



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

Sistema de monitoramento de consumo de água de baixo custo com comunicação Wi-Fi aplicado à IoT

Thiago Rabelo Fraga

João Monlevade, MG
2021

Thiago Rabelo Fraga

**Sistema de monitoramento de consumo de
água de baixo custo com comunicação Wi-Fi
aplicado à IoT**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Dr. Welbert Alves Rodrigues

Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F811s Fraga, Thiago Rabelo.

Sistema de monitoramento de consumo de água de baixo custo com comunicação Wi-Fi aplicado à IoT. [manuscrito] / Thiago Rabelo Fraga. - 2021.

47 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Welbert Alves Rodrigues.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia Elétrica .

1. Internet das coisas. 2. Microcontroladores. 3. Medidores de fluxo. 4. Calibração. I. Rodrigues, Welbert Alves. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621.3.049.77

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Thiago Rabelo Fraga

**Sistema de monitoramento de consumo de água de baixo custo
com comunicação Wi-Fi aplicado à IoT**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista

Aprovada em 03 de Agosto de 2021

Membros da banca

Dr - Welbert Alves Rodrigues - Orientador - UFOP
Dr - Marcelo Moreira Tiago - UFOP
MsC - Thainan Santos Theodoro - UFOP

Welbert Alves Rodrigues, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/09/2021



Documento assinado eletronicamente por **Welbert Alves Rodrigues, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/09/2021, às 08:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0217089** e o código CRC **0DEF502F**.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pelas oportunidades que ele me concedeu até aqui. À minha família pela união, amor e sabedoria. Aos meus amigos pelos bons momentos que vivemos e pela força nos dias difíceis. À minha namorada, Maria Augusta, pelo carinho e companheirismo. Agradeço também aos profissionais da universidade pela motivação, afinho e dedicação.

A todos que fizeram e estão fazendo parte dessa história, meu muito obrigado!

"Tudo posso naquele que me fortalece."

– Filipenses 4:13

Resumo

Este trabalho apresenta a implementação de um sistema de monitoramento de consumo de água de baixo custo com comunicação Wi-Fi que utiliza o conceito da Internet das Coisas. O processo é realizado por meio da leitura de vazão de um transdutor de vazão, que envia seu sinal elétrico para uma Unidade de microcontrolador, do inglês *microcontroller unit* (MCU), onde este sinal é calibrado e processado para obter dados de vazão e estes dados são enviados para a plataforma *Tago.io*, que permite a exibição dos dados em um *dashboard*, permitindo que o usuário acesse as informações de seu interesse. Para implementar tal processo, foi necessário realizar medições com o auxílio de um osciloscópio no transdutor de vazão *YF-S201*, onde foi possível verificar a forma de onda do sinal que é enviado à MCU. Também foi necessário calibrar o transdutor de vazão por meio da regressão linear, utilizando os procedimentos descritos nas normas do INMETRO e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Dentre as normas abordadas, a que se apresentou mais viável e mais adequada foi a Norma Técnica brasileira (NBR) 4185, devido a sua adequação à aplicação no que diz respeito à quantidade de vazão medida. Após a calibração do transdutor, foi calculada a incerteza do ajuste. Para uma probabilidade de 95%, foi encontrado que a indicação real em vazão do transdutor varia em $1,975L/h$ para mais ou para menos. Através da aquisição dos dados de vazão em tempo real pela MCU em *C++*, os dados de volume acumulado foram processados via programação em *Python* na plataforma *Tago.io* e, posteriormente, apresentados ao usuário. Para melhorias e trabalhos futuros, o código-fonte foi disponibilizado à comunidade na plataforma *GitHub*.

Palavras-chave: Monitoramento, Microcontrolador, Internet das Coisas - IoT, medição de vazão, calibração.

Abstract

This work presents the implementation of a low cost water consumption monitoring system with Wi-Fi communication that uses the concept of the Internet of Things. The process is carried out by reading the flow of a flow transducer, which sends its electrical signal to a microcontroller unit (MCU), where this signal is calibrated and processed to obtain flow data and this data are sent to the Tago.io platform, which allows the display of data on a dashboard, allowing the user to access the information of interest. To implement this process, it was necessary to perform measurements with the aid of an oscilloscope on the YF-S201 flow transducer, where it was possible to verify the waveform of the signal that is sent to the MCU. It was also necessary to calibrate the flow transducer through linear regression, using the procedures described in the standards of INMETRO and the Brazilian Association of Technical Standards (ABNT). Among the standards discussed, the one that was the most viable and most adequate was the Brazilian Technical Standard (NBR) 4185, due to its suitability for application with regard to the amount of measured flow. After transducer calibration, the adjustment uncertainty was calculated. For a 95% probability, it was found that the actual transducer flow indication varies by more or less 1.975L/h. Through the acquisition of flow data in real time by the MCU in C++, the accumulated volume data were processed via Python programming on the Tago.io platform and, later, presented to the user. For further improvement and work, the source code has been made available to the community on the GitHub platform.

Keywords: Monitoring, Microcontroller, Internet of Things - IoT, flow measurement, calibration.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Recursos adicionais necessários para atingir as metas de serviços de água, saneamento e higiene, básicos e gerenciados de forma segura. . .	1
Figura 2 – Esquemático IOT com usuários e aplicações.	2
Figura 3 – Diagrama do sistema de monitoramento proposto.	6
Figura 4 – Funcionamento dos medidores ultrassônicos por tempo de trânsito. . .	7
Figura 5 – Representação da Lei de Faraday sobre um fio condutor (a) e sobre eletrodos (b) de uma tubulação	8
Figura 6 – Exemplo de medidor de vazão eletromagnético.	9
Figura 7 – Princípio do efeito Hall.	10
Figura 8 – Transdutor de vazão de Efeito Hall.	10
Figura 9 – Método de calibração volumétrico ou gravimétrico.	13
Figura 10 – Método de calibração por comparação com o medidor de referência. . .	13
Figura 11 – Diagrama de uma instalação para calibração por pesagem estática. . .	16
Figura 12 – Diagrama de uma instalação para calibração por pesagem dinâmica. . .	18
Figura 13 – Exemplo de <i>dashboard</i>	21
Figura 14 – Fluxograma do desenvolvimento.	22
Figura 15 – Estrutura de testes do transdutor.	23
Figura 16 – Sinal de saída do transdutor.	24
Figura 17 – Gráfico das observações comparadas com o <i>datasheet</i>	25
Figura 18 – <i>Dashboard</i> do teste de conexão cliente-servidor.	27
Figura 19 – Janela do recurso <i>Analysis</i>	29
Figura 20 – Sistema montado para calibração do transdutor.	31
Figura 21 – Gráfico das observações para calibração.	33
Figura 22 – Gráfico da reta de calibração.	34
Figura 23 – Instalação do MCU (a) e montagem do sistema de medição (b)	36
Figura 24 – <i>Dashboard</i> visualizada no computador.	37
Figura 25 – <i>Dashboard</i> visualizada no <i>smartphone</i>	38
Figura 26 – Configurações de intervalo de visualização do <i>Dashboard</i>	39
Figura 27 – Configurações de formato de visualização do <i>Dashboard</i>	39

Lista de tabelas

Tabela 1	– Normas vigentes para normalização de medidores de vazão.	12
Tabela 2	– Modelo de resultados obtidos na calibração do medidor.	14
Tabela 3	– Dados das medições.	26
Tabela 4	– Lista de materiais para o sistema de medição	31
Tabela 5	– Observações para correção na medição do tempo de coleta	32
Tabela 6	– Observações para calibração do transdutor	33

Lista de Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
API	Interface de programação de aplicações, do inglês <i>Application Programming Interface</i>
HTTP	Protocolo de Transferência de Hipertexto, do inglês <i>Hypertext Transfer Protocol</i>
IDE	Ambiente de desenvolvimento integrado, do inglês <i>Integrated Development Environment</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IoT	Internet das coisas, do inglês <i>Internet of Things</i>
ISO	Organização Internacional de Normalização, do inglês <i>International Organization for Standardization</i>
IP	Endereço de Protocolo da Internet, do inglês <i>Internet Protocol</i>
MCU	Unidade de microcontrolador, do inglês <i>microcontroller unit</i>
NBR	Norma Técnica brasileira
PCI	Placa de circuito impresso
PVC	Policloreto de vinila
RAM	Memória de Acesso Aleatório, do inglês <i>Random Access Memory</i>
SoC	Sistema em um Chip, do inglês <i>System on a Chip</i>
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
Wi-Fi	Fidelidade sem Fio, do inglês <i>Wireless Fidelity</i>

Lista de símbolos

V_H	Tensão gerada
$\vec{I}$	Corrente vetorial
$\vec{B}$	Campo magnético vetorial
q	Vazão da corrida convencional
q'	Vazão média da corrida segmentada
q_v	Vazão volumétrica
ΔV	Variação de volume
Δt	Intervalo de tempo
q_m	Vazão mássica
m_1	Massa final do recipiente
m_0	Massa inicial do recipiente
m_i	Massa incrementada em uma corrida de tempo
ρ_a	Massa específica do ar em kg/m^3
ρ_p	Massa específica do material dos pesos-padrão em kg/m^3
ρ_w	Massa específica da água em kg/m^3
ΔP	Erro médio de correção de medição em segundos
α	Ângulo do braço da balança em radianos
L	Distância percorrida pela extremidade do braço da balança em metros
g	Aceleração da gravidade da terra (aproximadamente $9,8m/s^2$)
Δm	Variação de massa após abertura da válvula

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação	3
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivos específicos	4
1.3	Trabalhos relacionados	4
1.4	Organização do trabalho	4
2	REFERENCIAL TEÓRICO	6
2.1	Medidores de Vazão	6
2.1.1	Medidor de vazão ultrassônico por tempo de trânsito	7
2.1.2	Medidor de vazão eletromagnético	8
2.1.3	Medidor de Vazão de Efeito Hall	9
2.2	O Microcontrolador ESP8266	11
2.3	Normalização de medidores de vazão	12
2.4	Orientações do INMETRO	12
2.5	Normas da ABNT - NBR 4185	14
2.5.1	Pesagem estática	14
2.5.2	Pesagem dinâmica	16
2.6	Regressão linear simples - Calibração do transdutor	18
2.7	Incerteza do ajuste	19
2.8	Sistema de Armazenamento em Nuvem e <i>Dashboard</i>	20
3	DESENVOLVIMENTO	22
3.1	Medições iniciais do Instrumento	23
3.2	Conexão Cliente-Servidor	26
3.3	Códigos-fonte	28
3.4	Implementação do frequencímetro	29
3.5	Calibração do transdutor de vazão	30
3.5.1	Correções na medição do tempo de coleta	31
3.5.2	Observações para calibração	32
3.5.3	Aplicação da regressão linear simples	34
3.5.4	Cálculo da incerteza do ajuste	34
3.6	Protótipo do sistema de medição	35
4	RESULTADOS	37

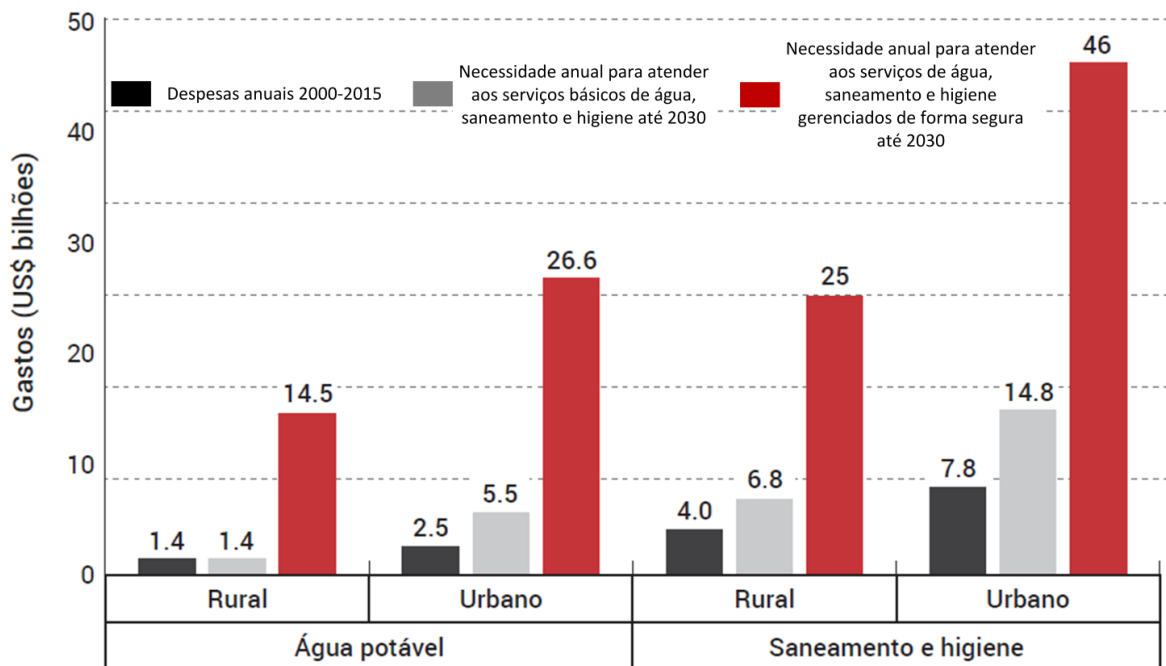
5	CONCLUSÕES	41
5.1	Trabalhos futuros	42
	REFERÊNCIAS	43
	APÊNDICE A – ENDEREÇOS <i>WEB</i> DOS REPOSITÓRIOS <i>GITHUB</i>	45
A.1	Repositório dos códigos	45
	ANEXO A – <i>DATASHEET</i> YF-S201	46
	ANEXO B – TABELA DE DISTRIBUIÇÃO <i>T</i>	47

1 Introdução

Com o crescimento populacional e o avanço da tecnologia, o consumo de água vêm crescendo com o passar dos anos. Em junho de 2017, a população mundial atingiu o valor de 7,6 bilhões de pessoas. No entanto, é estimado que até o ano de 2050 ela aumentará para 9,8 bilhões (UNESCO, 2019).

Segundo a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), os níveis atuais de financiamento direcionados para os serviços de saneamento, água e higiene estão abaixo do nível de financiamento necessário para se atingir o nível básico até 2030. Na Figura 1, é possível notar a grande diferença entre esses valores para diversos setores.

Figura 1 – Recursos adicionais necessários para atingir as metas de serviços de água, saneamento e higiene, básicos e gerenciados de forma segura.



Fonte: retirado de UNESCO (2019).

