que j representa o operador imaginário, ω a frequência angular e C_p a capacitância equivalente do sensor.

Para exemplificar esse comportamento, considerando uma capacitância típica de aproximadamente 25 nF e uma frequência de excitação de 100 Hz, a magnitude da impedância capacitiva equivalente pode ser estimada pela Equação 4.

$$Z_{out} = \frac{1}{j\omega C_p} \quad (4)$$

$$Z_{out} = \frac{1}{2\pi * 100 * 25 * 10^{-9}}$$

$$Z_{out} = 63,7k\Omega$$

Esse resultado evidencia a elevada impedância de saída característica dos sensores piezoelétricos, justificando a necessidade de circuitos de condicionamento com alta impedância de entrada. Caso essa condição não seja atendida, podem ocorrer efeitos de carregamento, perda de amplitude do sinal adquirido, aumento da sensibilidade a ruídos elétricos e instabilidades no ponto de operação do circuito, principalmente para frequências baixas (Franco, 2015; Horowitz; Hill, 2015).

Em aplicações envolvendo tubulações hidráulicas, pequenas perturbações no escoamento, cavitação, turbulências e vazamentos podem gerar vibrações mecânicas capazes de se propagar pela estrutura da tubulação. Essas vibrações podem ser captadas por sensores piezoelétricos posicionados externamente ao sistema hidráulico, sem necessidade de contato direto com o fluido. Estudos como o de Okosun et al. (2019) demonstram a viabilidade do uso de sensores piezoelétricos de saída direta para identificação de eventos vibracionais associados a vazamentos em

tubulações pressurizadas, reforçando o potencial dessa abordagem para aplicações de monitoramento não invasivo.

Entretanto, a aplicação de sensores piezoelétricos em tubulações residenciais apresenta desafios relevantes, especialmente no contexto brasileiro, em que muitas instalações hidráulicas utilizam tubulações poliméricas, principalmente PVC. Esse tipo de material apresenta maior amortecimento acústico quando comparado a tubulações metálicas, provocando significativa atenuação das vibrações ao longo da estrutura. Estudos voltados à vibroacústica aplicada à detecção de vazamentos em tubulações plásticas, como os de Almeida (2013), Almeida et al. (2014) e Brennan et al. (2018), demonstram que a propagação de sinais acústicos nesses materiais sofre elevada dissipação energética devido ao amortecimento da parede da tubulação e ao acoplamento com o meio externo.

Essa limitação justifica o uso de arquiteturas distribuídas de monitoramento, baseadas em múltiplos sensores de baixo custo posicionados próximos aos pontos de interesse. Em vez de depender exclusivamente de poucos sensores de alta precisão e elevado custo, a abordagem distribuída permite aumentar a sensibilidade espacial do sistema e reduzir os efeitos da atenuação vibracional característica das tubulações poliméricas.

Além da atenuação do sinal, outro fator crítico está relacionado à forma de fixação do sensor. O acoplamento mecânico entre o piezoelétrico e a superfície da tubulação influencia diretamente a transferência de energia vibracional para o elemento sensor. Camadas de ar, folgas mecânicas, fixações flexíveis ou contato inadequado podem reduzir significativamente a amplitude do sinal adquirido. A literatura aponta que fatores como método de fixação, geometria da estrutura monitorada, material da tubulação e acoplamento com o meio externo influenciam a resposta dinâmica do sistema de medição (Almeida et al., 2014; Brennan et al., 2018; Uchino, 2017).

Outro aspecto importante é a elevada sensibilidade dos sensores piezoelétricos a eventos impulsivos e transitórios. Impactos mecânicos produzem pulsos de curta duração, geralmente com energia distribuída em ampla faixa de frequências. Esse comportamento difere de vibrações contínuas ou aproximadamente estacionárias, que tendem a apresentar componentes espectrais mais estáveis. Assim, em sistemas de baixo custo, impactos, ruídos elétricos e saturações transitórias podem dificultar a

interpretação espectral do sinal e gerar respostas que não necessariamente estão associadas a vazamentos hidráulicos.

Dessa forma, a utilização de sensores piezoelétricos para detecção de vazamentos exige não apenas a correta aquisição do sinal, mas também um projeto criterioso do condicionamento analógico, incluindo alta impedância de entrada, polarização adequada, filtragem e proteção contra saturações. Além disso, a interpretação dos sinais deve considerar conjuntamente aspectos temporais e espectrais, bem como as condições hidráulicas do sistema monitorado.

Portanto, embora os sensores piezoelétricos apresentem potencial para aplicações de monitoramento vibracional em tubulações, sua aplicação em sistemas hidráulicos residenciais demanda cuidados específicos relacionados ao material da tubulação, ao acoplamento mecânico, à elevada impedância do sensor, à presença de ruídos e à distinção entre vibrações associadas a vazamentos e eventos transitórios não relacionados ao escoamento. Esses desafios reforçam a importância de uma abordagem multimodal, combinando sinais vibracionais com informações hidráulicas, como a medição de vazão, para aumentar a confiabilidade da análise do sistema.

2.3 MEDIÇÃO DE VAZÃO POR SENSORES BASEADOS EM EFEITO HALL

No que se refere à quantificação do fluxo hidráulico em sistemas embarcados, sensores de vazão baseados em efeito Hall, como os modelos YF-S201 e YF-S401, destacam-se pela simplicidade de integração com microcontroladores, baixo custo e ampla disponibilidade comercial. Esses dispositivos convertem o movimento do fluido em uma sequência de pulsos digitais, cuja frequência está relacionada à vazão volumétrica instantânea.

O princípio físico empregado nesses sensores baseia-se no efeito Hall, descrito inicialmente por Hall (1879). Esse fenômeno ocorre quando um material condutor ou semicondutor, submetido à circulação de corrente elétrica, é exposto a um campo magnético perpendicular ao fluxo de cargas. Nessa condição, os portadores de carga sofrem deflexão lateral devido à força de Lorentz, produzindo uma diferença de potencial transversal, denominada tensão Hall. Essa tensão é proporcional à intensidade do campo magnético aplicado e pode ser utilizada para detectar a

presença ou a variação de campos magnéticos próximos ao elemento sensor (Sedra; Smith, 2015).

Em sensores comerciais de vazão, o fluido escoar pelo interior do dispositivo e promove a rotação de um rotor acoplado a um ímã permanente. À medida que esse ímã passa periodicamente próximo ao elemento Hall, ocorre a geração de pulsos elétricos digitais. A frequência desses pulsos é proporcional à velocidade angular do rotor e, conseqüentemente, à vazão volumétrica do fluido que atravessa o sensor. Dessa forma, a medição de vazão pode ser realizada por meio da contagem dos pulsos em um intervalo de tempo definido. A relação entre a frequência dos pulsos e a vazão pode ser expressa genericamente pela Equação 5.

$$Vazão = \frac{f}{K} \quad (5)$$

em que vazão é a vazão volumétrica, geralmente expressa em L/min, f corresponde à frequência dos pulsos gerados pelo sensor, em Hz, e K representa o fator de calibração do sensor. Esse fator depende do modelo utilizado, das características construtivas do dispositivo e das condições hidráulicas de operação. Devido a isso, os fabricantes normalmente fornecem valores típicos de conversão.

Do ponto de vista eletrônico, a saída desses sensores geralmente é digital, permitindo integração direta com entradas digitais de microcontroladores. No entanto, como os sensores de vazão operam com alimentação de 5 V, é necessário condicionamento entre o nível lógico de saída do sensor e a tensão máxima suportada pelo microcontrolador utilizado. No caso do ESP32, cujas entradas operam em nível lógico de 3,3 V, recomenda-se o uso de circuito de adaptação de nível, como divisor resistivo ou conversor lógico apropriado, a fim de evitar sobretensão nos pinos de entrada.

A leitura dos pulsos pode ser realizada por meio de interrupções externas configuradas para detecção de borda de subida ou descida. Essa estratégia é especialmente adequada para sistemas embarcados, pois permite contabilizar os pulsos gerados pelo sensor sem depender de leitura contínua por polling (leitura contínua do estado do pino de leitura do sensor), reduzindo a probabilidade de perda de eventos e melhorando a confiabilidade da medição. Além disso, técnicas de desacoplamento elétrico, filtragem digital e organização da aquisição em janelas

temporais podem contribuir para reduzir oscilações e leituras espúrias, especialmente em ambientes sujeitos a ruídos eletromagnéticos (Horowitz; Hill, 2015).

Apesar da simplicidade de utilização, a precisão dos sensores de vazão baseados em rotor e efeito Hall depende significativamente das condições hidráulicas de instalação. A presença de bolhas de ar, turbulências excessivas, cavitação, vibrações mecânicas e perfis de escoamento não desenvolvidos pode introduzir oscilações na rotação do rotor e, conseqüentemente, instabilidades na frequência dos pulsos medidos. Além disso, conexões próximas, curvas, registros e mudanças bruscas de geometria podem perturbar o perfil de velocidade do fluido, afetando a repetibilidade das medições.

Por essa razão, é recomendado a utilização de trechos retos antes e depois do sensor sempre que possível, de modo a reduzir perturbações no escoamento e favorecer maior estabilidade na leitura. Essa recomendação está alinhada aos fundamentos de mecânica dos fluidos, segundo os quais singularidades hidráulicas, como curvas, válvulas e mudanças de seção, podem alterar o perfil de velocidade e introduzir perdas de carga localizadas no sistema (Fox; McDonald; Pritchard, 2011).

Neste trabalho de graduação, os sensores de vazão foram utilizados com o objetivo de complementar a análise vibracional realizada pelo sensor piezoelétrico. Enquanto o piezoelétrico permite investigar perturbações mecânicas associadas ao escoamento e a possíveis vazamentos, o sensor de vazão fornece uma indicação direta da presença e da intensidade do fluxo hidráulico no sistema. Essa integração contribui para uma abordagem multimodal, permitindo interpretar os sinais vibracionais de forma mais contextualizada.

Dessa forma, os sensores de vazão baseados em efeito Hall constituem uma solução adequada para aplicações experimentais de baixo custo envolvendo monitoramento hidráulico. Entretanto, sua utilização exige cuidados relacionados à calibração, instalação hidráulica, compatibilidade elétrica com o microcontrolador e tratamento digital dos pulsos adquiridos. No contexto deste trabalho, essas características justificam sua aplicação como variável auxiliar na identificação e interpretação dos estados operacionais da maquete hidráulica, especialmente quando combinada aos sinais vibracionais obtidos por sensores piezoelétricos.

2.4 PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS PARA DIAGNÓSTICO CONTÍNUO

A interpretação dos sinais adquiridos pelos sensores requer técnicas de processamento digital capazes de distinguir fenômenos de interesse de ruídos ambientais, interferências elétricas e instabilidades do sistema de aquisição.

No domínio do tempo, o valor RMS (Root Mean Square) é amplamente utilizado como indicador da energia média de sinais vibracionais (Oppenheim; Schaffer, 2010). Essa abordagem permite quantificar o nível energético associado às vibrações presentes no sistema, sendo frequentemente empregada em aplicações de monitoramento estrutural e análise vibracional. Entretanto, o RMS apresenta limitações importantes, pois não distingue a origem espectral da energia medida. Dessa forma, ruídos externos, impactos transitórios e interferências elétricas podem elevar o valor RMS sem necessariamente representar eventos associados a vazamentos hidráulicos. Para superar essas limitações, utiliza-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT), que permite converter o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência.

Entretanto, diversos autores apontam que sinais transitórios impulsivos, ruídos eletrônicos e instabilidades do circuito de condicionamento podem introduzir componentes espúrias na análise espectral, dificultando a identificação direta das frequências associadas ao fenômeno hidráulico. Sistemas embarcados de baixo custo estão particularmente sujeitos a problemas relacionados à relação sinal-ruído, saturação do conversor analógico-digital e oscilações do ponto de polarização do sinal. Para isso, além da FFT, a literatura apresenta diferentes estratégias de filtragem digital para melhoria da interpretação dos sinais adquiridos. Entre as principais técnicas destacam-se filtros FIR (Finite Impulse Response), filtros IIR (Infinite Impulse Response), filtros de média móvel e filtros adaptativos. Essas abordagens permitem reduzir ruídos indesejados, suavizar componentes transitórias e isolar bandas de frequência associadas ao fenômeno monitorado (Lyons, 2011; Smith, 1997).

Dessa forma, conclui-se que a análise vibracional aplicada à detecção de vazamentos depende não apenas da implementação matemática de algoritmos de processamento digital, mas também da estabilidade do condicionamento analógico, da qualidade da aquisição embarcada e da correta interpretação física dos sinais obtidos.

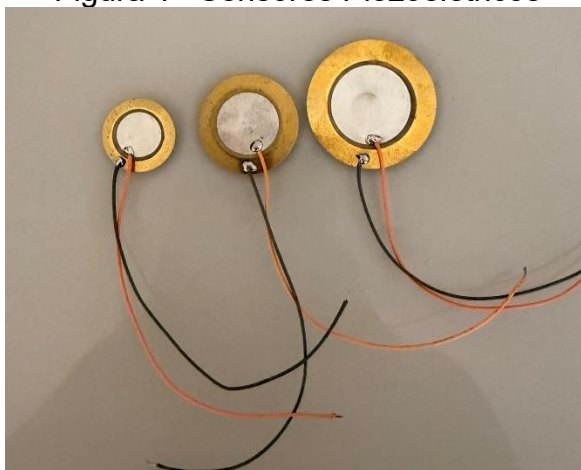
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 PIEZOELÉTRICO

No presente trabalho, foi utilizado um sensor piezoelétrico do tipo disco, composto por um substrato metálico e uma camada cerâmica piezoelétrica. Esse tipo de transdutor foi escolhido devido ao baixo custo, à ampla disponibilidade comercial e à possibilidade de instalação externa à tubulação, sem contato direto com o fluido.

Os sensores piezoelétricos foram empregados para monitoramento vibracional experimental, com o objetivo de captar perturbações mecânicas associadas ao escoamento da água, à ocorrência de vazamentos simulados e a eventos transitórios, como impactos mecânicos. Na Figura 1 apresenta-se os sensores piezoelétricos utilizados no sistema.

Figura 1– Sensores Piezoelétricos



Fonte: Produção do próprio autor.

A fixação do sensor à tubulação foi tratada como um fator crítico para o desempenho do sistema, uma vez que o acoplamento mecânico influencia diretamente a transferência de energia vibracional entre a estrutura e o elemento sensor. Dessa forma, buscou-se garantir contato firme entre o piezoelétrico e a superfície do tubo, minimizando folgas, camadas de ar e perdas mecânicas na interface sensor-estrutura.

Devido à baixa amplitude do sinal gerado e à necessidade de adequação à faixa de entrada do conversor analógico-digital do ESP32, o sinal proveniente do sensor piezoelétrico foi submetido a um circuito de condicionamento analógico composto por pré-amplificação, polarização em tensão contínua e filtragem passa-baixa. Esses

estágios foram implementados com o objetivo de elevar a amplitude do sinal, deslocá-lo para uma faixa compatível com alimentação simples e reduzir componentes de alta frequência indesejadas antes da aquisição digital.

3.2 SENSOR DE VAZÃO E INTEGRAÇÃO COM O SISTEMA

Para complementar a análise vibracional, foram analisados sensores de vazão baseados em efeito Hall, dos modelos YF-S201 e YF-S401, apresentados na Figura 2, sendo que para o presente se utilizou apenas do YF-S201. Esses sensores foram empregados para medir a vazão instantânea da água na maquete hidráulica e permitir a correlação entre o comportamento do fluxo e os sinais vibracionais adquiridos pelo sensor piezoelétrico.

Figura 2 – YF-S201 e YF-S401



Fonte: Produção do próprio autor.

No sistema desenvolvido, o sensor de vazão foi conectado ao ESP32 por meio de três terminais: alimentação, referência comum e sinal digital. O fio de alimentação foi conectado à tensão de 5 V, o terminal de referência ao GND comum do circuito e o fio de sinal a uma entrada digital do microcontrolador.

Como o sinal digital de saída dos sensores pode operar em nível lógico de 5 V, enquanto as entradas do ESP32 são compatíveis com 3,3 V, foi utilizado um divisor resistivo para adequação do nível de tensão. Para essa finalidade, foram empregados resistores de 10 k Ω e 22 k Ω , dimensionados para reduzir a tensão do sinal a uma faixa segura para o microcontrolador. Além disso, a constante K dada para o YF-S201 pelo fabricante é de 7.5, gerando 450 pulsos por litro de vazão.

A leitura dos pulsos foi realizada por interrupção externa configurada por borda de subida. Essa estratégia permitiu contabilizar os pulsos gerados pelo sensor sem depender de leitura contínua por polling, reduzindo a possibilidade de perda de eventos durante a aquisição. Cada pulso detectado incrementa uma variável global de contagem, posteriormente utilizada para estimar a vazão no intervalo de aquisição definido.

Durante os ensaios, também foi considerada a possibilidade de suavização digital das leituras, uma vez que bolhas de ar, turbulência e instabilidades do escoamento podem provocar oscilações na frequência dos pulsos.

3.3 CIRCUITO DE PRÉ-AMPLIFICAÇÃO DO SINAL PIEZOELÉTRICO

O circuito de pré-amplificação foi desenvolvido para elevar a amplitude do sinal proveniente do sensor piezoelétrico e reduzir os efeitos de carregamento associados à interface entre o sensor e o sistema de aquisição. Como discutido na revisão bibliográfica, sensores piezoelétricos apresentam elevada impedância de saída, o que torna necessária a utilização de um estágio de entrada com impedância suficientemente alta.

A configuração adotada para o pré-amplificador foi a topologia não inversora, cujo ganho é definido pela Equação 6.

$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_i} \quad (6)$$

em que A_v representa o ganho de tensão do circuito, R_f corresponde ao resistor de realimentação e R_i ao resistor conectado entre a entrada inversora e a referência do circuito.

Para os testes experimentais, o ganho do circuito foi ajustado por meio da troca do resistor R_f , permitindo variações na faixa aproximada de 3 a 50 vezes. Essa possibilidade de ajuste foi importante durante os ensaios, pois permitiu adaptar a amplificação de acordo com a intensidade dos sinais captados e evitar saturações excessivas na saída do amplificador.

Também foi empregado um capacitor de acoplamento em série com o sensor piezoelétrico, permitindo bloquear componentes contínuas indesejadas e transferir ao

estágio de amplificação apenas a componente alternada associada às vibrações mecânicas. Além disso, foi utilizado um resistor de alta impedância associado ao ponto de polarização, fornecendo caminho de descarga para o sensor e contribuindo para a estabilidade do ponto de operação do circuito.

Durante o desenvolvimento experimental, foram avaliadas duas alternativas de amplificadores operacionais: o CA3140 e o LM358. O CA3140 foi considerado devido à sua entrada MOSFET e elevada impedância de entrada, características favoráveis para sinais provenientes de sensores piezoelétricos (Renesas Electronics, 2026). Já o LM358 foi avaliado como alternativa de maior disponibilidade e menor custo, além de apresentar operação compatível com alimentação simples (Texas Instruments, 2024). Nos testes com o LM358, foram utilizadas configurações com resistor de realimentação de até 470 k Ω , permitindo ganho aproximado de 48 vezes. A comparação entre as arquiteturas permitiu observar que o desempenho do sistema depende fortemente da estabilidade do ponto de polarização, do ganho adotado e da capacidade do amplificador em lidar com sinais de baixa amplitude e elevada impedância.

3.4 FILTRO PASSA-BAIXA SALLEN KEY

Após o estágio de pré-amplificação, foi implementado um filtro ativo passa-baixa de segunda ordem na topologia Sallen-Key, referenciado ao ponto de polarização contínua do circuito. Esse filtro teve como objetivo atenuar componentes de alta frequência indesejadas antes da conversão analógico-digital realizada pelo ESP32, atuando como etapa de condicionamento final do sinal vibracional.

