



**Politécnico
Castelo Branco**

Escola Superior
de Tecnologia

Desenvolvimento de um Caudalímetro com Aquisição de Dados e Visualização em Tempo Real

Jorge Tiago Correia Dias

Aluno nº 20150856

Orientadores

Professor Paulo Jorge Sequeira Goncalves (orientador)

Engenheiro Leonel Duarte(coorientador)

Trabalho de Projeto apresentado à Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Licenciado em Engenharia e Gestão Industrial, realizada sob a orientação científica do Doutor Paulo Jorge Sequeira Goncalves, do Instituto Politécnico de Castelo Branco e da orientação do Engenheiro Leonel trabalhador da empresa Dinefer.

Julho de 2026

Composição do júri

Presidente do júri

Nuno Octávio Garcia Fernandes

Professor Coordenador da Escola Superior de Tecnologia do Instituto
Politécnico de Castelo Branco

Vogais

Doutor Paulo Jorge Sequeira Gonçalves

Professor Coordenador da Escola Superior de Tecnologia do Instituto
Politécnico de Castelo Branco

Doutor Armando Lopes Ramalho

Professor Coordenador da Escola Superior de Tecnologia do Instituto
Politécnico de Castelo Branco

Dedicatória

Dedico este trabalho a todos os intervenientes que me ajudaram, que o mesmo fosse possível realizar.

Agradecimentos

A finalização do relatório de projeto, marca o fim da primeira parte do meu percurso acadêmico e com isso quero agradecer a todas pessoas que estiveram envolvidas no meu percurso.

Um grande agradecimento à empresa Dinefer, que incentivou a ingressar no curso e ainda ajudou na realização do projeto final, com a disponibilização dos materiais necessários e alguns conselhos.

Aos meu colegas de curso, pela ajuda mútua na realização de trabalhos e conselhos importantíssimos e claro aos professores pela ajuda e disponibilidade.

Por fim quero agradecer a toda a minha família e amigos e em especial a minha namorada pelo incentivo, apoio e compreensão nos momentos mais difíceis.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro que este relatório de projeto final é o resultado da minha investigação pessoal e independente.

O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto.

Mais declaro que as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

Castelo Branco, 28 de junho de 2026.

O autor

Jose
Dias

Resumo

O trabalho realizado, consiste na criação de um caudalímetro adaptado ao contexto da indústria 4.0, destinado à medição e monitorização do caudal, utilizando um sensor de massa térmico com uma precisão previamente definida. Adicionalmente o sistema integra uma electroválvula responsável pelo controlo do caudal no circuito, permitindo interrompê-lo automaticamente, em situações em que o fluxo medido, está fora dos limites estabelecidos.

Para além da medição e controlo, foi implementado um sistema de armazenamento de dados, numa base de dados e ainda uma interface de visualização(*dashboard*), que permite acompanhar dados em tempo real e analisar dados históricos.

O sistema encontra-se integrado numa estrutura física (caixa), onde contém todos os componentes necessários ao seu funcionamento, dispondo apenas de uma saída de ar e um cabo de alimentação ligado diretamente à rede elétrica, permitindo a deslocação entre diferentes locais, possibilitando a realização de medições em distintos pontos conforme necessário.

Este projeto permitiu integrar vários conceitos adquiridos em diferentes unidades curriculares.

Palavras-chave

Condicionamento de sinal, Interface de visualização, Aquisição de dados, Caudalímetro, Base de dados.

Abstract

The developed work consists of creating a flowmeter adapted to the Industry 4.0 context, intended for the measurement and monitoring of flow rate, using a thermal mass sensor with a previously defined level of accuracy. Additionally, the system integrates a solenoid valve responsible for controlling the flow within the circuit, allowing the automatic interruption of the flow whenever the measured value falls outside the established limits.

In addition to the measurement, a data storage system was implemented in a database and a visualization interface (dashboard), which allows monitoring data in real time and analyzing historical data.

The system is integrated into a physical structure (box), where it contains all the components necessary for its operation, with only an air outlet and a power cable connected directly to the electrical network, allowing movement between different locations, making it possible to carry out measurements at different points as necessary.

This project allowed the integration of several concepts acquired in different curricular units.

Keywords

Signal conditioning, Visualization interface, Data acquisition, Flow meter, Database.

Índice Geral

1. Introdução	1
1.1. Introdução ao projeto	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Estrutura do relatório	3
2. Estudo de Sistemas de Caudal	4
2.1. Caudalímetros mecânicos	4
2.2. Caudalímetros de pressão diferencial	5
2.3. Caudalímetros ultrassônicos	6
Caudalímetros do tempo de transito	6
Caudalímetros Doppler	6
2.4. Caudalímetros eletromagnéticos	7
2.5. Caudalímetro de massa Coriolis	8
2.6. Caudalímetros mássicos térmicos (usado neste projeto)	9
Método do diferencial de temperatura constante	9
Método da potência constante	9
2.7. Análise comparativa entre o sistema desenvolvido e os caudalímetros industriais convencionais	10
3. Descrição dos componentes utilizados	11
3.1. Ligações e cabos utilizados	11
3.2. Fontes de alimentação	12
3.3. Sensor de caudal utilizado	13
3.4. Amplificador de instrumentação	14
3.5. Conversor analógico/digital	15
3.6. Unidade de processamento	16
3.7. Placa relé (SRD-05VDC-SL-C)	16
3.8. Electroválvula direcional 5/2	17
3.9. Display (LCD 7 inch)	17
4. Desenho 3D	18
4.1. Montagem do sistema	19
5. Processamento de sinal e calibração do sistema	20
5.1. Amplificação do sinal	20

5.2. Conversão do sinal-----	20
5.3. Caracterização inicial do sinal-----	22
5.4. Compensação do sinal-----	24
5.4.1 Exemplo prático real:-----	24
5.5. Filtragem do sinal-----	26
5.5.1 Mediana -----	28
5.5.2 Média-móvel-----	29
5.6. Calibração do sistema-----	30
5.7. Validação do sistema de medição -----	33
Incerteza padrão -----	34
Repetibilidade -----	36
6. Sistema inteligente de monitorização e deteção de anomalias -----	37
6.1. Deteção de valores críticos absolutos -----	37
6.2. Deteção estatística de anomalias -----	38
7. Arquitetura de comunicação e armazenamento de dados -----	40
7.1. Comunicação MQTT -----	40
7.2. Base de dados-----	43
8. Programação e desenvolvimento do software -----	45
9. Interface gráfica para monitorização e controlo -----	47
Conclusão -----	51
Bibliografia -----	52
Anexos -----	53
Anexo A - Tabela de calibração do sistema -----	53
Anexo B - Avaliação da precisão, repetibilidade e incerteza padrão do sistema desenvolvido -----	54
Anexo C – Tabela da distribuição normal -----	55

Índice de Figuras

Figura 1 - Esquema de um caudalímetro mecânico.....	4
Figura 2 - Esquema de funcionamento de um caudalímetro de pressão diferencial.	5
Figura 3 - Esquema de medição de um caudalímetro ultrassónico por tempo de trânsito.....	6
Figura 4 - Esquema de funcionamento de um caudalímetro eletromagnético.....	7
Figura 5 - Esquema de funcionamento de um caudalímetro de massa coriolis.....	8
Figura 6 - Esquema de funcionamento de um caudalímetro térmico de massa baseado na transferência de calor	9
Figura 7 - Caudalímetro IoT	10
Figura 8 - Ficha macho (ligação à rede exterior).....	11
Figura 9 - Cabo HDMI (ligação entre o LCD e o Raspberry pi).....	11
Figura 10 - 2 Cabos USB 5V 3A de alimentação (Para alimentação do LCD e Raspberry pi).....	11
Figura 11 - Cabo de alimentação de 3G 1,5.....	11
Figura 12 - Bucim (Passagem do cabo de alimentação ao interior da caixa)	11
Figura 13 - Passa-muros para tubo de 4mm de diâmetro	12
Figura 14 - 24V 1.3A MEANWELL(IRM-30-24ST).....	12
Figura 15 - 5V 6A MEANWELL(IRM-30-5-ST)	12
Figura 16 - Sensor caudal (FS1012-1020-NG)	13
Figura 17 – Gráfico de relação tensão/caudal	13
Figura 18 - Amplificador INA333.....	14
Figura 19 - Conversor ADC (ADS1115).....	15
Figura 20 - Raspberry pi 4b	16
Figura 21 - Placa relé (SRD-05VDC-SL-C).....	16
Figura 22 - Electroválvula 5/2 SMC(SYJ3120-5GS-M3-Q)	17
Figura 23 - LCD	17
Figura 24 - Logótipo Fusion 360.....	18
Figura 25 - Visualização 3D do sistema	18
Figura 26 - Esquema elétrico	19
Figura 27 – Variação temporal da alimentação.....	22
Figura 28 - Análise do sinal em frequência	22
Figura 29 - Análise temporal do sensor	23
Figura 30 - Análise da frequência do sinal do sensor	23
Figura 31 - Compensação do sinal.....	25
Figura 32 - Frequência do sinal após compensação.....	26
Figura 33 - Análise do sinal após filtro RC	27
Figura 34 - Evolução do sinal do sensor ao longo das diferentes etapas de processamento.....	27

Figura 35 - Caudalímetro utilizado na calibração	30
Figura 36 - Curva tensão/caudal.....	31
Figura 37 - Aquisição experimental de dados	33
Figura 38 - Esquema de comunicação MQTT	40
Figura 39 - Logotipo da APP.....	42
Figura 40 – Dashboard da app	42
Figura 41 - Demonstração da monitorização do caudal e alteração do estado do sistema	43
Figura 42 - Logótipo InfluxDB.....	43
Figura 43 - Base de dados influxDB.....	44
Figura 44 - Projeto criado.....	45
Figura 45 - Classes desenvolvidas.....	46
Figura 46 - Interface gráfica	47
Figura 47 - Visualização histórica dos dados	48
Figura 48 - Gráfico tensão vs caudal	48
Figura 49 - Configuração do sistema.....	49
Figura 50 - Demonstração da configuração	49
Figura 51 - Detecção de anomalias	50
Figura 52 - Caudal máximo admitido	50

Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos

HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i>
AC	<i>Alternating Current</i>
DC	<i>Direct Current</i>
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
CMRR	<i>Common Mode Rejection Ratio</i>
I ² C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
PGA	<i>Programmable Gain Amplifier</i>
SCL	<i>Serial Clock Line</i>
SDA	<i>Serial Data Line</i>
MES	<i>Manufacturing Execution System</i>
COM	<i>Common Port</i>
STEP	<i>Standard for the Exchange of Product Data</i>
EPLAN	<i>Electric P8 Design Software</i>

Nomenclatura

P	Pressão	(Pa)
ρ	Densidade do fluido	(kg/m ³)
v	Velocidade do fluido	(m/s)
g	Aceleração gravítica	(m/s ²)
h	Altura relativa ao ponto de referência	(m)
E	Tensão induzida	(V)
k	Constante adimensional	---
B	Densidade de fluxo magnético	(T)
D	Diâmetro interno da tubagem	(m)
Q	Caudal	(L/min)
A	Área da secção da tubagem	(m ²)
RG	Resistência de ganho	(Ω)
μ F	Microfarad	---
k Ω	Quilo-ohm	---
mv	milivolt	---
V	Volt	---

1. Introdução

1.1. Introdução ao projeto

O presente projeto tem como objetivo desenvolver um caudalímetro inteligente portátil, capaz de ser facilmente transportado e utilizado em diferentes locais. Enquadra-se nos princípios da indústria 4.0, que se baseia na digitalização e interligação de sistemas, através da integração do sensor, aquisição de dados em tempo real, comunicação e armazenamento da informação, simultaneamente, aproxima-se da indústria 5.0, que se foca mais no utilizador, na sustentabilidade e flexibilidade, através do sistema portátil, permitindo medições em diferentes pontos e apoiando a tomada de decisão humana.

O sistema desenvolvido encontra-se integrado numa caixa projetada no *software CAD (Fusion360)*, e fabricada numa impressora 3D. A arquitetura do sistema é composta por um *Raspberry pi 4*, que é o cérebro do sistema, responsável pelo tratamento da informação, armazenamento de dados e monitorização em tempo real do caudal. Para alimentar o sistema, utilizaram-se duas fontes de alimentação, uma de 24V (destinada a alimentar a electroválvula) e uma de 5V (para alimentar os restantes componentes), esta configuração permite que o sistema seja portátil necessitando apenas de uma ligação (1 cabo) à rede elétrica de 220V e de uma entrada de ar.

Para aquisição de dados, é utilizado um sensor de caudal, que mede o fluxo de ar e envia o sinal a um conversor ADC, responsável pela conversão do sinal analógico recebido do sensor, num sinal digital.

Adicionalmente, a integração de um relé, permite a comutação e acionamento de uma electroválvula responsável pela interrupção do fluxo de ar, aumentando a segurança no sistema principalmente em situações de operações anómalas.

Desta forma, o projeto apresentado integra conhecimentos adquiridos ao longo de várias unidades curriculares do curso.

O apoio não só do professor orientador, bem como da empresa Dinefer foi essencial nomeadamente no fornecimento dos materiais.

1.2. Objetivos

O objetivo deste trabalho é maximizar a precisão e a repetibilidade do sistema, através da integração dos componentes selecionados, garantindo um desempenho fiável nas condições de funcionamento previstas. Pretende-se ainda assegurar a comunicação com diferentes dispositivos e implementar um sistema de armazenamento de dados, permitindo a monitorização, o registo e a análise das medições de forma eficiente.

Inicialmente foram definidos objetivos intermédios, para uma melhor organização e desenvolvimento do projeto nomeadamente:

Enquadramento e estudo preliminar

- ❖ Análise do sistema a desenvolver

Seleção dos componentes e materiais necessários

- ❖ Análise dos componentes mais apropriados a utilizar no sistema
- ❖ Conceção e desenho do projeto

Definição e desenho da arquitetura do sistema

- ❖ Esquematização e cálculo do circuito de condicionamento de sinal

Implementação do sistema eletrónico

- ❖ Montagem do circuito elétrico
- ❖ Testes e validação do sinal há saída do condicionamento

Programação do sistema (inclui visualização e armazenamento de dados)

- ❖ Desenvolvimento do software de aquisição de dados
- ❖ Comunicação com a base de dados
- ❖ Desenvolvimento de uma interface de visualização (*dashboard*)
- ❖ Registo e organização das medições

Realização do relatório

- ❖ Organização e escrita do relatório
- ❖ Conclusões e trabalho futuro

1.3. Estrutura do relatório

O presente relatório encontra-se organizado em 10 capítulos, de forma a garantir uma estrutura sistematizada e facilitar a compreensão de todo o trabalho desenvolvido ao longo do projeto.

O **primeiro capítulo**, correspondente à introdução, apresenta o enquadramento do projeto no contexto atual, define o objetivo principal e os intermédios, bem como a estrutura geral do presente relatório.

O **segundo capítulo** aborda os diferentes sistemas de medição de caudal atualmente existentes, analisando as suas principais características, diferenças, áreas de aplicação e no fim justificando a solução adotada para o desenvolvimento deste projeto.

O **terceiro capítulo** descreve os componentes e materiais aplicados, apresentando os elementos utilizados na construção e implementação do sistema.

O **quarto capítulo** é dedicado à conceção e ao desenho do sistema, descrevendo a arquitetura física desenvolvida e a organização dos diferentes elementos que o constituem.

O **quinto capítulo** apresenta o estudo matemático com exemplos reais, associado ao circuito de condicionamento de sinal, bem como o processo de calibração implementado no sistema.

O **sexto capítulo** descreve o método matemático com exemplos concretos, desenvolvidos para a deteção de anomalias, explicando os critérios e algoritmos utilizados para a identificação de comportamentos anormais durante o funcionamento do sistema.

O **sétimo capítulo** aborda o processo de comunicação e armazenamento de dados, descrevendo a implementação dos protocolos utilizados e a integração com a base de dados.

O **oitavo capítulo** é dedicado à descrição do software desenvolvido no sistema, incluindo a programação da aquisição de dados, o processamento da informação, a comunicação de dados, a implementação da interface gráfica (dashboard) e o armazenamento dos dados para posterior análise e interpretação.

O **nono capítulo** apresenta a interface gráfica desenvolvida, demonstrando o seu funcionamento e alguns exemplos práticos de visualização e operação do sistema.

No **decimo capítulo** é apresentada as conclusões do projeto, assim como as perspetivas de trabalho futuro.

Nos **anexos** encontram-se as respetivas tabelas de ensaio.

2. Estudo de Sistemas de Caudal

Atualmente, existem diversos tipos de caudalímetros, cada um concebido para diferentes aplicações e adaptado a diferentes tipos de fluidos (líquidos ou gases). A sua escolha depende de vários fatores e necessidades, tais como o nível de precisão pretendido e intervalo do caudal a medir, nunca esquecendo o custo associado.

Estes dispositivos baseiam-se em diferentes princípios de funcionamento, incluindo métodos mecânicos, térmicos, de pressão diferencial, ultrassónicos, eletromagnéticos entre outros.