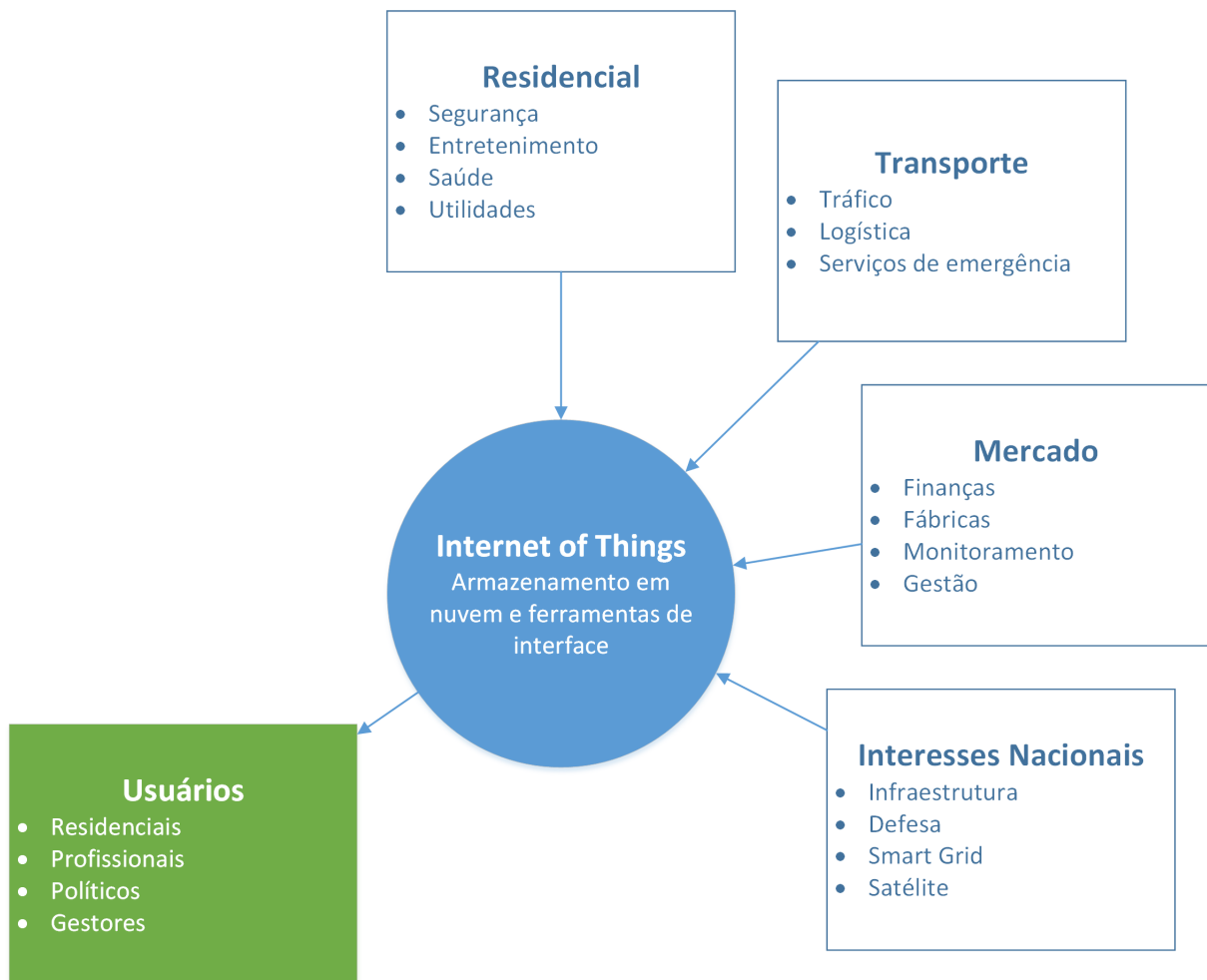
Dentre os setores apresentados na Figura 1, o setor que apresenta a maior projeção de gastos é o setor urbano, tanto na utilização da água potável quanto para o saneamento e higiene. Logo, o setor urbano torna-se uma das principais áreas para o investimento em melhorias que visam atender à demanda projetada ou que reduza o desperdício da água.

No que diz respeito à redução do desperdício de água, a criação de novos sistemas de monitoramentos de consumo de água de maneira acessível a todos os níveis de consumidores torna-se necessária, permitindo ao usuário identificar com facilidade as causas do

desperdício de água,

Com o avanço nas áreas de sistemas embarcados, microeletrônica, comunicação e sensoriamento, é possível aplicar massivamente o uso da Internet pela Internet das coisas, do inglês *Internet of Things* (IoT). A IoT é uma extensão da Internet que possibilita que objetos do dia-a-dia possam ser inseridos na rede mundial, permitindo que seja efetuado o monitoramento, supervisionamento e controle dos parâmetros desses objetos de forma remota (SANTOS; SILVA et al., 2006). Pelo conceito de IoT, é possível interconectar vários objetos e dispositivos entre si, fazendo com que a atuação de um sistema em outro seja muito mais viável e fácil, pois por meio da conexão com a *Internet*, os dispositivos estão integrados, como é representado na Figura 2.

Figura 2 – Esquemático IOT com usuários e aplicações.



Fonte: adaptado de: Gubbi, Buyya et al. (2013).

Devido à sua enorme gama de aplicação, uma vez que o usuário possui o acesso a um aplicativo IoT, ele pode ter acesso a diversos sistemas de maneira rápida, eficiente e fácil. Dessa forma, a aplicação da IoT em um sistema de monitoramento de consumo de água se mostra útil, podendo o usuário ter o monitoramento em tempo real e em histórico

de parâmetros relevantes e de seu interesse, visando otimizar seu consumo de água de acordo com a sua necessidade.

No entanto, sabe-se que em alguns casos tal monitoramento pode não se apresentar viável, sendo necessário um grande investimento para a compra dos equipamentos, como é o caso de alguns transdutores de vazão. Neste trabalho, é possível verificar que os equipamentos, bem como a instalação do sistema é de baixo custo, viabilizando o monitoramento para casos onde não é necessário valores de precisão altíssimos.

1.1 Motivação

Uma aplicação IoT se mostra viável e aplicável em várias situações, conforme apresentado na Figura 2. Em aplicações residenciais, o monitoramento de consumo de água pode ser considerado vantajoso, por exemplo, quando utilizado em condomínios cujo consumo de água é compartilhado com os moradores. A ação de monitorar permite à gestão saber quais moradores consomem mais água e quais economizam mais. Isso permite a gestão acionar recursos que incentivam a economia e obter dados para otimização do uso da água no ambiente. Esta mesma aplicação pode ser replicada para o ramo de turismo e recreação.

Outros exemplos de aplicações IoT envolvem o monitoramento nos ramos da agricultura e de infraestrutura. Uma vez instalado um sistema automatizado de leitura do consumo de água em uma grande plantação, é possível que o gestor obtenha dados históricos do consumo de água e, juntamente com outros parâmetros como a umidade do solo e qualidade dos grãos, é possível realizar uma otimização no sistema visando melhorar a qualidade dos grãos e minimizar o consumo de água. No ramo de infraestrutura, é possível automatizar a leitura de consumo de água dos consumidores, reduzindo o gasto com mão-de-obra que, atualmente, é normalmente utilizado para realizar essa tarefa.

Além da automatização da leitura reduzir os gastos de mão-de-obra, este tipo de leitura permite que o usuário consulte o consumo de água em tempo real, fazendo com que haja a possibilidade do consumidor ser notificado caso tal consumo de água esteja acima do esperado, evitando gastos desnecessários.

1.2 Objetivos

Implementar de um sistema de monitoramento de consumo de água para aplicações de baixo custo, usando um transdutor cuja curva de calibração foi encontrada utilizando a norma da ABNT ISO 4185 e o método de regressão linear, por meio de um microcontrolador de uso geral com conectividade à internet visando aplicações IoT com alta integração com o usuário.

1.2.1 Objetivos específicos

- Observar e aplicar as normas e as fontes que descrevem o funcionamento da medição e aquisição de dados do sistema;
- Apresentar os princípios da programação do microcontrolador e de seu hardware;
- Observar e calibrar o transdutor de vazão conforme as normas vigentes e pelo método da regressão linear;
- Apresentar um protótipo de sistema de medição para medições práticas;
- Apresentar o *dashboard* final com todos os dados de interesse de medição do sistema ao usuário.

1.3 Trabalhos relacionados

Está disponível na literatura diversos trabalhos relacionados a sistemas de monitoramento de consumo de água. No trabalho de Vendemiatti (2020), é desenvolvido um medidor de vazão e pressão de forma remota, tendo o objetivo de analisar possíveis mudanças nos padrões de consumo, tanto no período noturno quanto de forma geral. Por meio deste trabalho, é possível identificar com mais facilidade possíveis vazamentos em um sistema hídrico.

Já no trabalho de Filtsoff e Martins (2018), é implementado um sistema de monitoramento com o envio de notificações para o aplicativo instalado no celular do usuário, visando informar em caso de eventos específicos, como a abertura e fechamento da válvula, maior consumo diário do mês e maior consumo global. Além disso, é possível controlar a válvula remotamente via aplicativo por meio de um servo motor.

Por sua vez, o trabalho de Carneiro (2018) tem como objetivo desenvolver um protótipo de um sistema de supervisão de consumo de água, enfatizando o uso do monitoramento para diversos usuários e equipamentos, podendo estender a aplicação para prédios residenciais em cada item consumidor de água da residência, como o caso de torneiras, chuveiros e eletrodomésticos.

1.4 Organização do trabalho

No Capítulo 2 será apresentado ao leitor o referencial teórico necessário para o entendimento do sistema de monitoramento de consumo de água, abordando os elementos integrados a esse sistema como o transdutor de vazão, o MCU e, além disso, é apresentado as normas e os métodos matemáticos que foram necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

No Capítulo 3 será tratado o desenvolvimento do sistema, colocando em prática as informações e orientações descritas no Capítulo 2, implementando os processos necessários para o monitoramento por parte do usuário do consumo de água por meio de um *dashboard*.

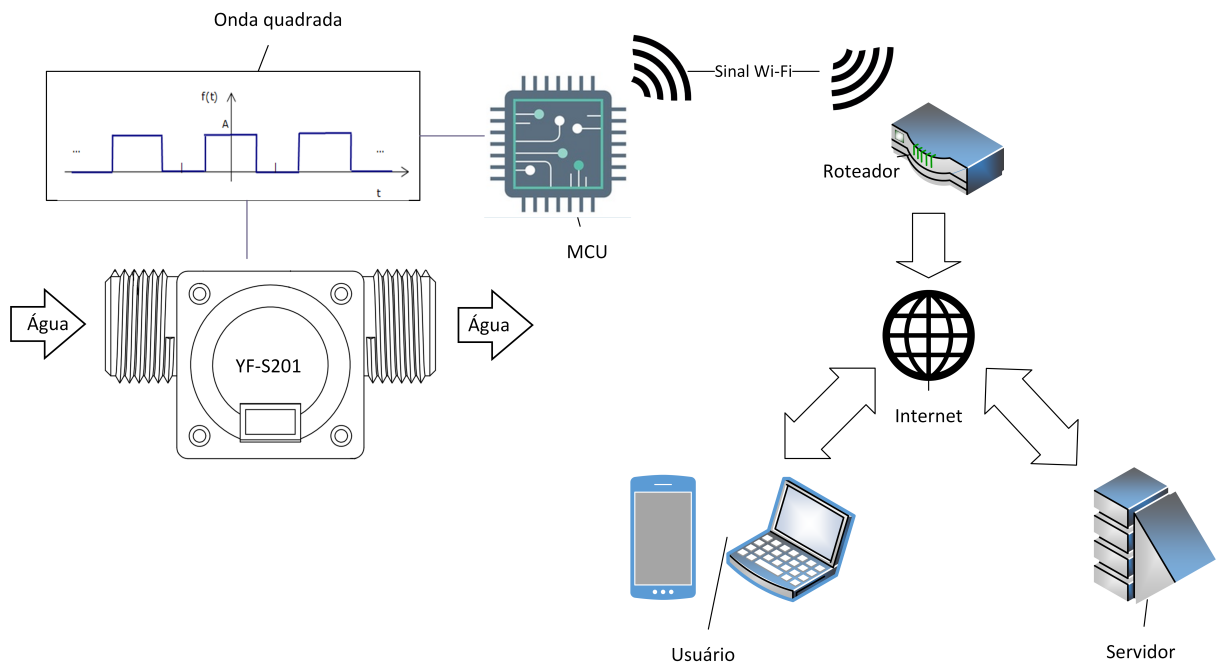
Já no Capítulo 4 serão tratados os resultados, apresentando detalhes do *dashboard* que é disponibilizado para o usuário e que pode ser acessado por um computador ou por um *smartphone*.

No Capítulo 5 são descritas as conclusões levando em consideração a elaboração dos capítulos anteriores, analisando a coerência entre dos objetivos e os resultados obtidos. Além disso, foi apresentado no Capítulo 5 sugestões de trabalhos futuros relacionados ao tema deste trabalho, viabilizando o aprimoramento deste sistema por meio do uso do código-fonte disponibilizado via *GitHub*.

2 Referencial teórico

Para abordar o princípio de funcionamento dos componentes do sistema e as normas que regem o trabalho é necessário primeiramente ter uma visão geral de como o sistema de medição funciona. Para isso, a Figura 3 representa o sistema em forma de diagrama.

Figura 3 – Diagrama do sistema de monitoramento proposto.



Fonte: elaborada pelo autor.

Primeiramente, o fluido passa pelo transdutor de vazão gerando em seus terminais um sinal de tensão cuja frequência é diretamente proporcional à vazão que passa pelo transdutor. Em seguida, o sinal é enviado para a MCU, que processa esse sinal e obtém a vazão correspondente à frequência desse sinal para cada instante de tempo, além de realizar cálculos adicionais, como o volume total de água consumido. Por meio da comunicação Wi-Fi, os dados processados pelo MCU são enviados para um roteador que possui uma conexão com a Internet. Os dados são encaminhados para um servidor que armazenará os dados de vazão dos instantes desejados e, por meio de um aplicativo, o usuário poderá acessar esses dados com um dispositivo, como um computador e/ou um smartphone.

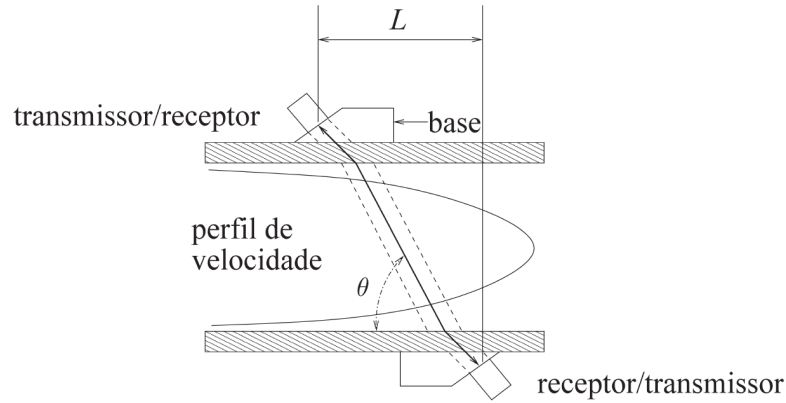
2.1 Medidores de Vazão

Nesta seção será apresentado alguns modelos de medidores de vazão utilizados no mercado, bem como suas vantagens e desvantagens em aspectos físicos e de custo.

2.1.1 Medidor de vazão ultrassônico por tempo de trânsito

Segundo Aguirre (2013), a medição ultrassônica consiste na emissão de sinais de ultrassom por parte de cristais piezoelétricos que, de maneira alternada, emite e recebe o sinal, conforme a figura 4.

Figura 4 – Funcionamento dos medidores ultrassônicos por tempo de trânsito.



Fonte: retirado de Aguirre (2013).

Com isso, é registrado o tempo de emissão a favor do escoamento t_1 e o tempo de emissão no sentido contrário do escoamento t_2 , fazendo com que $t_1 < t_2$. Com isso, percebe-se que:

$$t_1 = L / (c - v \cos \theta) \quad (2.1)$$

$$t_2 = L / (c + v \cos \theta) \quad (2.2)$$

onde c é a velocidade de ultrassom no fluido, v é a velocidade do líquido na tubulação. Por conseguinte, manipulando as equações (2.1) e (2.2), tem-se que:

$$v \cos \theta = \frac{L}{2} \frac{t_2 - t_1}{t_1 t_2} \quad (2.3)$$

Uma vez adquirido o valor da velocidade do fluido, é possível obter o valor de vazão, fazendo com que este método se torne válido para a medição de vazão em tubulações.

Segundo Andrade, Martinez et al. (2014), o método de medição de vazão ultrassônico apresenta um valor de precisão de medição de 0,5% a 2%, sendo um valor relativamente baixo quando comparado a outros métodos de medição. No entanto, sua fabricação tem um custo elevado e requer uma manutenção especializada, inviabilizando seu uso para casos de baixo custo.