A topologia adotada foi a configuração Sallen-Key de ganho unitário, utilizando componentes simétricos. Foram empregados resistores $R_1 = R_2 = 5,6 \text{ k}\Omega$ e capacitores $C_1 = C_2 = 10 \text{ nF}$. A frequência de corte teórica do filtro pode ser estimada pela Equação 7.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (7)$$

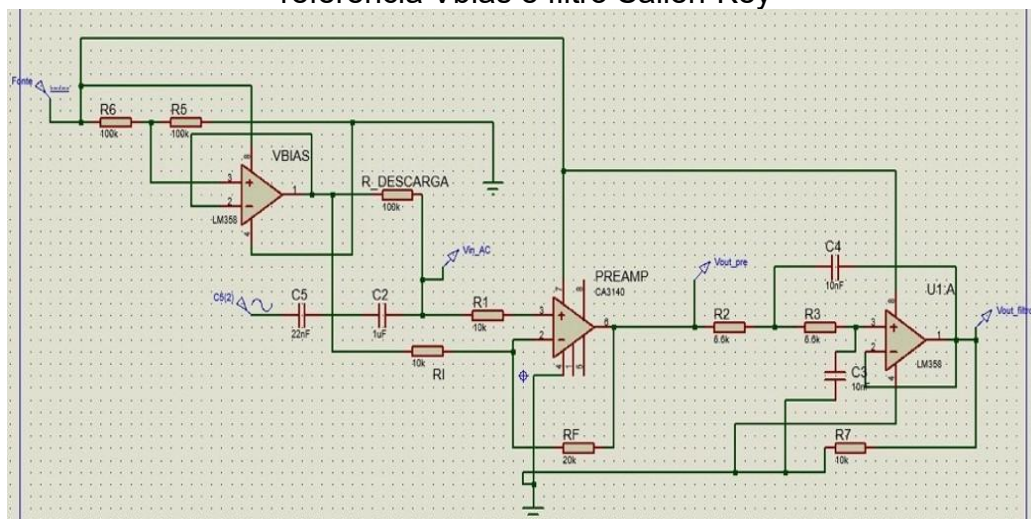
Substituindo os valores utilizados se tem a Equação 8.

$$f_c = \frac{1}{2\pi \times 5.6 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-9}} \approx 2,84 \text{ kHz} \quad (8)$$

Esse valor foi escolhido por estar dentro da faixa de interesse para a análise vibracional proposta, permitindo a atenuação progressiva de componentes de frequência mais elevada associadas a ruídos elétricos e interferências externas. O circuito foi referenciado a uma tensão de polarização contínua V_{bias} , centrada em aproximadamente 2,5 V. Essa referência permitiu que o sinal alternado proveniente do sensor oscilasse dentro da faixa de operação do amplificador operacional e do ADC do ESP32. O V_{bias} foi implementado por meio de divisor resistivo e estabilizado por seguidor de tensão, reduzindo oscilações no ponto de referência.

Além disso, foram utilizados capacitores de desacoplamento de 100 nF próximos aos pinos de alimentação dos amplificadores operacionais e capacitor eletrolítico de 10 μ F associado ao circuito de polarização, contribuindo para a estabilidade da alimentação e a redução de ruídos. O conjunto formado pelo pré-amplificador, circuito de polarização e filtro ativo constitui o bloco de condicionamento analógico do sistema. O esquemático elétrico do circuito de condicionamento é apresentado na Figura 3, sendo que o software utilizado para simulação foi o Proteus.

Figura 3 – Esquemático elétrico do circuito de condicionamento — pré-amplificador, referência V_{bias} e filtro Sallen-Key

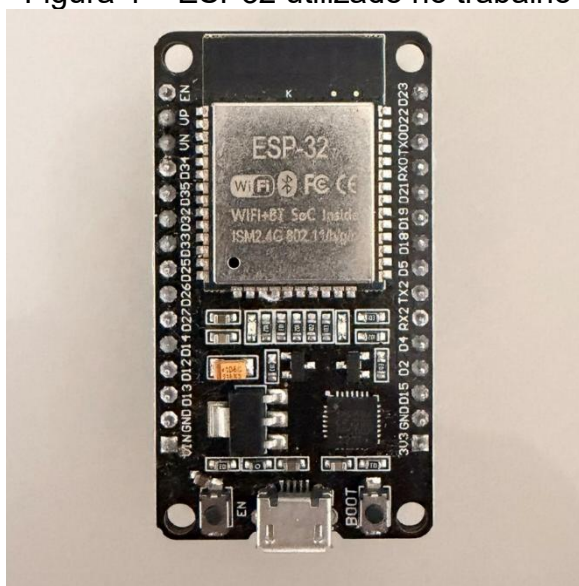


Fonte: Produção do próprio autor.

3.5 MICROCONTROLADOR ESP32

O microcontrolador utilizado como unidade central de aquisição foi o ESP32, desenvolvido pela Espressif Systems. O dispositivo foi escolhido devido à sua capacidade de processamento, disponibilidade de entradas analógicas e digitais, comunicação serial USB e possibilidade de futura integração com sistemas IoT por meio de Wi-Fi e Bluetooth. No presente trabalho, o ESP32, apresentado na Figura 4, foi utilizado principalmente para aquisição dos sinais provenientes do sensor piezoelétrico e do sensor de vazão. O sinal vibracional, previamente condicionado pelo circuito analógico, foi adquirido por meio do conversor analógico-digital interno do microcontrolador, configurado com resolução de 12 bits.

Figura 4 – ESP32 utilizado no trabalho

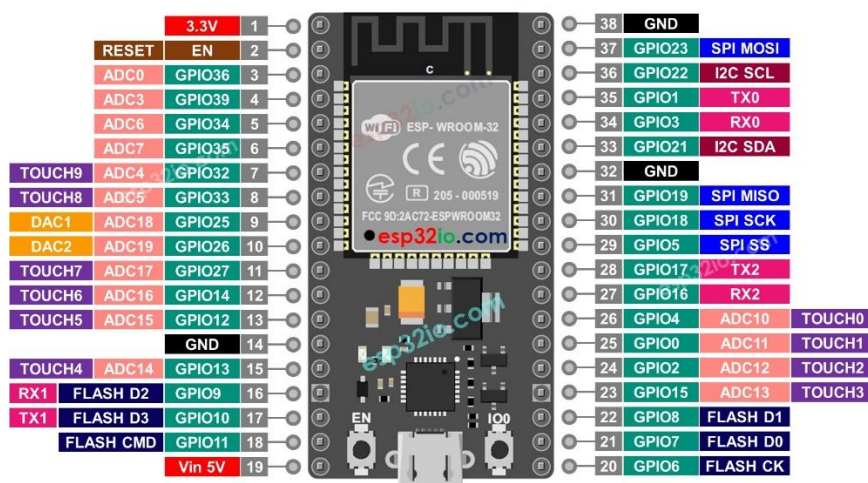


Fonte: Produção do próprio autor.

A aquisição do sinal piezoelétrico foi realizada pela entrada analógica GPIO34, pertencente ao barramento ADC1 do ESP32. A escolha desse pino decorre da arquitetura interna do ESP32: os canais associados ao ADC2 são compartilhados com o driver do rádio Wi-Fi e tornam-se indisponíveis ou instáveis enquanto a comunicação sem fio está ativa, ao passo que os canais do ADC1, ao qual o GPIO34 pertence, operam de forma independente do Wi-Fi, garantindo leituras analógicas estáveis mesmo com o rádio habilitado (Espressif Systems, 2024). Além disso, o GPIO34 é um pino exclusivamente de entrada, sem circuitos internos de saída ou resistores de pull-

up/pull-down, característica adequada à aquisição de sinais analógicos condicionados. A pinagem da placa é apresentada na Figura 5.

Figura 5 – Pinagem da placa ESP32 DevKit V1



Fonte: Adaptado de ESP32IO ([s.d.]).

Durante os ensaios experimentais, foram utilizados regimes de amostragem entre aproximadamente 4 kHz e 20 kHz, de acordo com o tipo de teste realizado. As amostras foram organizadas em blocos contendo entre 1024 e 4096 pontos, permitindo posterior análise no domínio do tempo e da frequência. Além da aquisição do sinal analógico, o ESP32 realizou a leitura dos pulsos digitais provenientes do sensor de vazão. Essa leitura foi feita por interrupções externas, possibilitando a contagem dos pulsos em intervalos definidos de tempo e a estimativa da vazão correspondente.

A comunicação entre o ESP32 e o computador foi realizada por interface serial USB. Essa arquitetura permitiu que o microcontrolador atuasse como unidade de aquisição, enquanto o processamento mais detalhado dos dados fosse realizado em ambiente computacional externo, utilizando linguagem Python. Embora o ESP32 possua capacidade para processamento embarcado, nesta etapa do trabalho optou-se por priorizar a validação da cadeia de aquisição e condicionamento dos sinais em ambiente controlado. O código embarcado no ESP32, responsável pela aquisição e pelo envio dos dados, é apresentado no Apêndice A.

3.6 AQUISIÇÃO E FILTRAGEM DIGITAL

A aquisição dos dados foi estruturada em blocos de amostras, permitindo que cada ensaio fosse analisado como uma janela temporal definida. Essa abordagem

facilitou a comparação entre diferentes condições experimentais, como sistema em repouso, bomba ligada sem vazamento, vazamentos simulados e impactos mecânicos no sensor.

O processo de aquisição é iniciado pelo programa em Python, que envia um comando ao ESP32 por comunicação serial. Após receber esse comando, o microcontrolador inicia a coleta de um novo bloco de amostras do sinal piezoelétrico e, simultaneamente, contabiliza os pulsos do sensor de vazão durante o intervalo de aquisição. Ao final da coleta, os dados são enviados ao computador juntamente com informações como frequência de amostragem, número de amostras, contagem de pulsos e vazão estimada. A rotina completa de aquisição e análise em Python é apresentada no Apêndice B.

No ambiente computacional externo, as amostras recebidas são convertidas para valores de tensão, considerando a resolução do ADC e a faixa de operação do ESP32. Em seguida, é realizada a remoção da componente contínua associada ao ponto de polarização V_{bias} , centralizando o sinal em torno de zero para possibilitar a análise da componente alternada.

A análise temporal incluiu o cálculo da tensão média, tensão pico a pico e valor RMS. O RMS foi utilizado como indicador da energia média do sinal vibracional, conforme a Equação 9.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (9)$$

em que x_i representa cada amostra adquirida, $\bar{x}$ corresponde ao valor médio do sinal e N representa o número total de amostras do bloco analisado.

Durante os ensaios preliminares, observou-se a ocorrência de amostras próximas a 0 V em determinados blocos de aquisição. Essas quedas abruptas foram tratadas como eventos relevantes, pois poderiam estar associadas a saturações momentâneas do circuito, impactos mecânicos ou instabilidades no ponto de polarização. Por esse motivo, foi implementada uma rotina de detecção de amostras abaixo de um limiar mínimo configurável.

O algoritmo contabilizou tanto a quantidade total de amostras próximas a 0 V quanto a duração de sequências consecutivas desse tipo de ocorrência. Essa

distinção permitiu diferenciar eventos curtos, associados a transientes ou possíveis ruídos de aquisição, de eventos prolongados, que comprometem a validade do bloco analisado.

Quando as quedas para 0 V ocorriam por intervalos curtos, o programa podia aplicar interpolação linear entre amostras válidas adjacentes, reduzindo a influência dessas discontinuidades sobre as métricas calculadas. Entretanto, quando as quedas se prolongavam por intervalos maiores, o bloco era classificado como inadequado para análise espectral confiável.

Após o pré-processamento, foi aplicada uma janela de Hann ao sinal antes da Transformada Rápida de Fourier. Essa etapa teve como objetivo reduzir o vazamento espectral durante a análise no domínio da frequência. A magnitude espectral foi calculada a partir das componentes real e imaginária da transformada, conforme a Equação 10.

$$|X_k| = \sqrt{Re(X_k)^2 + Im(X_k)^2} \quad (10)$$

A análise espectral foi utilizada para identificar componentes dominantes do sinal vibracional. No entanto, os resultados experimentais indicaram que a FFT não deveria ser interpretada isoladamente, pois ruídos elétricos, impactos mecânicos e saturações transitórias também podem gerar componentes espectrais relevantes. Dessa forma, a interpretação dos dados foi realizada de maneira conjunta, considerando RMS, tensão pico a pico, ocorrência de quedas para 0 V, espectro de frequência e presença ou ausência de vazão.

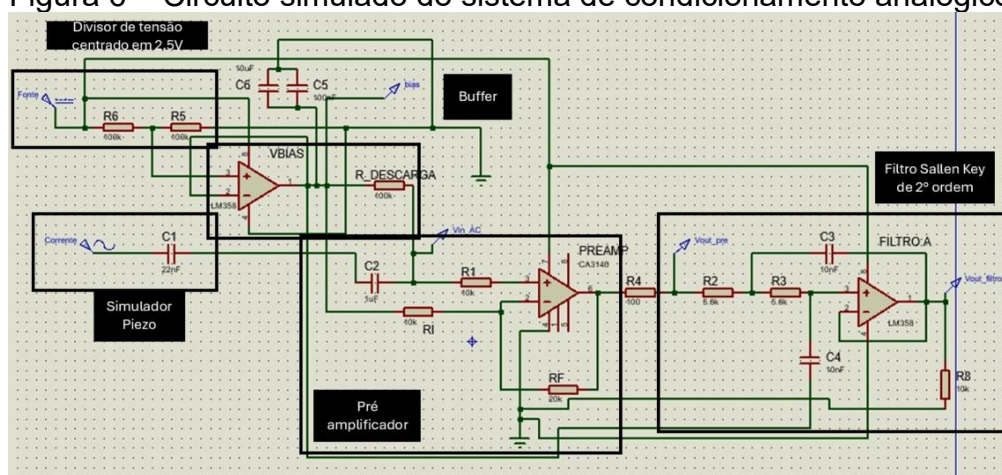
3.7 SIMULAÇÕES

Antes da implementação física do circuito, foram realizadas simulações computacionais no software Proteus. O objetivo foi avaliar previamente o comportamento do sistema de condicionamento analógico, incluindo o estágio de pré-amplificação, o deslocamento DC por meio de V_{bias} e a resposta em frequência do filtro passa-baixa.

A simulação foi utilizada como ferramenta de apoio ao dimensionamento inicial dos componentes, permitindo verificar tendências de funcionamento, ganho

aproximado, estabilidade do ponto de polarização e faixa de passagem do filtro. O modelo adotado teve caráter simplificado e não teve como objetivo representar integralmente todos os fenômenos observados na montagem real, como ruídos eletromagnéticos, capacitâncias parasitas, variações de acoplamento mecânico, instabilidades de alimentação e saturações transitórias. O sensor piezoelétrico foi representado por um modelo elétrico simplificado, composto por uma fonte de excitação associada a um elemento capacitivo. A excitação foi simulada por um sinal senoidal de amplitude definida no ambiente de simulação e frequência de 2,5 kHz, permitindo avaliar a resposta do circuito a uma entrada vibracional controlada, o circuito simulado é apresentado na Figura 6.

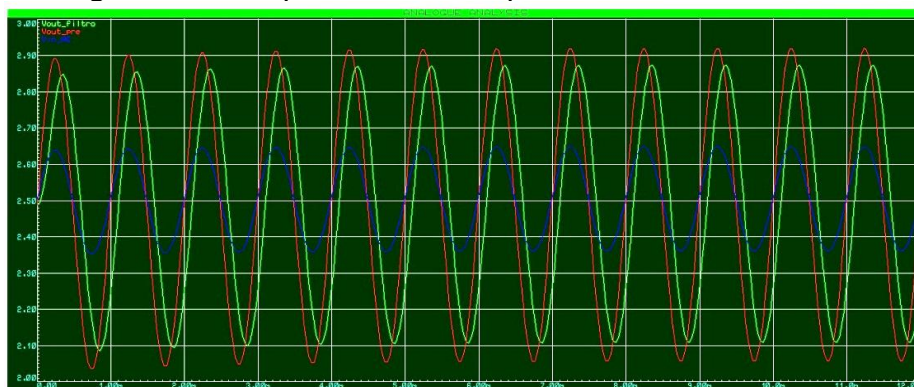
Figura 6 – Circuito simulado do sistema de condicionamento analógico



Fonte: Produção do próprio autor.

Na simulação inicial, apresentada na Figura 7, o estágio de pré-amplificação foi configurado com $R_f = 20 \text{ k}\Omega$ e $R_i = 10 \text{ k}\Omega$, resultando em ganho teórico aproximado de 3, conforme a relação de ganho apresentada anteriormente. Esse valor foi adotado como ponto de partida para avaliação do comportamento temporal do circuito, sem ultrapassar os limites de operação do amplificador operacional e do ADC.

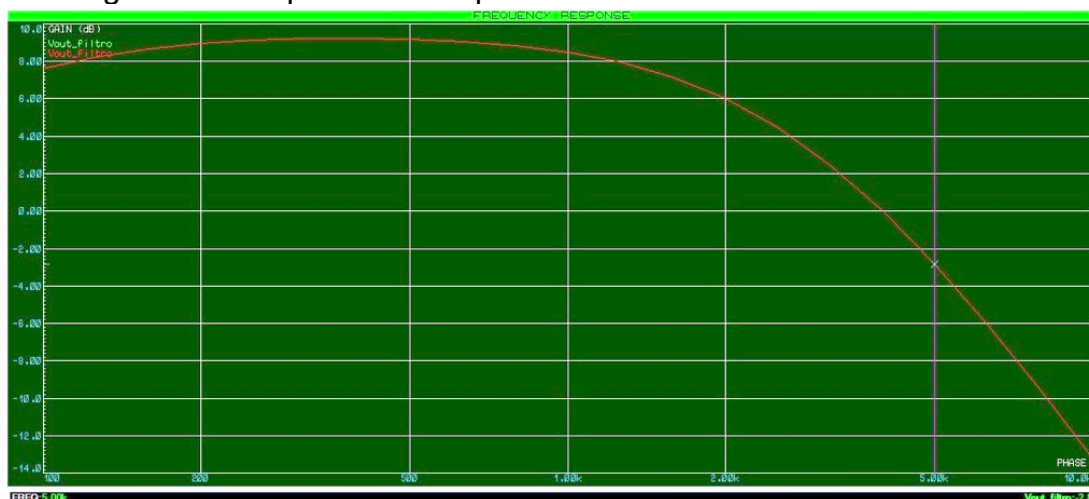
Figura 7 – Comportamento temporal do circuito simulado



Fonte: Produção do próprio autor.

A resposta temporal simulada indicou que o circuito foi capaz de amplificar o sinal de entrada e deslocá-lo para uma região centrada em torno de V_{bias} , mantendo-o dentro da faixa de operação esperada para aquisição pelo ESP32. Também foi realizada a análise da resposta em frequência do filtro Sallen-Key, como é apresentado na Figura 8. O resultado apresentou comportamento compatível com um filtro passa-baixa de segunda ordem, com frequência de corte próxima de 5 kHz. A divergência em relação ao valor teórico de 2,84 kHz pode ser atribuída aos modelos não ideais do amplificador operacional e às tolerâncias dos componentes adotados na simulação; ainda assim, o filtro cumpre a função de atenuar as componentes de alta frequência indesejadas.

Figura 8 – Resposta em frequência do circuito de condicionamento



Fonte: Produção do próprio autor.

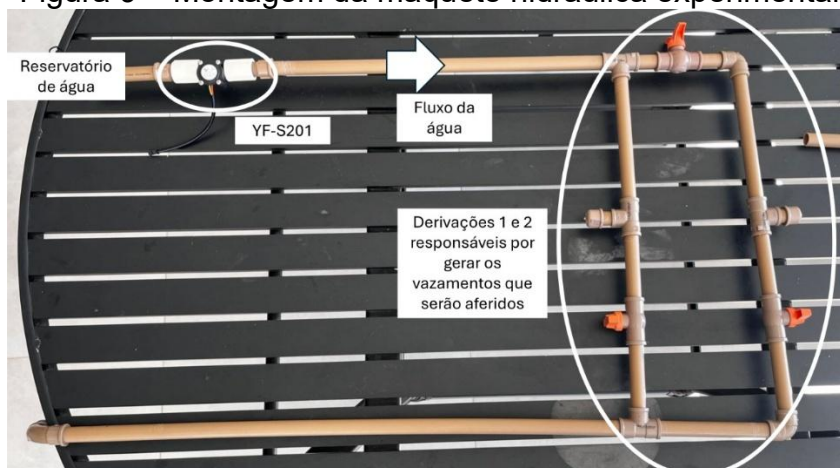
Embora os resultados de simulação tenham indicado comportamento estável, os ensaios experimentais revelaram fenômenos adicionais não representados integralmente pelo modelo computacional. Entre eles, destacam-se oscilações no ponto de polarização, interferências eletromagnéticas, saturações transitórias durante

impactos mecânicos e ocorrência de amostras espúrias próximas a 0 V. Ainda assim, as simulações foram importantes para orientar o projeto inicial do circuito e reduzir incertezas antes da montagem física.