2.1. Caudalímetros mecânicos

Os caudalímetros mecânicos são dispositivos que medem o caudal de fluido (líquido ou gasoso), através de hélices, turbinas ou rodas de pás, todos estes componentes rodam com a passagem do fluido. À medida que o fluido atravessa o sensor, a energia cinética do escoamento faz rodar as pás do rotor, sendo a velocidade de rotação diretamente proporcional ao caudal. Sensores magnéticos ou óticos detetam essa rotação e convertem-na num sinal elétrico correspondente ao valor de caudal. É demonstrado na figura 1, o respetivo conceito [1].

Normalmente, os caudalímetros de turbina fornecem uma precisão de $\pm 0,5\%$ a $\pm 1,5\%$ da leitura, tornando-os adequados para aplicações em que são essenciais medições precisas [1].

Vantagens:

- ❖ Baixo custo
- ❖ Facilidade de instalação
- ❖ Resposta rápida
- ❖ Elevada precisão [1]

Desvantagens:

- ❖ Desgaste mecânico,
- ❖ Necessidade de manutenção periódica,
- ❖ Sensíveis a turbulências na instalação,
- ❖ Sensibilidade às alterações de viscosidade [1]

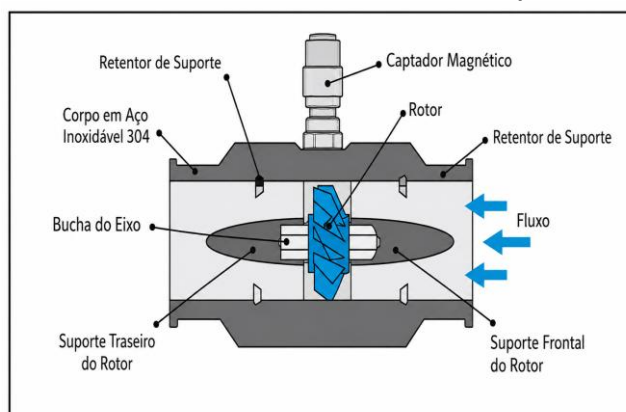


Figura 1- Esquema de um caudalímetro mecânico [1]

Estes tipos de caudalímetros, são amplamente utilizados em aplicações industriais como sistemas de gestão de água, combustíveis, indústria química, alimentar e processos, sistemas HVAC onde é necessária medição precisa de líquidos ou gases. Destacam-se pela sua elevada precisão e simplicidade, sendo uma solução amplamente utilizada em processos industriais [1].

2.2. Caudalímetros de pressão diferencial

Os caudalímetros de pressão diferencial, medem o caudal através da diferença de pressão gerada por uma restrição no interior da tubagem, originando uma variação de pressão entre dois pontos (montante e jusante). Utiliza o princípio de Bernoulli que consiste no aumento da velocidade do fluido provocado pela diminuição da secção de escoamento, resultando na diminuição da pressão. Na seguinte expressão, é visível matematicamente o princípio de *Bernoulli* em que [2]:

$$P_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 = P_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2$$

onde **P** representa a pressão, **ρ** a densidade do fluido, **v** a velocidade, **g** a aceleração da gravidade e **h** a altura relativa a um ponto de referência. Na figura 2, é possível observar como ocorre a diferença de pressão entre P1 e P2 [2].

Vantagens:

- ❖ Fiáveis
- ❖ Robustos
- ❖ Operam em Condições exigentes de alta pressão e temperatura
- ❖ Simplicidade de construção
- ❖ Baixo custo de fabrico [2]

Desvantagens:

- ❖ Perdas de cargas permanentes no sistema, reduzindo a eficiência energética do processo [2]

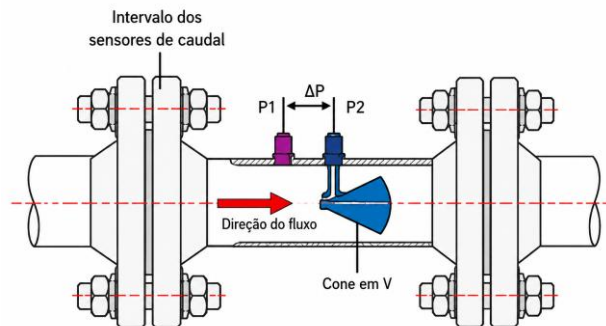


Figura 2 - Esquema de funcionamento de um caudalímetro de pressão diferencial.

Este tipo de tecnologia continua a ser uma das soluções mais utilizadas em processos industriais devido à sua fiabilidade e ampla aplicabilidade [2].

2.3. Caudalímetros ultrassônicos

Os caudalímetros ultrassônicos medem o caudal de um fluido, através da propagação das ondas ultrassônicas no interior de uma tubagem, ou seja, a alteração que o escoamento provoca nessas ondas permite determinar a velocidade do fluido. Estes podem-se classificar em dois tipos [3]:

Caudalímetros do tempo de transito

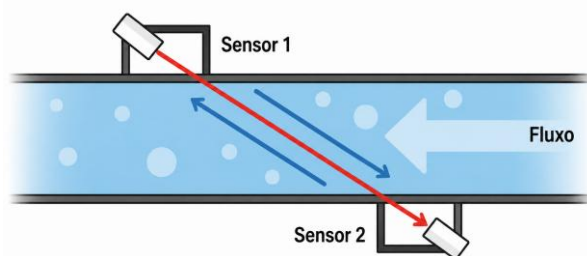
Funcionam medindo a diferença, entre o tempo que um pulso ultrassónico demora a percorrer o fluido a favor do escoamento e o tempo necessário para percorrer o mesmo caminho contra o escoamento. Essa diferença é proporcional à velocidade média do fluido [3]. A figura 3 ilustra este princípio de funcionamento.

Caudalímetros Doppler

Baseiam-se no **Efeito Doppler**, medindo a variação de frequência das ondas refletidas por partículas sólidas ou bolhas presentes no fluido. São indicados para líquidos que contenham impurezas ou partículas em suspensão [3].

Vantagens:

- ❖ Não são intrusivos
- ❖ Baixa perda de carga
- ❖ Boa precisão de medição
- ❖ Possibilidade de instalação externa sem cortar tubagem [3].



Desvantagens:

- ❖ A precisão depende da presença de partículas e da qualidade do sinal
- ❖ Desempenho pode ser afetado pela temperatura devido à velocidade do som variar com a mesma
- ❖ Sensíveis a instalação incorreta [3].

Figura 3 - Esquema de medição de um caudalímetro ultrassônico por tempo de trânsito

Aplicabilidade

São muito utilizados em sistemas de distribuição de água, indústria química, monitorização de fluidos industriais e processos onde se pretende medição não invasiva [3].

Os caudalímetros ultrassônicos constituem uma solução eficiente e fiável para monitorização de caudal em diversos processos industriais.

2.4. Caudalímetros eletromagnéticos

Este tipo de caudalímetros **baseiam-se na lei de faraday da indução eletromagnética**. Quando um fluido condutor passa num campo magnético gera uma diferença de potencial elétrico proporcional à velocidade do escoamento (caudal). São constituídos por um elemento primário (transdutor de caudal), responsável por gerar o campo magnético e pela captação da tensão induzida através de eletrodos, e ainda por um elemento secundário, responsável pelo condicionamento, amplificação e processamento do sinal obtido. A figura 4 e as seguintes equações descrevem esta relação [3].

A tensão induzida pode ser expressa por [3]:

$$E = k \cdot B \cdot D \cdot v$$

onde:

- E = tensão induzida (V)
- k = constante adimensional
- B = densidade do fluxo magnético (T)
- D = diâmetro interno da tubagem (m)
- v = velocidade média do fluido (m/s)

Relacionando a velocidade com o caudal volumétrico, obtêm-se [3]:

$$Q = A \cdot v$$

onde:

- Q = caudal
- A = área da secção da tubagem
- v = velocidade do fluido

Isolando na primeira equação o **v** e na segunda o **A** obtêm-se a expressão geral [3]:

$$Q = \frac{\pi D E}{4 k B}$$

Vantagens:

- ❖ Alta precisão
- ❖ Ausência de partes móveis
- ❖ Possibilidade de medição bidirecional [3].

Desvantagens:

- ❖ Só funcionam com fluidos condutores [3] (ex: água).

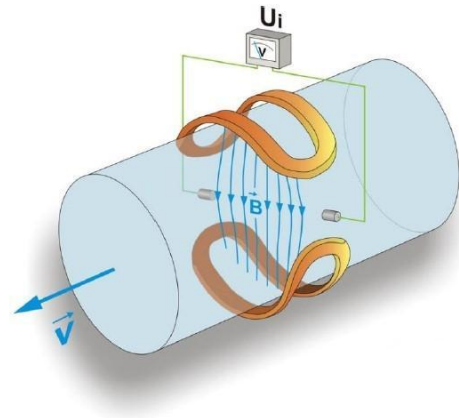


Figura 4 - Esquema de funcionamento de um caudalímetro eletromagnético [3]

2.5 Caudalímetro de massa Coriolis

O princípio de funcionamento do caudalímetro Coriolis baseia-se na vibração controlada de dois tubos internos, gerada através da ação de uma bobina e de um íman, alimentados por corrente alternada. Quando o fluido circula no interior desses tubos, surge a força de Coriolis que provoca um desfasamento na vibração, sendo essa variação diretamente proporcional ao caudal mássico do fluido [4].

A frequência de vibração dos tubos depende da massa total do conjunto, incluindo o fluido em circulação. Assim, alterações na densidade do fluido originam variações nessa frequência, permitindo também determinar esta grandeza [4].

Adicionalmente, através de sensores incorporados no sistema, é possível medir a temperatura do fluido durante o processo, tornando este tipo de tecnologia capaz de fornecer múltiplos parâmetros em simultâneo. Na figura 5, é descrito o funcionamento deste tipo de caudalímetros [4].

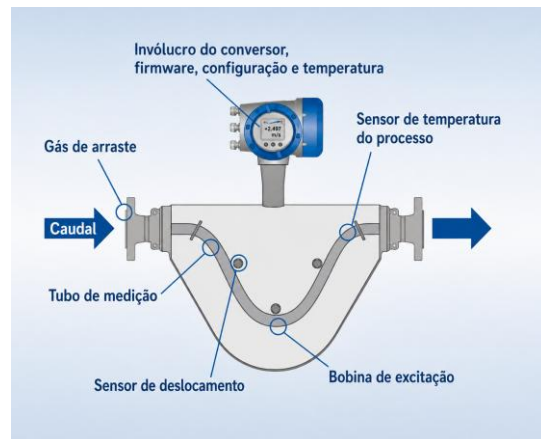


Figura 5 - Esquema de funcionamento de um caudalímetro de massa coriolis

Vantagens:

- ❖ Medição direta do caudal mássico
- ❖ Elevada precisão e boa repetibilidade
- ❖ Permite medir também densidade e temperatura
- ❖ Adequado para diferentes tipos de fluidos
- ❖ Baixa necessidade de manutenção devido à ausência de partes móveis significativas [4]

Desvantagens:

- ❖ Custo elevado comparativamente a outras tecnologias
- ❖ Maior complexidade de instalação e funcionamento
- ❖ Dimensões geralmente superiores [4]

2.6. Caudalímetros mássicos térmicos (usado neste projeto)

Os caudalímetros **mássicos térmicos**, medem o caudal com base na transferência de calor. São constituídos por dois sensores internos, sendo um utilizado como referência (mede a temperatura inicial do fluido) e outro aquecido eletricamente. À medida que o fluido passa pelos sensores, ocorre a remoção do calor, provocando uma variação térmica, que é através da mesma que vai ser calculado o caudal do fluido. A figura 6 ilustra o princípio de funcionamento mencionado. Existem ainda dois métodos de medição [5]:

Método do diferencial de temperatura constante

A potência necessária para manter uma diferença de temperatura constante entre sensores é proporcional ao caudal [5].

Método da potência constante

A alimentação do sensor é mantida de forma constante e a variação de temperatura entre sensores resultante é utilizada para determinar o caudal do fluido [5].

Vantagens:

- ❖ Bons para gases
- ❖ Medem caudal mássico diretamente
- ❖ Elevada precisão em caudais baixos
- ❖ Ausência de partes móveis
- ❖ Baixa necessidade de manutenção [5]

Desvantagens:

- ❖ Sensíveis à temperatura e propriedades do fluido
- ❖ Requerem calibração [5]

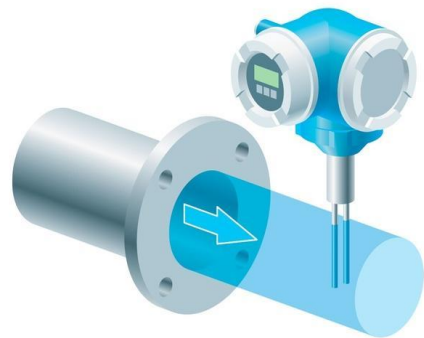


Figura 6 - Esquema de funcionamento de um caudalímetro térmico de massa baseado na transferência de calor

Os caudalímetros de massa térmica são muito aplicados em indústrias onde a medição precisa do caudal de gás é crítica, como o processamento químico, o fabrico de semicondutores e a monitorização ambiental. São também conhecidos pela sua capacidade de funcionar sem peças móveis, o que reduz os requisitos de manutenção e aumenta a durabilidade [5].

2.7. Análise comparativa entre o sistema desenvolvido e os caudalímetros industriais convencionais

A maioria dos sistemas convencionais de medição de caudal disponibiliza apenas um sinal elétrico de saída, analógico ou digital, sendo necessário recorrer a controladores externos para o processamento da informação e posterior comunicação com outros dispositivos do sistema.

O sistema desenvolvido neste projeto integra todas as etapas do processo num único dispositivo. O sensor térmico utilizado realiza a medição do caudal e envia o sinal para o controlador *Raspberry Pi*, responsável pela aquisição e tratamento dos dados através de algoritmos desenvolvidos em *Python*.

Para além do processamento em tempo real, o sistema possui capacidade de tomada de decisão local, permitindo atuar diretamente sobre o processo sem necessidade de um controlador intermédio. Adicionalmente, a solução desenvolvida possibilita a comunicação e integração dos dados em diferentes níveis da arquitetura industrial, desde sistemas de supervisão local até plataformas de gestão e monitorização, incluindo integração ao nível MES (*Manufacturing Execution System*) e ERP (*Enterprise Resource Planning*).

Desta forma, o sistema desenvolvido diferencia-se dos caudalímetros industriais convencionais por combinar medição, processamento, controlo, comunicação e integração industrial numa solução única, flexível e de baixo custo.

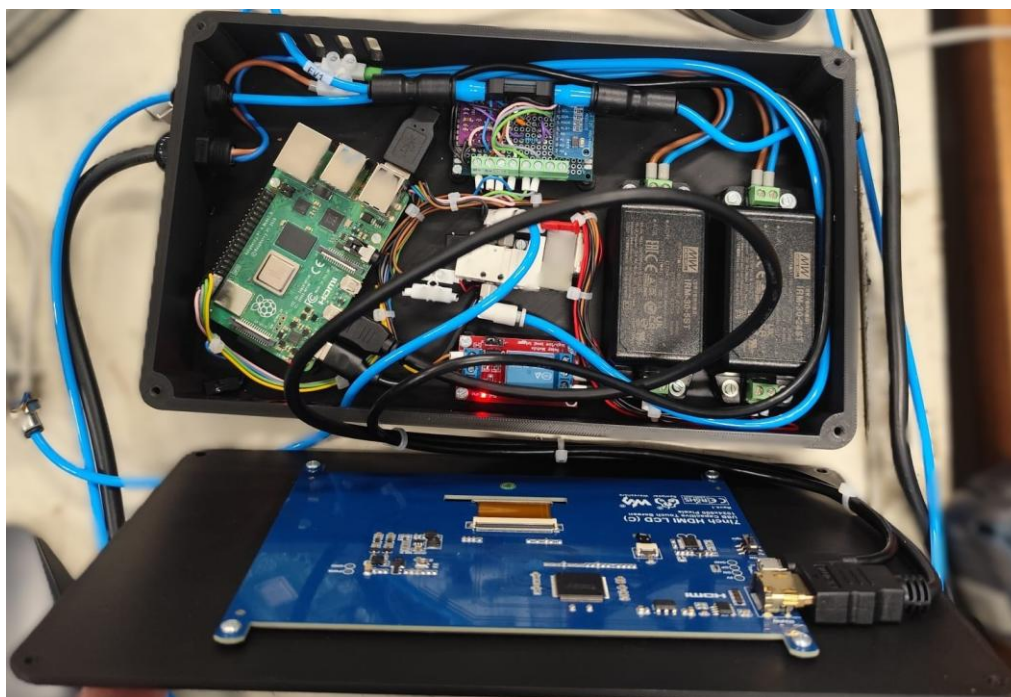


Figura 7 - Caudalímetro IoT

3. Descrição dos componentes utilizados

3.1. Ligações e cabos utilizados



Figura 8 - Ficha macho (ligação à rede exterior)



Figura 9 - Cabo HDMI (ligação entre o LCD e o Raspberry pi)



Figura 10 - 2 Cabos USB 5V 3A de alimentação (Para alimentação do LCD e Raspberry pi)



Figura 11 - Cabo de alimentação de 3G 1,5



Figura 12 - Bucim (Passagem do cabo de alimentação ao interior da caixa)



Figura 13 - Passa-muros para tubo de 4mm de diâmetro

3.2. Fontes de alimentação

Fonte responsável pela alimentação da electroválvula. Converte tensões entre 100 e 240 AC em tensão de 24V DC.