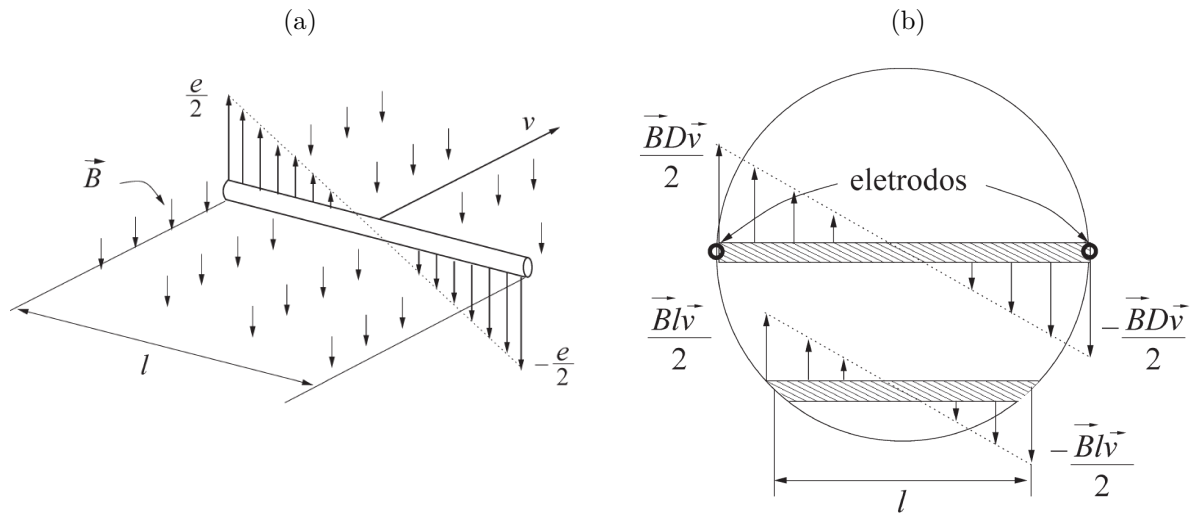
2.1.2 Medidor de vazão eletromagnético

A lei de indução formulada por Michael Faraday estabelece a relação entre o campo magnético $\vec{B}$ em um espaço, a velocidade $\vec{v}$ de um condutor de comprimento l e uma força eletromotriz e que é gerada (2.4):

$$e = (\vec{v} \times \vec{B})l \quad (2.4)$$

Uma representação dos vetores envolvidos na equação (2.4) pode ser visualizado na Figura 5a, onde a força eletromotriz é dividida em duas partes na extremidade do condutor. Na Figura 5b é representado outro caso de aplicação da lei de indução, onde há uma tubulação com dois eletrodos diametralmente opostos com uma distância D entre eles e, dentro dessa tubulação, partículas de água fluem com velocidade $\vec{v}$ com a presença de um campo magnético $\vec{B}$.

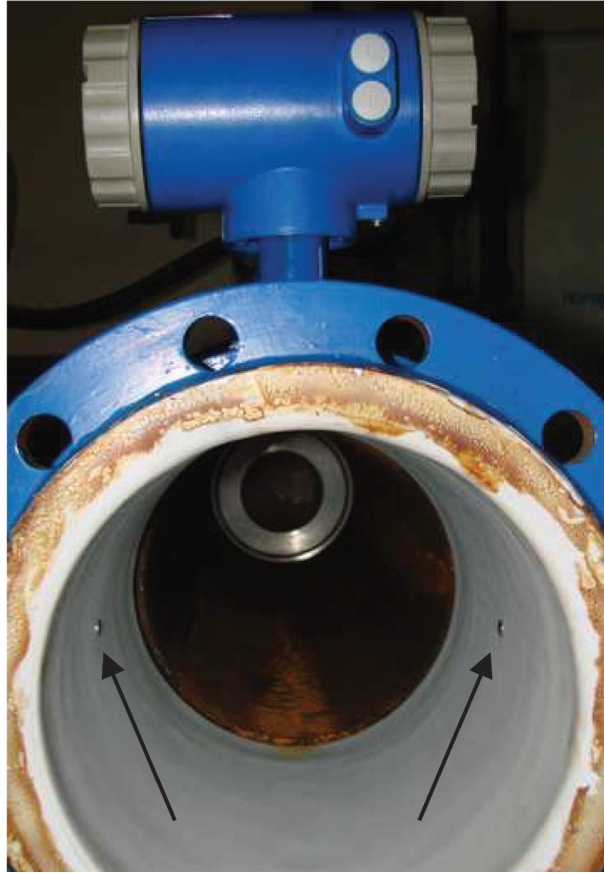
Figura 5 – Representação da Lei de Faraday sobre um fio condutor (a) e sobre eletrodos (b) de uma tubulação



Fonte: retirado de Aguirre (2013).

O caso apresentado na Figura 5b é utilizado na prática para medição de vazão em tubulações, uma vez que existe uma relação entre a força eletromotriz gerada e a velocidade das partículas de água. Um exemplo de medidor de vazão eletromagnético com seus eletrodos indicados pode ser visualizado na Figura 6. A medição de vazão eletromagnética tem características próximas com a medição de vazão ultrassônica, com precisão entre 0,5% a 2% e com alto custo de fabricação e manutenção (ANDRADE; MARTINEZ et al., 2014).

Figura 6 – Exemplo de medidor de vazão eletromagnético.



Fonte: retirado de Aguirre (2013).

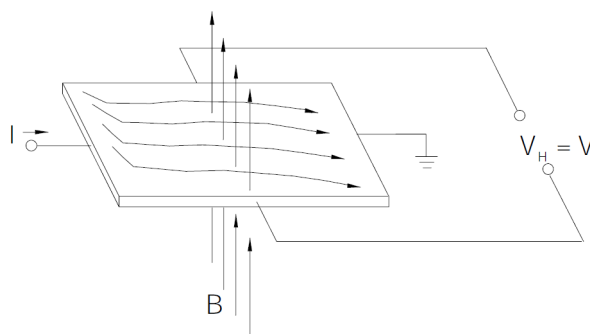
2.1.3 Medidor de Vazão de Efeito Hall

No projeto de um sistema de monitoramento de consumo de água é essencial a presença de um transdutor que descreva a vazão de água que passa por uma seção. Desse modo será abordado o princípio de funcionamento do sensor contido nesse sistema, que no caso do projeto é o de Efeito Hall (HONEYWELL, 2019).

Quando uma corrente elétrica fluindo em um condutor é exposta a um campo magnético, uma tensão é gerada perpendicularmente ao sentido da corrente e do campo magnético. Quando não há campo magnético presente, a distribuição da corrente sobre o condutor permanecerá uniforme e não haverá diferença de potencial na saída do sistema. Quando há um campo magnético sobre o condutor, uma força de Lorentz é exercida sobre a corrente fazendo com que a tensão V_H nos terminais seja diretamente proporcional ao produto vetorial entre a corrente no condutor $\vec{I}$ e o campo magnético $\vec{B}$ (2.5), gerando uma tensão nos terminais, como é representado na Figura 7.

$$V_H \propto \vec{I} \times \vec{B}, \quad (2.5)$$

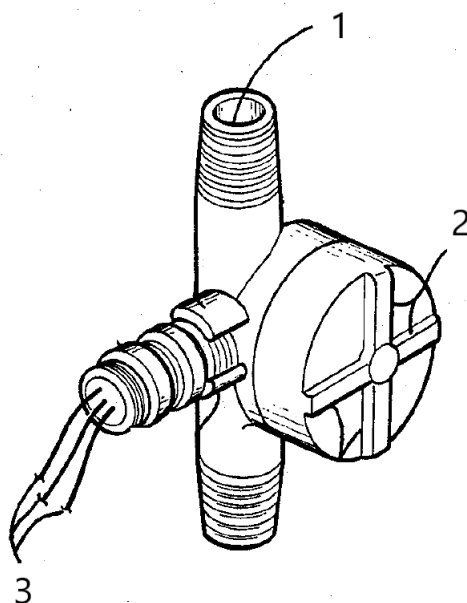
Figura 7 – Princípio do efeito Hall.



Fonte: retirado de: Honeywell (2019).

Com isso, foi possível criar um indicador que mede o fluxo de um fluido qualquer por meio de um transdutor de Efeito Hall. Nesse medidor, há um rotor magnético que gira de acordo com o fluxo de fluido que passa por ele, alterando o campo magnético no condutor e, conseqüentemente, gerando uma tensão no terminal que é conforme a frequência do rotor (ROASEN, 1989). A representação de um medidor de vazão de Efeito Hall típico pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 – Transdutor de vazão de Efeito Hall.



Fonte: adaptado de: Roasen (1989).

A obtenção do valor instantâneo de vazão do fluido se dá na seguinte forma: o fluido entra pelo encanamento do transdutor (1), passando pela caixa (2) no qual está inserido o rotor. Com a rotação do rotor e aplicando uma corrente nos fios (3), é gerada a tensão associada ao fluxo de fluido que passa pelo medidor gerando uma tensão entre um dos fios e o fio comum (3). O sinal desta tensão no domínio do tempo tem a forma de uma onda quadrada conforme a Figura 16, cuja frequência é proporcional à vazão que

passa pelo transdutor. O anexo A apresenta a relação dessa proporção entre a frequência e vazão do transdutor.

O medidor de vazão de efeito Hall se encaixa na classificação de medidores de vazão do tipo turbina, que por sua vez apresentam uma precisão entre 0,5% a 1%. No entanto, suas peças são móveis e a probabilidade de desgaste do equipamento é maior quando comparado a outros tipos de medidores de vazão (ANDRADE; MARTINEZ et al., 2014). Dentre os tipos de medidores observados, o que se apresenta com menor custo de compra é o medidor de efeito Hall, fazendo com que seja escolhido como um dos elementos deste trabalho.

2.2 O Microcontrolador ESP8266

Após a obtenção do sinal do transdutor de medição de vazão, é necessário uma MCU que tenha um custo acessível e capacidade de transmitir os dados processados via Wi-Fi para o servidor.

O microcontrolador ESP8266 é um produto da Espressif Systems (2018) e oferece a solução Sistema em um Chip, do inglês *System on a Chip* (SoC) com o recurso Wi-Fi altamente integrada para atender necessidades que demandam um uso eficiente de energia, uma arquitetura compacta e de desempenho confiável na aplicação da IoT. Com tais recursos, o ESP8266 é capaz de executar aplicativos de forma independente ou dependente de um host de MCU. Seu tamanho compacto facilita na minimização da Placa de circuito impresso (PCI) e sua arquitetura colabora na minimização do circuito externo.

Em relação ao seu desempenho, seu processador é o modelo *Tensilica L106 32-bit RISC*, que pode chegar a uma frequência de *clock* de 160MHz, fazendo com que este MCU chegue a um desempenho relativamente superior a outros MCUs disponíveis no mercado. A Memória de Acesso Aleatório, do inglês *Random Access Memory* (RAM) máxima do MCU é de 50kB a corrente média de operação é 80mA. No entanto, a principal escolha para a escolha deste MCU é seu baixo custo e seu módulo Fidelidade sem Fio, do inglês *Wireless Fidelity* (Wi-Fi) incluso no SoC.

Este microcontrolador pode ser usado em diversas aplicações, como em automação residencial, controle industrial, monitoramento, dentre outras (Espressif Systems, 2018). Além das aplicações citadas, se mostra viável o uso desse microcontrolador para o objetivo desse trabalho, visto este MCU é aplicável a todos os processos deste trabalho, sendo eles: a aquisição do sinal do transdutor, o processamento e o envio dos dados processados para o servidor.

2.3 Normalização de medidores de vazão

Segundo a COPASA (2021), existem algumas normas que regem a fabricação, instalação e especificação de hidrômetros, que estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Normas vigentes para normalização de medidores de vazão.

Norma	Descrição
NBR 8009	Hidrômetro taquimétrico para água fria até 15,0 m ³ /h de vazão nominal
NBR 8194	Medidores de água potável — Padronização
NBR NM 212	Medidores velocimétricos de água fria até 15 m ³ /h
NBR 14005	Medidor velocimétrico para água fria, de 15 m ³ /h até 1 500 m ³ /h de vazão nominal
INMETRO 246	Portaria nº 246 - hidrômetros utilizados para medição de consumo de água fria

Fonte: adaptado de: COPASA (2021)

Devido às limitações práticas para a normalização do medidor de vazão, foi utilizada as orientações do INMETRO (2018) para proficiência na medição de vazão e a ABNT (2009) que estabelece diretrizes para a medição de vazão de líquidos em dutos fechados. No entanto, em nenhum dos casos os instrumentos de medição foram calibrados conforme as normas correspondentes. Portanto, não é possível garantir que as medições realizadas estão corretas. Dessa forma, os valores encontrados por meio dessas normas e dos métodos utilizados para a calibração do transutor são estimados.

2.4 Orientações do INMETRO

Algumas orientações do INMETRO (2018) tem o objetivo de conduzir as atividades de ensaio de proficiência na medição de vazão. Dentre os métodos que foram apresentados na referência, destacam-se alguns métodos que são viáveis.

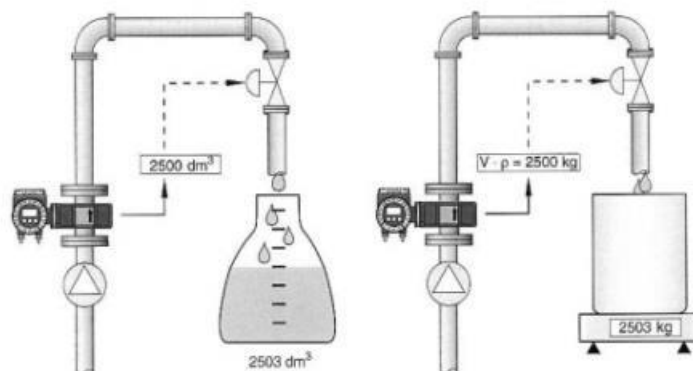
O método volumétrico consiste em medir o volume de fluido que foi preenchido em um recipiente em um intervalo de tempo (2.6).

$$q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t}, \quad (2.6)$$

onde q_v é a vazão volumétrica, ΔV é a variação de volume em um intervalo de tempo Δt .

Para que a vazão seja válida, é indispensável que a fonte de água seja com uma vazão constante para que a vazão média seja equivalente à vazão instantânea. Tal processo de medição pode ser esquematizado conforme a Figura 9.

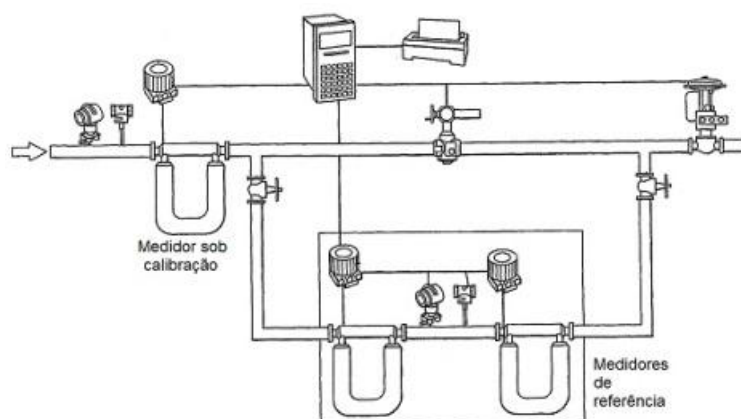
Figura 9 – Método de calibração volumétrico ou gravimétrico.



Fonte: retirado de: INMETRO (2018).

Outro método muito utilizado é o de comparação com outro medidor de referência, que é pautado em calibrar o transdutor de interesse comparando com outro transdutor já calibrado que é tomado como referência, conforme é demonstrado na Figura 10. Ambos métodos podem ser utilizados para a calibração e para a análise da qualidade do medidor, a fim de que, pela concordância entre os valores medido e de referência, seja possível averiguar de forma mais completa o sucesso da calibração.

Figura 10 – Método de calibração por comparação com o medidor de referência.



Fonte: retirado de: INMETRO (2018).

Segundo INMETRO (2016), vários parâmetros podem ser levados em consideração para observar o desempenho metrológico do transdutor, que por sua vez pode ser obtido por meio da medição da vazão. Dentre diversos parâmetros, os mais comuns de serem apresentados no campo de vazão são:

- o erro de medição;
- a tendência da medição;
- o fator medidor e

- os sinais de saída.

Considerando os parâmetros que serão apresentados, é possível projetar com mais facilidade o sistema de medição e calibração. A Tabela 2 apresenta exemplos de resultados que são obtidos na calibração de um medidor, cujo parâmetro de desempenho metrológico adotado foi o erro relativo percentual.

Tabela 2 – Modelo de resultados obtidos na calibração do medidor.

Vazão de calibração	Valor indicado pelo medidor	Valor de referência	Erro	Desvio padrão do erro	Incerteza expandida	Fator de abrangência	Graus de liberdade efetivos
$[m^3/s]$	$[m^3/s]$	$[m^3/s]$	$[\%]$	$[\%]$	$U[\%]$	k	V_{eff}
...	...	...	...	...	...	...	...

Fonte: retirado de: INMETRO (2018)

Vale ressaltar que não foi possível realizar a medição de todos os parâmetros apresentados na Tabela 2 devido a falta de informações e instrumentos. Um exemplo disso é a impossibilidade de se medir o valor de referência, já que não há um instrumento de referência calibrado para comparar seus valores de vazão (INMETRO, 2012).

2.5 Normas da ABNT - NBR 4185

A norma NBR ISO 4185 (ABNT, 2009) estabelece diretrizes para a medição de vazão de líquidos em dutos fechados por meio da medição da massa de um líquido coletada em um recipiente dado um intervalo de tempo. Observar esta norma é fundamental para a elaboração deste sistema, visto a viabilidade da montagem do sistema de medição, pelo fato deste método ser capaz de atingir alta exatidão e ser frequentemente usado como um método de calibração.