3.8 MAQUETE

A maquete hidráulica, apresentada na Figura 9, foi construída com o objetivo de representar, em escala reduzida e ambiente controlado, uma instalação hidráulica residencial. A estrutura foi montada utilizando tubulação rígida de PVC de $\frac{1}{2}$ polegada, permitindo a realização de ensaios de escoamento, vazamentos simulados e análise vibracional.

Figura 9 – Montagem da maquete hidráulica experimental



Fonte: Produção do próprio autor.

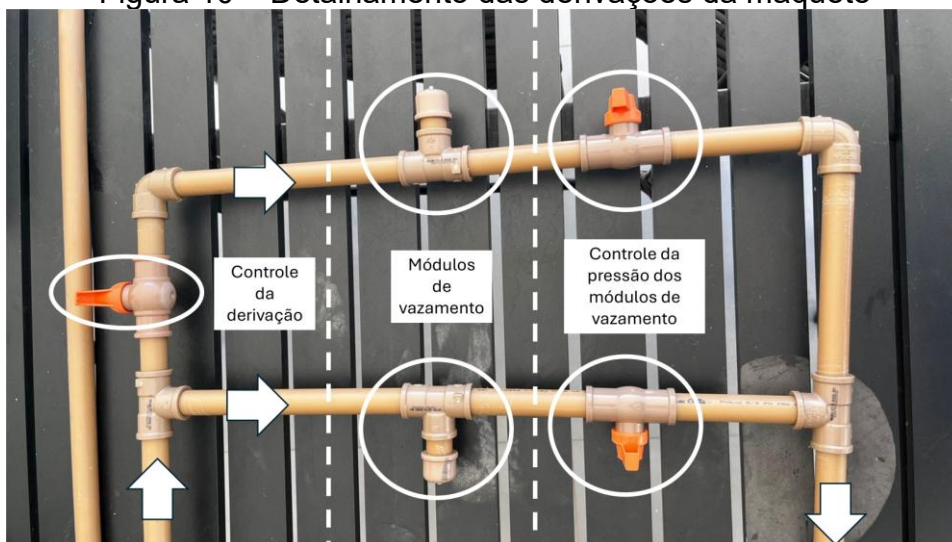
O sistema hidráulico foi projetado em circuito fechado, permitindo recirculação contínua da água utilizada nos ensaios. Essa abordagem reduz desperdício de fluido, facilita repetibilidade experimental e permite maior controle das condições hidráulicas ao longo das medições. A maquete possui duas derivações hidráulicas conectadas à linha principal por conexões em “T”. Uma das derivações foi instrumentada com sensores vibracionais e hidráulicos, enquanto a segunda derivação foi mantida inicialmente sem instrumentação direta. Essa configuração foi adotada com o objetivo de investigar a propagação estrutural das vibrações ao longo da tubulação e avaliar a possibilidade de identificação indireta de vazamentos localizados em regiões não instrumentadas do sistema.

Ambas as derivações possuem módulos de vazamento desenvolvidos a partir de conexões em “T” com saída lateral calibrável. Esses módulos permitem simular

diferentes condições de vazamento, desde microfuros até vazamentos de maior intensidade, possibilitando análise comparativa do comportamento vibracional e hidráulico do sistema em diferentes cenários operacionais. Após cada módulo de vazamento foi instalado um registro de controle, permitindo ajuste da vazão escoada e da pressão local presente no ponto de vazamento. Essa configuração possibilita variar experimentalmente a intensidade do vazamento e, consequentemente, alterar as características vibracionais produzidas pelo escoamento turbulento. Quando os registros encontram-se mais abertos, ocorre aumento do fluxo escoado pelo vazamento e redução da pressão local, modificando a amplitude das vibrações transmitidas à estrutura da tubulação.

Além disso, a derivação não instrumentada possui um registro adicional em sua entrada, permitindo sua completa isolação hidráulica. Essa configuração possibilita a realização de ensaios tanto com uma única derivação ativa quanto com ambas operando simultaneamente, ampliando as possibilidades experimentais e permitindo avaliar a influência hidráulica e vibracional entre diferentes regiões da maquete. O detalhamento das derivações hidráulicas é apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Detalhamento das derivações da maquete



Fonte: Produção do próprio autor.

Na entrada principal do sistema, foi instalado um sensor de vazão YF-S201, responsável pela medição do fluxo volumétrico total circulante na maquete. O sensor foi posicionado respeitando um trecho reto de aproximadamente 10 cm antes da região de medição, com o objetivo de reduzir perturbações provocadas por conexões, registros ou mudanças bruscas de geometria. Após o sensor de vazão, a água percorre aproximadamente 50 cm de tubulação reta antes de alcançar a primeira

derivação. As duas derivações foram separadas por aproximadamente 15 cm ao longo da tubulação principal. Entre a conexão com a linha principal e o módulo de vazamento, cada derivação possui cerca de 20 cm de comprimento. Após o módulo de vazamento, há um trecho adicional de aproximadamente 10 cm até o registro de controle, seguido por cerca de 10 cm até a linha de retorno hidráulico, as medidas da maquete são apresentadas na Figura 11.

Figura 11 – Dimensões da maquete hidráulica experimental



Fonte: Produção do próprio autor.

Essa configuração permitiu que os experimentos fossem feitos de forma a simular o seu comportamento, mesmo que em etapas distintas, de forma a validar o comportamento esperado pelos sensores e pela maquete.

3.9 PROTOCOLO EXPERIMENTAL

Os ensaios experimentais foram definidos com o objetivo de avaliar o comportamento da cadeia de aquisição e condicionamento do sinal piezoelétrico em diferentes condições operacionais e mecânicas da maquete hidráulica. Considerando as limitações observadas durante o desenvolvimento do sistema, o sensor piezoelétrico não foi tratado como instrumento suficiente para medir diretamente as vibrações hidráulicas da tubulação de forma robusta. Dessa forma, sua resposta foi analisada como resultado do conjunto formado pelo sensor, método de fixação, circuito de condicionamento analógico e sistema de aquisição digital. Assim, o protocolo experimental não teve como objetivo validar de maneira definitiva a detecção automática de vazamentos por vibração. O foco foi avaliar se o sistema desenvolvido era capaz de registrar alterações elétricas em diferentes condições da

maquete, incluindo repouso, escoamento normal, impactos mecânicos e perturbações mecânicas simuladas na tubulação e ensaios com escoamento ativo. Essa abordagem permitiu investigar a sensibilidade do sistema, suas limitações práticas e a confiabilidade das métricas extraídas dos sinais adquiridos.

Para cada condição experimental, foram adquiridos blocos de amostras do sinal piezoelétrico condicionado e, quando aplicável, informações provenientes do sensor de vazão. Os dados foram posteriormente processados em ambiente computacional externo, permitindo a análise de grandezas como tensão média, valor RMS, tensão pico a pico, ocorrência de quedas abruptas para 0 V, presença de saturações transitórias e comportamento espectral por meio da Transformada Rápida de Fourier. Na Tabela 1 apresenta-se os cenários experimentais avaliados após a devida validação do sistema de condicionamento e aquisição dos sinais do sensor piezoelétrico.

Tabela 1 - Cenários Experimentais

Ensaio	Condição experimental	Objetivo	Grandezas analisadas
1	Sensor piezoelétrico fixado ao tubo em condição de repouso (sem fluxo e sem excitação mecânica)	Avaliar o ruído de fundo do circuito de condicionamento e a estabilidade do sinal em condição estacionária	Tensão média, RMS, pico a pico, quedas para 0 V e FFT
2	Impacto mecânico leve aplicado ao tubo instrumentado	Caracterizar a resposta do sistema a excitações impulsivas de baixa intensidade próximas ao sensor	Pico a pico, RMS, quedas para 0 V, saturação e espectro de frequência
3	Impacto mecânico forte aplicado ao tubo instrumentado	Avaliar a resposta do sistema a eventos impulsivos de maior amplitude e verificar possíveis saturações do sinal	Pico a pico, RMS, quedas para 0 V, saturação, sequência de zeros e FFT
4	Vibração contínua aplicada ao tubo instrumentado	Avaliar a resposta do sistema sob excitação vibracional contínua, simulando perturbações mecânicas persistentes	RMS, pico a pico, estabilidade temporal e espectro de frequência
5	Análise multimodal: impacto mecânico sem escoamento	Avaliar a capacidade do algoritmo em distinguir perturbações mecânicas sem presença de fluxo hidráulico	Estado piezoelétrico, vazão estimada e decisão multimodal
6	Análise multimodal:	Avaliar a integração entre	RMS, FFT, vazão

	vibração/impacto com escoamento ativo	os sensores piezoelétrico e de vazão para classificação conjunta do estado operacional	estimada, classificação do piezo e decisão multimodal
--	---------------------------------------	--	---

Fonte: Produção do próprio autor.

No primeiro ensaio, com o sensor piezoelétrico fixado ao tubo em condição de repouso, sem circulação de água e sem excitação mecânica intencional, buscou-se caracterizar o comportamento de base do circuito de aquisição. Essa condição foi utilizada como referência para identificação do ruído de fundo, da estabilidade do ponto de polarização e da ocorrência de eventuais quedas espontâneas do sinal para valores próximos a 0 V.

Nos ensaios 2, 3 e 4, foram aplicadas diferentes excitações mecânicas ao tubo instrumentado, incluindo impactos leves, impactos fortes e vibração contínua. Esses testes tiveram como objetivo caracterizar a resposta elétrica do sistema frente a diferentes níveis de perturbação mecânica, avaliando alterações nas métricas temporais e espectrais do sinal adquirido. A comparação entre essas condições permitiu verificar a sensibilidade do sistema a eventos impulsivos e contínuos, além de identificar possíveis saturações, variações de amplitude e mudanças no espectro de frequência.

Nos ensaios 5 e 6, foi realizada a análise multimodal combinando as informações provenientes do sensor piezoelétrico e do sensor de vazão. Esses testes tiveram como objetivo avaliar a capacidade do algoritmo em distinguir condições com excitação mecânica sem escoamento de condições com excitação mecânica associada à presença de fluxo hidráulico. Dessa forma, buscou-se demonstrar a contribuição da fusão das duas fontes de informação para a classificação do estado operacional do sistema.

A análise dos resultados foi realizada de forma comparativa entre os diferentes cenários experimentais. As métricas extraídas do sinal piezoelétrico não foram interpretadas isoladamente como medição direta da vibração hidráulica da tubulação, mas como indicadores do comportamento elétrico do sistema de aquisição diante de diferentes perturbações mecânicas e condições de escoamento. Dessa forma, a presença de vazão, a intensidade do sinal, a ocorrência de quedas para 0 V, a presença de saturações e o comportamento espectral foram utilizados em conjunto para caracterizar as limitações e possibilidades da arquitetura desenvolvida.

Portanto, o protocolo experimental foi estruturado para validar funcionalmente a cadeia de aquisição, condicionamento e processamento dos sinais, além de avaliar a viabilidade da abordagem multimodal proposta. Essa estratégia permitiu uma análise tecnicamente mais adequada às condições experimentais disponíveis, reconhecendo que o sistema desenvolvido não teve como objetivo realizar medições acústicas de alta precisão, mas sim investigar a capacidade de sensores de baixo custo em identificar alterações de comportamento associadas a diferentes condições mecânicas e hidráulicas em uma arquitetura experimental simplificada.

3.10 LÓGICA DO PROGRAMA, AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DOS DADOS

A lógica computacional do sistema foi estruturada de forma modular, integrando a aquisição embarcada realizada pelo ESP32, a transmissão dos dados por comunicação serial e o processamento em ambiente computacional externo. O código embarcado, que foi escrito e compilado através do software Arduino.cc, no microcontrolador teve como função principal adquirir o sinal proveniente do circuito de condicionamento do sensor piezoelétrico e contabilizar os pulsos gerados pelo sensor de vazão por efeito Hall. Já o programa desenvolvido em Python foi utilizado para solicitar novas aquisições, organizar os dados recebidos, calcular métricas temporais e espectrais, gerar visualizações gráficas e auxiliar na interpretação dos diferentes cenários experimentais.

A separação entre aquisição embarcada e processamento externo foi adotada com o objetivo de aumentar a flexibilidade durante os ensaios experimentais. Dessa forma, o ESP32 atuou prioritariamente como unidade de coleta de dados, enquanto o computador foi responsável pelas etapas de análise, visualização e classificação dos blocos adquiridos. Essa arquitetura também permite futuras expansões do sistema, como a implementação de processamento embarcado, comunicação sem fio e integração com plataformas IoT.

O processo de aquisição não ocorre de forma contínua e autônoma. Inicialmente, o programa em Python realiza a limpeza do buffer serial e envia um comando ao ESP32 solicitando a coleta de um novo bloco de amostras. Após o recebimento desse comando, o microcontrolador inicia a aquisição do sinal piezoelétrico pela entrada analógica definida no sistema. Simultaneamente, quando

há circulação de água, o ESP32 contabiliza os pulsos provenientes do sensor de vazão por meio de interrupções externas.

Ao final de cada aquisição, o ESP32 envia ao computador o bloco de dados coletado, acompanhado de informações auxiliares como frequência de amostragem, número de amostras, quantidade de pulsos detectados e intervalo utilizado para estimativa da vazão. Para evitar erros de sincronização e interpretação, a transmissão foi estruturada utilizando marcadores de início e fim de bloco, permitindo que o programa em Python valide a integridade dos dados recebidos antes de iniciar o processamento.

No ambiente computacional externo, os valores recebidos do conversor analógico-digital são convertidos para tensão e organizados em vetores numéricos. A conversão considera a resolução de 12 bits do ADC do ESP32 e a tensão de referência de 3,3 V, de modo que cada amostra digital é transformada em seu valor equivalente de tensão. A partir desses dados, o programa calcula métricas temporais do sinal, incluindo tensão média, tensão pico a pico, valor RMS da componente alternada e ocorrência de quedas para valores próximos a 0 V.

Durante os ensaios preliminares, observou-se que determinados blocos apresentavam quedas abruptas para valores próximos a 0 V. Esse comportamento foi associado a possíveis saturações transitórias, impactos mecânicos, instabilidades do ponto de polarização ou limitações da cadeia de aquisição. Por esse motivo, o programa passou a identificar automaticamente a ocorrência dessas quedas, sua frequência e sua duração dentro de cada bloco. Para isso, são calculadas variáveis como a razão de amostras próximas de 0 V, o número de eventos de queda e a maior sequência consecutiva de amostras nessa condição.

Após o cálculo das métricas temporais, o algoritmo, que foi escrito no Jupyter Notebook, aplica um conjunto de limiares empíricos para classificar o estado do sinal piezoelétrico. Esses limiares foram definidos a partir dos ensaios preliminares realizados com a maquete hidráulica, considerando condições de repouso, impactos mecânicos, vibração induzida e escoamento ativo. Na Tabela 2 apresenta-se os principais critérios utilizados para identificação de quedas para 0 V, validade do bloco, impactos mecânicos, vibração de baixa amplitude e presença de escoamento.

Tabela 2 - Limiares utilizados na classificação dos sinais adquiridos

Critério avaliado	Variável utilizada	Limiar adotado no algoritmo	Interpretação no sistema
Amostra	Valor ADC da amostra	$ADC < 200$	A amostra é considerada uma

próxima de 0 V			queda abrupta para região próxima de 0 V. Como o ADC é de 12 bits e $V_{ref} = 3,3$ V, esse limiar equivale a aproximadamente 0,161 V.
Validade geral do bloco para análise espectral	Razão de amostras próximas de 0 V ($zero_ratio$)	$zero_ratio \leq 20\%$	O bloco é considerado válido quando até 20% das amostras estão abaixo do limiar de 0 V. Acima desse valor, o bloco pode estar comprometido por saturação, instabilidade ou falha de aquisição.
Saturação prolongada	Maior sequência consecutiva de amostras próximas de 0 V (max_zero_seq)	$max_zero_seq > 50$ amostras	Sequências longas próximas de 0 V indicam possível saturação prolongada ou instabilidade do circuito.
Impacto mecânico por alta amplitude	Tensão pico a pico (V_{pp})	$V_{pp} > 1,5$ V	O bloco é classificado como impacto quando apresenta variação abrupta de grande amplitude, compatível com excitação mecânica impulsiva.
Bloco inválido por saturação sem excitação significativa	$bloco_valido$, max_zero_seq e V_{pp}	$zero_ratio > 20\%$ e $V_{pp} < 0,5$ V, ou $max_zero_seq > 50$ e $V_{pp} < 0,5$ V	O bloco é classificado como inválido quando há muitas quedas para 0 V sem indicação de pico significativo no sinal.
Impacto leve ou transitório	Número de eventos de zero ($zero_eventos$)	$zero_eventos \geq 1$	A presença de uma ou mais quedas isoladas para 0 V é interpretada como evento impulsivo ou transitório, sendo classificada como impacto.
Vibração de baixa amplitude	Valor RMS da componente alternada (V_{rms})	$V_{rms} > 0,02$ V	O sinal é classificado como vibração de baixa amplitude quando a energia média da componente alternada ultrapassa o ruído de repouso definido empiricamente.
Vibração por variação pico a pico	Tensão pico a pico (V_{pp})	$V_{pp} > 0,9$ V	Mesmo que o RMS não seja elevado, uma variação pico a pico acima desse valor indica perturbação vibracional relevante.
Condição de repouso	V_{rms} , V_{pp} , $zero_eventos$ e validade do bloco	Não atender aos critérios de impacto, invalidez ou vibração	O bloco é classificado como repouso quando não apresenta quedas relevantes, alta amplitude ou RMS acima dos limiares definidos.
Presença de escoamento	Vazão estimada pelo sensor Hall	Vazão $> 0,1$ L/min	O sistema considera que há fluxo hidráulico ativo quando a vazão estimada ultrapassa 0,1 L/min.
Ausência de escoamento	Vazão estimada pelo sensor Hall	Vazão $\leq 0,1$ L/min	O sistema considera que não há fluxo hidráulico significativo no intervalo analisado.

Fonte: Produção do próprio autor.

A partir desses critérios, cada bloco de aquisição é classificado inicialmente quanto ao comportamento do sensor piezoelétrico. Os estados possíveis são repouso, vibração de baixa amplitude, impacto mecânico ou aquisição comprometida. Blocos com quantidade excessiva de amostras próximas de 0 V, sem presença de picos significativos, são classificados como inválidos para interpretação espectral, evitando que sinais artificialmente distorcidos sejam interpretados como respostas físicas representativas das condições experimentais.

Além da análise temporal, o sistema realiza análise espectral por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT), permitindo avaliar qualitativamente o conteúdo em frequência associado às diferentes condições experimentais. Antes do cálculo da FFT, a componente contínua do sinal é removida e uma janela de Hann é aplicada ao bloco de amostras, com o objetivo de reduzir o vazamento espectral decorrente da análise de sinais finitos no tempo. Considerando a frequência de amostragem de 4 kHz utilizada nos ensaios, a análise espectral foi limitada à faixa inferior a 2 kHz, conforme o critério de Nyquist.

Paralelamente, o programa estima a vazão do sistema a partir da frequência de pulsos gerada pelo sensor YF-S201, conforme a relação apresentada na Equação 5, descrita na seção referente ao sensor de vazão. Nesta etapa, adotou-se o fator nominal do sensor, $K = 7,5 \text{ Hz}/(\text{L}/\text{min})$, equivalente a aproximadamente 450 pulsos por litro. Ressalta-se que a vazão foi utilizada como uma estimativa funcional para identificação da presença ou ausência de escoamento, não como uma calibração metrológica definitiva do sensor.

A informação de vazão é então combinada com a classificação do sinal piezoelétrico em uma etapa de decisão multimodal. Essa abordagem permite diferenciar, por exemplo, perturbações mecânicas sem presença de escoamento de condições em que há simultaneamente vibração e fluxo hidráulico ativo. Na Tabela 3 apresenta-se as regras de decisão utilizadas pelo algoritmo para combinar o estado do sensor piezoelétrico com a condição de vazão.