Figura 14 - 24V 1.3A MEANWELL(IRM-30-24ST)

Fonte responsável pela alimentação do sensor e *Raspberry pi*. Converte tensões entre 100 e 240 AC em tensão de 5V DC.



Figura 15 - 5V 6A MEANWELL(IRM-30-5-ST)

3.3. Sensor de caudal utilizado



Figura 16 - Sensor caudal (FS1012-1020-NG) [6]

O sensor escolhido para o projeto foi um **sensor térmico denominado FS1012-1020-NG**, capaz de medir fluidos gasosos não corrosivos e líquidos, com uma gama de medição entre 0 e 2L/min para gases. O sensor opera com uma tensão de alimentação entre 3V e 5V ideal para o projeto [6].

A escolha deste componente baseia-se na sua fácil integração, dimensões reduzidas e baixo custo. Além disso, fornece um sinal analógico que requer condicionamento, permite desenvolver um projeto mais complexo e robusto, alinhado com o objetivo inicial.

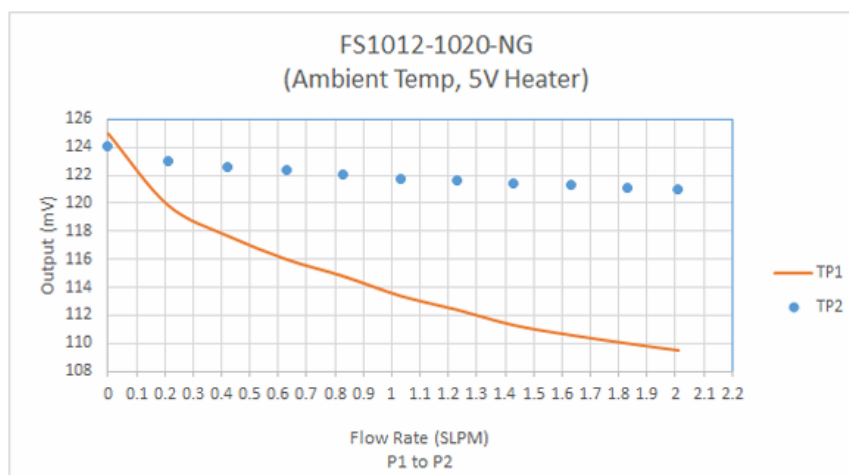


Figura 17 – Gráfico de relação tensão/caudal

A figura 17 demonstra, a relação entre o sinal analógico de saída e o caudal. Verifica-se que, para 0L/min, o sinal lido é de 125mV e quando aumenta para 2L/min o valor diminui para 109mV [6].

Embora o *datasheet* do fabricante demonstre estes valores, verificou-se em condições experimentais reais, os valores obtidos diferem dos especificados, estas diferenças devem-se às condições de operação distintas, como variações de temperatura, pressão entre outras. Assim, foi necessário a realização da calibração e obtenção da respetiva curva ajustada ao sistema desenvolvido.

3.4. Amplificador de instrumentação

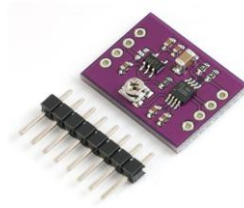


Figura 18 - Amplificador INA333

Devido à reduzida amplitude do sinal analógico proveniente do sensor, na ordem dos milivolts, foi incorporado no sistema um amplificador de **instrumentação INA333**, responsável pela amplificação do sinal antes da etapa de aquisição de dados. Este componente permite obter ganhos até 1000 vezes, tornando-se adequado para aplicações que exigem elevada precisão na leitura de sinais analógicos de baixa amplitude [7].

O INA333 destaca-se ainda pelas suas características técnicas, nomeadamente o baixo consumo energético, elevada estabilidade operacional e elevada capacidade de rejeição ao ruído elétrico, sendo particularmente indicado para sistemas de instrumentação e aquisição de dados industriais. O ganho do amplificador pode ser ajustado externamente através da ligação de uma resistência entre os terminais dedicados, de acordo com a expressão [7]:

$$G = 1 + \frac{100 \text{ k}\Omega}{R_G}$$

onde R_G representa a resistência externa de ajuste do ganho [7].

Em termos de desempenho, o dispositivo suporta ganhos desde **1 Volt/Volt até aproximadamente 1000 Volts/Volt**, tornando possível adaptar o circuito a diferentes níveis de sinal provenientes do sensor utilizado. Outra característica relevante é o elevado valor de **CMRR (Common Mode Rejection Ratio)**, superior a **100 dB**, o que permite rejeitar interferências comuns presentes nas linhas de alimentação ou nos cabos de medição, aumentando significativamente a qualidade do sinal adquirido [7].

3.5. Conversor analógico/digital

Para a conversão analógico-digital do sistema foi utilizado o **módulo ADS1115**, responsável por converter sinais analógicos de tensão em valores digitais. Com uma resolução de **16 bits**, correspondendo a um intervalo de medição entre **0 e 65535 níveis discretos** [8].

Após a conversão, os dados são transmitidos para a Raspberry Pi através do protocolo de comunicação **I²C (Inter-Integrated Circuit)**, utilizando os pinos **SDA (Serial Data)** e **SCL (Serial Clock)** presentes nos pinos GPIO [9].

Uma das principais características deste conversor é a presença de um **amplificador de ganho programável interno (PGA – Programmable Gain Amplifier)**, que permite ajustar por software a gama de tensão de entrada, aumentando a sensibilidade da medição em função do sinal a adquirir. O módulo suporta diferentes configurações de ganho, nomeadamente [8]:

- **2/3x** → intervalo de ± 6.144 V
- **1x** → intervalo de ± 4.096 V
- **2x** → intervalo de ± 2.048 V
- **4x** → intervalo de ± 1.024 V
- **8x** → intervalo de ± 0.512 V
- **16x** → intervalo de ± 0.256 V

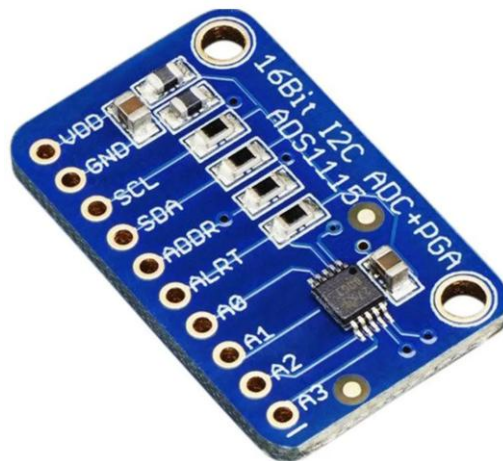


Figura 19 - Conversor ADC (ADS1115)

3.6. Unidade de processamento

O *Raspberry pi* é um minicomputador, que permite tornar o sistema autónomo e inteligente. Este dispositivo é responsável por adquirir os dados do sensor, processá-los e enviá-los para uma base de dados. Além disso possibilita a criação de uma interface gráfica e ainda visualização da informação através de um *Display LCD*. Funciona com uma tensão de alimentação de 5V e requer uma corrente de 3A, possui ainda de várias interfaces de comunicação, como portas USB, Bluetooth e wi-fi. É amplamente utilizado em áreas como automação industrial, sistemas IoT, robótica e aplicações de *edge computing* [9].

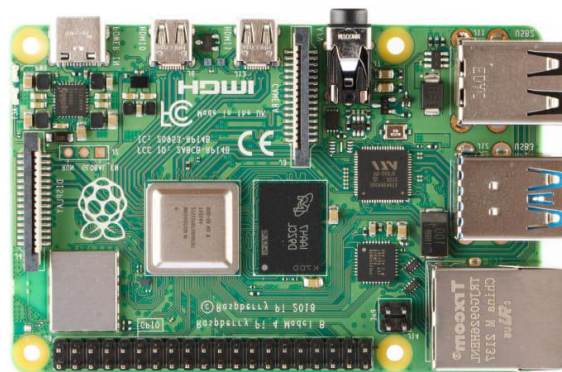


Figura 20 - Raspberry pi 4b

3.7. Placa relé (SRD-05VDC-SL-C)

Para o controlo da electroválvula foi adicionado uma placa relé, que permite que a tensão de 3.3V disponibilizada pelos pinos GPIO do *Raspberry pi*, ative o circuito de comando. O acionamento do relé permite comutar a tensão de 24 V presente no terminal comum (COM) para o terminal normalmente aberto (NO), possibilitando a alimentação elétrica da electroválvula.



Figura 21 - Placa relé (SRD-05VDC-SL-C)

3.8. Electroválvula direcional 5/2

A electroválvula é um elemento essencial para a segurança do sistema, permitindo o corte da alimentação de ar, sempre que os valores excedam os limites predefinidos.

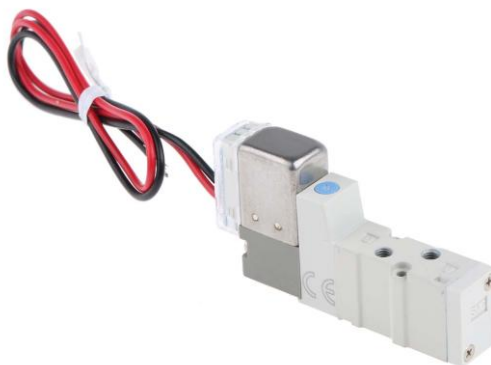


Figura 22 - Electroválvula 5/2 SMC(SYJ3120-5GS-M3-Q)

3.9. Display (LCD 7 inch)

O *display LCD* de 7 polegadas, é responsável pela visualização de todos os dados do sistema, permitindo a monitorização em tempo real e ainda pesquisar dados históricos.

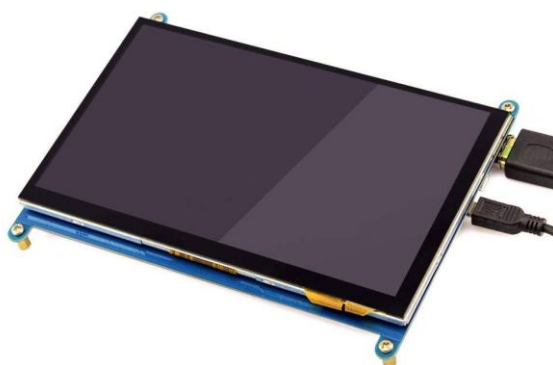


Figura 23 - LCD

4. Desenho 3D

O projeto iniciou-se com o desenho do sistema no **software Autodesk Fusion 360**, que permitiu a visualização tridimensional do projeto e de todos os componentes necessários à sua implementação. Estes foram obtidos em modelos tridimensionais, exportados em formato **STEP** e posteriormente importados para o ambiente **CAD**, possibilitando a integração e montagem virtual de todo o sistema. A utilização desta ferramenta CAD possibilitou a criação de um modelo virtual detalhado do sistema antes da sua construção física, permitindo verificar o correto posicionamento dos componentes, analisar o espaço disponível para montagem e identificar antecipadamente possíveis incompatibilidades mecânicas entre as diferentes partes do sistema.



Figura 24 - Logótipo Fusion 360

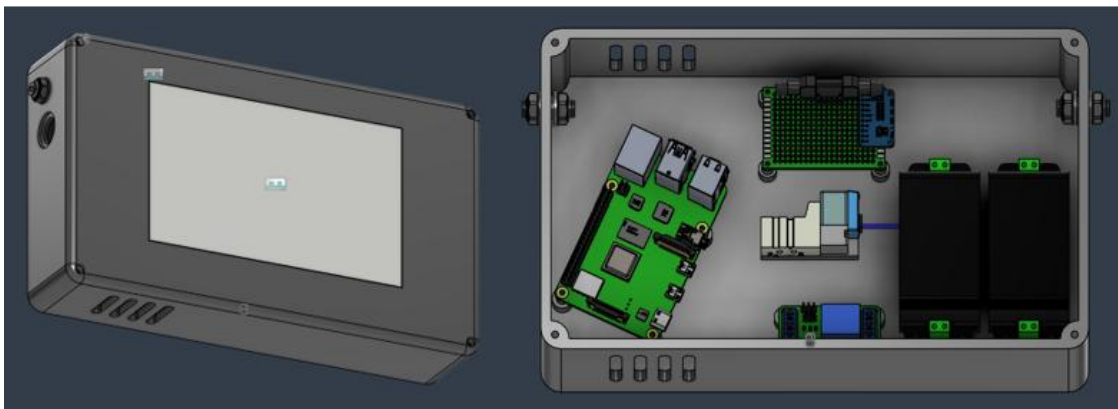


Figura 25 - Visualização 3D do sistema

4.1. Montagem do sistema

Após a fase de modelação 3D, procedeu-se à **montagem física do sistema**, integrando todos os componentes mecânicos, eletrônicos e de aquisição de sinal. Nesta etapa, foi dada especial atenção ao correto alinhamento dos sensores, à fixação dos componentes e à organização das ligações elétricas, de acordo com um esquema elétrico previamente definido no **software EPLAN Electric P8**, muito usado na indústria, para o desenvolvimento e documentação de sistemas elétricos.

Este software permite a criação de esquemas elétricos de elevada precisão, integrando funcionalidades avançadas, como gerar automaticamente referências cruzadas, numeração automática de dispositivos, listas de materiais, documentação técnica e verificação automática de erros no projeto.

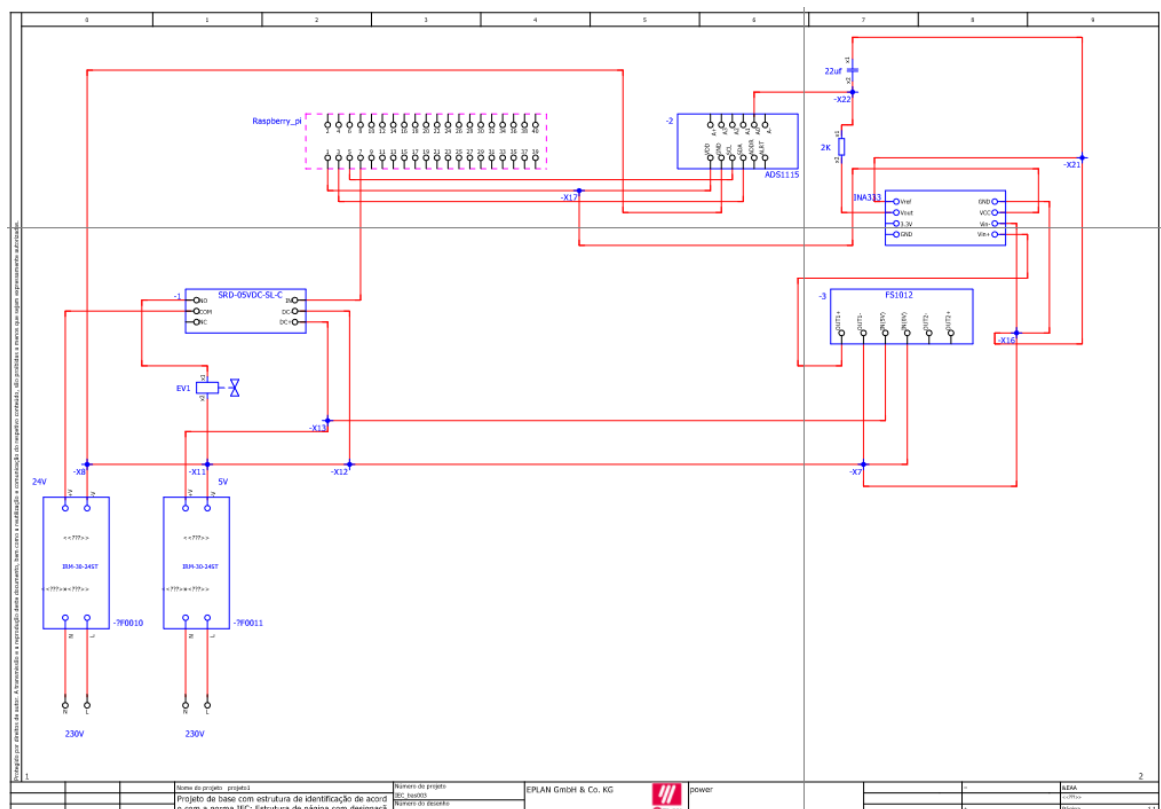


Figura 26 - Esquema elétrico

5. Processamento de sinal e calibração do sistema

Com a montagem física concluída, iniciou-se a fase de processamento e análise do sinal proveniente do sensor. Nesta etapa foram realizados testes para identificar interferências e ruído elétrico, analisando o sinal no domínio da frequência, avaliar a estabilidade temporal das medições e implementar técnicas de filtragem com o objetivo de melhorar a qualidade da aquisição, antes da fase de calibração.