Para a medição de líquidos de dutos fechados, o procedimento pode ser realizado pelo método de pesagem estática ou pelo método de pesagem dinâmica, que são esclarecidos nos tópicos abaixo.

2.5.1 Pesagem estática

Segundo a ABNT, a pesagem estática consiste em:

método no qual a massa líquida de líquido coletado é deduzida das pesagens de tara e bruta feitas respectivamente antes e depois do líquido ser desviado para o tanque de pesagem, durante um intervalo de tempo medido.

Para isso, é necessário realizar os seguintes procedimentos:

1. Realizar a montagem de um sistema conforme a Figura 11, onde o medidor sob calibração é o próprio transdutor de de vazão de efeito Hall;

2. Determinar a massa do tanque de pesagem em seu estado inicial;
3. Abrir a válvula reguladora de vazão até que a vazão atinja valor constante;
4. Alterar o divisor para fluir o líquido em direção ao tanque de pesagem, acionando o cronômetro, realizando uma corrida convencional para determinar a vazão mássica anotando a diferença de massa e o intervalo de tempo, realizando o cálculo abaixo;

$$q_m = \frac{m_1 - m_0}{\Delta t} \times \frac{1 - \frac{\rho_a}{\rho_p}}{1 - \frac{\rho_a}{\rho_w}} = 1,00106 \times \frac{m_1 - m_0}{\Delta t}, \quad (2.7)$$

onde q_m é a vazão mássica, m_1 é a massa final do recipiente, m_0 é a massa inicial do recipiente, Δt é o intervalo de tempo da medição, ρ_a é a massa específica do ar em kg/m^3 , ρ_p é a massa específica do material dos pesos-padrão em kg/m^3 e ρ_w é a massa específica da água em kg/m^3 .

5. Realizar uma segunda corrida acionando o divisor n vezes (aproximadamente 25 vezes) brevemente, sem zerar o cronômetro ou a balança até atingir aproximadamente o mesmo tempo da corrida anterior;
6. Realizar uma terceira corrida repetindo passo 4 e realizar a média entre o valor obtido no passo 4 e neste passo;
7. Calcular o erro médio em segundos, que será compensado posteriormente para correção da medição do tempo de coleta:

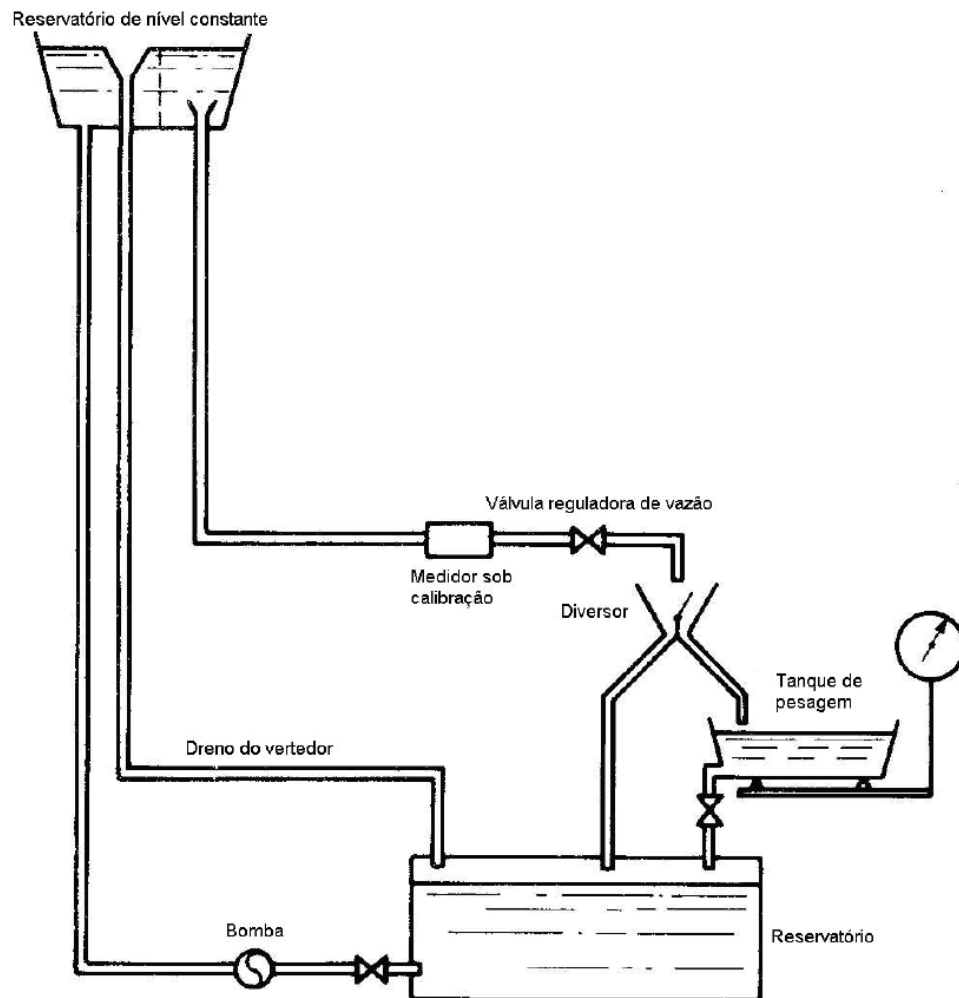
$$\Delta P = \frac{\Delta t}{n - 1} \left\{ \frac{q_m}{q'_m} \times \frac{\sum_{i=1}^n \Delta m_i / \sum_{i=1}^n t_i}{(m_1 - m_0) / \Delta t} - 1 \right\}, \quad (2.8)$$

onde ΔP é o erro médio em segundos, Δt é o intervalo de tempo da medição do passo 4, n é o número de vezes em que a medição foi realizada na segunda corrida, q_m é a vazão mássica encontrada na primeira corrida, q'_m é a vazão mássica média encontrada na segunda corrida, $\sum_{i=1}^n \Delta m_i / \sum_{i=1}^n t_i$ é a vazão determinada a partir da massa e tempo totalizados na segunda corrida com n segmentos, m_1 é a massa final do recipiente na primeira corrida e m_0 é a massa inicial do recipiente na primeira corrida.

8. Calcular a vazão final Q considerando a correção da medição do tempo de coleta:

$$Q = \frac{m_1 - m_0}{t - \Delta P}, \quad (2.9)$$

Figura 11 – Diagrama de uma instalação para calibração por pesagem estática.



Fonte: retirado de: ABNT (2009).

Vale observar que quanto menos houver erros por medição do tempo de coleta, menor será o valor de ΔP . Caso o valor de ΔP encontrado seja suficientemente pequeno, podemos desconsiderar os erros na medição do tempo de coleta, sendo apenas necessário uma medição convencional (passo 4) para calcular o valor da vazão mássica, fazendo com que $q_m = Q$.

2.5.2 Pesagem dinâmica

Segundo a ABNT, a pesagem dinâmica consiste em:

Pesagem dinâmica: Método no qual a massa líquida de líquido coletado é deduzida das pesagens feitas enquanto o líquido está sendo despejado no tanque de pesagem. (não é necessária a utilização de um diversor neste método).

Vale ressaltar que, conforme a Figura 12, está presente o tanque de pesagem e chaves acionadoras do cronômetro. O tanque de pesagem consiste em um sistema de

pesagem de braços, em que num lado do braço será despejado o líquido e o outro braço servirá de contrapeso com uma massa M_1 . A partir do momento em que a resistência do braço com o contrapeso for superada pelo braço em que o líquido estiver sendo despejado, o cronômetro deverá ser acionado automaticamente.

Para realizar este processo, é necessário realizar os seguintes procedimentos:

1. Realizar a montagem de um sistema conforme a Figura 12, onde o medidor sob calibração é o próprio transdutor de de vazão de efeito Hall;
2. Garantir que o tanque não possua líquidos e realizar a tara da pesagem;
3. Abrir a válvula reguladora de vazão;
4. Acionar ou verificar o cronômetro assim que a resistência do braço com o contrapeso for superada pelo braço do líquido que estiver sendo despejado;
5. Aguardar um instante de tempo e anotar a massa final e o intervalo de tempo entre a superação da resistência do contrapeso e a aquisição da massa final.
6. Calcular o erro médio ΔP em segundos, que será compensado posteriormente para correção na medição do tempo de coleta:

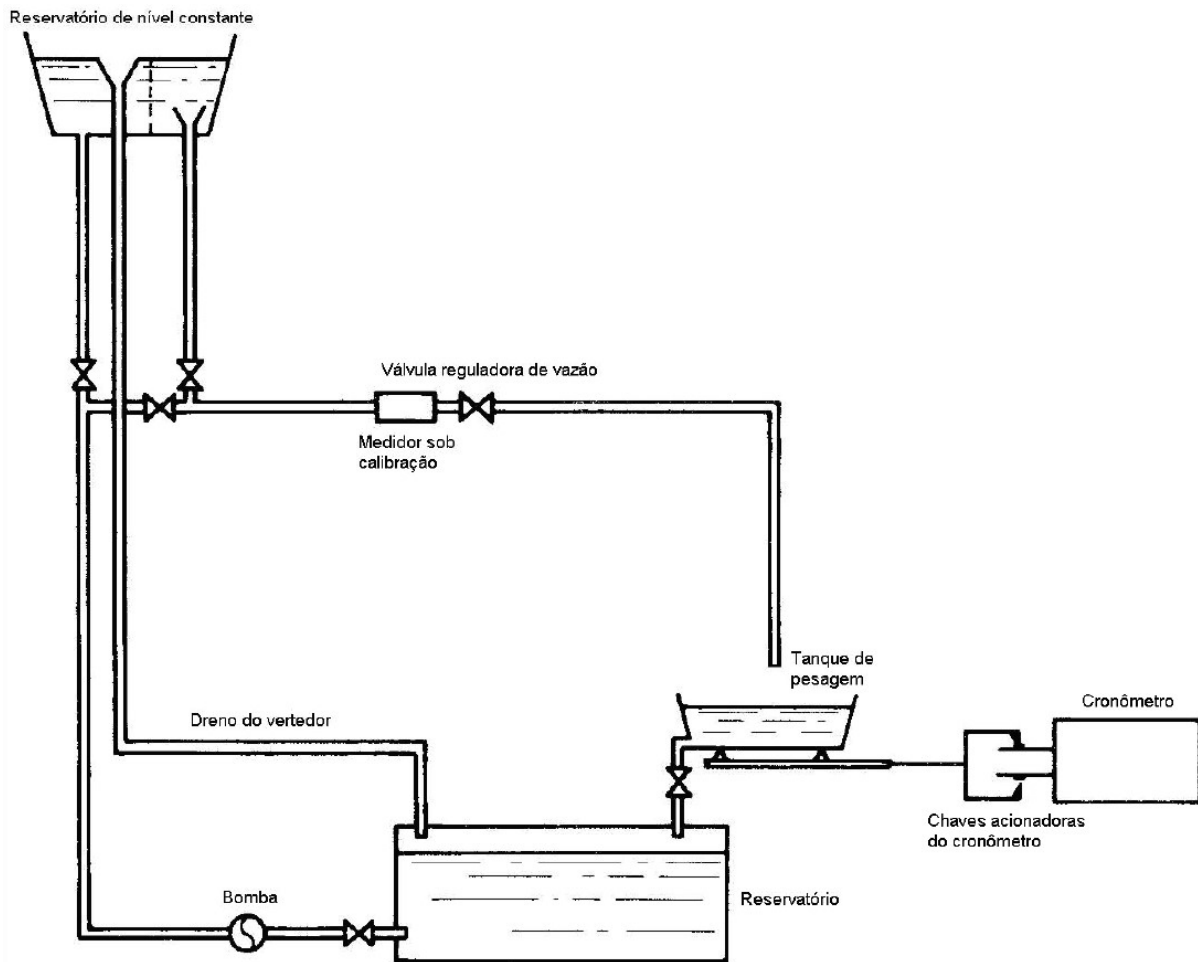
$$\Delta P = \left[\frac{6L\alpha}{g} \right]^{1/3} \left[\frac{\Delta m}{\Delta t} \right]^{2/3} \frac{(M_1 + \Delta m)^{1/3} - M_1^{1/3}}{\Delta m} \times \Delta t, \quad (2.10)$$

onde L é a distância percorrida pela extremidade do braço da balança, α é o ângulo do braço da balança em radianos, g é a aceleração da gravidade da terra (aproximadamente $9,8m/s^2$), Δm é a variação de massa após abertura da válvula, Δt é o intervalo de tempo, M_1 é a massa do braço e Δm é a variação de massa após a abertura da válvula.

7. Realizar o cálculo da vazão mássica considerando a correção da medição do tempo de coleta:

$$Q = 1,00106 \times \frac{\Delta m}{t - \Delta P}, \quad (2.11)$$

Figura 12 – Diagrama de uma instalação para calibração por pesagem dinâmica.



Fonte: retirado de: ABNT (2009).

2.6 Regressão linear simples - Calibração do transdutor

Uma vez que é possível medir a vazão real de um sistema, se faz necessário verificar se os valores declarados no *datasheet* do transdutor de vazão (anexo A) estão de acordo com o funcionamento real do transdutor, ou seja, verificar se o transdutor está calibrado. Para realizar tal verificação, faz-se viável a utilização do método de regressão linear simples, que tem como objetivo explorar as relações entre duas variáveis que são obtidas de forma empírica (Montgomery, Douglas and Runger, George, 2009). Uma vez realizadas as medições de ambas variáveis em diversas observações, é possível demonstrar a relação da variável preditora x e a variável de resposta Y por meio de uma função linear, sendo somado por um erro ϵ :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon. \quad (2.12)$$

onde β_0 é o coeficiente linear e β_1 é o coeficiente angular da reta.

Realizando diversas observações e registrando os valores de x e Y para cada observação, é possível estimar os valores de β_0 e β_1 de forma que o valor de ϵ seja mínimo para cada observação. Para isso, calcula-se as estimativas dos mínimos quadrados β_0 e β_1 :

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x}, \quad (2.13)$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n}}, \quad (2.14)$$

onde:

- x_i e y_i são os valores medidos de cada observação e
- $\bar{y} = (1/n) \sum_{i=1}^n y_i$ e $\bar{x} = (1/n) \sum_{i=1}^n x_i$ são as médias dos valores medidos.

Dessa forma, é possível apresentar em porcentagem da relação entre as variáveis Y e x . Para mensurar o quão adequado o modelo de regressão está, existe o coeficiente de determinação R^2 que é descrito pela equação 2.15.

$$R^2 = 1 - \frac{SQ_E}{SQ_R + SQ_E}, \quad (2.15)$$

Onde:

- $SQ_E = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2$ é a soma dos quadrados dos erros e
- $SQ_R = \sum_{i=1}^n (\hat{y} - \bar{y})^2$ é a soma dos quadrados da regressão.

Aplicando este método ao problema tratado, é possível considerar a variável x como a frequência medida no transdutor de vazão e a variável Y como a vazão medida pela pesagem estática (subseção 2.5.1) e, finalmente, obter a relação entre ambas.

2.7 Incerteza do ajuste

Uma vez calculados os coeficientes que ajustam uma reta às medições de (x, y) realizadas, é notado um erro de medição cujo valor é ϵ para cada observação. Este erro de medição gera uma incerteza no ajuste, ou seja, uma probabilidade de que os pontos (x, y) estejam dentro de uma certa região (AGUIRRE, 2013). Com isso, para uma medição da variável x , o valor de y real pode estar dentro do intervalo demonstrado pela equação (2.16) com uma certa probabilidade denominada P :

$$y = \hat{y} \pm u(y), \quad (2.16)$$

onde y é o valor real da variável resposta, $\hat{y}$ é o valor ajustado pela reta da variável resposta e $u(y)$ representa o intervalo de confiança em torno da variável resposta ajustada, que pode ser calculado pela (2.17):

$$u(y) = t_{\nu, P} \frac{s(y, x)}{\sqrt{N}}, \quad (2.17)$$

em que N é a quantidade de observações realizadas, $t_{\nu, P}$ é o valor de distribuição t de *Student* para ν graus de liberdade e uma probabilidade P , $s(y, x)$ é o desvio-padrão do erro de ajuste e N é a quantidade de observações realizadas. Vale ressaltar que $\nu = N - m - 1$, onde m é o grau do polinômio do ajuste. O valor de $s(y, x)$ pode ser calculado pela equação (2.18). O valor de distribuição t de *Student* pode ser verificado no anexo B.

$$s(y, x) = \frac{1}{\nu} \sum (y_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 x_i)^2, \quad (2.18)$$

2.8 Sistema de Armazenamento em Nuvem e *Dashboard*

Juntamente com o crescimento da Internet com o passar dos anos, as aplicações baseadas em armazenamento em nuvem vêm sendo utilizadas cada vez mais. Por meio desse método de armazenamento de dados, a confiabilidade de um sistema de monitoramento aumenta de maneira significativa, pois mesmo que os dispositivos do sistema permaneçam em ambientes desprovidos de energia elétrica, os dados já armazenados não serão perdidos, desde que os dados sejam enviados para a nuvem periodicamente (OLIVEIRA, 2017). Dessa forma, o dispositivo IoT transmite seus dados para a Internet e, consequentemente, outros dispositivos podem acessar esses dados. Com isso, os dados adquiridos pelo sistema de medição podem ser acessados de forma remota, desde que o usuário tenha acesso a esta nuvem por meio de uma plataforma.