Tabela 3 - Regras de decisão multimodal do sistema

Estado do piezoelétrico	Condição de vazão	Decisão final do algoritmo	Interpretação
INVÁLIDO	Qualquer condição	AQUISICAO_COMPROMETIDA	O bloco não deve ser usado para análise confiável.
REPOUSO	Vazão $\leq$	SISTEMA_EM_REPOUSO	Não há excitação

	0,1 L/min		vibracional nem escoamento relevante.
REPOUSO	Vazão > 0,1 L/min	ESCOAMENTO_SEM_VIBRACAO	Há fluxo hidráulico, mas sem perturbação vibracional significativa.
VIBRACAO_BAIXA	Vazão ≤ 0,1 L/min	VIBRACAO_SEM_ESCOAMENTO	Há vibração sem fluxo, sugerindo impacto externo ou ruído mecânico.
VIBRACAO_BAIXA	Vazão > 0,1 L/min	VIBRACAO_COM_ESCOAMENTO	Há fluxo e vibração simultâneos, condição de interesse para monitoramento.
IMPACTO	Qualquer condição	IMPACTO_MECANICO_DETECTADO	O sinal apresenta característica impulsiva dominante.

Fonte: Produção do próprio autor.

A lógica de decisão multimodal não tem como objetivo fornecer um diagnóstico automático definitivo de vazamentos, mas sim organizar a interpretação experimental dos diferentes cenários avaliados. Dessa forma, situações como sistema em repouso, escoamento sem vibração, vibração sem escoamento, vibração com escoamento, impacto mecânico e aquisição comprometida podem ser diferenciadas de maneira sistemática.

A análise dos resultados não foi interpretada como medição direta e precisa das vibrações hidráulicas da tubulação, mas como avaliação do comportamento elétrico do conjunto formado pelo sensor piezoelétrico, sua fixação mecânica, o circuito de condicionamento e o sistema de aquisição digital. Assim, a presença de vazão, a intensidade do sinal, as quedas para 0 V, a ocorrência de saturações e o comportamento espectral foram utilizados em conjunto para caracterizar as limitações e possibilidades da arquitetura experimental desenvolvida.

Portanto, o sistema computacional implementado permitiu validar a comunicação entre ESP32 e computador, organizar os dados adquiridos, comparar diferentes cenários experimentais e avaliar funcionalmente a proposta multimodal desenvolvida. Embora a arquitetura não tenha sido suficiente para realizar medições acústicas hidráulicas de alta precisão ou detectar automaticamente microvazamentos de forma robusta, ela forneceu uma base experimental relevante para investigação do comportamento de sensores de baixo custo aplicados ao monitoramento de perturbações mecânicas e hidráulicas em sistemas residenciais simplificados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos com o sistema proposto. Na seção 4.1, descreve-se o desenvolvimento e a validação da cadeia de condicionamento e aquisição do sinal piezoelétrico, abrangendo os ajustes de polarização, ganho e filtragem realizados até a obtenção de um sinal estável e adequado à conversão analógico-digital. Na seção 4.2, apresentam-se os ensaios experimentais de validação funcional, nos quais os sensores piezoelétrico e de vazão são avaliados de forma individual e combinada, culminando na análise multimodal integrada dos dois canais de medição.

4.1 DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DA CADEIA DE CONDICIONAMENTO E AQUISIÇÃO

A análise experimental do sistema de condicionamento e aquisição do sinal piezoelétrico evidenciou a forte dependência do desempenho do circuito em relação aos parâmetros de projeto associados à impedância de entrada, à polarização do sinal, ao ganho do estágio de amplificação e ao acoplamento mecânico do sensor à estrutura monitorada. Tais aspectos corroboram os fundamentos teóricos descritos na literatura clássica de eletrônica analógica e sensores piezoelétricos, especialmente no que se refere ao tratamento de sinais de alta impedância e à operação de amplificadores sob alimentação simples (Franco, 2015; Horowitz; Hill, 2015; Sedra; Smith, 2015).

Na fase inicial dos ensaios, observou-se que o sinal na saída do estágio de pré-amplificação apresentava instabilidade significativa, caracterizada por oscilações entre níveis próximos à tensão de polarização (V_{bias}) e valores próximos a 0 V, mesmo na ausência de excitação mecânica. Esse comportamento é típico de entradas de alta impedância em condição flutuante, nas quais não há referência definida para o potencial elétrico do nó de entrada. No contexto de sensores piezoelétricos, tal efeito é ainda mais pronunciado devido à natureza capacitiva do elemento sensor, que não fornece um nível DC estável sem a presença de um caminho de polarização adequado (Uchino, 2017).

A introdução de um resistor de polarização entre a entrada do amplificador e a tensão de referência V_{bias} foi fundamental para o estabelecimento de um ponto de

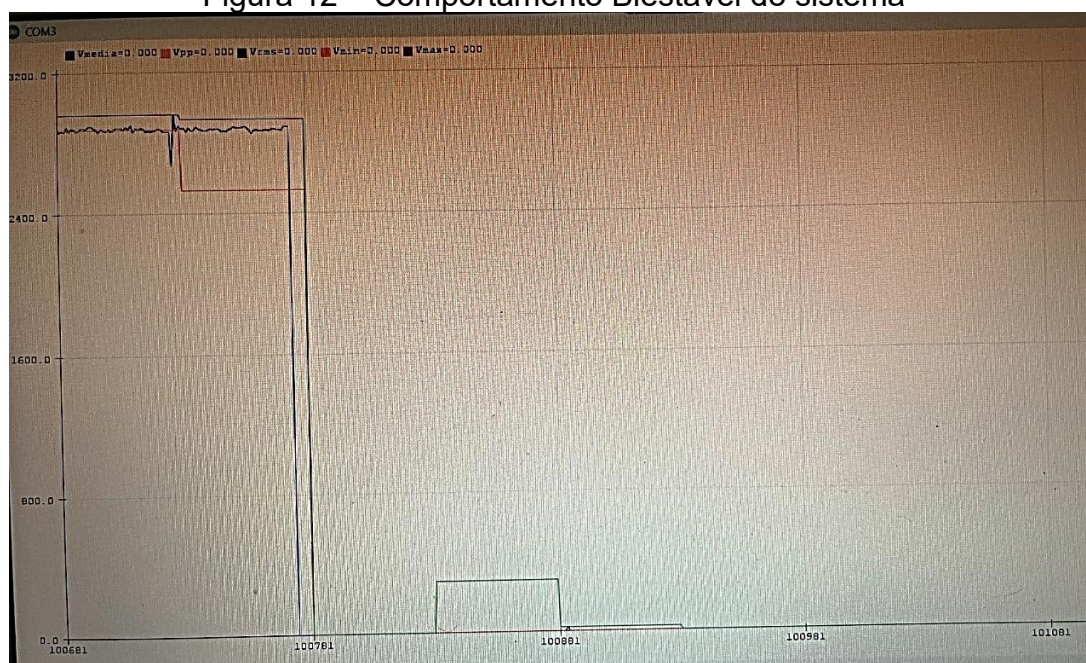
operação estável. Considerando que o sensor piezoelétrico pode ser modelado como uma fonte de corrente em paralelo com uma capacitância interna e uma resistência de fuga elevada, sua saída apresenta natureza predominantemente capacitiva e alta impedância (Uchino, 2017). Na ausência de um caminho definido para corrente contínua, o nó de entrada permanece eletricamente flutuante, tornando-se extremamente suscetível a ruídos eletromagnéticos e correntes de polarização do próprio amplificador operacional. O resistor de polarização atua como elemento de referência DC, fornecendo esse caminho e fixando o potencial do nó em torno de V_{bias} . Experimentalmente, antes de sua inserção o sinal apresentava flutuações aleatórias frequentes entre V_{bias} e 0 V; após sua implementação, o sinal estabilizou-se em torno de 2,3 V a 2,5 V, confirmando o comportamento esperado para amplificadores operacionais em alimentação simples (Franco, 2015; Horowitz; Hill, 2015).

Na etapa subsequente, foi introduzido um capacitor de acoplamento em série com o sensor piezoelétrico, com o objetivo de realizar o desacoplamento entre as componentes contínuas e alternadas do sinal. Esse capacitor, em conjunto com a resistência de entrada do circuito, forma um filtro passa-altas de primeira ordem que bloqueia componentes DC indesejadas e preserva as variações temporais do sinal associadas às vibrações mecânicas. Sem o capacitor de acoplamento, as variações de carga geradas pelo piezoelétrico poderiam deslocar o ponto de operação do amplificador, levando-o à saturação. Com a introdução do acoplamento capacitivo, o sinal passou a ser referenciado em torno de V_{bias} , permitindo que as excursões positivas e negativas da componente alternada fossem corretamente interpretadas dentro da faixa de operação do circuito. A validação experimental evidenciou-se pela redução significativa das saturações prolongadas após a implementação do capacitor, que antes ocorriam com frequência diante de excitações mecânicas mais intensas.

Entretanto, a utilização de resistores de elevada magnitude na entrada do circuito, particularmente na ordem de 1 M Ω , resultou em efeitos indesejados associados ao aumento da constante de tempo do sistema. Pela relação $\tau = RC$, a combinação de altos valores resistivos com o capacitor de acoplamento produzia constantes de tempo elevadas, implicando em resposta lenta do circuito a variações rápidas do sinal. Esse fenômeno manifestou-se experimentalmente como um comportamento biestável, ilustrado na Figura 12, após um impacto mecânico, o sinal, que se encontrava estabilizado em torno de 2,7 V (aproximadamente 2700 unidades no ADC de 12 bits do ESP32), caiu abruptamente para valores próximos a 0 V e permaneceu nesse

estado por toda a janela de aquisição observada, sem recuperação dentro do intervalo de análise. Esse comportamento é consistente com a dinâmica de circuitos RC de alta impedância, nos quais o carregamento e descarregamento lento do capacitor comprometem a capacidade do sistema de acompanhar sinais transitórios (Horowitz; Hill, 2015; Sedra; Smith, 2015).

Figura 12 – Comportamento Biestável do sistema

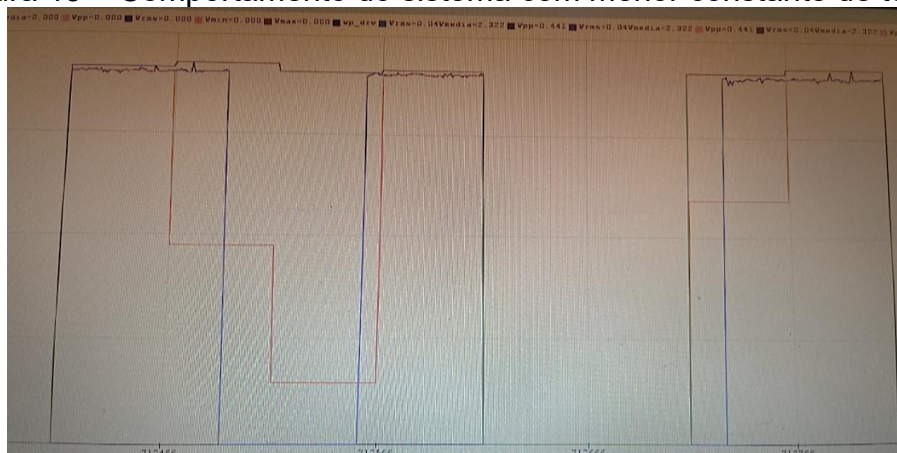


Fonte: Produção do próprio autor.

A redução dos valores resistivos para a faixa de 10 k Ω a 22 k Ω promoveu diminuição significativa da constante de tempo, resultando em melhora substancial na resposta dinâmica do sistema. Conforme evidenciado na Figura 13, o sinal passou a apresentar $V_{\text{média}} = 2,322 \text{ V}$, $V_{\text{pp}} = 0,441 \text{ V}$ e $V_{\text{rms}} = 0,04 \text{ V}$ em condição de escoamento. Embora quedas para valores próximos a 0 V ainda ocorressem diante de eventos impulsivos, a recuperação do ponto de operação passou a se dar em janelas muito mais curtas, da ordem de dezenas de amostras, contrastando com a permanência indefinida observada anteriormente. Esse ajuste evidenciou a importância do correto dimensionamento da impedância de entrada em sistemas de aquisição baseados em

sensores piezoelétricos, nos quais há necessidade de equilibrar sensibilidade e estabilidade temporal.

Figura 13 – Comportamento do sistema com menor constante de tempo

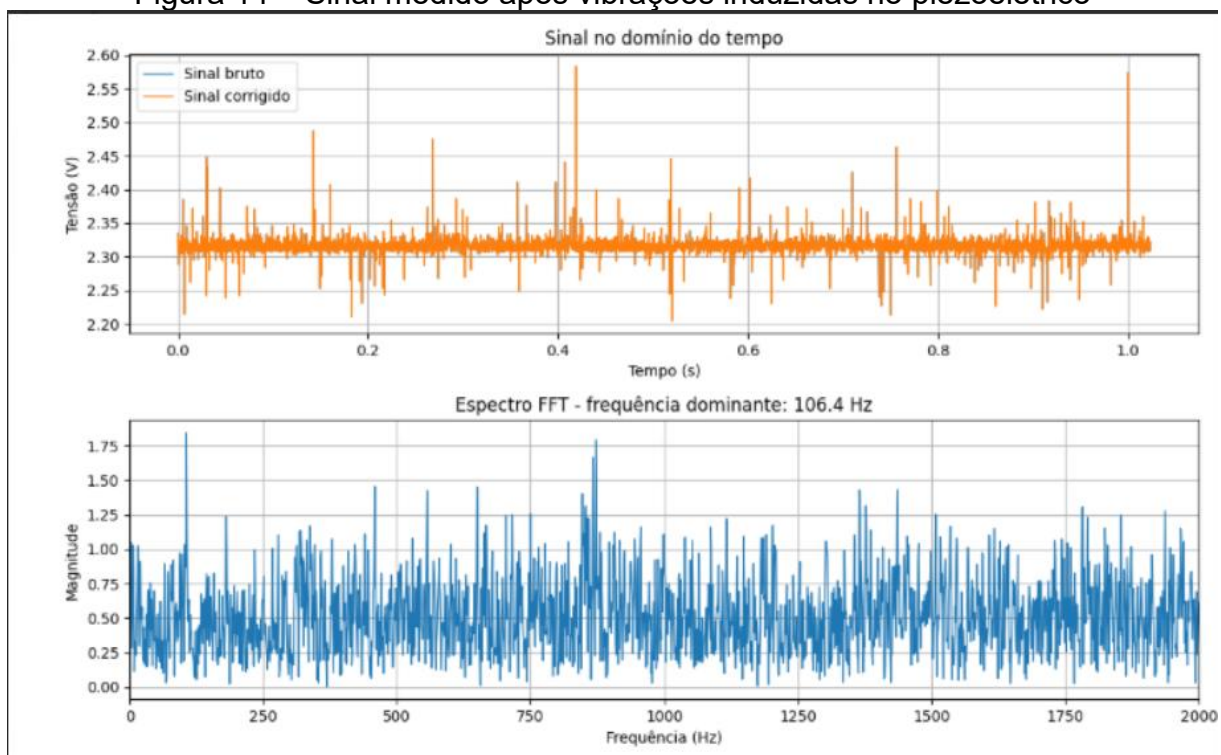


adquirido, interfaces com baixa rigidez mecânica reduzem significativamente a transferência de energia vibracional, comprometendo a sensibilidade do sistema, conforme também relatado em estudos de monitoramento acústico de vazamentos em tubulações (Almeida et al., 2014).

No que se refere à aquisição pelo microcontrolador, o conversor analógico-digital do ESP32 foi capaz de representar adequadamente as variações do sinal dentro da faixa de operação definida pelo V_{bias} . Entretanto, durante os ensaios foram identificadas leituras espúrias próximas a 0 V mesmo na presença de excitação mecânica contínua, não associadas à ausência real de sinal, mas a eventos transitórios de saturação momentânea do circuito de condicionamento e à susceptibilidade do sistema a ruídos elétricos. Do ponto de vista eletrônico, essas quedas abruptas decorrem da natureza impulsiva do sinal piezoelétrico, que pode gerar picos de tensão capazes de deslocar momentaneamente o amplificador para fora de sua região linear, combinada à alta impedância do sensor e às limitações práticas do circuito de entrada (Franco, 2015; Sedra; Smith, 2015).

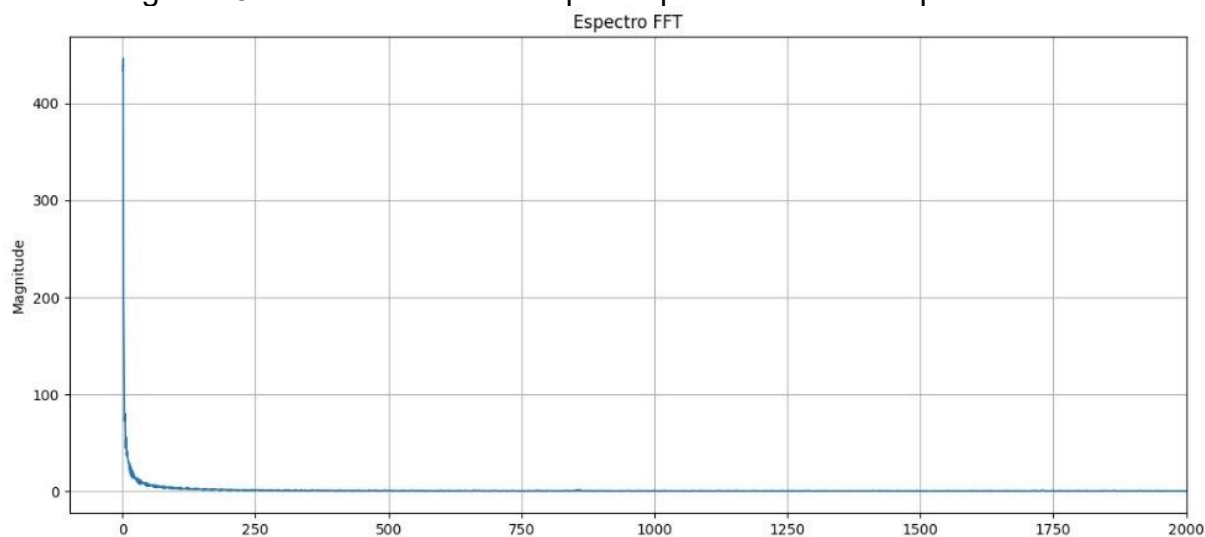
Diante disso, a métrica RMS que foi inicialmente considerada como indicador principal de vibração, por representar a energia média do sinal ao longo do tempo (Oppenheim; Schaffer, 2010), devido a presença recorrente de amostras próximas a 0 V introduzia distorções significativas nesse cálculo, teve sua confiabilidade como indicador direto de vibração reduzido. Quando o sinal contém quedas abruptas decorrentes de saturação, o valor RMS passa a refletir predominantemente o comportamento anômalo do circuito frente a transientes, e não a energia vibracional útil. De forma análoga, a análise espectral por FFT apresentou limitações semelhantes, observaram-se componentes frequenciais recorrentes mesmo sem excitação mecânica intencional, como é visto na Figura 14, indicando ruídos intrínsecos ao circuito e ao ambiente experimental; e quando o sinal caía para valores próximos a 0 V, o espectro passava a representar a dinâmica de saturação e recuperação do circuito, não a frequência física da excitação aplicada, como é apresentado na Figura 15.

Figura 14 – Sinal medido após vibrações induzidas no piezoelétrico



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 15 – Sinal FFT medido após impacto induzido no piezoelétrico



Fonte: Produção do próprio autor.

