

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

MATEUS FAVARON

**ESTUDO, PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM MEDIDOR DE VAZÃO
ELETROMAGNÉTICO APLICADO A INSTRUMENTAÇÃO E AUTOMAÇÃO DE
PROCESSOS.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2019

MATEUS FAVARON

**ESTUDO, PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM MEDIDOR DE VAZÃO
ELETROMAGNÉTICO APLICADO A INSTRUMENTAÇÃO E AUTOMAÇÃO DE
PROCESSOS.**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina TCC 2, do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Wagner Endo

CORNÉLIO PROCÓPIO
2019



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia de Controle e Automação



FOLHA DE APROVAÇÃO

Mateus Favaron

Estudo, projeto e implementação de um medidor de vazão eletromagnético aplicado a instrumentação e automação de processos.

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 13:30hs do dia 26/06/2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação no programa de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Wagner Endo - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Francisco de Assis Scannavino Junior - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Kleber Romero Felizardo - (Membro)

Dedico este trabalho aos meus pais Aparecida Vielli e Flávio R. Favaron Jr e meu irmão Fábio Favaron por todo o incentivo e apoio durante os anos de faculdade e também aos meus grandes amigos da faculdade, que permitiram que essa caminhada fosse mais alegre.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a universidade, todos os funcionários, coordenação, professores e em especial ao meu orientador Prof. Dr. Wagner Endo, pelo apoio, sabedoria, conhecimento e conselhos que me levaram a esta conquista.

Aos meus amigos que fizeram destes anos especiais e os melhores da minha vida.

Gostaria também de agradecer à minha família, pelo apoio total que forneceram, e apesar de todas as dificuldades, me ajudaram e me proporcionaram a oportunidade de viver momentos inesquecíveis e a realização do meu sonho.

A todos os que por algum motivo, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

FAVARON, Mateus. **Estudo, projeto e implementação de um medidor de vazão eletromagnético aplicado a instrumentação e automação de processos.** 2019. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia de Controle e Automação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2019.

Em processos industriais, a vazão está entre as variáveis mais medidas, possuindo os mais variados princípios de funcionamento para a medição. Os medidores de vazão eletromagnéticos correspondem a uma grande parcela dos medidores de vazão utilizados, por apresentar confiabilidade e exatidão da medição, não possuir nenhuma obstrução na passagem do fluido, capacidade de executar a medição de líquidos com sólidos em suspensão, perda de carga desprezível, grande faixa de operação. O trabalho consiste do estudo, construção e implementação de um protótipo de um medidor eletromagnético de vazão, voltado para instrumentação e automação de processos em geral. É apresentado o método de construção de um protótipo, meios de confecção, aquisição de sinal e desenvolvimento de circuitos eletrônicos, além disso, uma estrutura de testes é apresentada permitindo ao protótipo receber dois diferentes valores de vazão, testes também são realizados, encontrando alguns problemas, propondo e aplicando soluções. Para a aquisição do sinal, geração de resultados e apresentação gráfica foi utilizado o software *MATLAB*. Ao final do trabalho é desenvolvida a parametrização do equipamento utilizando como referência nas medições um fluxômetro do tipo turbina modelo YF-S201 realizando testes de comparação entre os dois equipamentos, o protótipo desenvolvido e o equipamento de referência. Análises estatísticas dos resultados também são apresentadas para validação da precisão do protótipo.

Palavras-chave: Medidor. Eletromagnético. Vazão. Instrumentação. Automação. Controle.

ABSTRACT

FAVARON, Mateus. **Study, project and implementation of an electromagnetic flow meter applied to instrumentation and automation of processes**. 2019. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia de Controle e Automação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2019.

In industrial processes, the flow is between variables and measures, has several types of operating principles for a measurement. The electromagnetic flowmeters correspond to a large portion of the flowmeters used, present the reliability and accuracy of the measurement, have no obstruction in the passage of the fluid, the ability to perform a measurement of liquids with suspended solids, the pressure drop negligible, large range of operation. The work consists in the study, construction and implementation of a prototype electromagnetic flow meter, focused on instrumentation and process automation in general. The method of construction of a prototype is presented, presenting means of confection, acquisition of signal and development of electronic circuits, in addition, a structure of tests is presented allowing to the prototype to receive two different values of flow and tests are also realized, finding some problems and proposing solutions. For the acquisition of the signal, generation of results and graphical presentation, *MATLAB* software was used. At the end of the work the parameterization of the equipment is developed using as reference in the measurements a turbine type flowmeter model YF-S201 and thus carrying out tests of comparison between the two equipments, the developed prototype and the reference equipment. Statistical analyzes of the results are also presented for validation of the prototype precision.