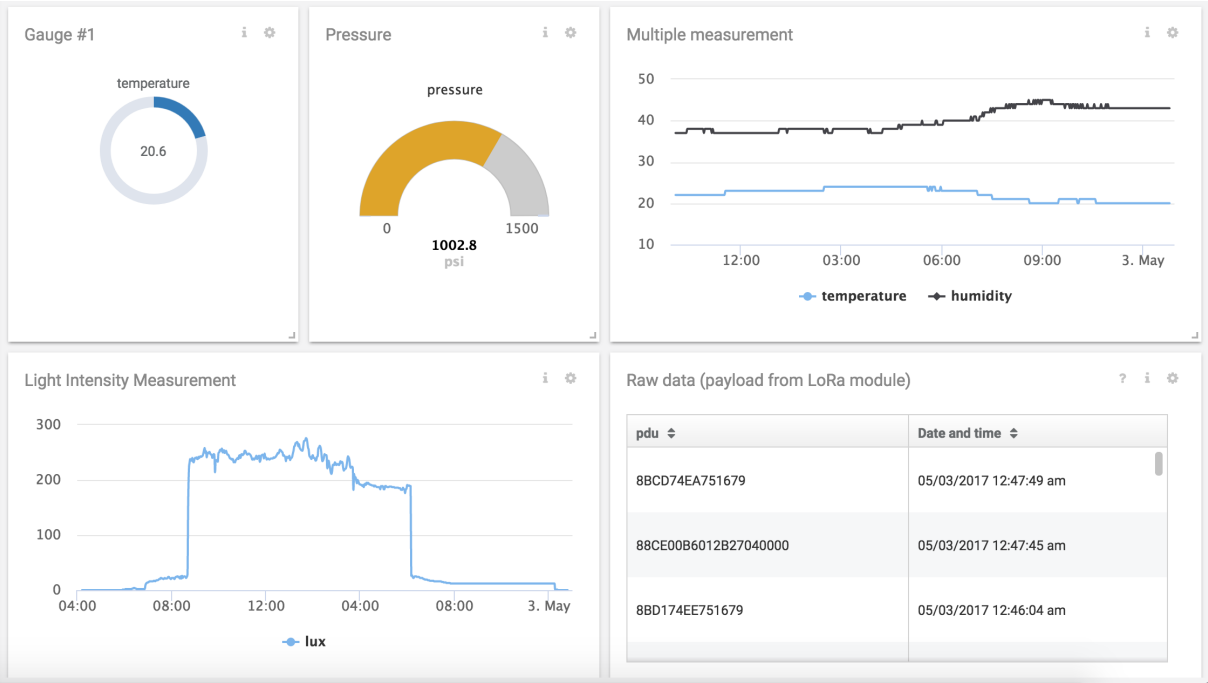
Neste trabalho foi utilizada uma plataforma já existente, chamada *Tago.io*, que é compatível com o microcontrolador utilizado. No entanto, foi necessário realizar a programação do MCU para estabelecer a conexão entre o cliente e o servidor, onde o cliente é o próprio MCU e o servidor é a *Tago.io*.

Por meio dessa plataforma, é possível não só armazenar os dados em nuvem, mas também configurar um *dashboard*, onde o gerenciador do aplicativo pode apresentar os dados para o usuário do aplicativo de diversas formas pré-estabelecidas por meio de painéis. Tal aspecto se apresenta desejável, já que é possível configurar o layout do aplicativo com facilidade.

Na Figura 13 é exemplificada um *dashboard* típica na plataforma. Na figura, pode-se perceber diversas formas de apresentação que, aos olhos do usuário, pode facilitar o

entendimento e a leitura dos dados. No caso de um sistema de monitoramento de consumo de água, essa grande variedade de informação pode ser utilizada de forma relevante, possibilitando ao usuário ter os valores reais de consumo de água do local desejado, bem como comparar os valores com períodos anteriores e planejar seus consumos futuros.

Figura 13 – Exemplo de *dashboard*.

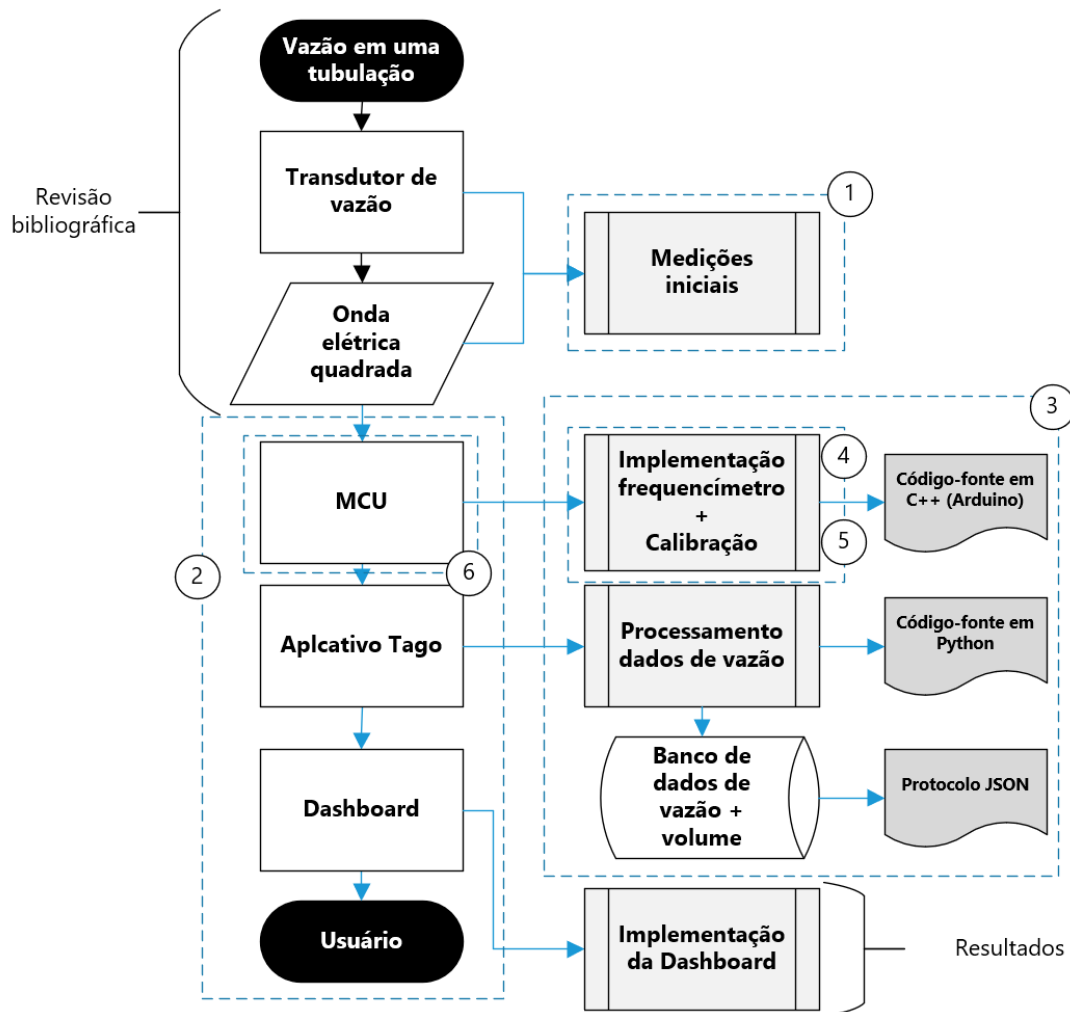


Fonte: elaborada pelo autor.

3 Desenvolvimento

Neste capítulo serão analisadas as etapas do sistema de monitoramento de consumo de água, baseado na sequência do fluxograma apresentado na Figura 14. Este fluxograma apresenta o processo desde a leitura da vazão na tubulação até a informação que é apresentada ao usuário, seja referente a uma medição instantânea ou a uma medição armazenada no histórico. Os retângulos e as setas apresentados no fluxograma sintetizam como é realizado o envio dos dados de vazão para o consumidor e os retângulos pontilhados apresentam quais processos foram detalhados em seus respectivos tópicos no capítulo de desenvolvimento, que foram numerados de 1 a 6.

Figura 14 – Fluxograma do desenvolvimento.



Fonte:

elaborada pelo autor.

O desenvolvimento foi pautado nas seguintes etapas: realização dos testes com o instrumento de medição de vazão (1), estabelecimento da conexão entre o cliente (o

usuário que acessará os dados via computador ou *smartphone*) e o servidor (plataforma *Tago.io*) (2), apresentação do funcionamento dos códigos-fonte (3), implementação do frequencímetro para a obtenção dos valores de vazão (4), processamento dos dados de vazão para obtenção dos dados de volume, calibração do transdutor de vazão (5) e a implementação de um *dashboard* para visualização e análise do usuário, onde esse *dashboard* será apresentado no capítulo 4. Vale ressaltar que faz parte deste trabalho a implementação de códigos-fonte que não são apresentados na íntegra neste documento. No entanto, os códigos-fonte foram disponibilizados em repositórios à comunidade do *GitHub* para consultas e possíveis trabalhos futuros, cujos endereços estão presentes no apêndice A. Os detalhes do desenvolvimento das etapas enumeradas serão apresentadas a seguir.

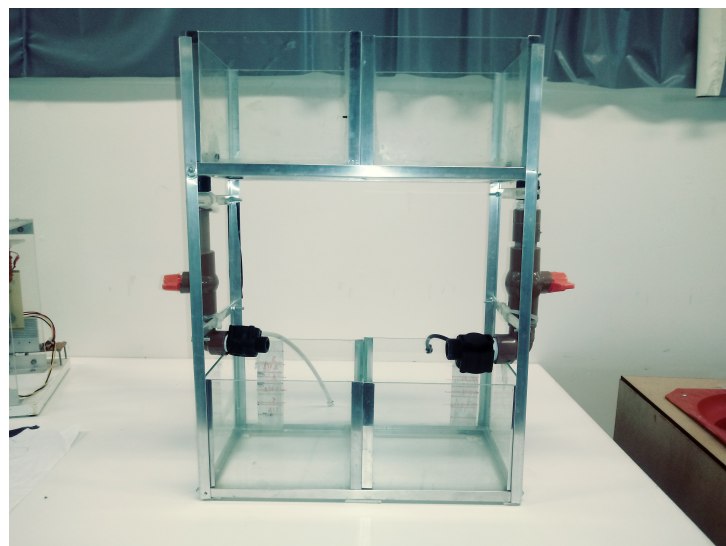
3.1 Medições iniciais do Instrumento

Nessa etapa do trabalho, foram efetuados alguns testes iniciais com o instrumento de medição de vazão que será utilizado (anexo A). Além disso, os dados do ensaio foram comparados aos dados apresentados no *datasheet*.

Conforme é apresentado no *datasheet*, a frequência do sinal de saída do transdutor é proporcional à vazão que passa pela turbina. Dessa forma, quanto maior é a vazão que passa pela turbina do transdutor, maior é a frequência, de forma a ser possível saber qual é a vazão instantânea que passa no transdutor.

Para verificar a conformidade do funcionamento do transdutor com o *datasheet* foi realizado o método de calibração volumétrica que foi apresentado na Figura 9. Para isso, utilizou-se uma estrutura onde é possível ajustar a vazão que passa pelo sensor e que é possível medir o volume total. Essa estrutura está presente em um dos laboratórios da universidade, e uma foto pode ser visualizada na Figura 15.

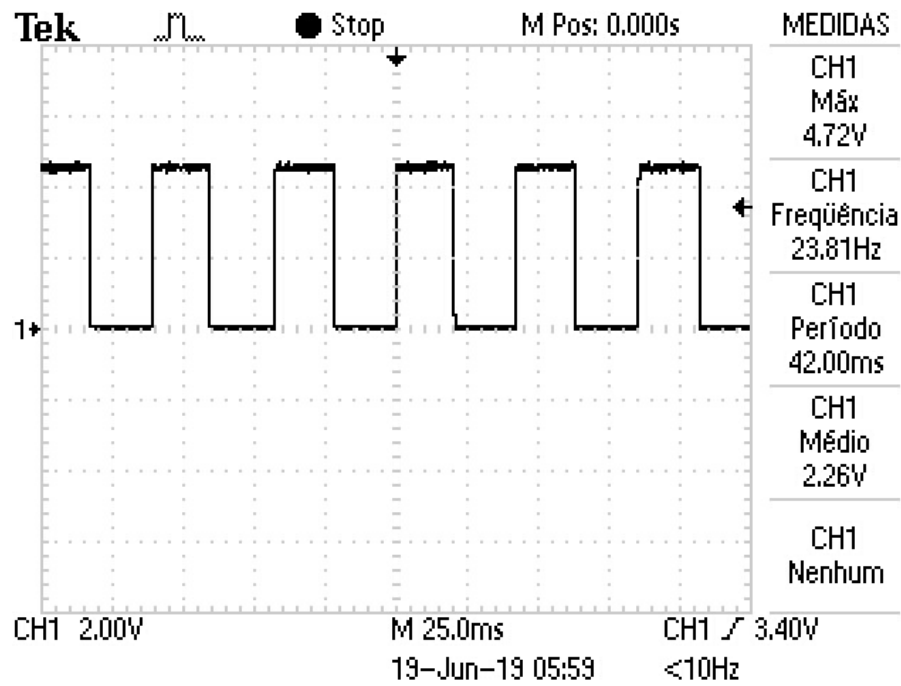
Figura 15 – Estrutura de testes do transdutor.



Fonte: elaborada pelo autor.

Os testes foram realizados da seguinte forma: o sensor foi alimentado com 5V e o sinal de saída do transdutor foi medido com o auxílio de um osciloscópio. Além disso, foram inseridos 2 litros de água no recipiente superior e, em seguida, a válvula foi aberta. A partir daí, foi monitorada a frequência, a forma de onda do sinal de saída do transdutor, bem como o tempo que foi gasto para encher 1 litro de água no recipiente inferior. Enquanto a água passava do recipiente superior para o recipiente inferior, era repostado mais água de forma que se mantivesse o volume de 2 litros no recipiente superior para se manter a pressão de coluna de água sobre o transdutor. Quando era atingido o volume de 1 litro de água no recipiente inferior, a frequência e o tempo era registrado, repetindo esse processo 6 vezes. Na Figura 16 é mostrado o sinal de saída do transdutor medido no osciloscópio.

Figura 16 – Sinal de saída do transdutor.



Fonte: elaborada pelo autor.

Para obter o valor de medição do transdutor foi medida a frequência da forma de onda. A partir disso, é possível obter o valor de vazão referente a frequência do sinal por meio do anexo A. Esses valores podem ser verificados na primeira e segunda coluna da tabela 3. No entanto, é necessário saber a vazão real que passa pelo transdutor para comparar com o valor verificado na frequência do sinal. Vale ressaltar que a vazão aplicada foi constante, visando realizar tal comparação e para manter os critérios do método de medição volumétrica que foi citado anteriormente.