Essas constatações motivaram a reformulação da lógica de processamento. Em vez de tratar as amostras próximas a 0 V como ruído a ser simplesmente descartado, passou-se a classificá-las como informação relevante sobre o estado do sistema: quedas curtas e isoladas indicam transientes de curta duração, enquanto quedas prolongadas sinalizam saturação do circuito ou falha de recuperação do ponto de operação. Com base nessa distinção, o algoritmo foi reformulado para avaliar

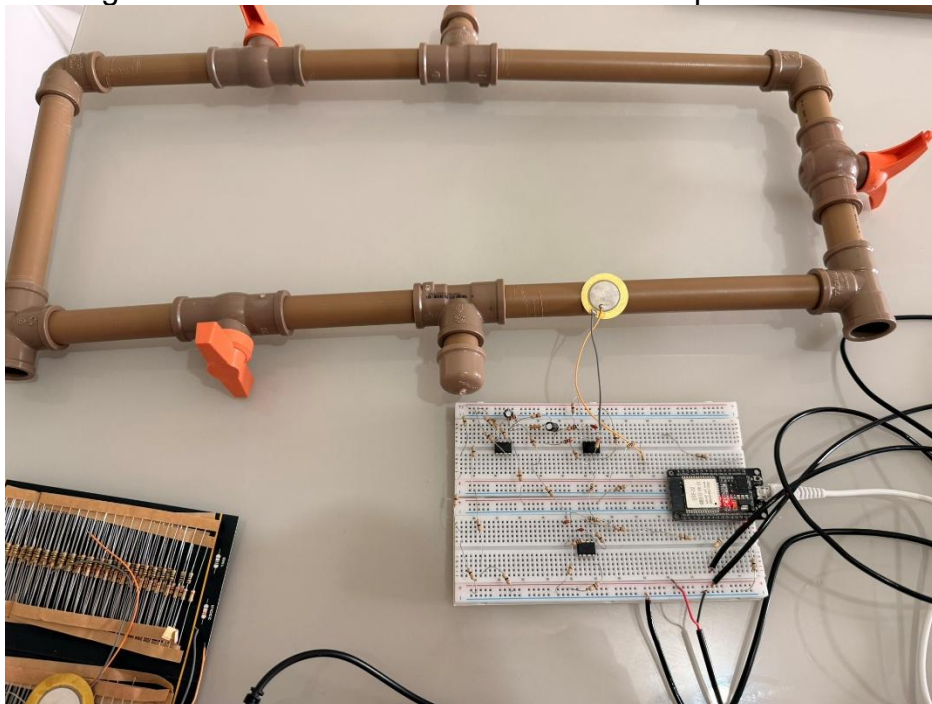
múltiplos parâmetros de forma simultânea — valor RMS, tensão pico a pico, ocorrência e duração de quedas para 0 V, número de eventos consecutivos de saturação, presença de vazão e comportamento espectral — classificando cada bloco como válido ou comprometido antes de aplicar qualquer métrica de diagnóstico. O RMS foi reposicionado como métrica auxiliar de caracterização, a ser interpretado em conjunto com os demais parâmetros e apenas quando o bloco for considerado válido. Essa reformulação metodológica, fundamentada nos resultados da primeira etapa de ensaios, estabeleceu as condições para a realização dos ensaios finais, nos quais o sistema foi avaliado nas condições experimentais definidas pelo protocolo da Tabela 1. Os resultados obtidos nessa segunda etapa são apresentados e discutidos na seção 4.2.

4.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS E ANÁLISE MULTIMODAL DOS SINAIS

Com o objetivo de validar funcionalmente o algoritmo reformulado e a abordagem multimodal, foram realizados ensaios de caracterização em bancada simplificada, nos quais cada sensor foi avaliado individualmente em condições controladas, sem necessidade de operação integrada da maquete hidráulica completa. Essa abordagem é consistente com a etapa de desenvolvimento em que o sistema se encontra, voltada à validação da lógica de classificação e não à detecção automática em condições reais de operação.

Na Figura 16 apresenta-se a configuração utilizada nos ensaios do sensor piezoelétrico. O sensor foi fixado diretamente sobre a tubulação de PVC da maquete por meio de acoplamento mecânico, com o circuito de condicionamento analógico e o microcontrolador ESP32 montados em protoboard e conectados ao computador via USB para transmissão serial dos dados adquiridos. Essa configuração reproduz fielmente a cadeia de aquisição descrita na seção 3, permitindo a validação do comportamento do sistema em condições equivalentes às da maquete hidráulica.

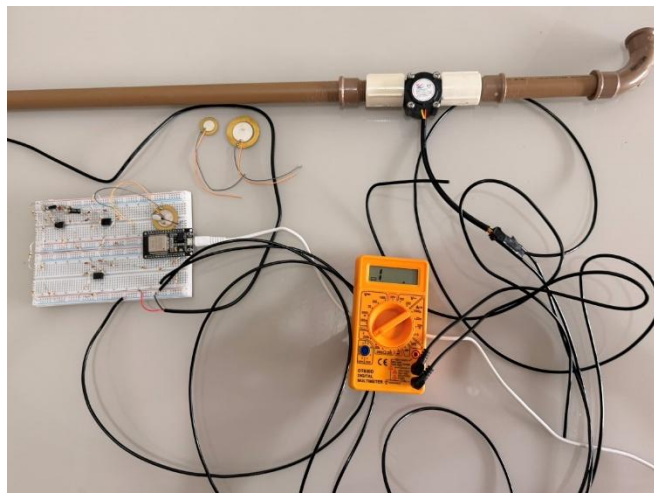
Figura 16 – Bancada de ensaios do sensor piezoelétrico



Fonte: Produção do próprio autor.

Na Figura 17 apresenta-se a configuração utilizada nos ensaios do sensor de vazão. O sensor YF-S201 foi instalado em série com um segmento de tubulação de PVC conectado a uma fonte de fluxo controlada, com os fios de sinal ligados diretamente ao ESP32 via protoboard.

Figura 17 – Bancada de ensaios do sensor de vazão YF-S201



Fonte: Produção do próprio autor.

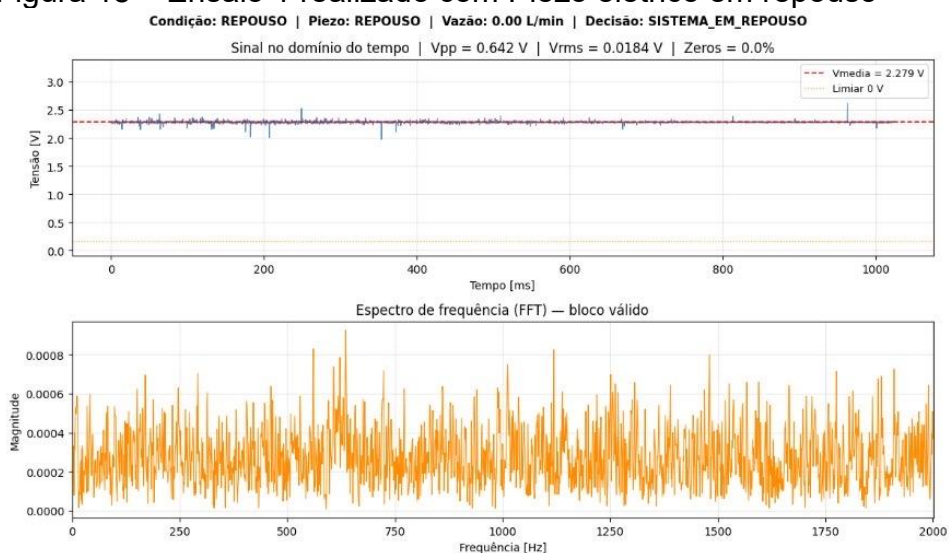
Os ensaios foram organizados em seis etapas progressivas, cobrindo as condições de repouso, impacto leve, impacto forte, vibração contínua induzida, escoamento sem impacto e escoamento com impacto, conforme detalhado nas

subseções a seguir. Para cada condição foram realizados dois blocos de aquisição, e os resultados foram registrados automaticamente pelo algoritmo Python em arquivo CSV, incluindo todas as métricas temporais, espectrais e de vazão, além da classificação final do sistema.

4.2.1 Sensor piezoelétrico em repouso

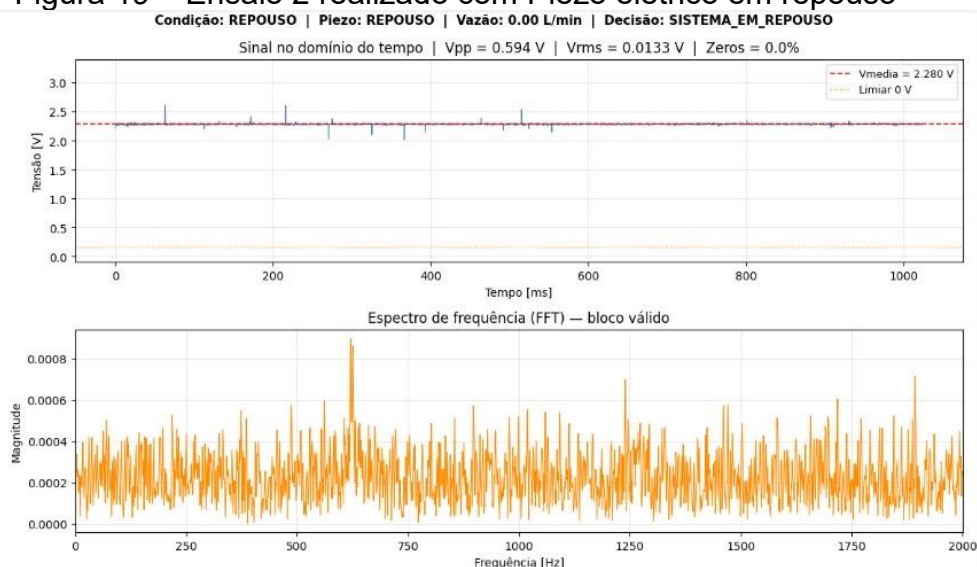
Para a primeira etapa dos ensaios de validação funcional, o sensor piezoelétrico foi fixado sobre um segmento de tubulação de PVC sem qualquer excitação mecânica intencional, com o objetivo de caracterizar o comportamento de linha de base do sistema de aquisição e condicionamento. Essa condição é fundamental para a definição dos limiares de classificação, uma vez que estabelece os níveis típicos de ruído elétrico e variação residual do circuito na ausência de perturbações externas. Foram realizados dois blocos de aquisição, cujos resultados são apresentados nas Figuras 18 e 19.

Figura 18 – Ensaio 1 realizado com Piezo elétrico em repouso



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 19 – Ensaio 2 realizado com Piezo elétrico em repouso



Fonte: Produção do próprio autor.

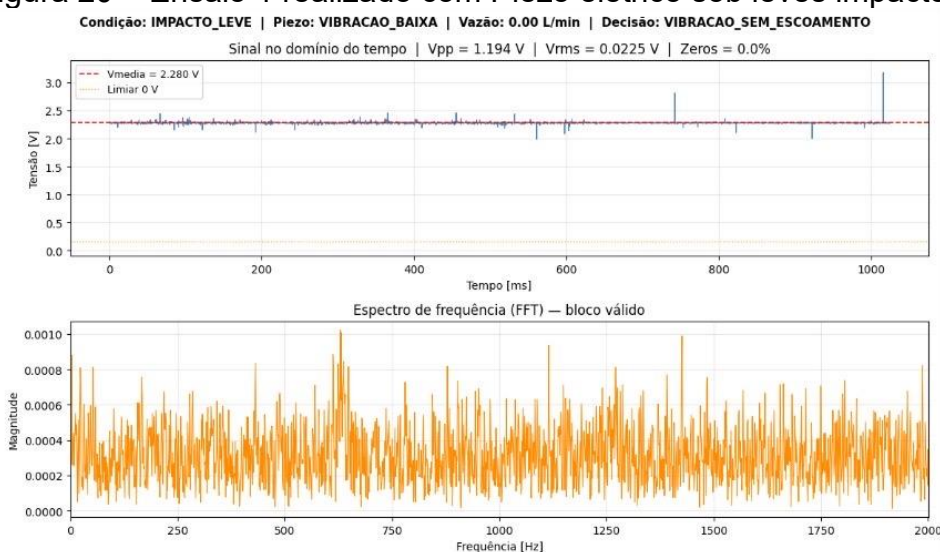
Nos dois ensaios, o sinal apresentou comportamento estável em torno da tensão de polarização V_{bias} , com tensão média de aproximadamente 2,279 V e 2,28 V respectivamente. Os valores de tensão pico a pico não ultrapassaram 0,09 V em nenhum dos blocos, enquanto o V_{rms} da componente alternada permaneceu abaixo de 0,02 V, refletindo exclusivamente o nível de ruído elétrico intrínseco ao circuito de condicionamento. A ocorrência de amostras próximas a 0 V foi 0% nos dois casos, sem registro de sequências consecutivas longas, confirmando a ausência de eventos de saturação. No domínio da frequência, o espectro obtido pela FFT não apresentou componentes dominantes, exibindo distribuição de baixa magnitude ao longo de toda a faixa analisada, comportamento típico de ruído branco residual sem excitação periódica definida (Oppenheim; Schafer, 2010).

Com base nas métricas extraídas, o algoritmo classificou ambos os blocos como REPOUSO, resultando em decisão multimodal SISTEMA_EM_REPOUSO. Esses resultados validam os limiares definidos no algoritmo de classificação e estabelecem a referência quantitativa para comparação com as condições de excitação mecânica avaliadas nas etapas subsequentes.

4.2.2 Sensor piezoelétrico sob impactos leves

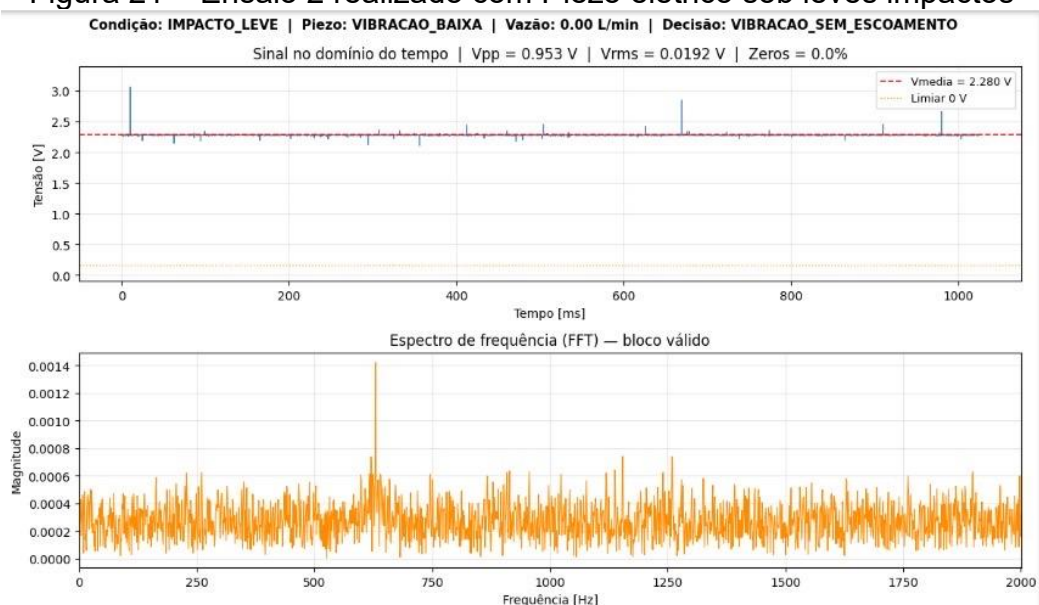
Na segunda etapa, foram aplicados impactos leves sobre a tubulação instrumentada por meio de toques suaves com a ponta do dedo na superfície do tubo de PVC próximo ao sensor, com o objetivo de avaliar a capacidade do sistema de distinguir perturbações mecânicas de baixa intensidade em relação à condição de repouso. Foram realizados dois blocos de aquisição, cujos resultados são apresentados nas Figuras 20 e 21.

Figura 20 – Ensaio 1 realizado com Piezo elétrico sob leves impactos



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 21 – Ensaio 2 realizado com Piezo elétrico sob leves impactos



Fonte: Produção do próprio autor.

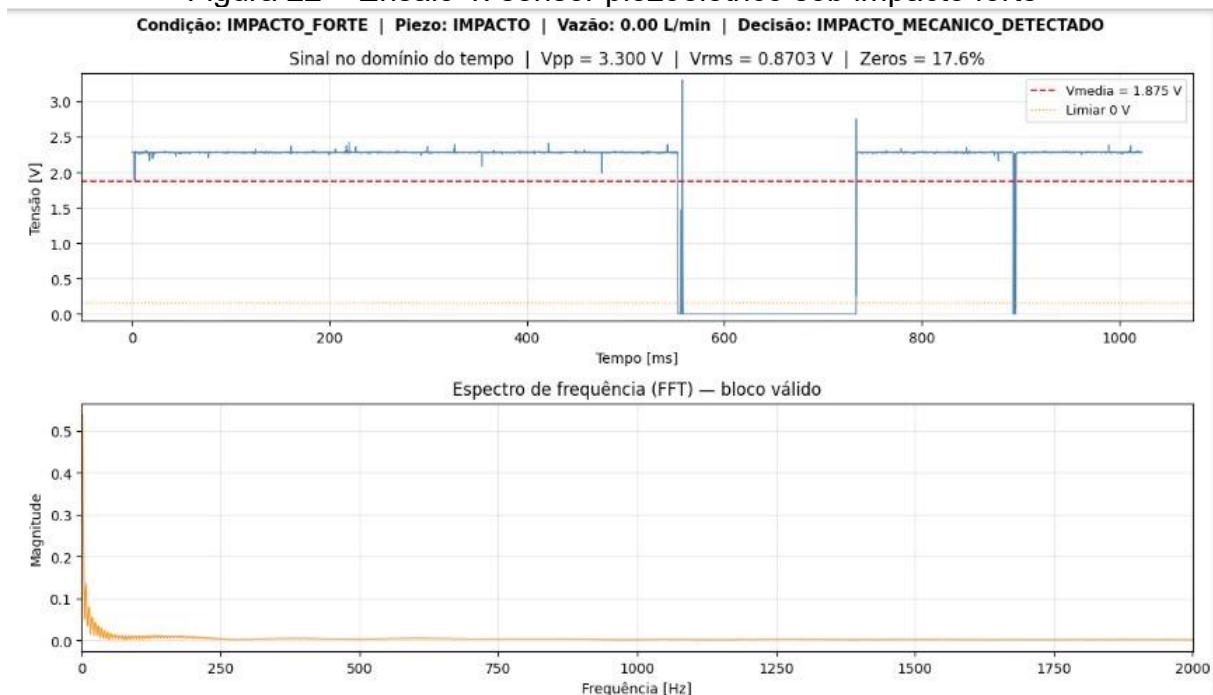
Em comparação com a condição de repouso, os ensaios sob impacto leve evidenciaram elevação perceptível nas métricas temporais. A tensão pico a pico atingiu 1,194 V e 0,953 V nos ensaios 1 e 2 respectivamente, enquanto o V_{rms} da componente alternada elevou-se para 0,0225 V e 0,0192 V, valores superiores aos registrados na linha de base. Foram identificados nenhum evento de queda para valores próximos a 0 V. Esse comportamento é consistente com o modelo físico do efeito piezoelétrico, no qual variações rápidas de esforço mecânico produzem pulsos de carga de curta duração e amplitude proporcional à intensidade do impacto (Uchino, 2017). No domínio da frequência, o espectro não apresentou alterações quando comparado com o sistema em repouso.

O algoritmo classificou ambos os blocos como VIBRACAO_BAIXA, com decisão multimodal resultando em VIBRACAO_SEM_ESCOAMENTO, demonstrando que o sistema foi capaz de identificar perturbações mecânicas de baixa intensidade e diferenciá-las corretamente da condição de repouso com base nos limiares definidos no algoritmo, que podem ser alterados devido a necessidade.