5.1. Amplificação do sinal

A saída do sinal proveniente do sensor apresentou, uma amplitude bastante reduzida, na ordem dos **125mV sem fluxo**, sendo necessário utilizar um amplificador, de forma a aumentar a amplitude do sinal e facilitar o seu posterior tratamento. Com a implementação do mesmo foi possível aumentar o sinal de **0,122V para 0,220V**, o que corresponde a um ganho de aproximadamente:

$$G = \frac{0,220}{0,125} \approx 1,8 \text{ vezes}$$

Este aumento permitiu melhorar a leitura do sinal e tornar o processamento mais eficiente. O objetivo seria obter um ganho próximo de **12**, permitindo elevar o sinal para valores perto de **1,5 V**, aproveitando melhor a gama de leitura do conversor analógico-digital. No entanto, devido a limitações verificadas no circuito, possivelmente, relacionadas com algum problema no amplificador, não foi possível atingir o valor de amplificação inicialmente previsto.

5.2. Conversão do sinal

Após a amplificação do sinal analógico, o mesmo teve de ser convertido num sinal digital, para a entrada dos pinos GPIO do *Raspberry pi*. Para essa função foi utilizado ADS1115 com uma resolução de 16 bits, que corresponde $2^{16} = 65536$ níveis de quantificação. Configurado em modo *single-ended* a conversão útil ocorre entre 0 até 32767 níveis digitais. Ao aplicar um ganho interno de 16 o intervalo fica limitado entre 0v e 0,256 V, sendo esta amplitude distribuída pelos 32767 níveis disponíveis.

Cada nível varia:

$$\frac{0,256}{32767} = 7,8125\mu V$$

Esta configuração permitiu aumentar a resolução da conversão para aproximadamente 7.81 μV por bit, tornando possível medir pequenas variações de tensão do sensor com maior sensibilidade.

5.2.1 Exemplo da relação entre a tensão aplicada e o valor convertido

Os valores extremos de tensão medidos no sinal adquirido foram os seguintes:

$$\begin{aligned} V_{max} &= 0,219300V \\ V_{min} &= 0,199150V \end{aligned}$$

Amplitude total:

$$\Delta V = 0,020150V = \mathbf{20,15mV}$$

Valor digital equivalente à tensão mínima:

$$V_{min} = 0,199150V$$

$$ADC = \frac{0,199150 \times 32768}{0,256}$$

$$\mathbf{ADC \approx 25491}$$

Valor digital equivalente à tensão máxima:

$$V_{max} = 0,219300V$$

$$ADC = \frac{0,219300 \times 32768}{0,256}$$

$$\mathbf{ADC \approx 28070}$$

Dos 32767 níveis, foram utilizados $28070 - 25491 = \mathbf{2579 \text{ níveis}}$

A percentagem da gama utilizada foi de:

$$\frac{2579}{32768} \times 100 = \mathbf{7,87\%}$$

Verifica-se que, apesar da utilização do ganho máximo disponível, o sinal ocupa apenas cerca de 8% da percentagem da gama útil do conversor, evidenciando a reduzida amplitude elétrica disponibilizada pelo sensor FS1012.

5.3. Caracterização inicial do sinal

O estudo do sinal, começou com **identificação de ruído provocado pela alimentação**, levando à criação de alguns gráficos.

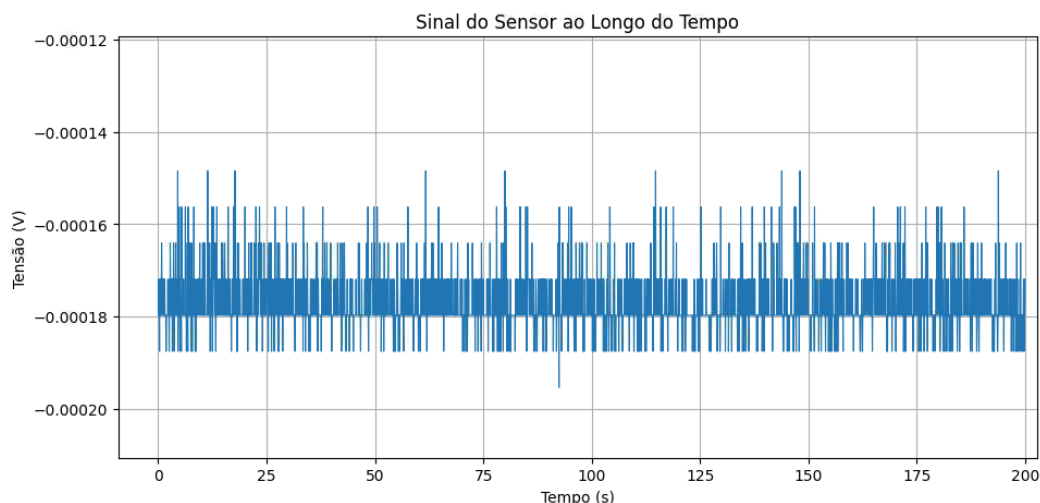


Figura 27 – Variação temporal da alimentação

Observa-se na figura 27 a presença de algum ruído no sinal, no entanto este mantém um comportamento relativamente constante, sem variações bruscas ao longo do tempo. Verifica-se ainda que a amplitude dessas oscilações é reduzida, indicando que, apesar da existência de pequenas perturbações, o sinal apresenta um comportamento globalmente estável.

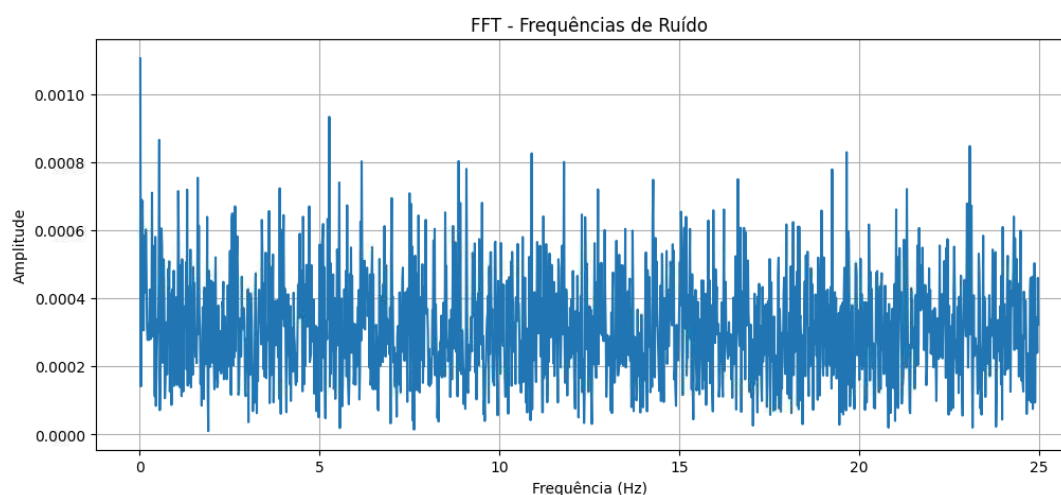


Figura 28 - Análise do sinal em frequência

A análise em frequência do sinal, obtida através da Transformada de Fourier (FFT), permitiu verificar que não existem componentes dominantes significativas ao longo do espectro analisado. As amplitudes encontram-se distribuídas de forma relativamente uniforme, indicando a ausência de interferências periódicas relevantes no sistema.

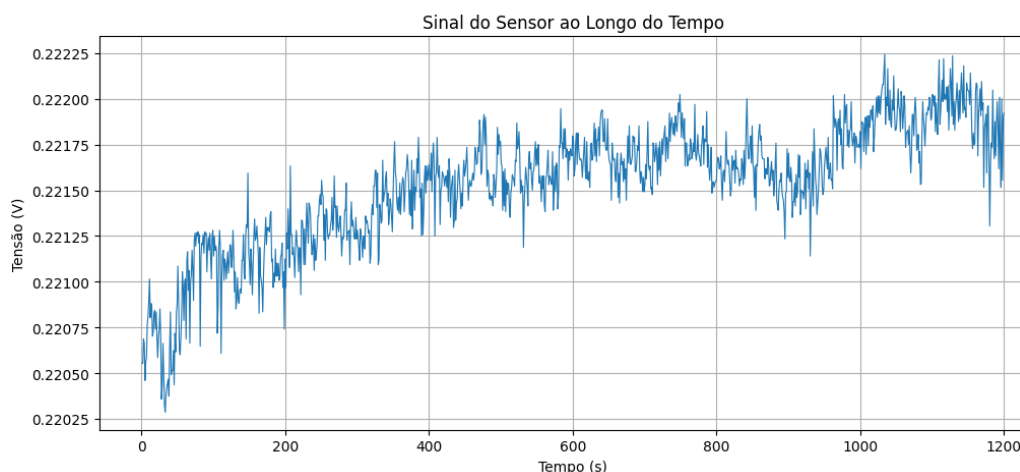


Figura 29 - Análise temporal do sensor

A figura 29 representa o comportamento do sinal disponibilizado pelo sensor ao longo de 20 minutos, permitiu observar a presença de pequenas oscilações associadas ao ruído principalmente do sensor. No entanto, ao contrário dos testes anteriores, verifica-se uma tendência gradual de aumento do valor do sinal à medida que o tempo avança, evidenciando a existência de deriva.

Esta variação progressiva indica que o sinal, não se mantém completamente estável durante aquisições prolongadas, podendo este comportamento estar relacionado com características internas do próprio sensor. Desta forma, tornou-se necessária a implementação de métodos de compensação, capazes de corrigir a deriva e melhorar a estabilidade global do sistema.

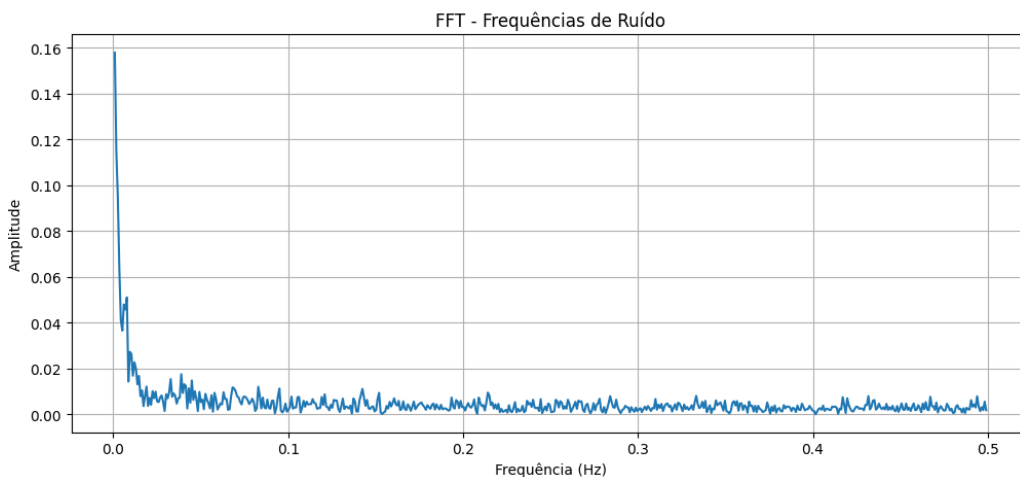


Figura 30 - Análise da frequência do sinal do sensor

Na figura 30 visualiza-se no início do espectro um pico acentuado, relacionado com o processo de arranque e estabilização inicial do sistema, sendo um comportamento esperado nos primeiros instantes de aquisição. Após essa fase, o sinal apresenta amplitudes reduzidas e não se observam frequências dominantes relevantes, indicando um funcionamento globalmente estável.

5.4. Compensação do sinal

Para compensar a deriva observada no sinal e após vários testes realizados com diferentes métodos, chegou-se à conclusão de que o método que apresentou melhores resultados foi a aplicação de uma compensação, baseada num modelo exponencial dependente do tempo, permitindo corrigir de forma gradual a variação observada durante a aquisição.

$$D(t) = A(1 - e^{-kt})$$

Onde:

- **D** representa o valor estimado da deriva em função do tempo;
- **A** representa o valor máximo esperado da deriva ao longo do ensaio;
- **k** representa a constante de crescimento, responsável por controlar a rapidez com que a deriva evolui;
- **t** corresponde ao tempo decorrido desde o início da aquisição.

Após calcular o valor da deriva, a correção do sinal foi realizada através da seguinte expressão:

$$V_{\text{corrigido}} = V - D(t)$$

em que:

- **V** corresponde ao valor instantâneo do sinal medido;
- **V_{corrigido}** representa o valor final após compensação.

5.4.1 Exemplo prático real:

Para uma leitura de 0,2220v e para um instante $t=1000s$. Assumindo os parâmetros experimentais determinados durante a análise temporal do sinal:

$$\mathbf{A = 0,0020}$$

O **parâmetro (A)** representa a amplitude máxima da deriva térmica, ou seja, o valor limite para o qual a variação do sinal tende a estabilizar após um determinado período de funcionamento contínuo.

$$\mathbf{K = 0,0020}$$

Por outro lado, o **parâmetro (k)** representa a constante de crescimento da deriva, controlando a velocidade com que o fenómeno evolui ao longo do tempo. Valores mais elevados de **(k)** correspondem a uma estabilização mais rápida do sensor, enquanto valores mais baixos traduzem uma evolução mais gradual da deriva térmica.

A deriva térmica é modelada pela expressão:

$$D(t) = A(1 - e^{-kt})$$

Ao substituir pelos valores exemplificados, obtém-se o valor da deriva:

$$D(1000) = 0,0012 * (1 - e^{-0,0009*1000})$$

$$D(1000) = \mathbf{0,000712v}$$

Aplicando a correção ao sinal instantâneo medido:

$$V_{\text{corrigido}} = V - D(t)$$

$$V_{\text{corrigido}} = 0,2220 - 0,000712$$

$$V_{\text{corrigido}} = \mathbf{0,221288v}$$

Verifica-se, assim, que após a compensação da deriva térmica o valor final do sinal é corrigido, reduzindo o efeito do aquecimento gradual do sensor e melhorando a deriva associada ao longo do tempo. O funcionamento deste método baseia-se no facto de a função exponencial apresentar um crescimento mais acentuado no início e tornar-se progressivamente mais estável com o passar do tempo. Desta forma, foi possível reduzir a influência da deriva e melhorar a estabilidade das medições realizadas, como se pode observar no gráfico da figura 31.

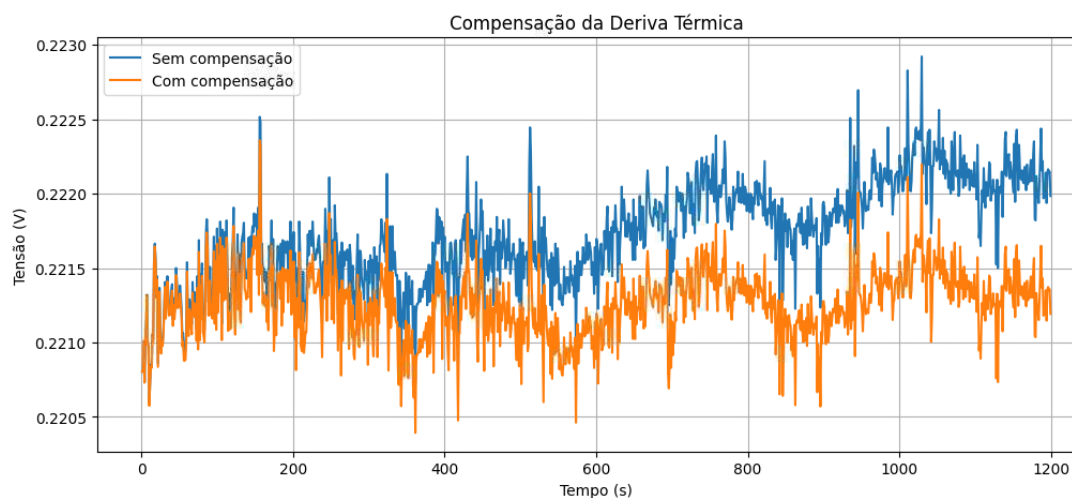


Figura 31 - Compensação do sinal

5.5. Filtragem do sinal

A análise espectral do sinal através da Transformada de Fourier (FFT), permitiu avaliar a presença de ruído no sistema global de aquisição. Verificou-se um pico inicial em 0 Hz associado à fase de inicialização e estabilização do sensor, não correspondendo a ruído permanente do sistema. Após essa fase, observou-se que o sinal apresenta baixos níveis de ruído, sem interferências significativas em frequências mais elevadas, demonstrando assim uma boa estabilidade do circuito de condicionamento e aquisição de dados.