Pelo fato da vazão ser constante pode-se utilizar a equação (3.1) para encontrar o valor de volume em litros que será adquirido de água pelo recipiente inferior durante 1

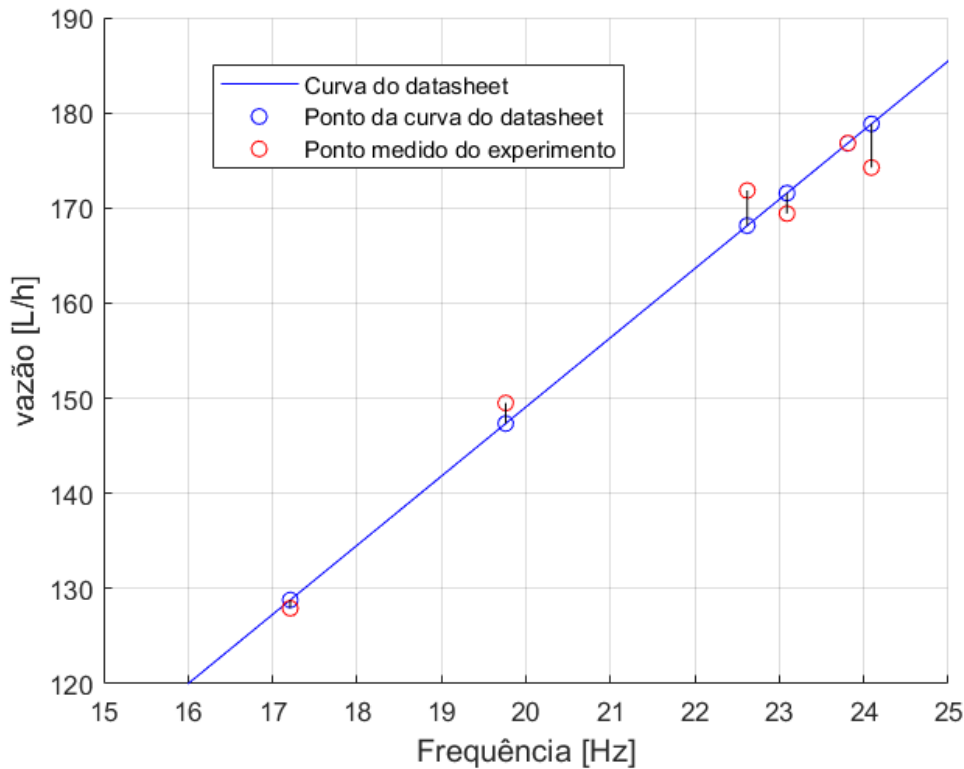
hora, ou seja, a vazão em litros por hora (L/h), onde Q é a vazão que passa pela turbina do transdutor em L/h , L a quantidade em litros medida no recipiente inferior e t o tempo em que a válvula esteve aberta.

$$Q = \frac{3600 \times L}{t} \quad (3.1)$$

Dessa forma é possível obter a vazão tendo o valor de L e t . Para os 6 experimentos, a válvula foi aberta até o recipiente inferior alcançar $1L$, e o tempo para cada experimento pode ser observado na terceira coluna da tabela 3. Assumindo que o tempo necessário para preencher o tanque é conhecido, encontra-se a vazão volumétrica, que está apresentada na quarta coluna da tabela 3.

Para visualizar o erro entre a curva do *datasheet* e a vazão calculada pelo volume preenchido no tanque inferior em um intervalo de tempo foi criado um gráfico, apresentando a distância entre os valores apresentados no *datasheet* e os valores medidos nos experimentos, conforme a Figura 17. O gráfico foi produzido interligando os pontos da curva do *datasheet*.

Figura 17 – Gráfico das observações comparadas com o *datasheet*.



Fonte: elaborada pelo autor.

Por meio desse gráfico é possível mensurar o erro de medição em comparação com a curva do *datasheet*, onde o erro ε em porcentagem é definido pela equação 3.2:

$$\varepsilon = \frac{Q_{med} - Q_{cur}}{Q_{cur}} \times 100 \quad (3.2)$$

onde Q_{med} é a vazão medida no experimento e Q_{cur} é a vazão na curva do *datasheet* para a frequência especificada, sendo ambas grandezas em L/h . Considerando a equação (3.2), é possível acrescentar na tabela o erro ε para cada medição, conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Dados das medições.

Frequência do sinal [Hz]	Vazão na curva [L/h]	Tempo de enchimento [s]	Vazão volumétrica Q [L/h]	Erro ε [%]
17,21	128,8000	28,14	127,9318	-0,6741
19,76	147,3455	24,08	149,5017	-1,4634
22,62	168,1455	20,95	171,8377	2,1959
23,09	171,5636	21,25	169,4118	-1,2543
23,81	176,8000	20,36	176,8173	0,0098
24,09	178,8364	20,66	174,2498	-2,5647

Fonte: elaborada pelo autor.

Observando a tabela 3, é possível verificar que os valores de erro se apresentaram no máximo em 2,56%, sendo menor que o erro apresentado no *datasheet*, que é 10%. No entanto, pela estrutura não apresentar uma disposição dos elementos que permitam uma alta vazão de água através do transdutor, não foi possível analisar todo o espectro de frequência do *datasheet*, pois o intervalo que foi analisado está entre os valores de 120 a 180L/h, uma vez que, segundo o *datasheet*, o transdutor tem capacidade de ler valores entre 120 e 840L/h. Isso fez com que fosse necessário um novo experimento, que será apresentado na seção 3.5. Além do novo experimento verificar se o transdutor está conforme as especificações do *datasheet*, ele auxiliará no processo de calibração do transdutor se necessário.

3.2 Conexão Cliente-Servidor

O MCU é responsável por receber o sinal do transdutor de medição de vazão, processá-lo e enviá-lo para o servidor via Wi-Fi na rede local e pela Internet. Para isso, o MCU foi programado na Ambiente de desenvolvimento integrado, do inglês *Integrated Development Environment* (IDE) *Arduino*, que é compatível com o ESP8266. Toda a documentação dessa IDE foi acessada no site da empresa (ARDUINO, 2021).

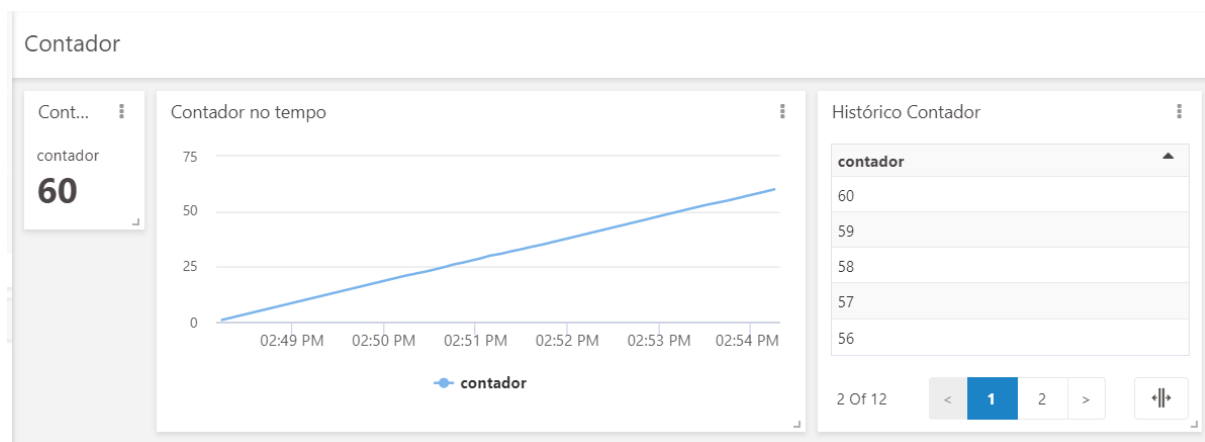
Além disso, para estabelecer a conexão entre o cliente (MCU) e o servidor (Tago.io), foi necessário programar o MCU para solicitar à Interface de programação de aplicações, do inglês *Application Programming Interface* (API) da Tago.io a permissão para transição de dados. Esta por sua vez é realizada por Protocolo de Transferência de Hipertexto, do inglês *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP) e autenticada por um *token*, que é um código gerado na plataforma Tago.io e que pode ser acessado no site.

Para averiguar o sucesso da conexão, a plataforma é capaz de retornar uma *string* (cadeia de caracteres), apresentando o estado da conexão e os dados que foram recebidos. Essa *string*, por sua vez, deve ser estruturada na programação para que seja acessada pela porta serial e ser visualizada no computador. No entanto, vale ressaltar que os dados reais de interesse são enviados para o servidor, viabilizando o acesso com facilidade pelo usuário por um dispositivo.

É interessante observar também que foi necessário incluir bibliotecas adicionais na IDE, cujos arquivos e informações foram colhidos no *Github*, que é uma plataforma de na qual diversos programadores utilizam e compartilham desenvolvimento de códigos e bibliotecas de diversas IDEs.

Com o intuito de averiguar o sucesso da implementação da conexão entre o módulo e o servidor da *Tago.io*, foi criado um programa que comuta o led do MCU, e o número de vezes que esse Led foi comutado durante um período de tempo é enviado para o servidor, possibilitando ao usuário visualizar o estado da conexão via porta serial do MCU e os valores no banco de dados do servidor pelo aplicativo. Já os valores que são armazenados no banco de dados são apresentados no *dashboard* do aplicativo, conforme a Figura 18.

Figura 18 – *Dashboard* do teste de conexão cliente-servidor.



Fonte: elaborada pelo autor.

Observando o estado da rede e o *dashboard*, pode-se perceber o sucesso da implementação da conexão cliente-servidor, tornando possível o envio de dados do MCU para o servidor via Wi-Fi para a Internet. Vale ressaltar que a implementação desse contador não pertence ao projeto do sistema de monitoramento de água, servindo apenas para testar a conexão com o servidor.

No entanto, como o único dado enviado para o servidor foi o valor do contador, o instante de tempo apresentado no gráfico foi o instante em que o servidor recebeu os dados, e não o instante em que o valor do contador foi alterado. Com isso, foi possível perceber em alguns instantes os atrasos oriundos de vários fatores, como colisão de pacote, congestionamento da rede e outros mais. Todavia, esse problema é facilmente solucionado caso o servidor envie também o horário do envio do valor do contador. Esse horário pode

ser obtido facilmente estabelecendo conexão com um API que é capaz de enviar o horário atual.

3.3 Códigos-fonte

Tomando como referência o fluxograma representado na Figura 14, pode-se perceber que o processo que é dependente de códigos-fonte se divide em 3 etapas: implementação do frequencímetro, calibração do transdutor e processamento dos dados de vazão. Para esses processos foram utilizadas as seguintes bibliotecas:

- *ESP8266WiFi*;
- *WiFiClient* ;
- *ESP8266WebServer* ;
- *ESP8266mDNS* ;
- *DNSServer* ;
- *WiFiManager* ;
- *TimeLib* e
- *WiFiUdp*.

Vale ressaltar que todos os códigos-fonte podem ser consultados na íntegra nos *links* disponibilizados no apêndice A e as documentações das bibliotecas citadas podem ser encontradas no GitHub (2021).

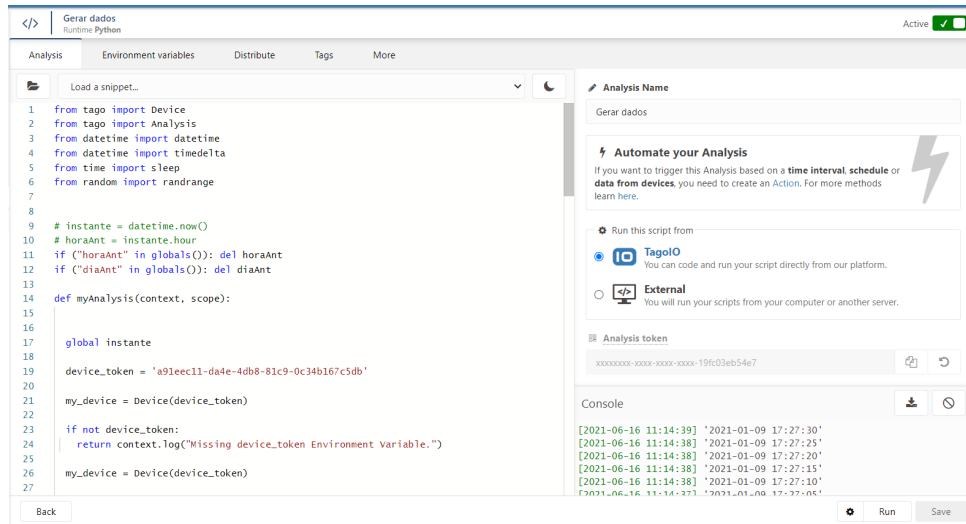
No primeiro processo que é a implementação do frequencímetro, o código que está armazenado no MCU é responsável por detectar os pulsos da onda elétrica gerada pelo transdutor conforme será apresentado na seção 3.4. A partir da obtenção do valor numérico da frequência gerada pelo transdutor, é possível iniciar o segundo processo.

O segundo processo tem como função adquirir o valor de frequência e, por meio da calibração, converter este valor de frequência para valores de vazão, pela relação da equação encontrada na regressão linear simples que será detalhada na subseção 3.5.3. Tanto o primeiro quanto o segundo processo foram implementados em linguagem C++ na IDE *Arduino*.

Já no terceiro processo que é o processamento dos dados de vazão consiste em obter os valores obtidos de vazão em tempo real pelo servidor da *Tago.io* e realizar o cálculo de integração, somando cada valor e acumulando-os de forma horária e total para finalmente ser apresentado no *dashboard* ao usuário. A implementação deste processo foi realizada via programação em linguagem *Python* na IDE que existe dentro da plataforma *Tago.io*

chamada *Analysis*. Por meio dessa IDE, é possível acionar a rotina de programação no instante desejado pelo usuário de forma automática. A janela recurso é apresentada na Figura 19.

Figura 19 – Janela do recurso *Analysis*.



Fonte: elaborada pelo autor.

3.4 Implementação do freqüencímetro

Visto que a medição da vazão é proporcional à frequência do sinal apresentada nas saídas do transdutor de vazão, o MCU deve ser capaz de detectar esta frequência de forma que posteriormente esta frequência seja convertida para termos de vazão. Para isso, o ciclo de repetição infinito do módulo realiza uma contagem de pulsos da onda quadrada em um intervalo de tempo. Tendo em mãos os valores de número de pulsos e o intervalo de tempo, é possível calcular a frequência média do sinal, conforme a equação (3.3).

$$f = \frac{n}{\Delta t}, \quad (3.3)$$

onde f é a frequência média, n é o número de pulsos analisado em um intervalo de tempo Δt que é constante, sendo 5s. Vale ressaltar que quanto maior o tempo analisado, menos preciso será o valor da frequência medida, pois haverá um erro entre a frequência instantânea e a média. No entanto, quanto menor o intervalo de tempo analisado, o MCU terá um número maior de cálculos para realizar e para enviar para o servidor. Com isso, é necessário que o desenvolvedor tenha um entendimento amplo da aplicação para que este intervalo seja escolhido da melhor forma.

3.5 Calibração do transdutor de vazão

Conforme o que foi concluído na seção 2.4, devido às limitações da montagem, não foi possível realizar a leitura de todo o espectro de frequência para posteriormente realizar a calibração. Além deste problema encontrado no método de medição e calibração do procedimento anterior, não é considerado os erros de medição, como por exemplo o intervalo entre a abertura e fechamento das válvulas, ou a diferença de pressão do reservatório, ao contrario da norma NBR 4185 que está referenciada na seção 2.5 e que considera tais variáveis.

Visto que é possível realizar a medição da vazão real de um sistema conforme a seção 2.5, é possível realizar a calibração do transdutor de vazão, que inicialmente pode não se apresentar em conformidade com o *datasheet* (anexo A). Dessa forma, é necessário encontrar a relação entre as informações reais medidas, que são elas:

- A vazão medida pelo método de pesagem estática e
- A frequência do sinal medida no transdutor de vazão.

Para aferir se as informações do *datasheet* estão corretas, é necessário aplicar a regressão linear simples tratada na seção 2.6, realizando um número considerável de observações, fazendo com que todo o espectro de frequência de leitura do transdutor seja analisado. Com isso, foi montado um sistema conforme a NBR 4185 (ABNT, 2009) com o objetivo de realizar as aferições que posteriormente serão utilizadas na calibração do transdutor, onde pode ser visualizado na Figura 20.

Figura 20 – Sistema montado para calibração do transdutor.



Fonte: elaborada pelo autor.

A montagem desse sistema exigiu a compra de alguns materiais, cujas descrições e valores podem ser consultados na tabela 4.