4.2.3 Sensor Piezo sob impactos fortes

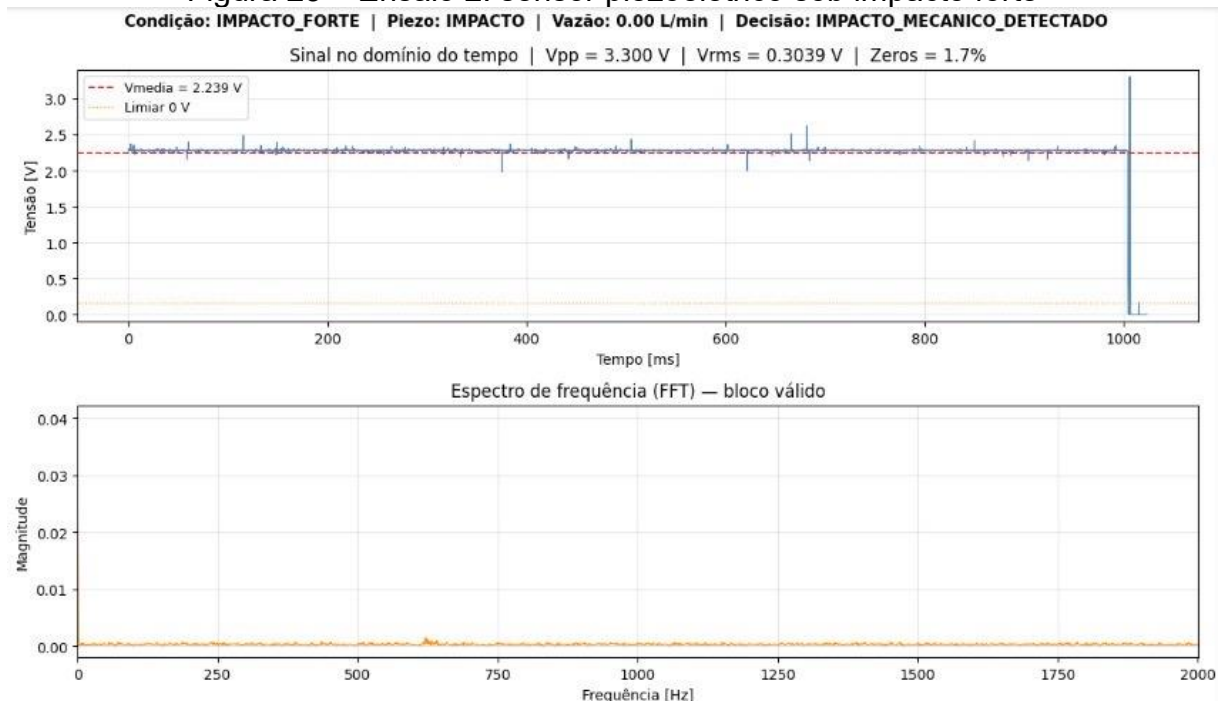
Na terceira etapa, foram aplicados impactos de maior intensidade sobre a tubulação instrumentada por meio de golpes com objeto rígido na superfície do tubo de PVC próximo ao sensor e no sensor, com o objetivo de avaliar a resposta do sistema a excitações impulsivas de alta energia mecânica e verificar o comportamento do algoritmo de classificação diante de eventos que levam o circuito de condicionamento à saturação. Foram realizados dois blocos de aquisição, cujos resultados são apresentados nas Figuras 22 e 23.

Figura 22 – Ensaio 1: sensor piezoelétrico sob impacto forte



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 23 – Ensaio 2: sensor piezoelétrico sob impacto forte



Fonte: Produção do próprio autor.

Os ensaios sob impacto forte produziram as maiores variações observadas em toda a etapa de validação funcional. A tensão pico a pico atingiu 3.3 V em ambos ensaios, e o V_{rms} da componente alternada elevou-se para 0.8703 V e 0.3039 V.

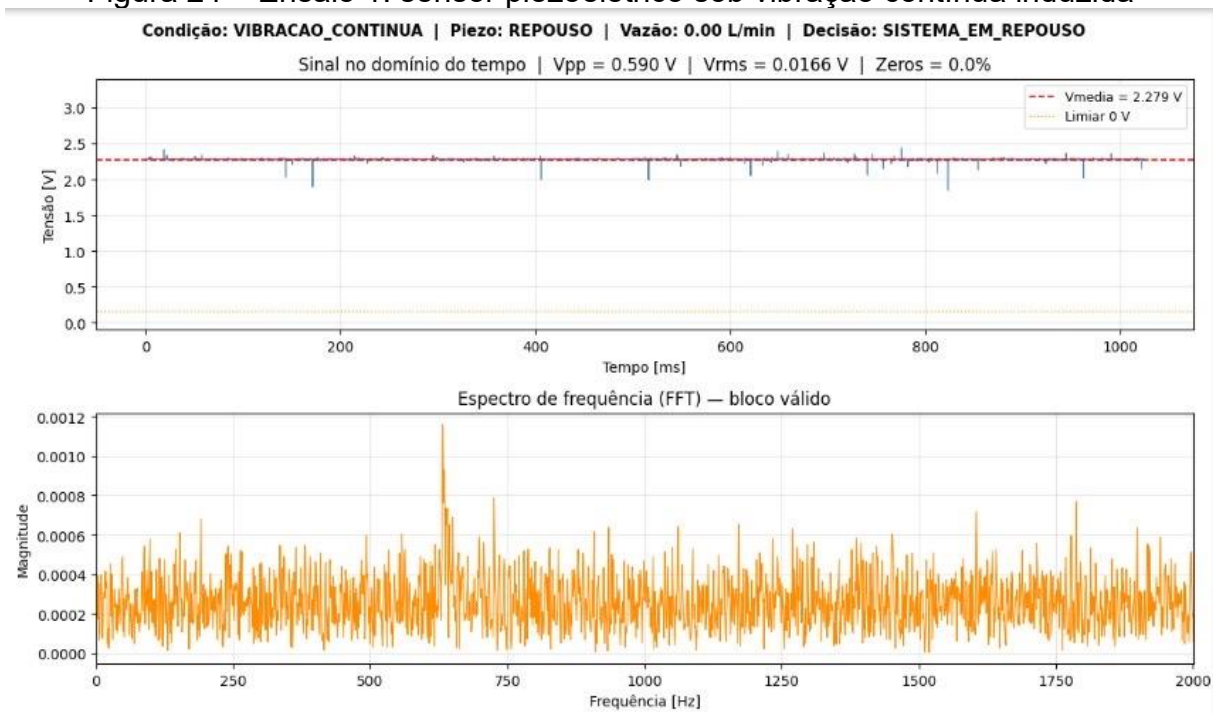
Verificou-se ocorrência expressiva de amostras próximas a 0 V, correspondendo a 17,6% e 1,7% do bloco total, sendo que o segundo ensaio teve seu impacto ao fim da amostragem. Esse comportamento é consistente com o fenômeno de saturação transitória do circuito de condicionamento descrito na seção 4.1, o impacto de alta intensidade gera um pico de tensão que desloca momentaneamente o amplificador operacional para fora de sua região linear de operação, resultando em uma saturação e então em uma queda abrupta do sinal para valores próximos a 0 V seguida de recuperação gradual determinada pela constante de tempo do circuito RC (Franco, 2015; Horowitz; Hill, 2015). Esse comportamento, embora represente uma limitação do circuito de condicionamento, constitui em si uma informação relevante sobre a intensidade do evento mecânico detectado.

Apesar da elevada ocorrência de amostras em 0 V, o algoritmo identificou corretamente ambos os blocos como IMPACTO, com decisão multimodal resultando em IMPACTO_MECANICO_DETECTADO. Esse resultado valida a lógica de classificação adotada, que prioriza a amplitude de pico sobre o percentual de zeros como critério principal de identificação de eventos impulsivos, mostrando-se mais robusta para essa condição do que um critério baseado exclusivamente na validade estatística do bloco.

4.2.4 Sensor Piezo sob vibração induzida

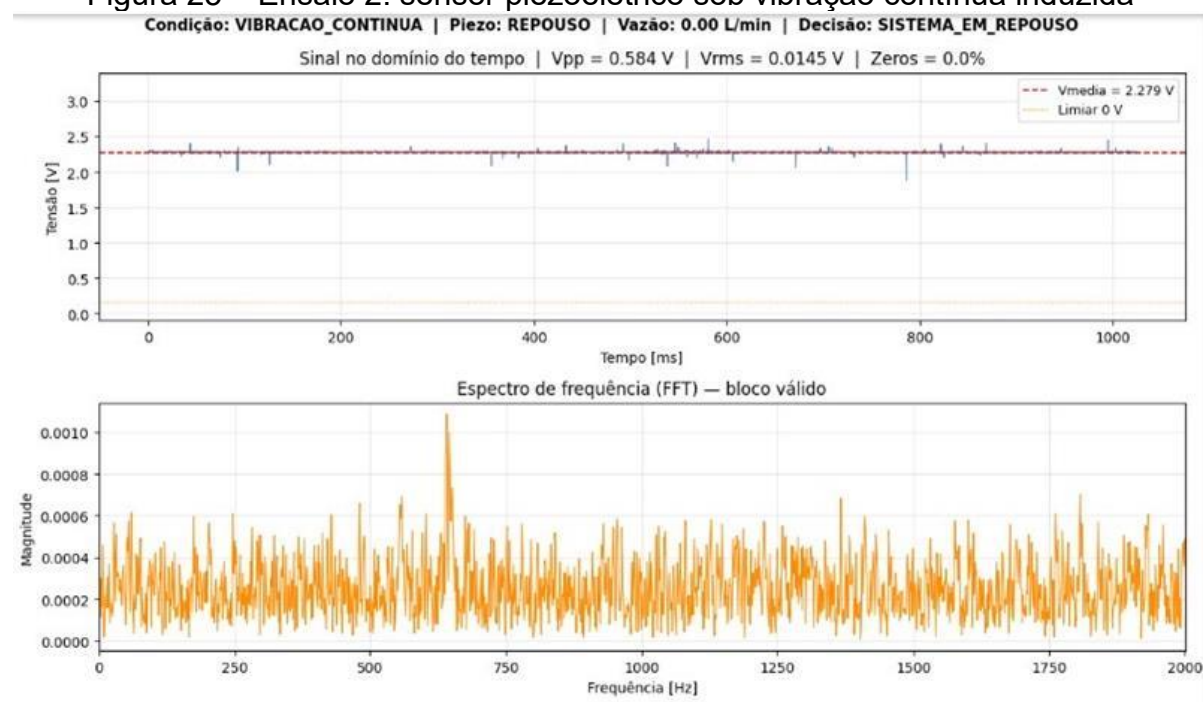
Na quarta etapa, foi aplicada vibração contínua de baixa amplitude sobre a tubulação instrumentada por meio de fricção suave e repetida com o dedo na superfície do tubo de PVC, com o objetivo de avaliar a resposta do sistema a perturbações mecânicas de caráter estacionário e baixa intensidade, análogas às que poderiam ser geradas pelo escoamento de fluido em condições normais de operação. Foram realizados dois blocos de aquisição, cujos resultados são apresentados nas Figuras 24 e 25.

Figura 24 – Ensaio 1: sensor piezoelétrico sob vibração contínua induzida



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 25 – Ensaio 2: sensor piezoelétrico sob vibração contínua induzida



Fonte: Produção do próprio autor.

Os ensaios sob vibração contínua induzida resultaram em métricas temporais equivalentes às observadas na condição de repouso. A tensão pico a pico atingiu 0,59 V e 0,584 V nos ensaios 1 e 2, enquanto o V_{rms} da componente alternada permaneceu

em 0,0166 V e 0,0145 V, valores dentro da faixa de ruído de fundo já caracterizada na seção 4.2.1. A ocorrência de amostras próximas a 0 V foi de 0%, sem sequências, confirmando ausência de saturação. No domínio da frequência, o espectro não apresentou componentes dominantes distinguíveis do perfil de ruído branco residual observado em repouso. O algoritmo classificou ambos os blocos como REPOUSO, com decisão multimodal resultando em SISTEMA_EM_REPOUSO.

Esse resultado evidencia uma característica relevante do sistema, o sensor piezoelétrico, nas condições de acoplamento e condicionamento implementadas, não responde de forma detectável a vibrações mecânicas de baixa amplitude. Esse comportamento decorre da combinação entre a atenuação vibracional característica das tubulações de PVC, que dissipam parte significativa da energia mecânica antes que ela alcance o sensor, e a relação sinal-ruído do circuito de condicionamento, cujo nível de ruído elétrico se sobrepõe às variações de tensão geradas por excitações de baixa intensidade (Uchino, 2017; Almeida et al., 2014).

Embora essa limitação restrinja a capacidade do sistema de detectar eventos vibracionais sutis, ela apresenta uma consequência positiva do ponto de vista da aplicação proposta, vibrações geradas pelo escoamento normal de água na tubulação, que tipicamente produzem perturbações mecânicas de baixa amplitude e caráter contínuo, não serão interpretadas como eventos de interesse pelo sistema. Dessa forma, o risco de falsos positivos associados ao próprio fluxo hidráulico é reduzido, e a detecção fica concentrada em eventos de maior energia mecânica, como impactos e perturbações abruptas na tubulação. Essa constatação reforça a importância da abordagem multimodal adotada, na qual a informação de vazão proveniente do sensor Hall complementa a análise vibracional, permitindo distinguir estados de escoamento sem excitação de situações em que há simultaneamente fluxo e perturbação mecânica detectável.

4.2.5 Validação funcional do sensor de vazão

Na quinta etapa dos ensaios de validação funcional, o sensor de vazão YF-S201 foi conectado a uma fonte de fluxo controlada, com o objetivo de verificar a capacidade do sistema de estimar a vazão volumétrica a partir da contagem de pulsos gerados pelo efeito Hall e de confirmar a integração entre a leitura de fluxo e o algoritmo de decisão multimodal. Foram realizados dois ensaios com diferentes níveis de abertura, cujos resultados são apresentados nas Figuras 26 e 27.

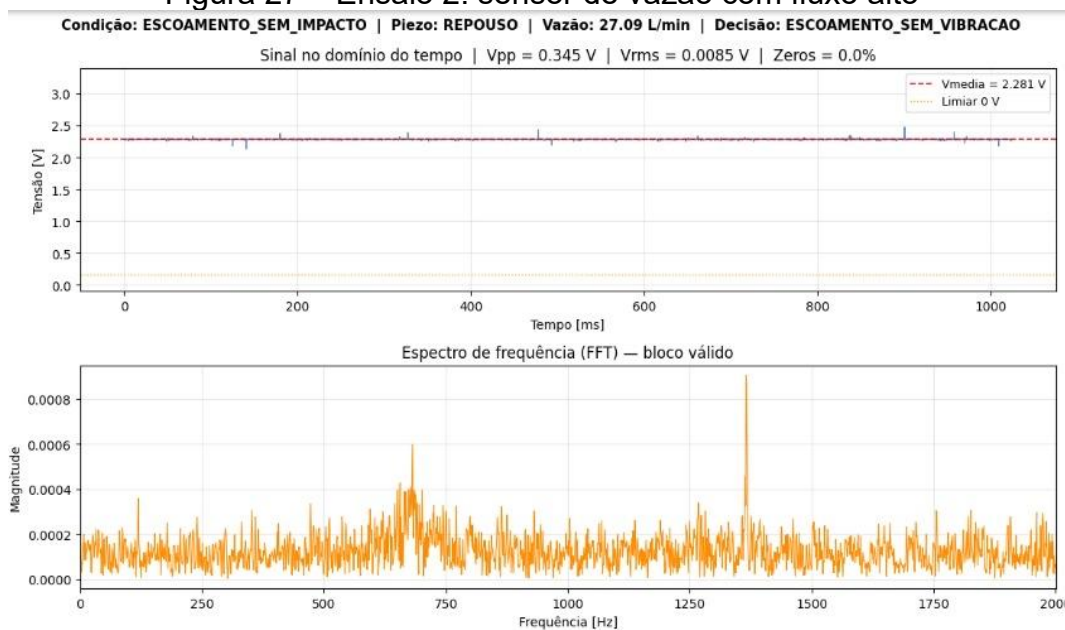
A vazão estimada foi calculada a partir da Equação 5, utilizando o fator nominal do sensor fornecido pelo fabricante, $K = 7,5$. Ressalta-se que, nesta etapa, a análise teve caráter de validação funcional, buscando verificar se o sistema era capaz de distinguir diferentes níveis de escoamento e integrar essa informação à lógica multimodal. Assim, os valores obtidos não devem ser interpretados como calibração metodológica definitiva do sensor, mas como estimativas baseadas no fator nominal do fabricante.

Figura 26 – Ensaio 1: sensor de vazão com fluxo baixo



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 27 – Ensaio 2: sensor de vazão com fluxo alto



Fonte: Produção do próprio autor.

No primeiro ensaio, com abertura parcial da fonte de fluxo, o sensor registrou 24,4 pulsos por segundo, resultando em vazão estimada de 3,26 L/min. O sinal piezoelétrico permaneceu estável, com $V_{\text{média}} = 2,281 \text{ V}$, $V_{\text{pp}} = 0,329 \text{ V}$ e $V_{\text{rms}} = 0,0085 \text{ V}$, sem ocorrência de amostras próximas a 0 V, caracterizando bloco válido. O estado do piezoelétrico foi classificado como REPOUSO, e a decisão multimodal resultou em ESCOAMENTO_SEM_VIBRACAO, confirmando que o sistema identificou corretamente a presença de fluxo sem perturbação mecânica associada.

No segundo ensaio, com abertura maior da fonte de fluxo, a frequência de pulsos elevou-se para 203,2 pulsos por segundo, resultando em vazão estimada de 27,09 L/min. O sinal piezoelétrico manteve comportamento equivalente ao primeiro ensaio, com $V_{\text{média}} = 2,281 \text{ V}$, $V_{\text{pp}} = 0,345 \text{ V}$ e $V_{\text{rms}} = 0,0085 \text{ V}$, sem ocorrência de zeros e com bloco classificado como válido. O estado do piezoelétrico permaneceu como REPOUSO, e a decisão multimodal resultou novamente em ESCOAMENTO_SEM_VIBRACAO. A diferença de vazão entre os dois ensaios — de 3,26 L/min para 27,09 L/min — foi prontamente refletida na contagem de pulsos, demonstrando a capacidade do sensor Hall de discriminar diferentes níveis de fluxo dentro da faixa de operação testada.

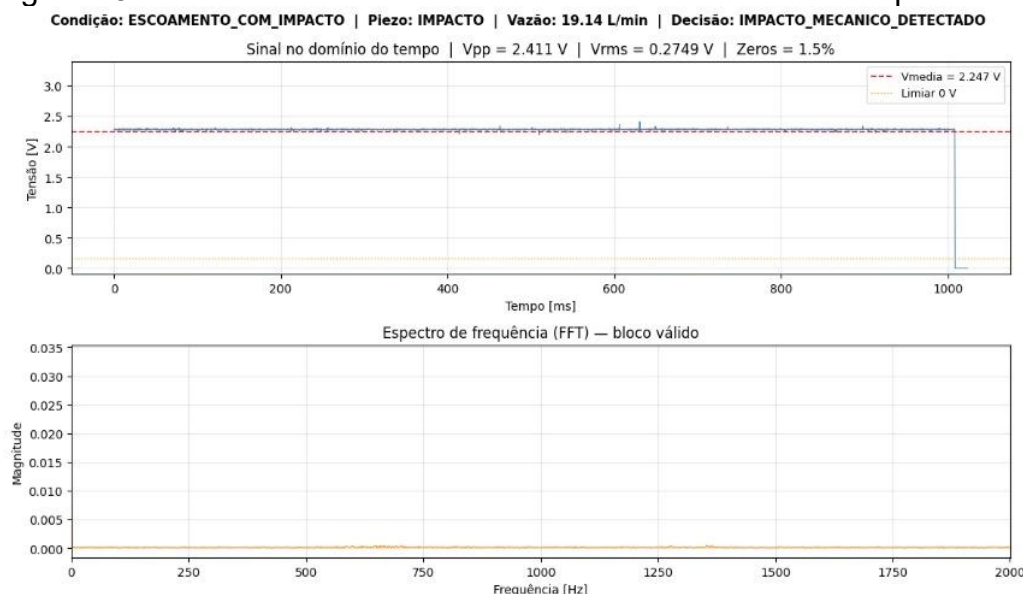
Em ambos os ensaios, o espectro de frequência apresentou distribuição de baixa magnitude ao longo de toda a faixa analisada, com ausência de componentes dominantes associadas ao escoamento, confirmando o comportamento já observado

na seção 4.2.4, o escoamento de água pela tubulação não gera vibrações de amplitude suficiente para ser detectada pelo sensor piezoelétrico nas condições de acoplamento implementadas. Esse resultado reforça a complementaridade entre os dois sensores na arquitetura multimodal proposta, o sensor Hall é o responsável pela detecção e quantificação do fluxo, enquanto o piezoelétrico permanece sensível apenas a eventos mecânicos de maior energia.