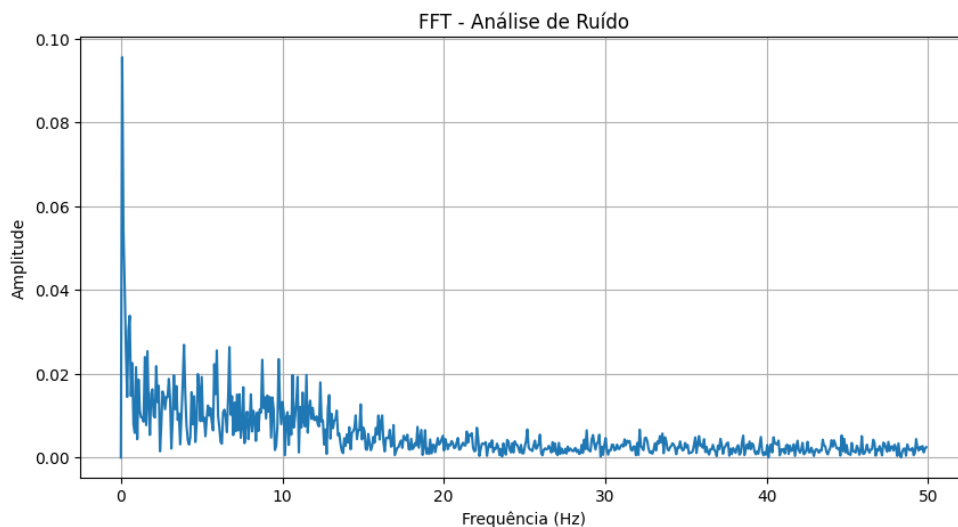


Figura 32 - Frequência do sinal após compensação

Para melhorar o condicionamento e a estabilização do sistema de aquisição, foi implementado um filtro RC analógico constituído por uma resistência de **2 kΩ** e um condensador de **22 μF**, permitindo uma atenuação de ruídos e pequenas oscilações presentes no sinal do sensor. A frequência de corte do filtro pode ser determinada através da seguinte expressão:

$$f_c = \frac{1}{2 * \pi * R * C}$$

$$f_{c1} = \frac{1}{2 * \pi * 2000 * 22 * 10^{-6}}$$

$$f_{c1} \approx 3,62\text{Hz}$$

Este valor indica que frequências superiores a 3.62 Hz serão progressivamente atenuadas, permitindo reduzir componentes de ruído de maior frequência e melhorar a estabilidade do sinal adquirido.

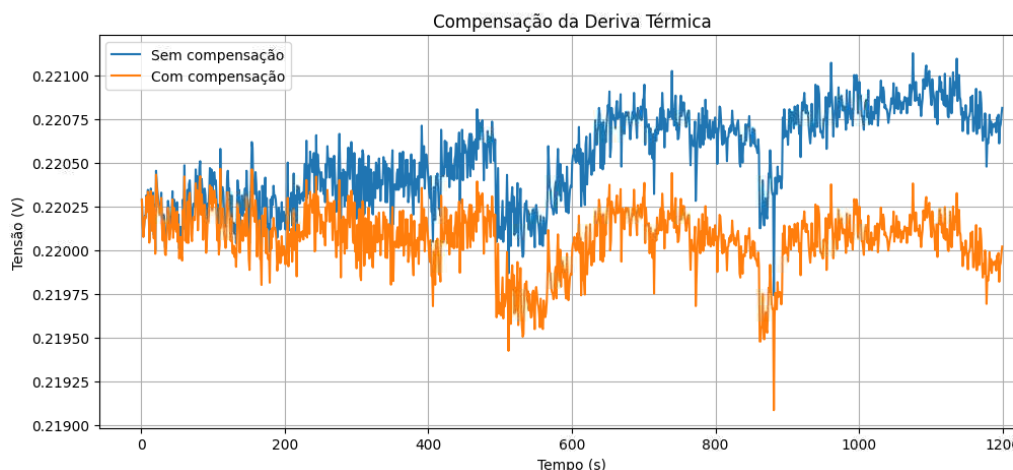


Figura 33 - Análise do sinal após filtro RC

Comparando o gráfico da figura 33 com a figura 31, pode-se observar uma redução significativa dos picos e das oscilações presentes no sinal. Esta melhoria demonstra que a implementação do filtro RC, em conjunto com o método de compensação da deriva térmica, contribuiu para uma maior estabilidade do sistema de aquisição. A atenuação das variações instantâneas permitiu obter um sinal mais consistente, reduzindo a influência de ruídos elétricos e pequenas perturbações no circuito de medição.

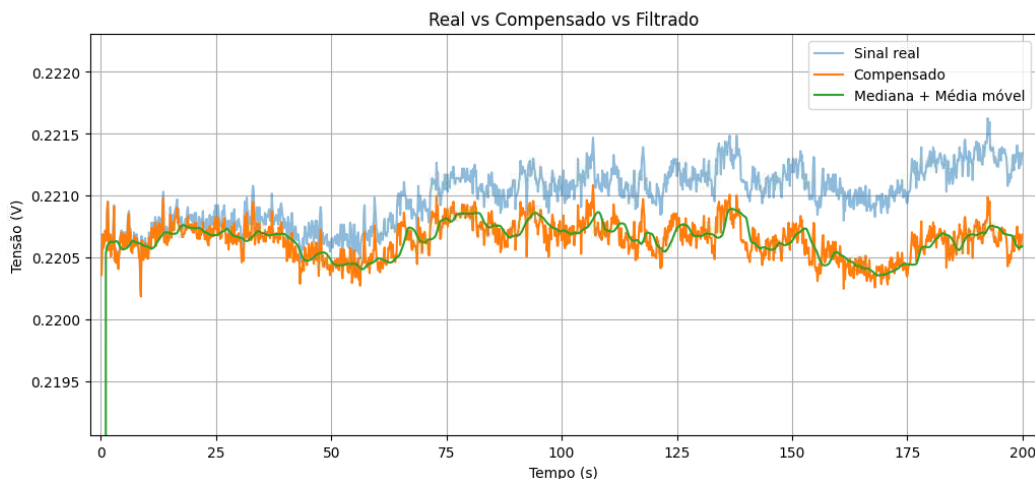


Figura 34 - Evolução do sinal do sensor ao longo das diferentes etapas de processamento

Com a aplicação dos filtros de **mediana com um $N = 20$** e **média móvel com um $N = 7$** , visualiza-se na figura 34, a redução significativa das oscilações e dos picos presentes no sinal original. Comparando as três curvas, verifica-se que o sinal filtrado a verde apresenta um comportamento mais estável e suave, mantendo a tendência do sinal compensado, mas com menor influência de ruídos instantâneos. A combinação destes dois métodos de filtragem permitiu melhorar a qualidade do sinal adquirido, reduzindo variações abruptas e tornando a leitura mais consistente para posterior análise e processamento.

5.5.1 Mediana

O **filtro da mediana** foi aplicado com o objetivo de reduzir ruídos impulsivos e eliminar valores anómalos presentes no sinal adquirido. A principal vantagem deste filtro é a sua capacidade de remover picos instantâneos e perturbações abruptas sem alterar significativamente a tendência real do sinal. Desta forma, foi possível melhorar a qualidade da medição, tornando o sinal mais estável e adequado para o processamento posterior.

Para uma janela de tamanho N :

$$y[n] = \text{mediana}(x[n - k], \dots, x[n], \dots, x[n + k])$$

onde:

- $x[n]$ = sinal original
- $y[n]$ = sinal filtrado
- $N = 2k + 1$ = número de amostras da janela

Exemplo real

Considerando $N = 5$ leituras consecutivas de tensão adquiridas pelo sistema:

[0,2081 0,2082 **0,2098** 0,2082 0,2083]

Neste conjunto verifica-se a presença de um valor anómalo instantâneo (**0,2098 V**)

Os valores são ordenados dentro da lista:

[0,2081 0,2082 **0,2082** 0,2083 0,2098]

É seleccionado o valor central da lista, eliminando os restantes

$$y[n] = 0,2082 \text{ V}$$

Desta forma, o valor anómalo é removido, permitindo reduzir perturbações impulsivas sem alterar significativamente a tendência real do sinal.

5.5.2 Média-móvel

O **filtro de média móvel** foi implementado com o objetivo de suavizar o sinal e reduzir pequenas oscilações, resultantes do ruído presente na aquisição de dados. Este método consiste em calcular a média de um conjunto de amostras consecutivas dentro de uma janela predefinida, substituindo cada valor pelo valor médio obtido. Ao contrário do filtro de mediana, que atua principalmente na eliminação de picos abruptos, a média móvel permite reduzir variações rápidas e tornar o sinal mais contínuo e estável ao longo do tempo. A sua aplicação contribuiu para melhorar a qualidade final do sinal, facilitando a análise e interpretação dos dados obtidos.

Equação matemática:

$$y[n] = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x[n-i]$$

onde:

- $x[n]$ = sinal original
- $y[n]$ = sinal filtrado
- N = número de amostras consideradas na janela

Exemplo real

Após aplicação do filtro de mediana, consideram-se os últimos três valores filtrados:

$$[0,2082 \ 0,2083 \ 0,2084]$$

A média móvel é calculada através da expressão:

$$y[n] = \frac{x_0 + x_1 + x_2}{3}$$

Substituindo os valores:

$$y[n] = \frac{0,2082 + 0,2083 + 0,2084}{3}$$

$$y[n] = \mathbf{0,2083 \ V}$$

O resultado obtido corresponde a um sinal mais estável, reduzindo pequenas oscilações residuais e melhorando a qualidade do valor enviado para a etapa seguinte de processamento.

5.6. Calibração do sistema

A calibração do sistema foi uma etapa fundamental no desenvolvimento do processo de medição, permitindo estabelecer a relação entre o sinal elétrico fornecido pelo sensor e o valor real do caudal. Através da aquisição experimental de diferentes pontos de funcionamento, foi possível determinar a correspondência entre a tensão medida e o respetivo caudal, criando assim uma curva de calibração.



Figura 35 - Caudalímetro utilizado na calibração

A utilização de um caudalímetro SMC(PF2M710-C6-E), com uma **precisão de $\pm 3\% F.S. + 1$ dígito** e uma **repetibilidade de $\pm 1\% F.S. + 1$ dígito**, permitiu efetuar a calibração recorrendo a valores reais de caudal, servindo como referência para estabelecer a relação entre a tensão de saída do sensor e o valor real medido no circuito [10].

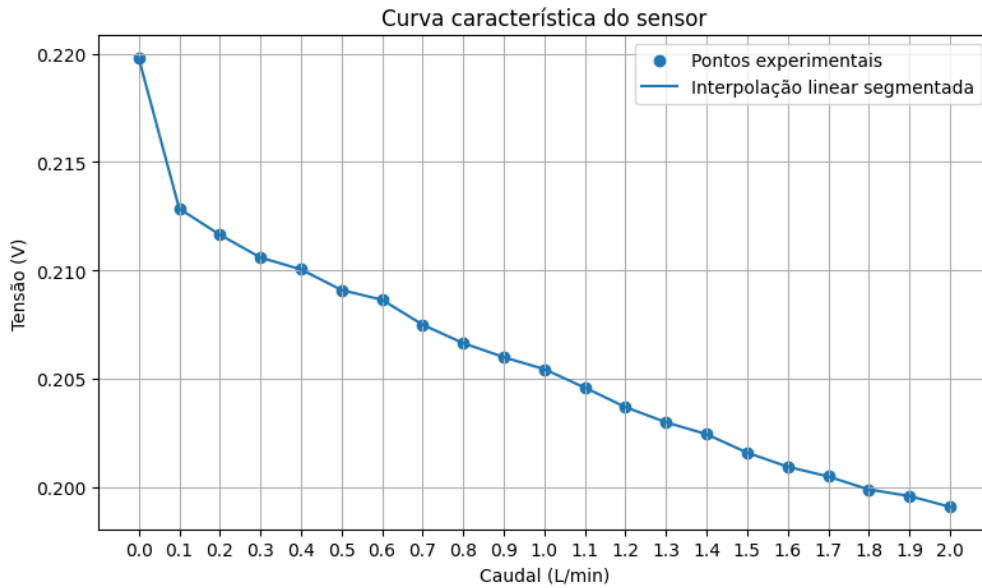


Figura 36 - Curva tensão/caudal

O gráfico demonstra a relação não linear entre a tensão medida e o caudal, observa-se que com aumento do caudal, a tensão diminui, existe ainda uma perceptível sensibilidade para caudais até 0.1L/min, onde a curva está mais acentuada e com o aumento do caudal vai diminuindo a inclinação. Para a criação da curva, recolheu-se um conjunto de médias de vários pontos de tensão de 0.1L/min em 0.1L/min.

Média:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Para a criação da curva de calibração recorreu-se ao método de interpolação linear por segmentos. Neste método, em vez de ajustar uma única equação global a todos os pontos experimentais, foi realizada uma interpolação individual entre cada par de pontos consecutivos. Desta forma, a curva obtida coincide exatamente com todos os pontos de calibração recolhidos, permitindo preservar o comportamento não linear do sensor ao longo da gama de medição.

A seguinte equação demonstra o método utilizado para realizar a interpolação linear entre cada segmento da curva de calibração:

$$q = q_1 + \frac{(v - v_1)(q_2 - q_1)}{(v_2 - v_1)}$$

Onde:

- v tensão medida naquele instante
- v_1, v_2 dois pontos consecutivos da tabela de calibração
- q_1, q_2 caudais correspondentes a esses dois pontos
- q caudal calculado

Exemplo prático

Para dois pontos escolhidos:

$$v_1 = 0,205450 \text{ V} \rightarrow q_1 = 1,0 \text{ L/min}$$

$$v_2 = 0,206000 \text{ V} \rightarrow q_2 = 0,9 \text{ L/min}$$

E para uma tensão lida instantânea $v = 0.205700 \text{ V}$

Aplicando a equação:

$$q = q_1 + \frac{(v - v_1)(q_2 - q_1)}{(v_2 - v_1)}$$

Substituindo valores:

$$q = 1,0 + \frac{(0,205700 - 0,205450)(0,9 - 1,0)}{(0,206000 - 0,205450)}$$

$$\mathbf{q = 0,9545 \text{ L/min}}$$

Conclui-se que, para uma tensão medida instantaneamente de 0.205700 V, o caudal correspondente calculado pelo método de interpolação é de aproximadamente 0.9545 L/min.

5.7. Validação do sistema de medição

Após a calibração do sistema, foram avaliados parâmetros de desempenho como a precisão, a repetibilidade e a incerteza de medição, com o objetivo de validar a fiabilidade do sistema desenvolvido.

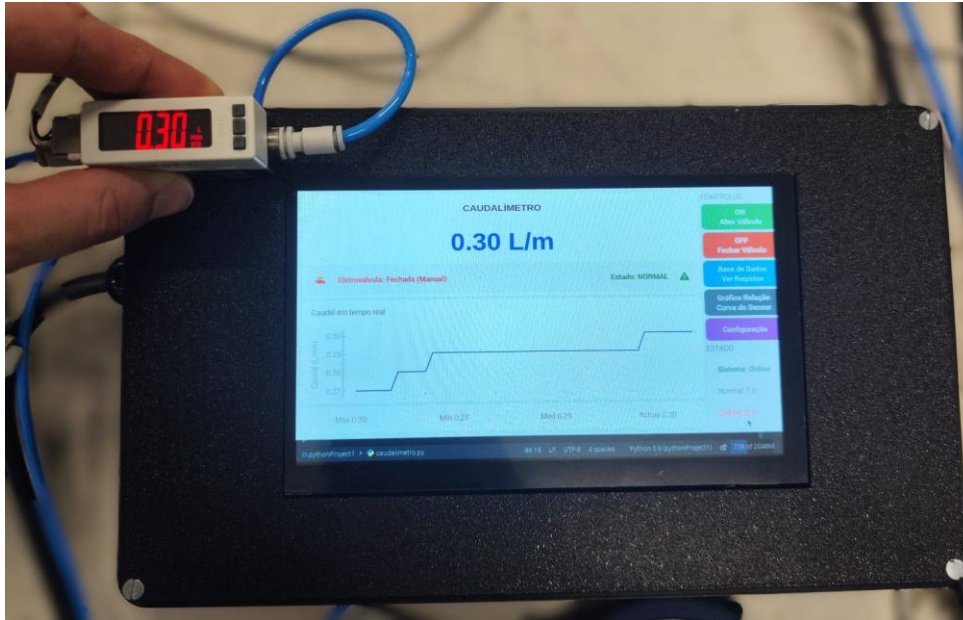


Figura 37 - Aquisição experimental de dados

Precisão do Sistema

A precisão corresponde à capacidade de o sistema apresentar resultados consistentes quando são realizadas várias medições nas mesmas condições experimentais. Quanto menor for a variação entre medições consecutivas, maior será a precisão do sistema. Através das seguintes equações, foram calculadas as precisões em cada 1 dos 21 pontos recolhidos e no fim a precisão global do sistema.