Tabela 4 – Lista de materiais para o sistema de medição

Qtd	Descrição	Valor unit (R\$)	Valor total (R\$)
1	Adesivo plástico 17g	2,88	2,88
3	Joelho PVC soldável 25mm	1,67	5,01
1	Tubo PVC soldável 20mm	15,75	15,75
1	Tubo PVC soldável 25mm	21,78	21,78
4	Registro esférico soldável	10,76	43,04
2	Balde de manteiga	7,00	14,00
1	Durepox 50g	5,50	5,50
1	Motor de indução monofásico 1/4cv	710,00	710,00

Fonte: elaborada pelo autor

3.5.1 Correções na medição do tempo de coleta

Uma vez com o sistema montado, primeiramente foi realizado o procedimento método de pesagem estática (subseção 2.5.1), objetivando o cálculo das correções na medição do tempo de coleta, conforme a NBR 4185. Vale ressaltar que não foi possível implementar o diversor que foi especificado no método. Porém, a válvula de controle foi

utilizada para realizar a alteração de fluxo no tanque de pesagem. As informações das observações para o cálculo podem ser verificadas na tabela 5.

Tabela 5 – Observações para correção na medição do tempo de coleta

i	m_i (Kg)	t_i (s)	Q_m (L/s)
1ª corrida (convencional)			
0	10,560	60,050	0,176
2ª corrida (segmentada)			
1	1,875	10,570	0,178
2	1,090	5,900	0,185
3	0,925	5,540	0,167
4	0,850	5,170	0,165
5	1,290	7,550	0,171
6	1,270	7,170	0,177
7	1,101	5,900	0,187
8	0,460	2,650	0,174
9	0,875	4,810	0,182
10	0,915	5,010	0,183
3ª corrida (convencional)			
11	10,650	60,270	0,1768921

Fonte: elaborada pelo autor

Substituindo os valores obtidos na equação 2.8:

$$\Delta P = \frac{\Delta t}{n-1} \left\{ \frac{q_m}{q'_m} \times \frac{\sum_{i=1}^n \Delta m_i / \sum_{i=1}^n t_i}{(m_1 - m_0) / \Delta t} - 1 \right\} \Rightarrow \quad (3.4)$$

$$\Delta P = \frac{60,050}{10-1} \left\{ \frac{0,1760399}{0,1768115} \times \frac{10,651/60,270}{10,560/60,050} - 1 \right\} \approx 0,00367 \text{ segundos}$$

Visto que para medições de aproximadamente 60 segundos o tempo de correção da medição é próximo de zero, é possível desconsiderar os erros nas medições por tempo de coleta. Isso faz com que seja possível realizar as observações para calibração de maneira simplificada, realizando apenas o passo 4 da subseção 2.5.1.

3.5.2 Observações para calibração

A calibração do transdutor consiste em relacionar as grandezas de frequência do sinal por meio do frequencímetro e a vazão verificada por meio do método de pesagem estática. Para encontrar a função que relaciona as grandezas, foi utilizada a regressão linear simples, fundamentada no tópico 2.6.

O primeiro passo é realizar as observações da frequência (variável preditora f) e da vazão (variável de resposta Q). As informações com as observações realizadas podem ser visualizadas na tabela 6.

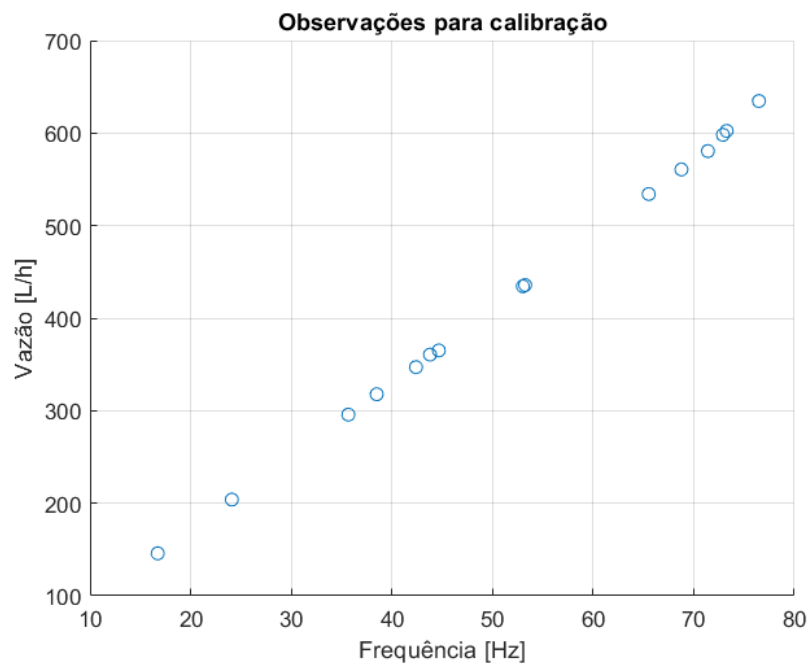
Tabela 6 – Observações para calibração do transdutor

i	m (Kg)	t (s)	f (Hz)	Q (L/h)
1	10,750	61,040	76,480	634,683
2	2,450	60,550	16,727	145,819
3	9,000	60,720	65,525	534,162
4	5,335	60,500	38,492	317,791
5	9,740	60,460	71,405	580,568
6	7,275	60,340	53,016	434,501
7	3,440	60,790	24,091	203,934
8	6,125	60,450	44,668	365,151
9	4,963	60,480	35,672	295,730
10	6,045	60,410	43,787	360,620
11	5,830	60,530	42,397	347,105
12	9,390	60,350	68,776	560,726
13	7,335	60,660	53,246	435,773
14	10,030	60,430	72,902	598,151
15	10,250	61,320	73,274	602,399

Fonte: elaborada pelo autor

Dessa forma, visualizando graficamente as observações na Figura 21, podemos perceber a forte tendência da relação linear entre a frequência e a vazão.

Figura 21 – Gráfico das observações para calibração.



Fonte: elaborada pelo autor.

3.5.3 Aplicação da regressão linear simples

Para realizar os cálculos pertinentes à regressão linear simples, foi utilizado o *software MATLAB*, conforme a sua documentação respectiva (MATLAB, 2021). Aplicando a regressão, foram encontrados os coeficientes linear β_0 e angular β_1 que são iguais à:

$$\beta_0 = 6,695736111405135$$

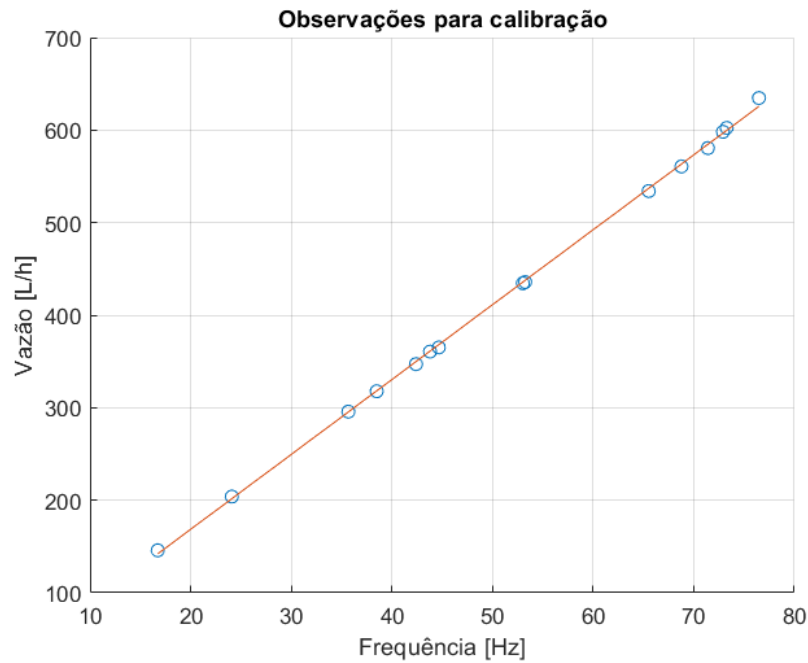
$$\beta_1 = 8,093565973634647$$

Consequentemente, a equação que relaciona a frequência medida e a vazão verificada é:

$$Q = \beta_0 + \beta_1 f \Rightarrow Q = 6,695736111405135 + 8,093565973634647 f \quad (3.5)$$

A equação da reta juntamente com os pontos observados podem ser visualizados na Figura 22.

Figura 22 – Gráfico da reta de calibração.



Fonte: elaborada pelo autor.

Para verificar a relação entre a frequência e a vazão, foi calculado o coeficiente de determinação, que é igual à:

$$R^2 = 0.999504679114738$$

3.5.4 Cálculo da incerteza do ajuste

Utilizando o método apresentado na seção 2.7, é calculado o intervalo de confiança $u(y)$ para uma probabilidade de $P = 95\%$. Visto que foram realizadas 15 observações, o

valor de N é igual à 15 e o valor dos graus de liberdade ν equivale a 13. Conforme calculado na subseção 3.5.3, sabe-se que $\beta_0 = 6,695736111405135$ e $\beta_1 = 8,093565973634647$ e é sabido o valor das observações verificando a Tabela 6.

Uma vez apresentado os valores necessários para o cálculo de $u(y)$, calcula-se o desvio-padrão do erro de ajuste:

$$\begin{aligned} s(Q, f) &= \frac{1}{\nu} \sum (Q_i - \hat{\beta}_0 - \hat{\beta}_1 f_i)^2 \\ &= 3,541 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Verificando o valor de $t_{\nu,P}$ na tabela de distribuição t de *Student* apresentada no anexo B, para a probabilidade $P = 95\%$ e $\nu = 13$, é encontrado que $t_{\nu,P} = 2,160$. Em seguida, calcula-se o valor do intervalo de confiança $u(Q)$:

$$\begin{aligned} u(Q) &= t_{\nu,P} \frac{s(Q, f)}{\sqrt{N}} \\ &= 2,160 \cdot \frac{3,541}{\sqrt{15}} \\ &= 1,975 \end{aligned} \quad (3.7)$$

Por conseguinte, é confirmado que, com 95% de probabilidade, a indicação real em vazão do transdutor está na faixa de valores indicada na equação (3.5.4):

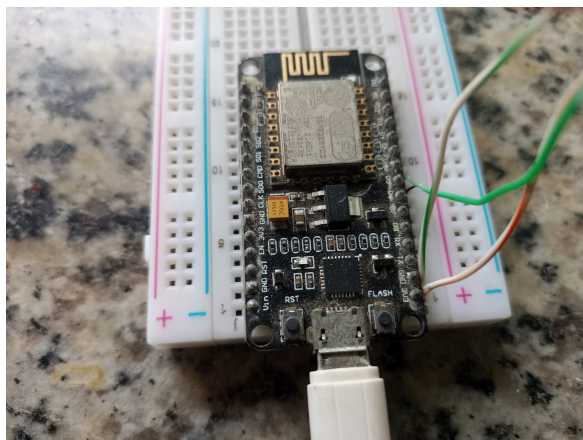
$$Q_{real} = \hat{Q} \pm 1,975L/h$$

3.6 Protótipo do sistema de medição

Para a realização das medições tanto no processo de calibração do transdutor quanto na etapa de medição a longo prazo, o MCU foi instalado em uma *proto-board* para que fosse facilitado a conexão dos fios entre o MCU e o transdutor. O protótipo consiste na instalação conforme a Figura 23 sem a implementação de uma PCI, pois o trabalho foi focado principalmente nas outras etapas citadas na seção 1.2, abrindo oportunidades a trabalhos futuros desde sistema focado no aperfeiçoamento do protótipo.

Figura 23 – Instalação do MCU (a) e montagem do sistema de medição (b)

(a)



(b)



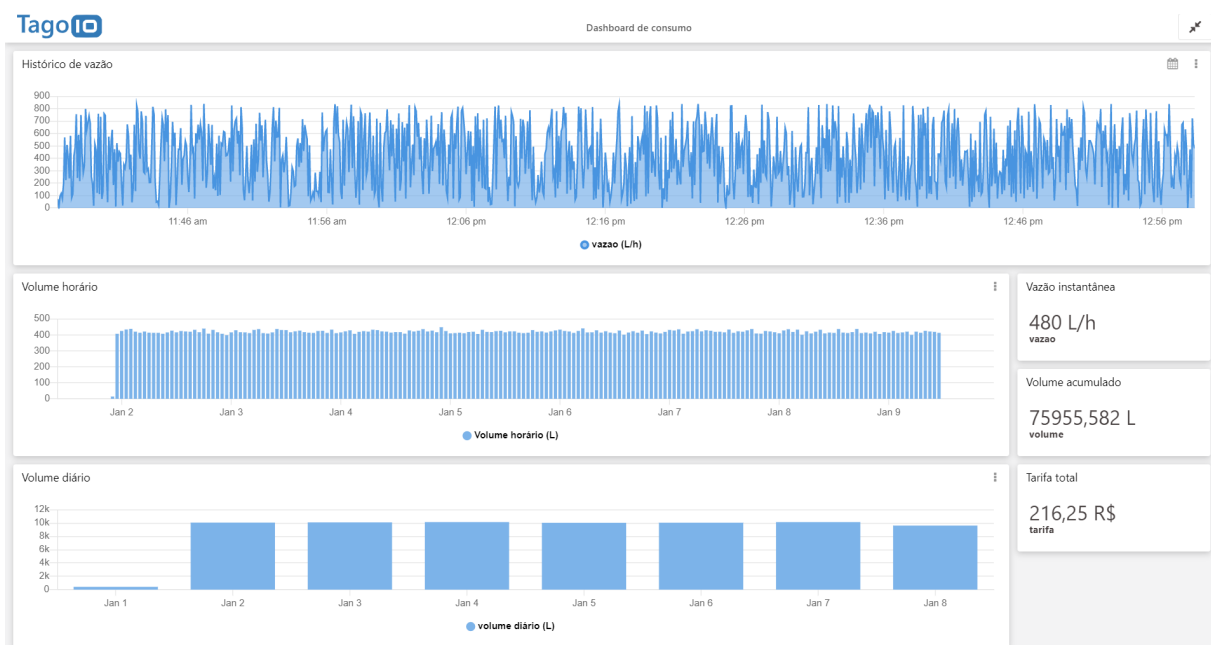
Fonte: elaborada pelo autor.

Vale ressaltar que a instalação deste protótipo foi para uso a curto prazo, visto que os valores de vazão podem ser gerados via simulação na plataforma de maneira mais rápida.

4 Resultados

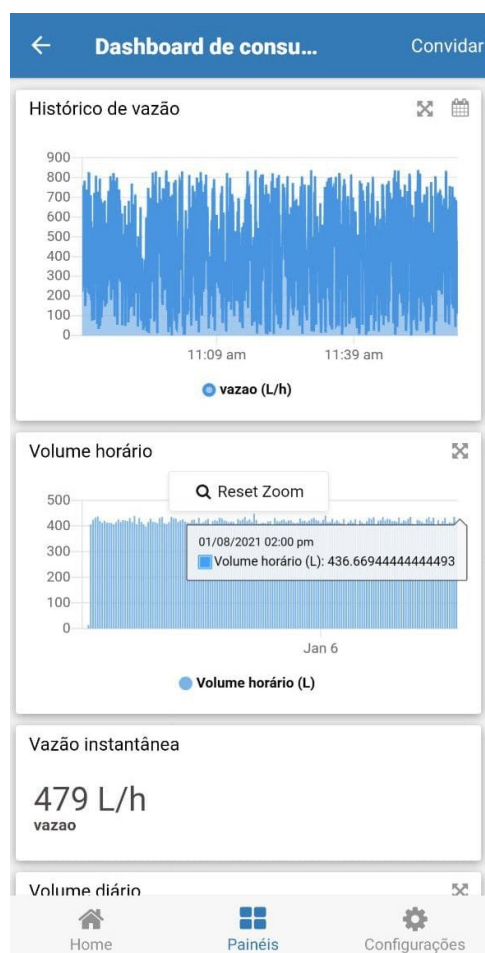
Neste capítulo será apresentado os resultados obtidos pela aquisição e processamento dos dados obtidos desde o primeiro processo do fluxograma de desenvolvimento, conforme a Figura 14. Este resultado se apresenta no monitoramento completo por parte do usuário por meio do *dashboard* da *Tago.io*, onde é possível visualizar dados fundamentais para dimensionamento e análise do consumo de água em uma determinada tubulação ou equipamento. O *dashboard* pode ser visualizada na Figura 24.

Figura 24 – *Dashboard* visualizada no computador.