4.2.6 Análise multimodal combinada

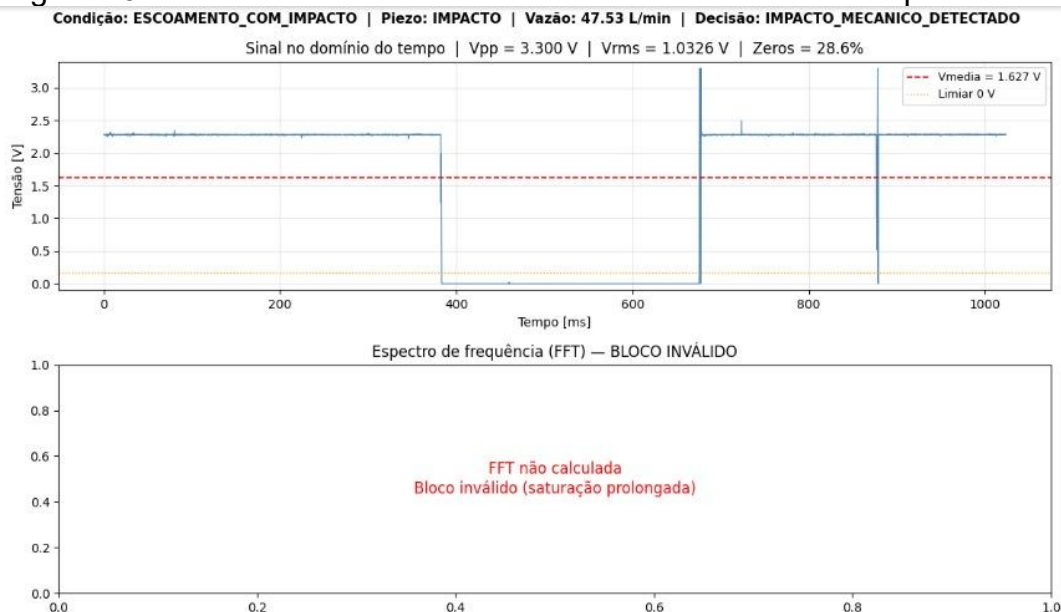
Na sexta e última etapa dos ensaios de validação funcional, o sistema foi avaliado com os dois sensores operando simultaneamente, com fluxo ativo e aplicação intencional de impactos mecânicos sobre a tubulação, com o objetivo de verificar a capacidade da decisão multimodal de identificar a ocorrência de perturbações mecânicas durante o escoamento. Essa condição é a mais relevante para a aplicação proposta, pois simula o cenário em que uma anomalia na tubulação, como uma falha mecânica ou evento associado a um vazamento, ocorre enquanto há circulação de água no sistema. Foram realizados dois ensaios, cujos resultados são apresentados nas Figuras 28 e 29.

Figura 28 – Ensaio 1: análise multimodal com escoamento e impacto leve



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 29 – Ensaio 2: análise multimodal com escoamento e impacto forte



Fonte: Produção do próprio autor.

No primeiro ensaio, com vazão de 19,14 L/min e aplicação de impacto de intensidade moderada sobre a tubulação, o sinal piezoelétrico apresentou $V_{pp} = 2,411$ V e $V_{rms} = 0,2749$ V, com ocorrência de 1,46% de amostras próximas a 0 V, correspondendo a 1 evento com sequência consecutiva máxima de 60 amostras. O bloco foi classificado como válido, e o espectro de frequência foi calculado, exibindo concentração de energia em baixas frequências com queda abrupta de magnitude acima de 250 Hz, reflexo do caráter impulsivo do evento registrado. O estado do

piezoelétrico foi classificado como IMPACTO, e a decisão multimodal resultou em IMPACTO_MECANICO_DETECTADO, combinando corretamente a informação de fluxo ativo com a detecção de perturbação mecânica.

No segundo ensaio, com vazão de 47,53 L/min e aplicação de impacto de maior intensidade, o sinal piezoelétrico apresentou $V_{pp} = 3,300$ V e $V_{rms} = 1,0326$ V, com ocorrência expressiva de 28,61% de amostras próximas a 0 V, correspondendo a 3 eventos com sequência consecutiva máxima de 1169 amostras, conforme apresentado na Figura 29. Em razão da extensão das quedas para 0 V, o bloco foi classificado como inválido para fins de análise espectral, e a FFT não foi calculada, conforme previsto na lógica de processamento implementada. Apesar disso, o estado do piezoelétrico foi corretamente identificado como IMPACTO em razão do V_{pp} elevado, e a decisão multimodal resultou em IMPACTO_MECANICO_DETECTADO, demonstrando que a classificação final não é comprometida pela invalidade espectral do bloco quando a amplitude de pico é suficiente para caracterizar o evento.

A comparação entre os dois ensaios desta etapa evidencia um aspecto relevante do comportamento do sistema, impactos de maior intensidade produzem quedas mais longas e mais frequentes para 0 V, comprometendo a análise espectral mas não a classificação temporal. Essa observação é consistente com os resultados da seção 4.1, que identificou a saturação transitória como fenômeno inerente ao circuito de condicionamento diante de excitações impulsivas de alta amplitude (Franco, 2015; Horowitz; Hill, 2015). A decisão multimodal mostrou-se robusta nos dois casos, produzindo classificação correta independentemente da validade espectral do bloco, o que valida a estratégia de combinar múltiplos parâmetros temporais com a informação de vazão como critério de diagnóstico.

De forma geral, os resultados da seção 4.2 indicam que o sistema desenvolvido é capaz de distinguir os principais estados operacionais avaliados, repouso, escoamento sem perturbação e escoamento com impacto mecânico, com base na combinação entre as métricas do sinal piezoelétrico e a leitura de vazão do sensor Hall. Os ensaios de validação funcional do sistema confirmam que a arquitetura proposta é eficaz para a detecção de eventos mecânicos de alta energia durante o escoamento, como impactos e perturbações abruptas na tubulação, que caracterizam falhas mecânicas associadas a rompimentos ou colapsos estruturais do sistema hidráulico. Nesse cenário de aplicação, a decisão multimodal mostrou-se robusta, produzindo classificação correta mesmo em blocos com saturação prolongada do

circuito de condicionamento. A principal limitação identificada refere-se à insensibilidade do sistema a vibrações contínuas de baixa amplitude, o que impede a detecção de microvazamentos graduais que não geram perturbação mecânica suficiente para ultrapassar o nível de ruído do circuito. Essa distinção é tecnicamente relevante, o sistema não deve ser interpretado como um detector universal de vazamentos, mas como um monitor de integridade estrutural hidráulica capaz de identificar eventos abruptos de falha, com potencial para evolução de forma a realizar detecção de anomalias de menor intensidade mediante melhorias no condicionamento analógico, no acoplamento mecânico do sensor e na lógica de classificação embarcada.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho de graduação teve como objetivo desenvolver e avaliar experimentalmente uma arquitetura de monitoramento inteligente de vazamentos hidráulicos residenciais, baseada na integração de sensores de baixo custo, microcontrolador ESP32 e técnicas de aquisição e processamento digital de sinais. A proposta foi estruturada a partir de uma abordagem multimodal, combinando a análise de sinais vibracionais obtidos por sensores piezoelétricos com informações de vazão provenientes de sensores baseados em efeito Hall, investigando a viabilidade técnica dessa integração para identificação de anomalias em uma maquete hidráulica em escala reduzida.

Ao longo do desenvolvimento, foi construída uma bancada experimental funcional, composta por tubulações de PVC, derivações hidráulicas, módulos de vazamento simulados, sensor de vazão, sensor piezoelétrico, circuito de condicionamento analógico e sistema de aquisição baseado no ESP32. Essa estrutura permitiu a realização de ensaios controlados em diferentes condições de operação, como sistema em repouso, circulação de água sem vazamento, impactos mecânicos aplicados à tubulação e perturbações mecânicas simuladas na tubulação e ensaios com escoamento ativo. A maquete cumpriu seu papel como plataforma experimental para análise inicial do comportamento dos sensores e da cadeia de aquisição.

Os resultados evidenciaram que a utilização de sensores piezoelétricos de baixo custo em tubulações hidráulicas residenciais apresenta potencial, mas também limitações práticas relevantes. O sinal gerado pelo piezoelétrico depende fortemente do acoplamento mecânico entre o sensor e a tubulação, da rigidez da fixação, da intensidade da excitação mecânica e da estabilidade do circuito de condicionamento. Tubulações de PVC, em especial, tendem a atenuar significativamente as vibrações propagadas, dificultando a identificação direta de eventos hidráulicos de baixa intensidade. Do ponto de vista eletrônico, observaram-se fenômenos como instabilidade do ponto de polarização, saturações transitórias e sensibilidade elevada a impactos mecânicos, confirmando que o sinal adquirido deve ser interpretado como resultado do conjunto formado pelo sensor, fixação mecânica, circuito analógico e sistema de aquisição digital.

A aquisição pelo ESP32 e o processamento em Python mostraram-se adequados para a validação da arquitetura proposta. As métricas extraídas, que foram tensão

média, RMS, pico a pico, quedas para 0 V, vazão estimada e espectro por FFT, permitiram comparar diferentes condições experimentais. Entretanto, os resultados indicaram que RMS e FFT, quando analisados isoladamente, não são suficientes para caracterizar de forma robusta a ocorrência de vazamentos, pois impactos mecânicos, ruídos elétricos e instabilidades do circuito também produzem alterações significativas nessas grandezas.

Nos ensaios de validação funcional realizados na etapa final, o sistema foi avaliado nas condições de repouso, escoamento sem perturbação, impacto mecânico sem escoamento e impacto mecânico durante escoamento ativo. Observou-se que impactos mecânicos próximos ao sensor produziram respostas de maior amplitude, frequentemente levando o circuito à saturação momentânea. As vibrações associadas ao escoamento contínuo resultaram em variações sutis do sinal, sem separação robusta em relação à condição de repouso, o que indica que o sistema não responde de forma detectável a perturbações mecânicas de baixa amplitude, como as geradas pelo fluxo normal de água. A FFT não apresentou frequência dominante clara associada a eventos hidráulicos, exibindo componentes espectrais recorrentes mesmo sem excitação intencional. A informação de vazão mostrou-se eficaz para distinguir estados de repouso e escoamento, reforçando a relevância da abordagem multimodal.

Adicionalmente, os ensaios demonstraram que o sistema é capaz de detectar eventos mecânicos de alta energia durante o escoamento, como impactos e perturbações abruptas na tubulação, produzindo classificação correta mesmo em blocos com saturação prolongada do circuito de condicionamento. Essa capacidade posiciona o sistema como um monitor de integridade estrutural hidráulica voltado à identificação de eventos abruptos de falha, como rompimentos e colapsos mecânicos, ainda que a detecção de microvazamentos graduais permaneça como desafio para etapas futuras de desenvolvimento.

A abordagem multimodal mostrou-se relevante para a interpretação dos sinais. A informação de vazão fornecida pelo sensor Hall permitiu contextualizar a análise vibracional, distinguindo situações com e sem circulação de água. Embora o sensor piezoelétrico, nas condições implementadas, não tenha sido suficiente para detectar microvazamentos de forma automática e confiável, sua combinação com a medição de vazão demonstrou ser uma estratégia promissora para futuras etapas de

desenvolvimento, reduzindo ambiguidades e evitando interpretações equivocadas de eventos elétricos ou mecânicos.

De modo geral, conclui-se que o objetivo principal do trabalho foi parcialmente atingido. Foi possível desenvolver a arquitetura de hardware e software proposta, construir a maquete hidráulica, adquirir sinais dos sensores, implementar rotinas de processamento e analisar experimentalmente o comportamento do sistema em diferentes condições. O trabalho também permitiu identificar os principais desafios práticos envolvidos na utilização de sensores piezoelétricos de baixo custo para monitoramento hidráulico, especialmente no que se refere à baixa amplitude dos sinais vibracionais, ao acoplamento mecânico e à instabilidade do circuito analógico. A detecção automática robusta de microvazamentos não foi consolidada nesta etapa, sendo o sistema mais adequado como base experimental validada para estudos posteriores.

Como contribuições principais, destacam-se: o desenvolvimento de uma maquete hidráulica de baixo custo para ensaios de vazamentos; a implementação de uma cadeia de condicionamento analógico para sensor piezoelétrico; a integração entre sensor de vazão e microcontrolador ESP32; a criação de rotinas de aquisição e processamento em Python; a análise crítica das limitações práticas do sistema; e a realização de ensaios de validação funcional em bancada que confirmaram a capacidade do sistema de classificar estados operacionais distintos por meio da abordagem multimodal, incluindo a detecção de eventos mecânicos abruptos durante escoamento ativo. Ressalta-se ainda que resultados negativos ou inconclusivos em determinadas condições possuem valor técnico relevante, pois delimitam os limites da arquitetura e orientam melhorias futuras.

Para trabalhos futuros, é recomendado que se faça o aprimoramento do acoplamento mecânico do sensor piezoelétrico à tubulação, se avalie diferentes métodos de fixação, sejam testados sensores com características construtivas distintas, se utilize amplificadores operacionais com maior impedância de entrada, e além disso, se faça do uso de comunicação Wi-Fi, substituindo a comunicação Serial USB. Também se recomenda a realização de ensaios em diferentes materiais de tubulação, diferentes pressões de operação e múltiplos sensores distribuídos ao longo da maquete. Do ponto de vista computacional, futuras etapas podem incluir filtragem digital embarcada, extração de características avançadas e aplicação de algoritmos

de aprendizado de máquina para classificação dos estados operacionais, com potencial para ampliar a sensibilidade do sistema à detecção de microvazamentos.

Portanto, o trabalho estabelece uma base experimental importante para o desenvolvimento de sistemas inteligentes de monitoramento hidráulico residencial. Embora a solução ainda não esteja pronta para aplicação prática definitiva, os resultados obtidos demonstram a viabilidade da arquitetura proposta como plataforma de estudo e confirmam que a combinação entre sensor piezoelétrico e sensor de vazão permite identificar estados operacionais relevantes, em especial eventos mecânicos abruptos durante escoamento ativo. A integração entre sensores de vibração, sensores de vazão, microcontroladores e processamento digital de sinais permanece uma alternativa promissora para a identificação precoce de anomalias hidráulicas, desde que acompanhada de melhorias no condicionamento analógico, na instrumentação mecânica e na lógica de interpretação dos dados.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2023: informe anual**. Brasília, DF: ANA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/relatorio-conjuntura-dos-recursos-hidricos-no-brasil-atualiza-informacoes-sobre-aguas-do-pais>. Acesso em: 21 maio 2026.

ALMEIDA, F. C. L.; BRENNAN, M. J.; JOSEPH, P. F.; WHITFIELD, S.; DRAY, S.; PASCHOAL, E. **On the acoustic filtering of the pipe and sensor in a buried plastic water pipe and its effect on leak detection: an experimental investigation**. *Sensors*, Basel, v. 14, n. 3, p. 5595-5610, 2014. DOI: 10.3390/s140305595.

ALMEIDA, Fabrício C. L. **Improved acoustic methods for leak detection in buried plastic water distribution pipes**. 2013. Tese (Doutorado) – University of Southampton, Southampton, 2013.

BRENNAN, M. J. et al. On the effects of soil properties on leak noise propagation in plastic water distribution pipes. **Journal of Sound and Vibration**, v. 427, p. 120–133, 2018. DOI: 10.1016/j.jsv.2018.03.027.

CALLISTER JR., William D.; RETHWISCH, David G. **Materials science and engineering: an introduction**. 10. ed. Hoboken: Wiley, 2020.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Qualidade das águas subterrâneas no Estado de São Paulo 2021**. São Paulo: CETESB, 2021.

ESP32IO. **ESP32 tutorials for beginners**. [S. l.]: ESP32IO, [s. d.]. Disponível em: <https://esp32io.com/>. Acesso em: 21 maio 2026.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32 series datasheet: 2.4 GHz Wi-Fi + Bluetooth® + Bluetooth LE SoC. Version 5.2**. [S. l.]: Espressif Systems, 2024. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 21 maio 2026.

FOX, Robert W.; McDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. **Introduction to fluid mechanics**. 8. ed. Hoboken: Wiley, 2011.

FRANCO, Sergio. **Design with operational amplifiers and analog integrated circuits**. 4. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015.

HALL, Edwin H. **On a new action of the magnet on electric currents**. *American Journal of Mathematics*, Baltimore, v. 2, n. 3, p. 287-292, 1879.

HOROWITZ, Paul; HILL, Winfield. **The art of electronics**. 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.

INSTITUTO TRATA BRASIL; GO ASSOCIADOS. **Estudo de perdas de água 2024: desafios na eficiência do saneamento básico no Brasil**. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2024. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2024/06/Release-Perdas-de-Agua-2024.pdf>. Acesso em: 21 maio 2026.

LAHLOU, Zacharia M. **Leak detection and water loss control**. Morgantown: National Drinking Water Clearinghouse, 2001. Tech Brief.

LYONS, Richard G. **Understanding digital signal processing**. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2011.

RENESAS ELECTRONICS. *CA3140, CA3140A: 4.5MHz, BiMOS Operational Amplifier with MOSFET Input/Bipolar Output*. Datasheet FN957, Rev. 10.01. Tokyo: Renesas Electronics, 2026. Acesso em: 01 maio 2026.

OKOSUN, F.; CAHILL, P.; HAZRA, B.; PAKRASHI, V. **Vibration-based leak detection and monitoring of water pipes using output-only piezoelectric sensors**. The European Physical Journal Special Topics, Berlin, v. 228, p. 1659-1675, 2019. DOI: 10.1140/epjst/e2019-800150-6.

OPPENHEIM, Alan V.; SCHAFER, Ronald W. **Discrete-time signal processing**. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2010.

SAQIB, Najam us; MYSOREWALA, Muhammad Faizan; CHEDED, Lahouari. **A multiscale approach to leak detection and localization in water pipeline network**. Water Resources Management, Dordrecht, v. 31, p. 3829-3842, 2017. DOI: 10.1007/s11269-017-1709-3.

SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C. **Microelectronic circuits**. 7. ed. New York: Oxford University Press, 2015.

SMITH, Steven W. **The scientist and engineer's guide to digital signal processing**. San Diego: California Technical Publishing, 1997. Disponível em: <https://www.dspguide.com/>. Acesso em: 21 maio 2026.

TEXAS INSTRUMENTS. *Industry-Standard Dual Operational Amplifiers*. Datasheet SLOS068AB. Dallas: Texas Instruments, 2024. Acesso em: 01 maio 2026.

UCHINO, Kenji. **Advanced piezoelectric materials: science and technology**. 2. ed. Duxford: Woodhead Publishing, 2017.

YAZDEKHAFTI, Sepideh et al. Novel vibration-based technique for detecting water pipeline leakage. **Structure and Infrastructure Engineering**, London, v. 13, n. 6, p. 731-742, 2017. DOI: 10.1080/15732479.2016.1188318.