Erro absoluto é dado por:

$$\Delta x = |x - x_{ref}|$$

Erro relativo percentual por:

$$Erro(\%) = \frac{|x - x_{ref}|}{x_{ref}} \times 100$$

Precisão:

$$Precisão = 100 - Erro(\%)$$

Precisão média global:

$$Precisão_{média} = \frac{\sum precisão_i}{21}$$

No caso do presente projeto com base nos valores experimentais apresentados na tabela em anexo B, verificou-se uma precisão global de **92.39% com um erro associado de $\pm 7.6\%$** .

Incerteza padrão

A **incerteza padrão** representa o grau de confiança, associado ao valor médio obtido a partir de um conjunto de medições repetidas. Este parâmetro permite avaliar a qualidade estatística das medições realizadas, sendo diretamente dependente da dispersão dos valores recolhidos e do número de amostras consideradas.

A **incerteza padrão do tipo A** é calculada pela expressão:

$$u = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

onde:

- u = incerteza padrão
- σ = desvio padrão das medições
- n = número total de medições efetuadas

Sendo o desvio padrão dado por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

onde:

- x_i = valor de cada medição
- $\bar{x}$ = valor médio das medições
- n = número de médio

Incerteza média

$$u_{média} = \frac{\sum u_i}{21}$$

Com base nos ensaios experimentais realizados, determinou-se uma incerteza padrão global média de aproximadamente **0,0117 L/min**. Considerando um nível de confiança de 95%, correspondente a um z igual a 1.65 retirado da tabela da distribuição normal em anexo C, mas tendo em atenção que os 5% são divididos do seguinte modo:

$$2.5\% < \text{-----} 95\% \text{-----} > 2.5\%$$

Ou seja, pode variar tanto acima de 95% como abaixo de 95%, então dividindo os 5% em duas partes:

$$\frac{0,05}{2} = 0,025$$

$$1 - 0,025 = \mathbf{0,975}$$

Para um nível de confiança de 97.5%, equivalente a um de $Z=1.96$ (valor esse retirado da tabela de distribuição normal em anexo C).

$$U = z \times u$$

$$U = 1,96 \times 0,0117$$

Obtêm-se um $U = \mathbf{0,023 L/min}$, isto significa que:

$Caudal = Valor\ medido \pm 0,023\ L/min$

Repetibilidade

A repetibilidade do sistema, foi avaliada através da diferença máxima, observada entre medições consecutivas, realizadas no mesmo ponto de calibração, recorrendo à seguinte expressão:

$$Repetibilidade(\%) = \pm \frac{x_{max} - x_{min}}{x_{ref}} \times 100$$

e por fim a média de todas as leituras:

$$R_{global} = \frac{\sum R_i}{21}$$

Onde:

R_i – Repetibilidade em cada ponto

Com base nos resultados experimentais obtidos apresentados na tabela em anexo B, determinou-se uma repetibilidade global de aproximadamente **±5.7%**. Indicando a capacidade do sistema em reproduzir medições sucessivas com uma variação máxima limitada a **5.7%**.

6. Sistema inteligente de monitorização e deteção de anomalias

Após a obtenção do valor de caudal em tempo real, foi desenvolvido um modelo de análise inteligente, com o objetivo de monitorizar continuamente o comportamento do sistema e identificar situações potencialmente anómalas.

Este modelo funciona como uma camada adicional de supervisão, analisando o histórico recente das medições e aplicando critérios estatísticos e lógicos capazes de distinguir entre funcionamento normal, comportamentos anormais e situações críticas de segurança.

A metodologia implementada baseia-se em três níveis distintos de análise:

- Deteção de valores críticos absolutos
- Deteção estatística de anomalias
- Deteção de tendências persistentes de comportamento anormal

6.1. Deteção de valores críticos absolutos

Para garantir a segurança do sistema a medir o operador define previamente, o caudal máximo permitido, para isso este caudalímetro, implementa um algoritmo em que ao atingir esse mesmo nível estabelecido, ocorre a desativação automática da electroválvula. Após esta condição de segurança, é necessária a ativação manual da mesma.

A análise inteligente apenas é ativada quando o sistema atinge um valor nominal de funcionamento considerado normal, previamente definido pelo operador. Isto permite que o sistema atinga o valor correto a medir.

Para um:

$$Q_{nominal} = 1,0 \text{ L/min}$$

Se:

$$Q < Q_{nominal}$$

A monitorização está desativada

Se:

$$Q \geq Q_{nom}$$

A monitorização é ativada e se exceder o $Q_{máx}$, a electroválvula é automaticamente desativada.

6.2. Detecção estatística de anomalias

Nesta etapa, o algoritmo analisa continuamente os valores medidos de caudal com o objetivo de identificar variações bruscas e instantâneas que se desviem do comportamento esperado do sistema.

Uma janela de 50 valores é guardada dentro de uma lista

$$Q = \{q_1, q_2, q_3, \dots, q_N\}$$

onde:

- Q conjunto das amostras armazenadas
- q_i valor de caudal medido em cada instante
- N número de amostras na janela de análise

Para identificar valores anormais, calcula-se a média dos últimos N valores armazenados:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_i$$

onde:

- μ representa o valor médio do caudal.

Calcula-se o desvio padrão:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (q_i - \mu)^2}{N}}$$

onde:

- σ representa a dispersão estatística do conjunto de dados.

Para cada nova leitura:

$$q_n$$

Calcula-se o valor de Z , que mede o quão afastado o valor atual de caudal q_n , está em relação ao comportamento normal recente do sistema.

$$z = \frac{q_n - \mu}{\sigma}$$

Ao definir este critério de avaliação:

$$|z| > 3$$

Se a condição for verificada, considera-se que existe uma anomalia estatística. Isto significa que o valor atual está demasiado afastado do comportamento esperado do sistema.

Exemplo prático

$$\mu = 1.20 \text{ L/min}$$

$$\sigma = 0.05 \text{ L/min}$$

$$q = 1.40 \text{ L/min}$$

$$z = \frac{1.40 - 1.20}{0.05}$$

$$z = 4$$

O valor de z é superior a 3, o algoritmo deteta a presença de uma anomalia e a electroválvula é desativada automaticamente.

Como nem todas as falhas provocam alterações bruscas, em alguns casos o sistema pode apresentar valores elevados durante um período prolongado. Para isso foi implementado um mecanismo de contagem consecutiva com um $C_{max} = 15$.

Sempre que o valor de:

$$q_i > Q_{nominal}$$

Incrementa-se um contador:

$$C = C + 1$$

Caso não se verifique a condição inicial:

$$C = 0$$

Se:

$$C \geq C_{max}$$

É gerado um estado de alerta e a electroválvula é desativada.

7.Arquitetura de comunicação e armazenamento de dados

7.1. Comunicação MQTT

O presente sistema permite a visualização em tempo real, não só localmente, mas também remotamente, através da utilização do **protocolo MQTT**. Esta abordagem possibilita a transmissão contínua dos dados adquiridos, para outros dispositivos ou plataformas, permitindo monitorização remota, maior flexibilidade de acesso à informação e integração com sistemas IoT.

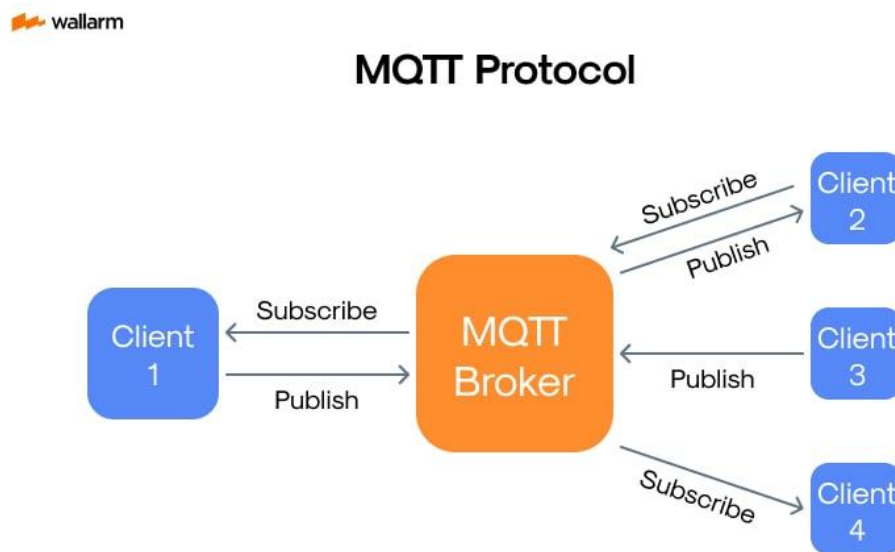


Figura 38 - Esquema de comunicação MQTT

O **MQTT** é um protocolo de comunicação leve, desenvolvido especialmente para aplicações de *Internet of Things (IoT)*, sendo particularmente adequado para sistemas, com recursos computacionais limitados e necessidade de comunicação rápida e eficiente.

O funcionamento do protocolo baseia-se no modelo **Publish/Subscribe**, onde a comunicação não ocorre diretamente entre os dispositivos, mas através de um elemento intermédio designado por **Broker**.

A arquitetura é composta por três elementos principais:

- **Publisher** – dispositivo responsável por enviar informação
- **Broker** – servidor responsável por receber e distribuir mensagens
- **Subscriber** – dispositivo responsável por receber a informação publicada

No sistema desenvolvido, o dispositivo principal publica continuamente, os valores medidos de caudal, através de um tópico MQTT. É enviada uma mensagem em formato JSON, contendo todos os dados publicados pelo sistema e três tópicos individuais, permitindo a subscrição independente de cada variável para diferentes dispositivos. O broker recebe esta informação e distribui automaticamente a mensagem a todos os dispositivos subscritos nesse tópico.

Publisher → Broker → Subscriber

A **taxa de transmissão** pode ser definida segundo um intervalo temporal:

$$f = \frac{1}{T}$$

onde:

- T representa o intervalo entre duas publicações consecutivas;
- f representa a frequência de atualização dos dados.

Se o sistema publicar dados a cada 100 ms:

$$T = 0.1s$$

então:

$$f = 10Hz$$

São assim transmitidos 10 valores por segundo.

Vantagens da utilização do protocolo MQTT

- Baixo consumo de largura de banda;
- Comunicação em tempo real;
- Possibilidade de monitorização remota;
- Fácil integração com plataformas IoT;
- Capacidade de comunicação entre múltiplos dispositivos em simultâneo.

Para demonstrar a comunicação implementada, foi utilizada uma aplicação móvel denominada **IoT MQTT Panel**, instalada num smartphone, que permite a criação de *dashboards* para subscrição de tópicos MQTT. Através desta aplicação foi possível visualizar, em tempo real, os valores publicados pelo *Raspberry Pi* [14].



Figura 39 -
Logotipo da APP

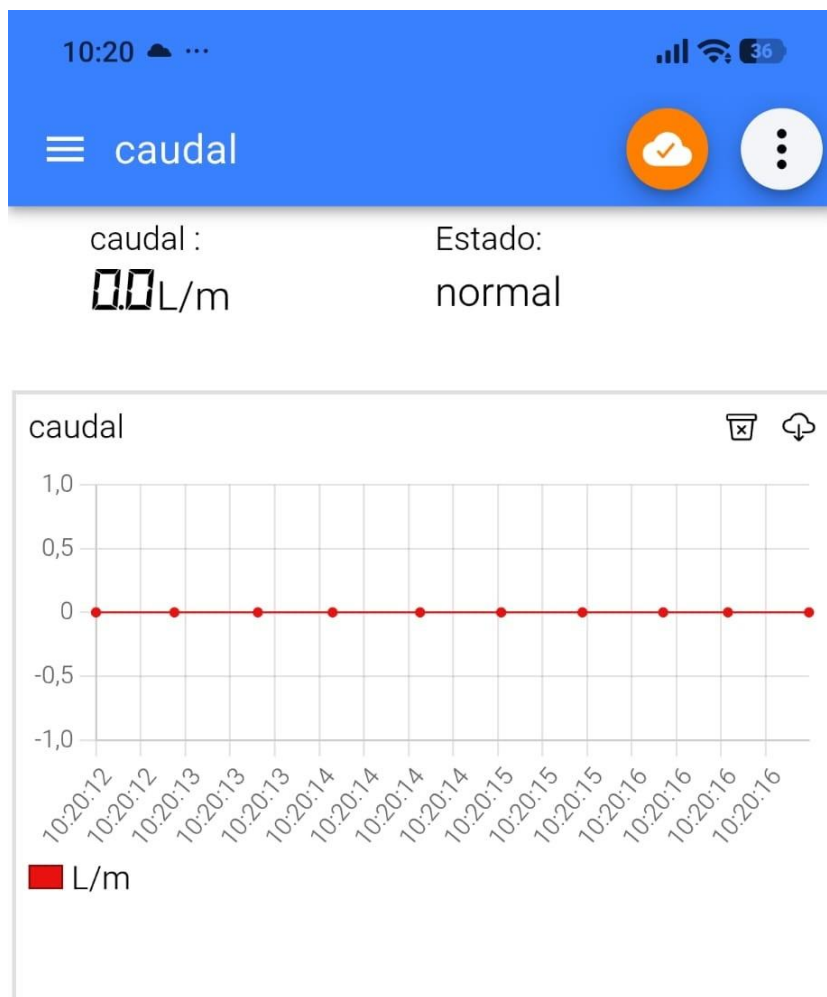


Figura 40 – Dashboard da app

Na Figura 40 é apresentada a *dashboard* desenvolvida na aplicação móvel, permitindo a visualização em tempo real dos valores de caudal e do estado de funcionamento do sistema em monitorização [14].



Figura 41 - Demonstração da monitorização do caudal e alteração do estado do sistema

Na figura 41 observa-se a monitorização do caudal em tempo real bem como estado do sistema durante o processo de medição [14].

7.2. Base de dados

Para permitir o armazenamento contínuo dos dados adquiridos pelo sistema, foi utilizada a base de dados **InfluxDB**, orientada especificamente para séries temporais (*Time Series Database*).

Este tipo de base de dados foi escolhido, devido à natureza dos dados gerados pelo sistema, uma vez que as medições de caudal são realizadas continuamente ao longo do tempo e cada valor encontra-se associado a um instante temporal específico.



Figura 42 - Logótipo InfluxDB

Ao contrário das bases de dados relacionais tradicionais, a **InfluxDB** foi desenvolvida para armazenar grandes quantidades de dados cronológicos de forma eficiente, permitindo elevada velocidade de escrita, consulta otimizada e fácil integração com sistemas de monitorização em tempo real.

Cada registo armazenado pode ser representado por três componentes fundamentais:

- **Measurement** – categoria geral dos dados armazenados
- **Field** – valor efetivamente medido
- **Timestamp** – instante temporal associado à medição

O algoritmo desenvolvido permite o envio de dados para a base de dados que se encontra a correr localmente e o seu retorno permitindo a visualização dos mesmos na *dashboard* do caudalímetro.

SQL VS NoSQL

As bases de dados **SQL** (*Structured Query Language*), armazenam informação em tabelas relacionais compostas por linhas e colunas, sendo adequadas para aplicações que necessitam de relações complexas, entre diferentes conjuntos de dados e elevada consistência transacional. Por outro lado, as bases de dados **NoSQL** (*Not Only SQL*) foram desenvolvidas, para lidar com grandes volumes de dados distribuídos, estruturas flexíveis e aplicações que exigem elevada velocidade de escrita e processamento em tempo real.

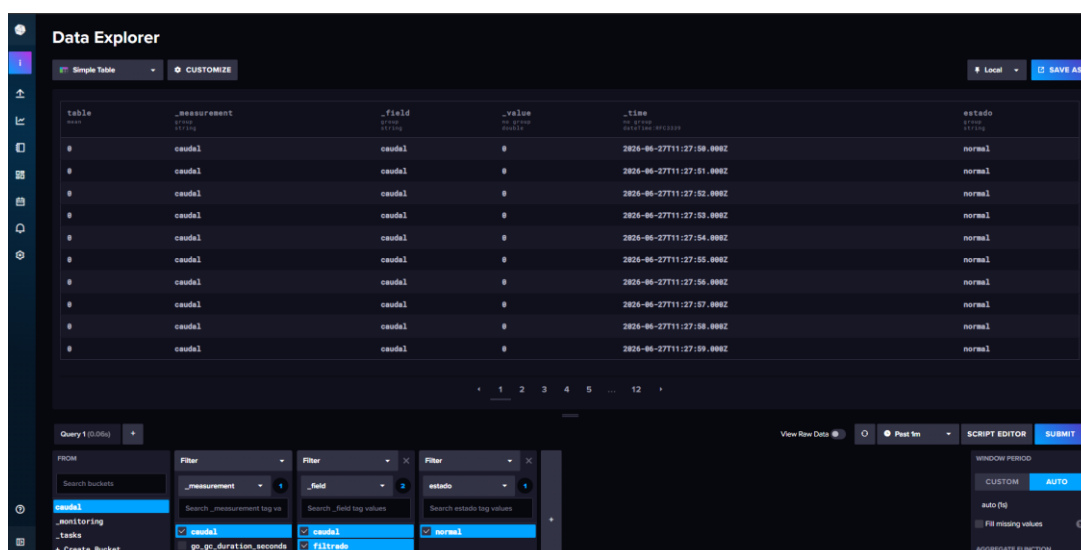


Figura 43 - Base de dados influxDB

8. Programação e desenvolvimento do software

Todo o sistema foi desenvolvido em *Python*, utilizando o ambiente de desenvolvimento *PyCharm*, tendo sido organizado de forma modular para facilitar a escalabilidade e reutilização do código. O projeto foi dividido em três ficheiros principais:

Primeiro ficheiro - responsável pela lógica central do sistema, integrando a aquisição do sinal proveniente do sensor, processamento e filtragem dos dados, calibração experimental, deteção de anomalias, comunicação através do protocolo MQTT e armazenamento dos dados na base de dados InfluxDB.