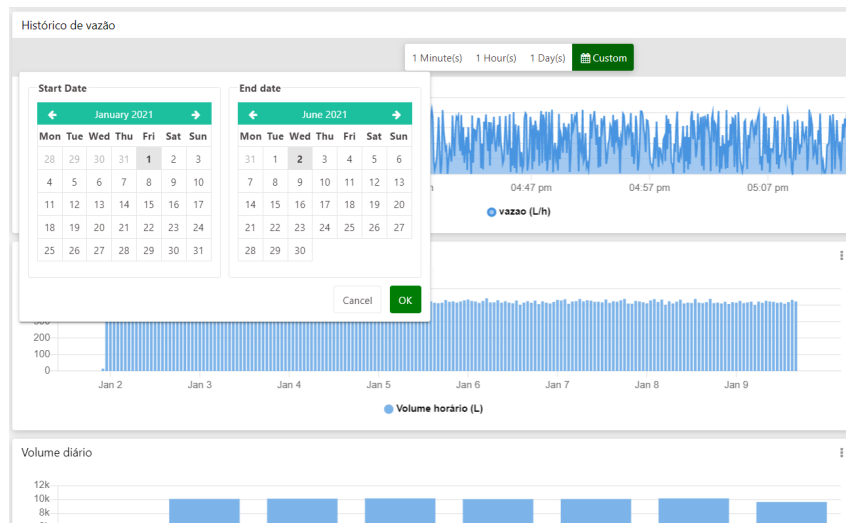
Fonte: elaborada pelo autor.

Vale ressaltar que o *dashboard* pode ser visualizado por diversos usuários e por diversos dispositivos diferentes, como um *smartphone* por exemplo. A visualização do *dashboard* via *smartphone* é apresentada na Figura 25.

Figura 25 – *Dashboard* visualizada no *smartphone*.

Fonte: elaborada pelo autor.

A plataforma permite também que os dados sejam acessados de diversas formas, como em intervalos específicos, conforme as figuras 26 e 27. Esta configuração pode ser realizada de várias maneiras, como por exemplo a seleção de datas específicas ou o *zoom* no gráfico apresentado na tela.

Figura 26 – Configurações de intervalo de visualização do *Dashboard*.

Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 27 – Configurações de formato de visualização do *Dashboard*.

The screenshot shows the 'Data Range & Format' configuration panel. It includes a section for 'X axis' with a 'Use X axis as reference line for' dropdown set to 'Time'. Below this are 'Plot' options: 'Real Time' (selected), 'By variable', and 'Fixed Time'. There are also 'Start date' and 'End date' pickers with options like '1 hour', '1 Day', '1 Year', 'All', and 'Custom'. A 'Start date custom' field is set to '99 years'. At the bottom, there is a 'Y axis' section and a 'Maximum number of points to be displayed' field set to '1000'.

Fonte: elaborada pelo autor.

Devido ao grande número de dados necessários para a apresentação completa do *dashboard*, os dados apresentados nas figuras foram gerados via programação em *Python* de forma aleatória. No entanto, os dados que foram gerados aleatoriamente foram somente os dados de vazão, ou seja, aqueles que são gerados de forma equivalente na MCU, evitando desperdícios de água e otimizando o tempo de aquisição dos dados para apresentação do *dashboard*.

Conforme as figuras 24 e 25, pode-se perceber que o *dashboard* permite ao usuário a obtenção das seguintes informações:

- O histórico de vazão em litros por hora;

- O histórico de volume que foi acumulado em cada hora (volume horário);
- O histórico de volume que foi acumulado em cada dia (volume diário);
- O valor numérico da vazão em tempo real;
- O valor numérico do volume acumulado desde o início da leitura, podendo ser reinicializado;
- O valor numérico da tarifa a ser paga pelo usuário, considerando uma taxa de 0,002847 R\$/L.

5 Conclusões

Durante o processo prático deste trabalho, pôde-se perceber a coerência entre o referencial teórico dos elementos e o que foi apresentado na prática. No entanto, as observações que foram observadas no primeiro sistema não foram suficientes, pois não foi possível analisar todo o espectro de frequência do *datasheet*. Além disso, foi necessário o estudo de duas normas: as normas do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) e da ABNT, onde as normas da ABNT se apresentaram mais adequadas à aplicação, visto que esta contém detalhes e especificações que permitiram uma calibração e medição mais exata do transdutor de vazão.

Para a calibração, foi utilizado o método da regressão linear simples, que, por meio das observações realizadas, pôde aferir um coeficiente de determinação de 99,9%, apresentando um alto ajuste da curva às amostras. Além disso, foi calculada a incerteza do ajuste, que para uma probabilidade de 95%, foi encontrado que a indicação real em vazão do transdutor varia em $1,975L/h$ para mais ou para menos.

O sistema apresentado possui apenas um transdutor, sendo possível a leitura de vazão de apenas uma tubulação. No entanto, o MCU comporta várias portas que podem ler a vazão de mais transdutores, sendo necessária a configuração dessas portas e também da plataforma.

No que diz respeito ao processo final que é a apresentação do *dashboard*, por meio dos processos anteriores, foi possível implementar o acesso por parte do usuário aos dados, sendo possível acessar todo o histórico de vazão e volume em escalas diferentes. No entanto, existem algumas limitações definidas pela própria plataforma *Tago.io* para usuários que a utilizam gratuitamente, sendo elas:

- Entrada de 7.000 dados por hora no servidor;
- Saída de 25.000 dados por hora do servidor;
- Execução de 250 *scripts* por hora;
- Armazenamento de 800.000 dados;
- Envio de 10 mensagens de texto por mês ao usuário;
- Envio de 100 e-mails por mês ao usuário.

Com isso, não foi possível gerar proporções de dados suficientes para visualização a nível mensal ou anual. No entanto, o processo se apresenta modularizado, sendo possível substituir posteriormente a plataforma *Tago.io* por outra que tem maior desempenho e, por conseguinte, diminuir o intervalo de tempo entre as medições e aumentar a capacidade do histórico do sistema de medição.

5.1 Trabalhos futuros

A implementação de um sistema de medição abre uma enorme variedade de trabalhos futuros a serem realizados para aprimoramento da experiência do usuário, bem como a preparação do produto para produção em grande escala. Visando viabilizar o aprimoramento deste sistema, foi criado um repositório na plataforma *GitHub*, que é uma aplicação de controle de versão que agrega repositórios de desenvolvimento onde, uma vez que o projeto é iniciado na plataforma, várias pessoas podem contribuir de forma simultânea e conjunta, além de possuir ferramentas que permitem ao gestor do projeto monitorar e administrar o andamento do desenvolvimento dos arquivos. O endereço *web* do repositório está disponível no apêndice A.

Uma das ações que é sugerida para aprimoramento deste sistema é o desenvolvimento de um sistema de inicialização do MCU, permitindo ao usuário reinicializar o sistema de forma segura e dando opções ao mesmo de configurações mais amplas, como o ajuste do intervalo de aquisição da vazão e ajuste da tarifa de consumo de água. Outra melhoria possível no *firmware* do MCU é a adição do recurso de notificações ao usuário em situações de interesse, como por exemplo o uso de água acima do limite em um curto espaço de tempo, um pequeno uso constante de água em longos períodos como um possível vazamento ou a configuração de conexão com o roteador local.

No que diz respeito ao *hardware*, o desenvolvimento de uma PCI e de um acabamento adequado permitirá a apresentação deste sistema como um produto que poderá ser até mesmo disponibilizado no mercado. Para isso, a melhoria do *hardware* e do *software* deverão ser realizadas conjuntamente, visto que todas as configurações e ajustes necessários deverão ser possíveis pelo próprio usuário, abrindo exceções somente para casos de atualizações do MCU.

Outro fator que se apresentou passível de melhoria é a plataforma onde é apresentado o *dashboard*. Como foi relatado no início do capítulo 5, há uma série de limitações definidas pela plataforma para usuários que a utilizam gratuitamente, fazendo com que o usuário tenha que utilizar o sistema de forma limitada. Além disso, devido à plataforma ser um produto de terceiros, o sistema se expõe a um risco de eventuais alterações que podem comprometer o uso de forma sistemática de todo o processo desde o envio de dados do MCU. Para solucionar esse problema, o ideal é a criação de um servidor próprio para a aquisição e armazenamento dos dados que são adquiridos pelo transdutor de vazão. Desta forma, além de assegurar a confiabilidade do sistema, a criação de um servidor próprio permite ao desenvolvedor a criação de um *dashboard* mais completo e de forma que atenda os interesses do usuário de maneira melhorada.

Referências

- ABNT. *Medição de vazão de líquidos em dutos fechados — Método gravimétrico*. 4185:2009. ed. Rio de Janeiro, RJ, 2009.
- AGUIRRE, L. A. *Fundamentos da Instrumentação*. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.
- ANDRADE, L. A. de; MARTINEZ, C. B. et al. Estudo comparativo dos métodos de medição de vazão - uma aplicação em comissionamento de turbinas hidráulicas. 2014.
- ARDUINO. *Documentação Arduino*. 2021. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/reference/pt/>>.
- CARNEIRO, C. R. *Desenvolvimento de um protótipo de um sistema automático para medição individualizada de água em apartamentos*. 2018.
- COPASA. *Copasa orienta - hidrômetros*. 2021. Disponível em: <<https://www.copasa.com.br/wps/portal/internet/copasa-orienta/conteudos/hidrometros-justica-acima-de-tudo>>.
- Espressif Systems. *ESP8266EX Datasheet*. [S.l.], 2018. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf>.
- FILTSOFF, R. B.; MARTINS, D. M. S. Sistema de monitoramento e controle do consumo de água residencial. Elsevier, 2018. Disponível em: <<https://seer.cesjf.br/index.php/cesi/article/download/1633/1235>>.
- GITHUB. *Website do GitHub*. 2021. Disponível em: <<https://github.com/>>.
- GUBBI, J.; BUYYA, R. et al. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, Elsevier, v. 29, p. 1645–1660, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X13000241>>.
- HONEYWELL. *Hall Effect sensing and application*. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://sensing.honeywell.com/hallbook.pdf>>.
- INMETRO. *Vocabulário Internacional de Metrologia*. 2012. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf>.
- INMETRO. *Orientações para definição das partes significativas do escopo para fins de elaboração do plano de participação em atividades de ensaio de proficiência em vazão e velocidade de fluidos*. Doq-cgcre-085. Rio de Janeiro, RJ, 2016. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/credenciamento/organismos/doc_organismos.asp?tOrganismo=CalibEnsaio>.
- INMETRO. *Orientações para a apresentação e expressão de resultados de calibração de medidores de vazão e totalizadores de fluidos*. Doq-cgcre-057. Rio de Janeiro, RJ, 2018. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/credenciamento/organismos/doc_organismos.asp?tOrganismo=CalibEnsaio>.

MATLAB. *Linear Regression*. 2021. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/matlab/data_analysis/linear-regression.html>.

Montgomery, Douglas and Runger, George. *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*. 4. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 2009.

OLIVEIRA, S. *Internet das Coisas com ESP8266, Arduino e Raspberry PI*. 1. ed. São Paulo, SP: Novatec, 2017.

ROASEN, L. O. *Fluid Flow Indicator Including a Hall Effect Transducer*. [S.l.], 1989. Disponível em: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/f3/a2/0c/1e5fb6ce38752f/US4507976.pdf>>.

SANTOS, B. P.; SILVA, L. A. et al. Internet das Coisas: da Teoria à prática. *Minicursos SBRC-Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, Sociedade Brasileira de Computação, 2006. Disponível em: <<https://homepages.dcc.ufmg.br/~mmvieira/cc/papers/internet-das-coisas.pdf>>.

UNESCO. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2019. 2019. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367276_por?posInSet=2&queryId=fa5e9bfb-2f91-44ad-8dab-065598a7cadf>.

VENDEMIATTI, C. *Sistema remoto para monitoramento do consumo de água em tempo real*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, 2020. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/202386/vendemiatti.c.me.soro.pdf.pdf?sequence=4&isAllowed=y>>.

APÊNDICE A – Endereços *Web* dos repositórios *GitHub*

A.1 Repositório dos códigos

<<https://github.com/ThiagoRabeloFraga/tcc.consumo.arduino>>

ANEXO A – datasheet YF-S201

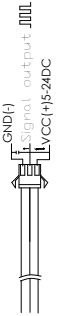
YIFA the plastics Ltd
Prodcut Introduction

1.Modle:YF-21

2.Product Name:Hall sensor

3.Flow Range: 1-30L/MIN

4.(1)Connection Method



(2)Voltage Range 3.5-24VDC, Pluse Characteristic:f=7Q(L/MIN).

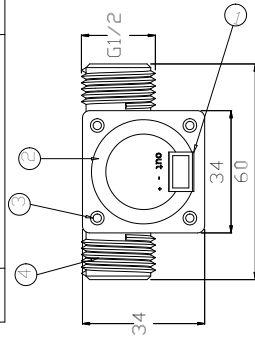
(3)Extent of error:±5%.

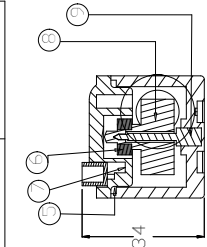
(4)Flow-Pulse

2L/MIN=16HZ 4L/MIN=32.5HZ 6L/MIN=49.3HZ
8L/MIN=65.5HZ 10L/MIN=82HZ

5.Bom

No.	Item	Material	Qty.
1	Connection wire		1
2	Bonnet	PA	1
3	Screw		4
4	Valve body	PA	1
5	Leak press valve		1
6	Magnet		1
7	Hall		1
8	Impeller	POM	1
9	Rustless steel axis	SUS304	1
10			
11			





Flow-Pulse

Flow-Curve

Connection method

Flow Range:100L/H-/1800H-L/H

Flow (L/H)	Frezq.(HZ)	Erro range
120L/H	16	±10
240L/H	32.5	
360L/H	49.3	
480L/H	65.5	
600L/H	82	
720L/H	90.2	

L/H

840

720

600

480

360

240

120

0

16

32.5

49.5

65.5

82

90.2

Freq.(HZ)

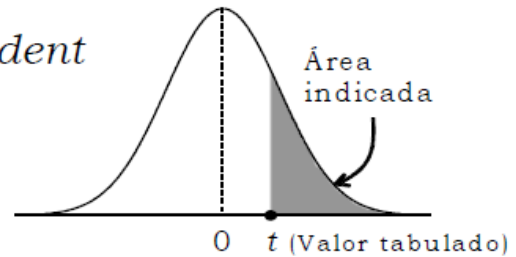
Connection method:



Black
Yellow
Red

ANEXO B – Tabela de distribuição t

Distribuição t de Student



gl	Área na cauda superior								
	0,25	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0025	0,001	0,0005
1	1,000	3,078	6,314	12,71	31,82	63,66	127,3	318,3	636,6
2	0,816	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	14,09	22,33	31,60
3	0,765	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	7,453	10,21	12,92
4	0,741	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	5,598	7,173	8,610
5	0,727	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	4,773	5,894	6,869
6	0,718	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	4,317	5,208	5,959
7	0,711	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,029	4,785	5,408
8	0,706	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	3,833	4,501	5,041
9	0,703	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	3,690	4,297	4,781
10	0,700	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	3,581	4,144	4,587
11	0,697	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	3,497	4,025	4,437
12	0,695	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,428	3,930	4,318
13	0,694	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,372	3,852	4,221
14	0,692	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,326	3,787	4,140
15	0,691	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,286	3,733	4,073
16	0,690	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,252	3,686	4,015
17	0,689	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,222	3,646	3,965
18	0,688	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,197	3,610	3,922
19	0,688	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,174	3,579	3,883
20	0,687	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,153	3,552	3,850
21	0,686	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,135	3,527	3,819
22	0,686	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,119	3,505	3,792
23	0,685	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,104	3,485	3,768
24	0,685	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,091	3,467	3,745
25	0,684	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,078	3,450	3,725
26	0,684	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,067	3,435	3,707
27	0,684	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,057	3,421	3,689
28	0,683	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,047	3,408	3,674
29	0,683	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,038	3,396	3,660
30	0,683	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,030	3,385	3,646
35	0,682	1,306	1,690	2,030	2,438	2,724	2,996	3,340	3,591
40	0,681	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	2,971	3,307	3,551
45	0,680	1,301	1,679	2,014	2,412	2,690	2,952	3,281	3,520
50	0,679	1,299	1,676	2,009	2,403	2,678	2,937	3,261	3,496
z	0,674	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	2,807	3,090	3,291

Nota: A coluna em destaque é a mais usada.



ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “Sistema de monitoramento de consumo de água de baixo custo com comunicação Wi-Fi aplicado à IoT” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 16 de agosto de 2021.

Thiago Rabelo Fraga
Nome completo do(a) aluno(a)