APÊNDICE A – CÓDIGO EMBARCADO NO ESP32

```

=====
// SISTEMA DE MONITORAMENTO MULTIMODAL - CÓDIGO EMBARCADO ESP32
// Função: adquirir o sinal do sensor piezoelétrico via ADC e contabilizar
// os pulsos do sensor de vazão via interrupção externa, transmitindo
// os dados ao computador por comunicação serial sob demanda.
//
// Pinos utilizados:
//   GPIO34 - entrada analógica do sinal piezoelétrico condicionado
//   GPIO27 - entrada digital dos pulsos do sensor de vazão (YF-S201)
//
// Protocolo serial de saída (disparado pelo comando 'A' recebido):
//   "START"
//   "FS:<valor>"           frequência de amostragem real medida [Hz]
//   "SAMPLES:<valor>"      número de amostras adquiridas
//   <amostra_0>            valores ADC inteiros (0-4095), um por linha
//   <amostra_1>
//   ...
//   "PULSOS:<valor>"       contagem de pulsos do sensor de vazão no intervalo
//   "INTERVALO:<valor>"    duração real do intervalo de aquisição [s]
//   "END"
//
=====
#include <Arduino.h>

// -----
// Pinos
// -----
#define PIEZO_PIN    34    // Entrada analógica – sinal piezoelétrico
#define FLOW_PIN     27    // Entrada digital – pulsos do sensor de vazão
// -----
// Parâmetros de aquisição
// -----
const uint16_t SAMPLES = 4096;    // Número de amostras por bloco
const uint32_t FS      = 4000;    // Frequência de amostragem desejada [Hz]
// Intervalo entre amostras em microssegundos
const uint32_t INTERVALO_US = 1000000UL / FS;
// -----
// Variáveis globais
// -----
uint16_t bufferPiezo[SAMPLES];    // Buffer de amostras do piezoelétrico
volatile uint32_t pulseCount = 0;  // Contador de pulsos (atualizado pela ISR)
// -----
// Rotina de serviço de interrupção – sensor de vazão
// Incrementa o contador a cada borda de subida do sinal Hall.
// Declarada em IRAM para execução rápida.
// -----
void IRAM_ATTR flowISR() {
    pulseCount++;
}
// -----
// setup()
// Inicializa serial, ADC e interrupção do sensor de vazão.
// -----
void setup() {
    Serial.begin(115200);
    while (!Serial) { }           // Aguarda porta serial pronta (USB CDC)
    // Configura ADC: resolução de 12 bits, atenuação 11 dB (0-3,3 V)
    analogReadResolution(12);
    analogSetAttenuation(ADC_11db);
}

```

```

pinMode(PIEZO_PIN, INPUT);
// Configura entrada do sensor de vazão com pull-up interno
pinMode(FLOW_PIN, INPUT_PULLUP);
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(FLOW_PIN), flowISR, RISING);
Serial.println("ESP32 pronto. Aguardando comando 'A'.");
    }

// -----
// loop()
// Aguarda o comando 'A' do Python. Ao recebê-lo, realiza a aquisição e
// transmite o bloco completo.
// -----
void loop() {
// Aguarda comando serial
if (!Serial.available()) return;
char cmd = (char)Serial.read();
if (cmd != 'A') return;
// ----- Início da aquisição -----
// Zera contador de pulsos e registra tempo inicial
noInterrupts();
pulseCount = 0;
interrupts();
unsigned long t0 = micros();
// Aquisição do bloco de amostras com temporização por micros()
for (uint16_t i = 0; i < SAMPLES; i++) {
    unsigned long tAmostra = t0 + (unsigned long)i * INTERVALO_US;
    while (micros() < tAmostra) { } // aguarda instante correto
    bufferPiezo[i] = analogRead(PIEZO_PIN);
}
unsigned long t1 = micros();
// Lê e zera contagem de pulsos com interrupções desabilitadas
noInterrupts();
uint32_t pulsos = pulseCount;
pulseCount = 0;
interrupts();
// Calcula duração real e frequência de amostragem real
float intervalo_s = (float)(t1 - t0) / 1e6f;
float fs_real = (float)SAMPLES / intervalo_s;
// ----- Transmissão do bloco -----
Serial.println("START");
Serial.print("FS:");
Serial.println(fs_real, 2);
Serial.print("SAMPLES:");
Serial.println(SAMPLES);
// Amostras ADC – uma por linha
for (uint16_t i = 0; i < SAMPLES; i++) {
    Serial.println(bufferPiezo[i]);
}
Serial.print("PULSOS:");
Serial.println(pulsos);
Serial.print("INTERVALO:");
Serial.println(intervalo_s, 6);
Serial.println("END");

```

APÊNDICE B – CÓDIGO PYTHON DE AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE SINAIS

```
# =====
#
# Este programa realiza a aquisição de dados do ESP32 via comunicação serial,
# calcula métricas temporais e espectrais do sinal piezoelétrico, estima a
# vazão a partir do sensor de efeito Hall e aplica uma decisão multimodal
# para classificação do estado operacional do sistema.
#
# =====
import serial
import serial.tools.list_ports
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import csv
import os
import time
from datetime import datetime
# =====
# PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO
# =====
PORTA_SERIAL      = "COM3"          # Ajustar conforme porta do ESP32 (ex: /dev/ttyUSB0)
BAUD_RATE         = 115200
TIMEOUT_SERIAL    = 5               # segundos
ADC_BITS          = 12              # Resolução do ADC do ESP32
VREF              = 3.3             # Tensão de referência [V]
ADC_MAX           = 4095            # Valor máximo do ADC (2^12 - 1)
ZERO_THRESHOLD    = 200             # Limiar ADC para identificação de queda para 0 V
ZERO_RATIO_MAX    = 0.20            # Bloco inválido para FFT se > 20% de amostras em 0 V
MAX_ZERO_SEQ      = 50              # Sequência de zeros que caracteriza saturação
                                # prolongada
K_SENSOR          = 7.5             # Fator de calibração do YF-S201 [pulsos/L]
ARQUIVO_CSV       = "resultados_ensaios.csv"
# =====
# FUNÇÕES AUXILIARES
# =====
def adc_para_tensao(amostra_adc):
    """Converte valor ADC (0-4095) para tensão em volts."""
    return (amostra_adc / ADC_MAX) * VREF
def calcular_metricas(amostras_adc):
    """
    Recebe vetor de amostras ADC e retorna dicionário com métricas temporais.
    Métricas calculadas:
    - Vmedia : tensão média do bloco [V]
    - Vpp    : tensão pico a pico [V]
    - Vrms   : valor RMS da componente alternada (sinal menos média) [V]
    - zero_ratio : fração de amostras com valor abaixo de ZERO_THRESHOLD
    - zero_eventos : número de sequências consecutivas de zeros
    - max_zero_seq : maior sequência consecutiva de zeros (amostras)
    - bloco_valido : True se zero_ratio <= ZERO_RATIO_MAX
    """
    tensoes = np.array([adc_para_tensao(a) for a in amostras_adc])
    Vmedia = float(np.mean(tensoes))
    Vmax = float(np.max(tensoes))
    Vmin = float(np.min(tensoes))
    Vpp = Vmax - Vmin
    # RMS da componente AC (remove o nível DC)
    ac = tensoes - Vmedia
    Vrms = float(np.sqrt(np.mean(ac ** 2)))
    # Detecção de quedas para 0 V
```

```

mascara_zero = np.array(amostras_adc) < ZERO_THRESHOLD
zero_count = int(np.sum(mascara_zero))
zero_ratio = zero_count / len(amostras_adc)
# Contagem de eventos e maior sequência consecutiva
zero_eventos = 0
max_seq = 0
seq_atual = 0
dentro = False
for z in mascara_zero:
    if z:
        seq_atual += 1
        if not dentro:
            zero_eventos += 1
            dentro = True
            max_seq = max(max_seq, seq_atual)
        else:
            seq_atual = 0
            dentro = False
bloco_valido = zero_ratio <= ZERO_RATIO_MAX
return {
    "tensoes" : tensoes,
    "Vmedia" : Vmedia,
    "Vpp" : Vpp,
    "Vrms" : Vrms,
    "zero_ratio" : zero_ratio,
    "zero_eventos": zero_eventos,
    "max_zero_seq": max_seq,
    "bloco_valido": bloco_valido,
}
def calcular_fft(tensoes, fs):
    """
    Calcula o espectro de frequência (FFT) do sinal.
    Retorna vetores de frequência [Hz] e magnitude normalizada.
    Só deve ser chamada quando bloco_valido == True.
    """
    ac = tensoes - np.mean(tensoes)
    N = len(ac)
    janela = np.hanning(N)
    Xk = np.fft.rfft(ac * janela)
    freqs = np.fft.rfftfreq(N, d=1.0 / fs)
    mag = np.abs(Xk) / (N / 2)
    return freqs, mag
def calcular_vazao(pulsos, intervalo_s):
    """
    Estima a vazão em L/min a partir da contagem de pulsos do YF-S201.
    Q [L/min] = (pulsos / intervalo_s) / K_SENSOR
    Retorna vazão estimada em L/min.
    """
    if intervalo_s <= 0:
        return 0.0
    freq_hz = pulsos / intervalo_s
    return freq_hz / K_SENSOR
# =====
# FUNÇÃO DE CLASSIFICAÇÃO DO BLOCO PIEZOELÉTRICO
# =====
def classificar_piezo(metricas):
    """
    Classifica o estado do sinal piezoelétrico com base nas métricas do bloco.
    Estados possíveis:

```

```

    INVALIDO        - bloco comprometido por saturação prolongada
    REPOUSO         - sinal estável, sem excitação detectável
    VIBRACAO_BAIXA  - variação moderada, compatível com escoamento
    IMPACTO         - pico impulsivo de alta amplitude ou queda abrupta
    """
    if not metricas["bloco_valido"]:
        return "INVALIDO"
    if metricas["max_zero_seq"] > MAX_ZERO_SEQ:
        return "INVALIDO"
    if metricas["zero_eventos"] >= 1 or metricas["Vpp"] > 1.5:
        return "IMPACTO"
    if metricas["Vrms"] > 0.05 or metricas["Vpp"] > 0.3:
        return "VIBRACAO_BAIXA"
    return "REPOUSO"

# =====
# FUNÇÃO DE DECISÃO MULTIMODAL
# =====
def decisao_multimodal(estado_piezo, vazao_lmin):
    """
    Combina o estado do piezoelétrico com a informação de vazão para produzir
    uma classificação final do estado operacional do sistema.
    Tabela de decisão:
        INVALIDO + qualquer vazão → AQUISICAO_COMPROMETIDA
        REPOUSO  + sem fluxo      → SISTEMA_EM_REPOUSO
        REPOUSO  + com fluxo      → ESCOAMENTO_SEM_VIBRACAO
        VIBRACAO + sem fluxo      → VIBRACAO_SEM_ESCOAMENTO (provável impacto externo)
        VIBRACAO + com fluxo      → VIBRACAO_COM_ESCOAMENTO (candidato a monitoramento)
        IMPACTO  + qualquer      → IMPACTO_MECANICO_DETECTADO
    """
    com_fluxo = vazao_lmin > 0.1 # limiar mínimo para considerar fluxo ativo
    if estado_piezo == "INVALIDO":
        return "AQUISICAO_COMPROMETIDA"
    if estado_piezo == "IMPACTO":
        return "IMPACTO_MECANICO_DETECTADO"
    if estado_piezo == "REPOUSO":
        return "ESCOAMENTO_SEM_VIBRACAO" if com_fluxo else "SISTEMA_EM_REPOUSO"
    if estado_piezo == "VIBRACAO_BAIXA":
        return "VIBRACAO_COM_ESCOAMENTO" if com_fluxo else "VIBRACAO_SEM_ESCOAMENTO"
    return "INDEFINIDO"

# =====
# COMUNICAÇÃO SERIAL COM O ESP32
# =====
def listar_portas():
    """Lista portas seriais disponíveis no sistema."""
    portas = serial.tools.list_ports.comports()
    if not portas:
        print("Nenhuma porta serial encontrada.")
    else:
        print("Portas disponíveis:")
        for p in portas:
            print(f" {p.device} - {p.description}")
def conectar_serial(porta, baud):
    """Abre a conexão serial com o ESP32."""
    try:
        ser = serial.Serial(porta, baud, timeout=TIMEOUT_SERIAL)
        time.sleep(2) # aguarda reset do ESP32
        ser.reset_input_buffer()
        print(f"Conectado em {porta} a {baud} bps.")
        return ser

```

```

except serial.SerialException as e:
    print(f"Erro ao abrir porta serial: {e}")
    return None
def solicitar_bloco(ser):
    """
    Envia comando 'A' ao ESP32 e aguarda recebimento do bloco de dados.
    Protocolo esperado do ESP32 (mesmo do Apêndice A):
    Linha 1 : "START"
    Linha 2 : "FS:<valor>"          frequência de amostragem em Hz
    Linha 3 : "SAMPLES:<valor>"     número de amostras
    Linhas  : valores ADC inteiros, um por linha
    Linha   : "PULSOS:<valor>"      contagem de pulsos do sensor de vazão
    Linha   : "INTERVALO:<valor>"  intervalo de contagem em segundos
    Linha   : "END"
    Retorna dicionário com os dados ou None em caso de falha.
    """
    ser.reset_input_buffer()
    ser.write(b'A')
    dados = {"fs": None, "amostras": [], "pulsos": 0, "intervalo_s": 1.0}
    lendo = False
    timeout_inicio = time.time()
    while True:
        if time.time() - timeout_inicio > TIMEOUT_SERIAL:
            print("Timeout aguardando dados do ESP32.")
            return None
        linha = ser.readline().decode("utf-8", errors="ignore").strip()
        if not linha:
            continue
        if linha == "START":
            lendo = True
            dados["amostras"] = []
            continue
        if not lendo:
            continue
        if linha.startswith("FS:"):
            dados["fs"] = float(linha.split(":")[1])
        elif linha.startswith("SAMPLES:"):
            pass # informativo; o número real será len(amostras)
        elif linha.startswith("PULSOS:"):
            dados["pulsos"] = int(linha.split(":")[1])
        elif linha.startswith("INTERVALO:"):
            dados["intervalo_s"] = float(linha.split(":")[1])
        elif linha == "END":
            break
        else:
            try:
                dados["amostras"].append(int(linha))
            except ValueError:
                pass # ignora linhas não numéricas
    if len(dados["amostras"]) < 64 or dados["fs"] is None:
        print("Bloco incompleto ou inválido recebido.")
        return None
    return dados
# =====
# REGISTRO DE RESULTADOS EM CSV
# =====
def inicializar_csv():
    """Cria o arquivo CSV com cabeçalho se ainda não existir."""
    if not os.path.exists(ARQUIVO_CSV):

```

```

with open(ARQUIVO_CSV, "w", newline="", encoding="utf-8") as f:
    writer = csv.writer(f)
    writer.writerow([
        "timestamp", "ensaio", "condicao",
        "Vmedia_V", "Vpp_V", "Vrms_V",
        "zero_ratio_%", "zero_eventos", "max_zero_seq",
        "bloco_valido", "estado_piezo",
        "vazao_lmin", "decisao_final"
    ])
print(f"Resultados serão salvos em: {ARQUIVO_CSV}")
def salvar_resultado(ensaio, condicao, metricas, estado_piezo, vazao, decisao):
    """Acrescenta uma linha ao CSV com os resultados do bloco."""
    with open(ARQUIVO_CSV, "a", newline="", encoding="utf-8") as f:
        writer = csv.writer(f)
        writer.writerow([
            datetime.now().strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S"),
            ensaio,
            condicao,
            f"{metricas['Vmedia']:.4f}",
            f"{metricas['Vpp']:.4f}",
            f"{metricas['Vrms']:.4f}",
            f"{metricas['zero_ratio']*100:.2f}",
            metricas["zero_eventos"],
            metricas["max_zero_seq"],
            metricas["bloco_valido"],
            estado_piezo,
            f"{vazao:.3f}",
            decisao,
        ])
# =====
# VISUALIZAÇÃO
# =====
def plotar_bloco(metricas, fs, condicao, estado_piezo, vazao, decisao):
    """Gera gráfico de tempo + FFT para o bloco atual."""
    tensoes = metricas["tensoes"]
    N = len(tensoes)
    t = np.arange(N) / fs * 1000 # eixo de tempo em ms
    fig, axes = plt.subplots(2, 1, figsize=(12, 7))
    fig.suptitle(
        f"Condição: {condicao} | Piezo: {estado_piezo} | "
        f"Vazão: {vazao:.2f} L/min | Decisão: {decisao}",
        fontsize=11, fontweight="bold"
    )
    # --- Domínio do tempo ---
    axes[0].plot(t, tensoes, color="steelblue", linewidth=0.8)
    axes[0].axhline(metricas["Vmedia"], color="red", linestyle="--",
                    linewidth=1.2, label=f"Vmedia = {metricas['Vmedia']:.3f} V")
    axes[0].axhline(adc_para_tensao(ZERO_THRESHOLD), color="orange",
                    linestyle=":", linewidth=1.0, label="Limiar 0 V")
    axes[0].set_xlabel("Tempo [ms]")
    axes[0].set_ylabel("Tensão [V]")
    axes[0].set_title(
        f"Sinal no domínio do tempo | "
        f"Vpp = {metricas['Vpp']:.3f} V | "
        f"Vrms = {metricas['Vrms']:.4f} V | "
        f"Zeros = {metricas['zero_ratio']*100:.1f}%"
    )
    axes[0].legend(fontsize=9)
    axes[0].set_ylim(-0.1, VREF + 0.1)

```

```

axes[0].grid(True, alpha=0.3)
# --- Domínio da frequência (FFT) ---
if metricas["bloco_valido"]:
    freqs, mag = calcular_fft(tensoes, fs)
    axes[1].plot(freqs, mag, color="darkorange", linewidth=0.8)
    axes[1].set_xlabel("Frequência [Hz]")
    axes[1].set_ylabel("Magnitude")
    axes[1].set_title("Espectro de frequência (FFT) – bloco válido")
    axes[1].set_xlim(0, fs / 2)
    axes[1].grid(True, alpha=0.3)
else:
    axes[1].text(0.5, 0.5,
                "FFT não calculada\nBloco inválido (saturação prolongada)",
                ha="center", va="center", fontsize=12,
                color="red", transform=axes[1].transAxes)
    axes[1].set_title("Espectro de frequência (FFT) – BLOCO INVÁLIDO")
plt.tight_layout()
plt.show()
# =====
# LOOP PRINCIPAL
# =====
def main():
    print("=" * 60)
    print("  SISTEMA DE MONITORAMENTO MULTIMODAL - VALIDAÇÃO FUNCIONAL")
    print("=" * 60)
    listar_portas()
    porta = input(f"\nPorta serial [{PORTA_SERIAL}]: ").strip() or PORTA_SERIAL
    ser = conectar_serial(porta, BAUD_RATE)
    if ser is None:
        return
    inicializar_csv()
    ensaio = input("Nome do ensaio (ex: PIEZO_BANCADA, VAZAO_TORNEIRA): ").strip()
    print("\nCondições disponíveis:")
    print("  1 - Repouso (sem excitação)")
    print("  2 - Impacto leve (toque suave no tubo)")
    print("  3 - Impacto forte (batida no tubo)")
    print("  4 - Vibração contínua (motor / fricção)")
    print("  5 - Escoamento sem impacto")
    print("  6 - Escoamento com impacto")
    print("  Outro - digitar manualmente")
    mapa_condicoes = {
        "1": "REPOUSO",
        "2": "IMPACTO_LEVE",
        "3": "IMPACTO_FORTE",
        "4": "VIBRACAO_CONTINUA",
        "5": "ESCOAMENTO_SEM_IMPACTO",
        "6": "ESCOAMENTO_COM_IMPACTO",
    }
    while True:
        print("\n" + "-" * 60)
        opcao = input("Condição (1-6 ou texto) | Enter=adquirir | 'sair': ").strip()
        if opcao.lower() == "sair":
            break
        condicao = mapa_condicoes.get(opcao, opcao if opcao else "NAO_DEFINIDA")
        print(f"Condição selecionada: {condicao}")
        print("Adquirindo bloco do ESP32...")
        dados = solicitar_bloco(ser)
        if dados is None:
            print("Falha na aquisição. Tente novamente.")

```

```

        continue
    fs = dados["fs"]
    amostras = dados["amostras"]
    pulsos = dados["pulsos"]
    intervalo_s = dados["intervalo_s"]
    # --- Processamento ---
    metricas = calcular_metricas(amostras)
    estado_piezo = classificar_piezo(metricas)
    vazao = calcular_vazao(pulsos, intervalo_s)
    decisao = decisao_multimodal(estado_piezo, vazao)
    # --- Saída no terminal ---
    print(f"\n{'='*50}")
    print(f"  RESULTADO DO BLOCO – {condicao}")
    print(f"{'='*50}")
    print(f"  Amostras      : {len(amostras)}")
    print(f"  Fs            : {fs:.0f} Hz")
    print(f"  Vmedia        : {metricas['Vmedia']:.4f} V")
    print(f"  Vpp           : {metricas['Vpp']:.4f} V")
    print(f"  Vrms (AC)     : {metricas['Vrms']:.4f} V")
    print(f"  Zeros         : {metricas['zero_ratio']*100:.2f}%  "
          f"({metricas['zero_eventos']} eventos, "
          f"max {metricas['max_zero_seq']} amostras consecutivas)")
    print(f"  Bloco válido  : {'Sim' if metricas['bloco_valido'] else 'NÃO'}")
    print(f"  Pulsos/s      : {pulsos/intervalo_s:.1f}")
    print(f"  Vazão         : {vazao:.3f} L/min")
    print(f"  Estado piezo  : {estado_piezo}")
    print(f"  Decisão final : {decisao}")
    print(f"{'='*50}")
    # --- Salvar e plotar ---
    salvar_resultado(ensaio, condicao, metricas, estado_piezo, vazao, decisao)
    print(f"Resultado salvo em {ARQUIVO_CSV}")
    ver_grafico = input("Exibir gráfico? (s/n) [s]: ").strip().lower()
    if ver_grafico != "n":
        plotar_bloco(metricas, fs, condicao, estado_piezo, vazao, decisao)
    ser.close()
    print("\nConexão serial encerrada.")
    print(f"Todos os resultados foram salvos em: {ARQUIVO_CSV}")
if __name__ == "__main__":
    main()

```