Segundo ficheiro - dedicado ao desenvolvimento da interface gráfica, permitindo a visualização em tempo real dos dados medidos, estado do sistema e interação do utilizador com o processo.

Terceiro ficheiro (main) - responsável pela coordenação e interação entre todos os módulos do sistema, assegurando o correto funcionamento global da aplicação.

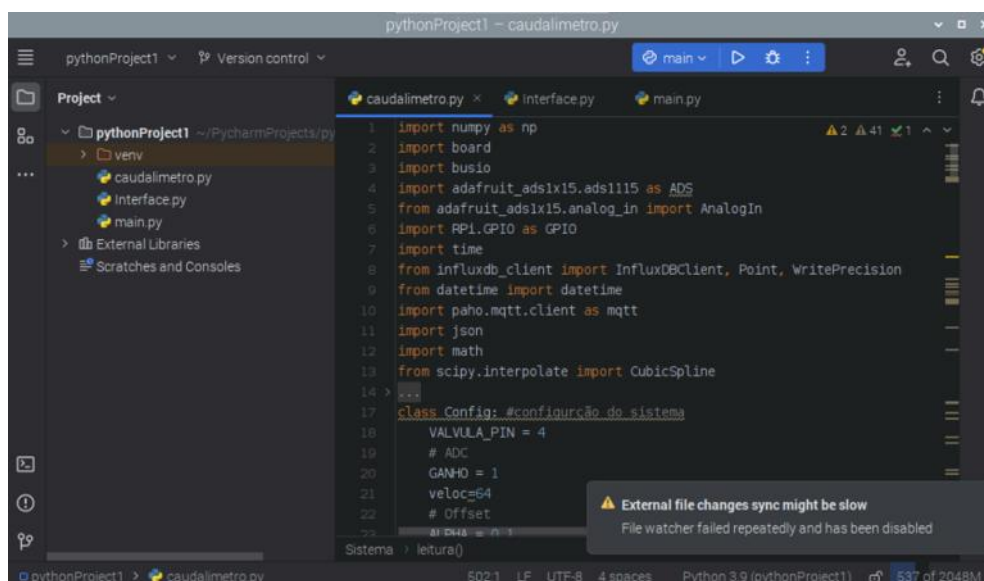


Figura 44 - Projeto criado

O código foi estruturado, recorrendo ao paradigma de programação orientada a objetos, através da criação de várias classes independentes, permitindo uma melhor organização e separação das diferentes funcionalidades do sistema. Esta abordagem facilita a leitura, manutenção e futura expansão do software.

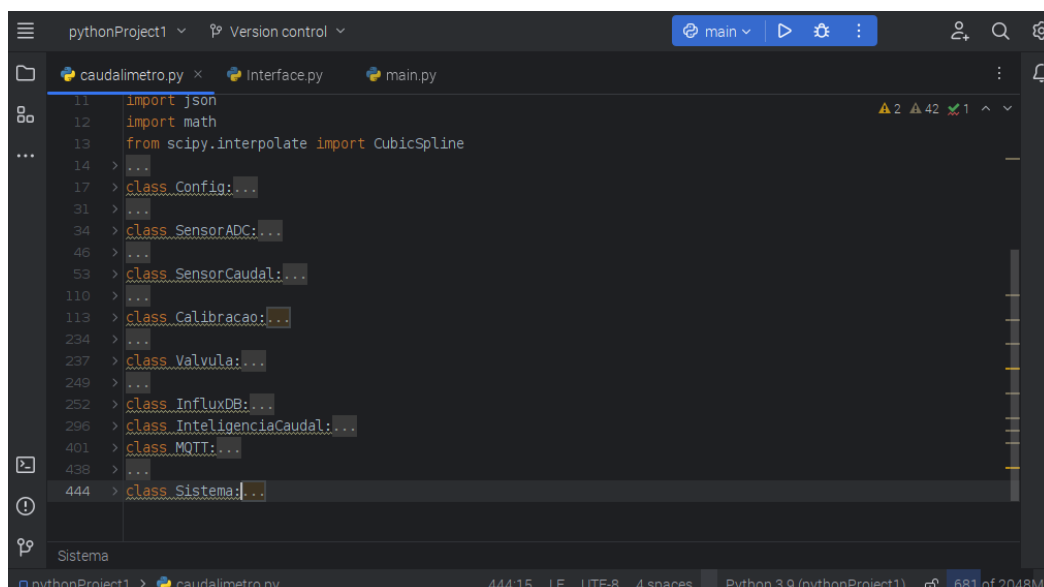


Figura 45 - Classes desenvolvidas

Foram desenvolvidas classes específicas para diferentes tarefas, nomeadamente:

Class config - Centralização dos principais parâmetros de configuração do sistema;

Class SensorADC - Aquisição e leitura do sinal analógico;

Class SensorCaudal - Processamento e filtragem dos dados adquiridos; Compensação de deriva e estabilização estatística do sinal;

Class Calibração - Conversão do valor de tensão em caudal, através do processo de calibração;

Class Valvula - Controlo automático/manual da válvula de segurança;

Class InteligenciaCaudal - Detecção inteligente de anomalias e identificação de comportamentos anormais no sistema;

Class MQTT - Comunicação remota utilizando o protocolo MQTT;

Class INFLUXDB - Armazenamento temporal dos dados na base de dados InfluxDB;

Class Sistema - Gestão e sincronização geral do sistema através de uma classe principal responsável pela orquestração de todos os módulos.

9. Interface gráfica para monitorização e controlo

De forma a permitir a visualização em tempo real e a interação com o sistema desenvolvido, foi implementada uma interface gráfica através da biblioteca *pyside* do *python*, dedicada à monitorização e controlo do processo. Esta interface foi concebida com o objetivo de apresentar, de forma clara e intuitiva, os principais parâmetros associados ao funcionamento do sistema, permitindo acompanhar continuamente o estado do processo e atuar sobre determinados elementos de controlo.

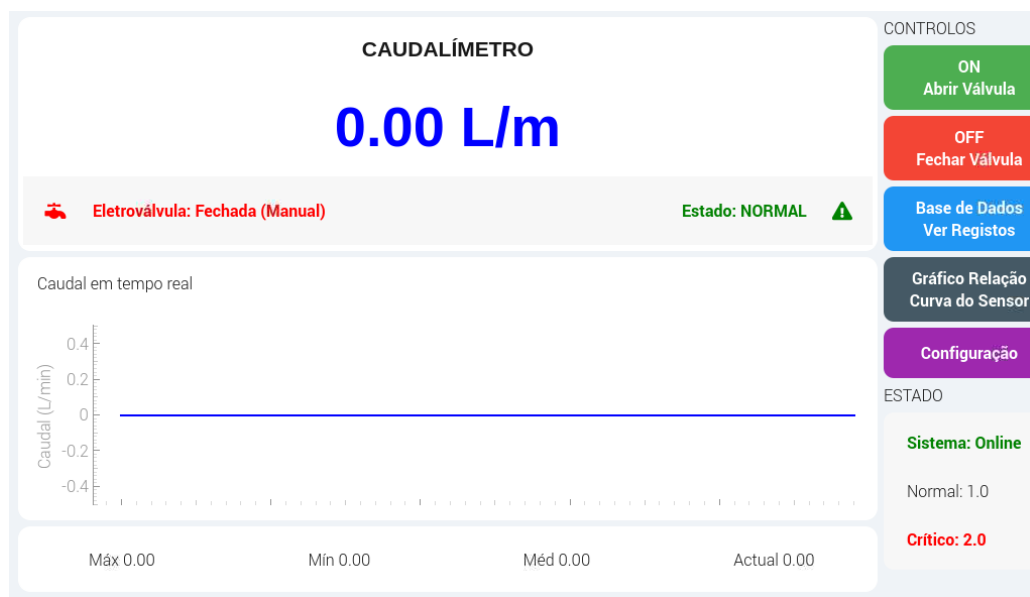


Figura 46 - Interface gráfica

A interface permite a visualização em tempo real do caudal incluindo o comportamento ao longo do tempo do mesmo através de um gráfico e ainda são apresentados os valores máximos, médios e mínimos do sistema. Para dar início ao sistema o operador tem de ativar sempre a electroválvula, quando aberta o estado da mesma altera e é permitida a visualização do caudal.

A interface possui ainda a opção de visualização histórica dos dados, bem como o gráfico de relação da tensão com o caudal, por fim o operador pode configurar os valores nominais e máximos do caudal no campo “*configuração*”.

Histórico do Sistema			
Registos: 1198		Sistema Online	
	Data/Hora	Caudal (L/min)	Tensão (V)
1	2026-06-25 20:20:22	0.00	0.2205
2	2026-06-25 20:20:23	0.00	0.2205
3	2026-06-25 20:20:24	0.00	0.2205
4	2026-06-25 20:20:25	0.00	0.2204
5	2026-06-25 20:20:26	0.00	0.2203
6	2026-06-25 20:20:27	0.00	0.2203
7	2026-06-25 20:20:28	0.00	0.2203
8	2026-06-25 20:20:29	0.00	0.2204
9	2026-06-25 20:20:30	0.00	0.2203
10	2026-06-25 20:20:31	0.00	0.2203
11	2026-06-25 20:20:32	0.00	0.2203
12	2026-06-25 20:20:33	0.00	0.2203
13	2026-06-25 20:20:34	0.00	0.2203
14	2026-06-25 20:20:35	0.00	0.2204
15	2026-06-25 20:20:36	0.00	0.2203
16	2026-06-25 20:20:37	0.00	0.2203

Figura 47 - Visualização histórica dos dados

Na Figura 47 é apresentada a interface destinada à visualização do histórico de dados registados pelo sistema, permitindo consultar o número total de registos armazenados, bem como navegar e analisar os valores adquiridos ao longo do funcionamento.

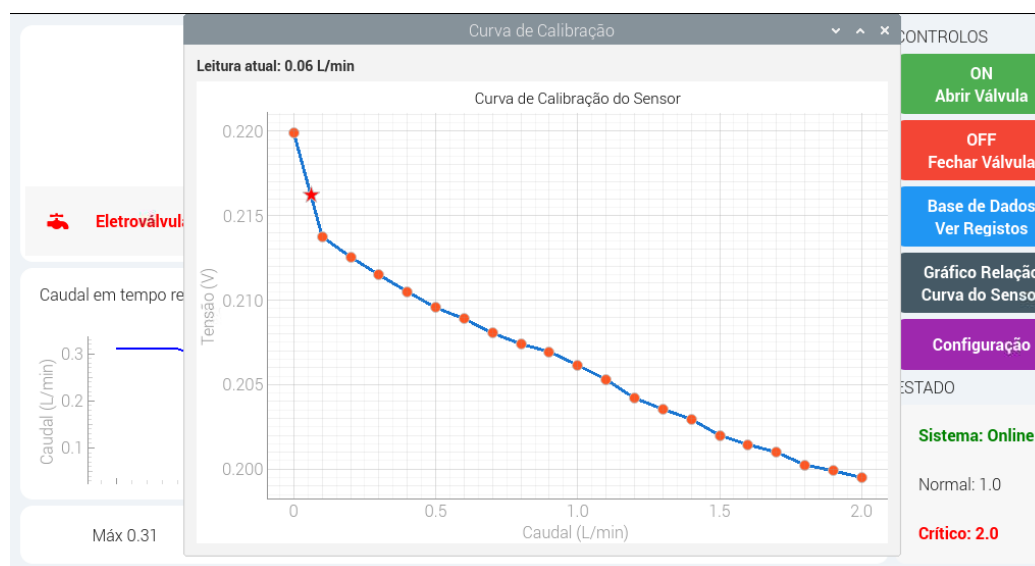


Figura 48 - Gráfico tensão vs caudal

Na Figura 48 é apresentado, em tempo real, o gráfico de calibração do sensor, permitindo comparar a leitura instantânea do caudal com a curva de calibração previamente definida. O marcador assinala a posição correspondente ao valor de tensão medido naquele instante, possibilitando a identificação do ponto de funcionamento do sensor.



Figura 49 - Configuração do sistema

Na Figura 49 apresenta-se a interface de configuração, responsável pela definição dos valores limite de caudal normal e caudal crítico utilizados para a monitorização do sistema.

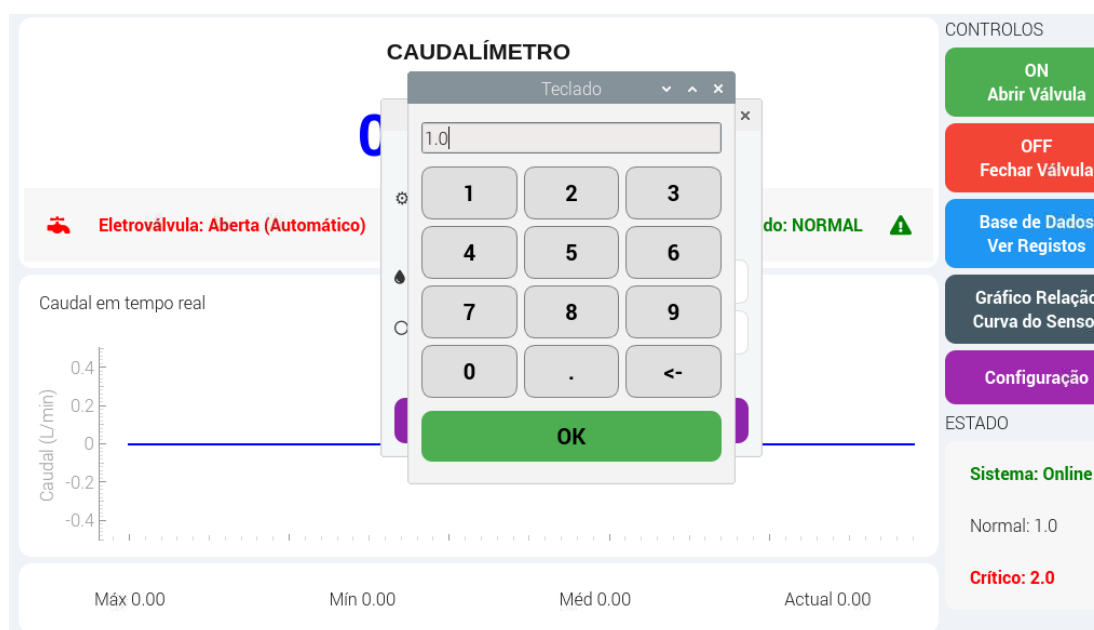


Figura 50 - Demonstração da configuração

Na Figura 50, visualiza-se o teclado virtual implementado na interface, utilizado para a introdução e alteração dos parâmetros de configuração de forma simples e intuitiva.

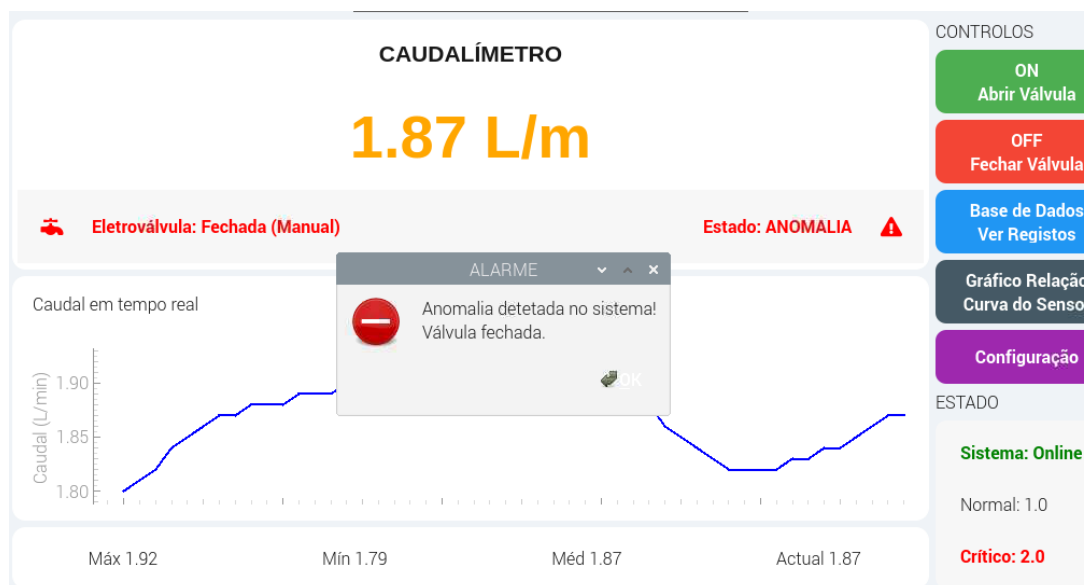


Figura 51 - Detecção de anomalias

Na Figura 51, observa-se o sistema em funcionamento normal até à deteção de uma condição anómala previamente definida. Perante esta situação, o sistema gera automaticamente um alerta e procede ao fecho da electroválvula, garantindo a segurança do processo.

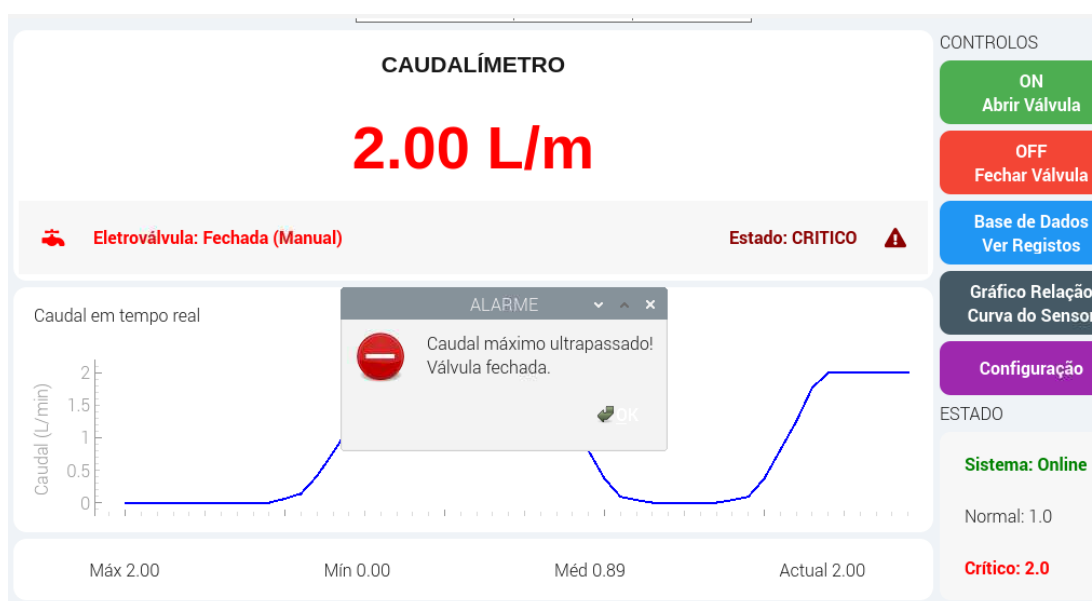


Figura 52 - Caudal máximo admitido

Na Figura 52, verifica-se a atuação do sistema quando o valor máximo de caudal estabelecido é atingido. Ao ultrapassar este limite, é emitido um alerta crítico e a válvula é automaticamente encerrada, protegendo o sistema contra condições de funcionamento excessivas.

Conclusão

A realização do presente projeto, permitiu consolidar e aprofundar os conhecimentos adquiridos ao longo da licenciatura, assim como desenvolver novas competências através do trabalho de investigação e da componente prática, associada ao desenvolvimento do sistema. Ao longo de todo o processo foi possível aplicar conhecimentos de diferentes áreas, nomeadamente instrumentação, aquisição e processamento de sinal, programação, comunicação entre dispositivos e integração de diferentes tecnologias num único sistema funcional.

O sistema desenvolvido enquadra-se nos conceitos associados à Indústria 4.0, destacando-se pela capacidade de aquisição e monitorização de dados em tempo real, armazenamento histórico da informação e possibilidade de comunicação remota através de protocolos de comunicação amplamente utilizados em ambiente industrial. A integração entre sensor, processamento local no Raspberry Pi, base de dados e a interface de monitorização permitiu criar uma solução flexível e adaptável a diferentes contextos de utilização.

De uma forma geral, os objetivos inicialmente propostos foram alcançados. No entanto, a fase mais complexa do projeto esteve relacionada com a calibração e caracterização do sensor de caudal utilizado. Durante esta etapa verificaram-se algumas limitações associadas ao próprio sensor, nomeadamente ao nível da estabilidade do sinal, comportamento não totalmente linear e alguma sensibilidade a fatores externos, o que tornou o processo de calibração mais exigente do que inicialmente previsto.

Apesar destas limitações, foi possível implementar diferentes métodos de filtragem e processamento do sinal, de forma a melhorar a estabilidade dos valores obtidos e aumentar a fiabilidade global do sistema. Embora os resultados representem uma precisão de $\pm 7.6\%$ do valor de referência e uma repetibilidade de 5.7% , considera-se que o desempenho obtido corresponde ao melhor compromisso possível tendo em conta as limitações do sensor utilizado.

Como perspetiva de trabalho futuro, a utilização de um sensor com maior precisão e melhores características técnicas poderá permitir melhorar significativamente o processo de calibração, aumentando a exatidão das medições e o desempenho global do sistema.

Para além da componente técnica, este projeto permitiu também desenvolver capacidades importantes ao nível da resolução de problemas, pesquisa autónoma, análise crítica e adaptação a dificuldades que surgiram ao longo da implementação.

Em termos finais, considera-se que o trabalho realizado cumpriu os objetivos propostos e demonstrou ser uma solução funcional, constituindo uma boa base para futuras melhorias e eventuais aplicações em contexto industrial real.

Bibliografia

- [1] *Metlan Instruments*, tudo o que precisa de saber sobre caudalímetros de turbina, 2024. [Online]. Available: <https://metlaninst.com/pt/tudo-sobre-caudalimetros-de-turbina/>
- [2] MALHEIRO, M. Instrumentação Industrial – Medição de Caudal. Revista Robótica, Secção Instrumentação, pp. 22–24.
- [3] J. D. Henriques, J. C. P. Palma e Á. S. Ribeiro, Medição de Caudal em Sistemas de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais Urbanas, Guia Técnico 9, LNEC/IRAR, Lisboa, Portugal, 2006.
- [4] KLINGER Portugal, "Caudalímetro de Massa Coriolis", 2026. [Online]. Available: <https://klinger.pt>
- [5] *Metlan Instruments*, "Medidores de Caudal Másico Térmico", [Online]. Available: <https://metlaninst.com/pt/medidores-de-caudal-massico-termico/>
- [6] *Reenas Electronics*, *FS1012 Liquid Flow Sensor Datasheet*, 2024.
- [7] *Texas Instruments*, *INA333 Precision Instrumentation Amplifier Datasheet*, 2024.
- [8] *Texas Instruments*, *ADS1115 16-Bit Analog-to-Digital Converter Datasheet*, 2024.
- [9] *Raspberry Pi Foundation*, *Raspberry Pi 4 Model B Documentation*, 2024. [Online].
- [10] *SMC Corporation*, *PF2M7 Series Digital Flow Switch – Datasheet*, [Online]. Available: *SMC PF2M7 Datasheet*.
- [11] P. J. S. Gonçalves, Sensores e Atuadores: Vocabulário de Metrologia e Incerteza na Medição, EST-IPCB, 2023/2024.
- [12] P. J. S. Gonçalves, Sensores e Atuadores: Aquisição de Dados, EST-IPCB, 2023/2024.
- [13] P. J. S. Gonçalves, Programação de Computadores – Parte 9, Engenharia Industrial, Escola Superior de Tecnologia, IPCB, 2021/2022.
- [14] K. Lingga, "How to Configure MQTT Using IoT MQTT Panel," YouTube, 2022. [Online]. Available: YouTube.
- [15] *OpenAI*, *ChatGPT, Large Language Model*, 2026. [Online]. Available: <https://chat.openai.com>

Anexos

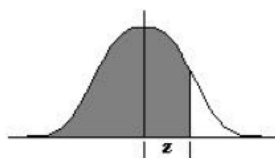
Anexo A - Tabela de calibração do sistema

Caudal (L/m)	1ª leitura média (v)	2ª leitura média (v)	3ª leitura média (v)	4ª leitura média (v)
2,0	0,199950	0,199150	0,199500	0,200300
1,9	0,200500	0,199600	0,199900	0,200829
1,8	0,200850	0,199900	0,200250	0,201366
1,7	0,201450	0,200500	0,201000	0,201800
1,6	0,201900	0,200950	0,201450	0,202425
1,5	0,202250	0,201600	0,202000	0,202900
1,4	0,202900	0,202450	0,202950	0,203315
1,3	0,203500	0,203000	0,203550	0,203995
1,2	0,204250	0,203700	0,204200	0,204776
1,1	0,205250	0,204600	0,205300	0,205779
1,0	0,206450	0,205450	0,206150	0,206867
0,9	0,206650	0,206000	0,206950	0,207452
0,8	0,207200	0,206650	0,207400	0,207641
0,7	0,207950	0,207500	0,208050	0,208850
0,6	0,208400	0,208650	0,208900	0,209104
0,5	0,209300	0,209100	0,209550	0,209347
0,4	0,209800	0,210050	0,210500	0,210110
0,3	0,210500	0,210600	0,211500	0,211094
0,2	0,211300	0,211650	0,212550	0,211821
0,1	0,212700	0,212850	0,213650	0,213436
0,0	0,219550	0,219300	0,220150	0,219300

Anexo B - Avaliação da precisão, repetibilidade e incerteza padrão do sistema desenvolvido

caudal ímetro (SMC) L/m	1ª Leitura L/m	2ª Leitura L/m	3ª Leitura L/m	Erro Relativo (%)	Precisão (%)	Incerteza padrão	Repetibilidade (%)
2	0,1	0,09	0,08	4,50	95,50	0,0058	1,00
1,9	0,1	0,1	0,1	5,26	94,74	0,0000	0,00
1,8	0,12	0,08	0,07	5,00	95,00	0,0153	2,78
1,7	0,12	0,1	0,09	6,08	93,92	0,0088	1,76
1,6	0,1	0,09	0,09	5,83	94,17	0,0033	0,63
1,5	0,1	0,1	0,07	6,00	94,00	0,0100	2,00
1,4	0,1	0,08	0,06	5,71	94,29	0,0115	2,86
1,3	0,1	0,08	0,06	6,15	93,85	0,0115	3,08
1,2	0,04	0,08	0,07	5,28	94,72	0,0120	3,33
1,1	0,04	0,1	0,07	6,36	93,64	0,0173	5,45
1	0,02	0,16	0,04	7,33	92,67	0,0437	14,00
0,9	0,02	0,1	0,06	6,67	93,33	0,0231	8,89
0,8	0,03	0,1	0,05	7,50	92,50	0,0208	8,75
0,7	0,03	0,05	0,02	4,76	95,24	0,0088	4,29
0,6	0,02	0,02	0,03	3,89	96,11	0,0033	1,67
0,5	0,02	0,03	0,03	5,33	94,67	0,0033	2,00
0,4	0,03	0,01	0,04	6,67	93,33	0,0088	7,50
0,3	0,04	0	0,04	8,89	91,11	0,0133	13,33
0,2	0,03	0,01	0,03	11,67	88,33	0,0067	10,00
0,1	0,04	0,02	0,04	33,33	66,67	0,0067	20,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0000	0,00

Anexo C – Tabela da distribuição normal



z	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	z
0,0	0,50000	0,50392	0,50798	0,51197	0,51595	0,51994	0,52392	0,52790	0,53188	0,33586	0,0
0,1	0,33983	0,54379	0,54776	0,55172	0,55367	0,55962	0,56336	0,36749	0,57142	0,57334	0,1
0,2	0,37926	0,58317	0,58706	0,59093	0,59483	0,59871	0,60257	0,60642	0,61026	0,61409	0,2
0,3	0,61791	0,62172	0,62531	0,62930	0,63307	0,63683	0,64058	0,64431	0,64803	0,65173	0,3
0,4	0,65542	0,65910	0,66276	0,66640	0,67003	0,67364	0,67724	0,68082	0,68438	0,68793	0,4
0,5	0,69146	0,69497	0,69847	0,70194	0,70540	0,70884	0,71226	0,71366	0,71904	0,72240	0,5
0,6	0,72575	0,72907	0,73237	0,73565	0,73891	0,74215	0,74537	0,74857	0,75175	0,75490	0,6
0,7	0,75803	0,76115	0,76424	0,76730	0,77035	0,77337	0,77637	0,77935	0,78230	0,78523	0,7
0,8	0,78814	0,79103	0,79389	0,79673	0,79954	0,80234	0,80510	0,80785	0,81057	0,81327	0,8
0,9	0,81594	0,81859	0,82121	0,82381	0,82639	0,82894	0,83147	0,83397	0,83646	0,83991	0,9
1,0	0,84134	0,84375	0,84613	0,84849	0,85083	0,85314	0,85543	0,85769	0,85993	0,86214	1,0
1,1	0,86433	0,86650	0,86864	0,87076	0,87285	0,87493	0,87697	0,87900	0,89100	0,88297	1,1
1,2	0,88493	0,88686	0,88877	0,89065	0,89251	0,89435	0,89616	0,89796	0,89973	0,90147	1,2
1,3	0,90320	0,90490	0,90658	0,90824	0,90988	0,91149	0,91308	0,91465	0,91621	0,91773	1,3
1,4	0,91924	0,92073	0,92219	0,92364	0,92506	0,92647	0,92785	0,92922	0,93056	0,93189	1,4
1,5	0,93319	0,93448	0,93574	0,93699	0,93822	0,93943	0,94062	0,94179	0,94295	0,94408	1,5
1,6	0,94520	0,94630	0,94738	0,94845	0,94950	0,95033	0,95154	0,95254	0,95352	0,95448	1,6
1,7	0,95543	0,95637	0,95728	0,95818	0,95907	0,95994	0,96080	0,96164	0,96246	0,96327	1,7
1,8	0,96407	0,96485	0,96562	0,96637	0,96711	0,96784	0,96856	0,96926	0,96995	0,97062	1,8
1,9	0,97128	0,97193	0,97257	0,97320	0,97381	0,97441	0,97500	0,97558	0,97615	0,97670	1,9
2,0	0,97725	0,97778	0,97831	0,97882	0,97932	0,97982	0,98030	0,98077	0,98124	0,98169	2,0
2,1	0,98214	0,98257	0,98300	0,98341	0,98382	0,98422	0,98461	0,98500	0,98537	0,98574	2,1
2,2	0,98610	0,98645	0,98679	0,98713	0,98745	0,98778	0,98809	0,98840	0,98870	0,98892	2,2
2,3	0,98928	0,98956	0,98983	0,99010	0,99036	0,99061	0,99086	0,99111	0,99134	0,99158	2,3
2,4	0,99180	0,99202	0,99224	0,99245	0,99266	0,99286	0,99305	0,99324	0,99343	0,99361	2,4
2,5	0,99379	0,99396	0,99413	0,99430	0,99446	0,99461	0,99477	0,99492	0,99506	0,99520	2,5
2,6	0,99534	0,99547	0,99560	0,99573	0,99585	0,99598	0,99609	0,99621	0,99632	0,99643	2,6
2,7	0,99653	0,99664	0,99674	0,99683	0,99693	0,99702	0,99711	0,99720	0,99728	0,99736	2,7
2,8	0,99744	0,99752	0,99760	0,99767	0,99774	0,99781	0,99788	0,99795	0,99801	0,99807	2,8
2,9	0,91981	0,99819	0,99825	0,99831	0,99836	0,99841	0,99846	0,99851	0,91986	0,99861	2,9
3,0	0,99865	0,99869	0,99874	0,99878	0,99882	0,99886	0,99889	0,99893	0,99897	0,99900	3,0
3,1	0,99190	0,99906	0,99910	0,99913	0,99916	0,99918	0,99921	0,99924	0,99926	0,99929	3,1
3,2	0,99931	0,99934	0,99936	0,99938	0,99940	0,99942	0,99944	0,99946	0,99948	0,99950	3,2
3,3	0,99952	0,99953	0,99955	0,99957	0,99958	0,99960	0,99961	0,99962	0,99964	0,99965	3,3
3,4	0,99966	0,99968	0,99969	0,99970	0,99971	0,99972	0,99973	0,99974	0,99975	0,99976	3,4
3,5	0,99977	0,99978	0,99978	0,99979	0,99980	0,99981	0,99981	0,99982	0,99983	0,99983	3,5
3,6	0,99984	0,99985	0,99986	0,99986	0,99986	0,99987	0,99987	0,99988	0,99988	0,99989	3,6
3,7	0,99989	0,99990	0,99990	0,99990	0,99991	0,99991	0,99992	0,99992	0,99992	0,99199	3,7
3,8	0,99993	0,99993	0,99993	0,99994	0,99994	0,99994	0,99994	0,99995	0,99995	0,99995	3,8
3,9	0,99995	0,99995	0,99996	0,99996	0,99996	0,99996	0,99996	0,99996	0,99997	0,99997	3,9