Keywords: Meter. Electromagnetic. Flow. Instrumentation. Automation. Control.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comportamento da tensão para diferentes valores de fluxo magnético e vazão.....	24
Gráfico 2 – Relação entre as variáveis no fluxo magnético.....	25
Gráfico 3 – Simulação 1 realizada no primeiro ensaio.....	40
Gráfico 4 – Simulação 2 realizada no primeiro ensaio.....	41
Gráfico 5 – Simulação 1 realizada no segundo ensaio.....	42
Gráfico 6 – Simulação 2 realizada no segundo ensaio.....	43
Gráfico 7 – Tensão gerada pela vazão Q1.....	44
Gráfico 8 – Tensão gerada pela vazão Q2.....	45
Gráfico 9 – Dados e linha de tendência obtida para o sistema.....	47
Gráfico 10 – Comparação entre a vazão do protótipo com a referência para Q1	48
Gráfico 11 – Comparação entre a vazão do protótipo com referência para Q2...	49
Gráfico 12 – Comparação entre a vazão do protótipo com a referência para variação com bolhas.....	50
Gráfico 13 – Intervalo utilizado para a análise estatística para a vazão Q1.....	51
Gráfico 14 – Intervalo utilizado para a análise estatística para a vazão Q2.....	51
Gráfico 15 – Intervalo utilizado para a análise estatística para vazão com presença de bolhas.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados obtidos a para a vazão Q1 a partir da vazão Q2.....	46
Tabela 2 - Valores calculados de vazão para cada valor de tensão.....	46
Tabela 3 - Análise estatística do protótipo para as vazões Q1 e Q2 isentas de bolhas.....	52
Tabela 4 - Análise estatística do protótipo para as vazões Q1 e Q2 com a presença de bolhas.....	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquemático de funcionamento do medidor eletromagnético.....	18
Figura 2 - Configuração do circuito amplificador.....	20
Figura 3 - Diagrama de blocos do circuito de medição.....	22
Figura 4 – Bobinas montadas.....	26
Figura 5 – Tubo de medição em silicone com eletrodos e conexões instalados	29
Figura 6 – Estrutura de sustentação do protótipo em MDF.....	30
Figura 7 – Montagem final da estrutura do protótipo.....	30
Figura 8 – Montagem final da estrutura de testes e calibração.....	31
Figura 9 – Circuito de ponte H desenvolvido para o protótipo.....	32
Figura 10 – Circuito amplificador de instrumentação AD620.....	33
Figura 11 – Circuito amplificador e condicionador do sinal dos eletrodos.....	34
Figura 12 – Regulados e inversos de tensão desenvolvido para o protótipo.....	34
Figura 13 – Placa eletrônica final do protótipo.....	35
Figura 14 – Fluxômetro de referência utilizado.....	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Motivação.....	12
1.2	Objetivos.....	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
2.1	Considerações sobre a variável vazão.....	14
2.2	Considerações sobre medidores de vazão.....	15
2.3	Medidor de vazão eletromagnético.....	17
2.4	Instrumentação eletrônica com amplificadores operacionais.....	19
3	METODOLOGIA.....	22
3.1	Análise da linearidade e características de transferência das variáveis estudadas.....	22
3.2	Bobinas geradoras de campo magnético.....	24
3.3	Montagem do protótipo e estrutura de testes e calibração.....	27
3.4	Circuito amplificador e condicionador de sinal e gerador de frequência.....	32
3.5	Aquisição de dados.....	35
3.6	Sensor de fluxo de água modelo YF-S201b.....	36
3.7	Filtro média móvel.....	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1	Primeiro ensaio.....	39
4.2	Segundo ensaio.....	41
4.3	Calibração do protótipo.....	43
5	CONCLUSÃO.....	54
	REFERÊNCIAS.....	57
	APENDICE A - FLUXO DE CONTROLE IMPLEMENTADO NO ARDUINO.....	59

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia é uma grande e poderosa aliada para a efetiva implantação da automação nos processos industriais, aumentando a produtividade, reduzindo custos e falhas, aprimorando a qualidade, otimizando o controle e garantindo maior segurança (GONÇALVES, 2003). Para a implementação de uma lógica de controle em um processo industrial se faz necessário a utilização de equipamento de mensuração das variáveis envolvidas no sistema. Na indústria, um processo de produção pode conter diversas variáveis, como vazão, pressão, temperatura e nível, que apresentam diversos princípios de medição passíveis de aplicação de acordo com a necessidade do projeto (HAYWARD, 1979).

Entre as variáveis mais frequentemente medidas, a vazão é a que requer diferentes recursos tecnológicos para o desenvolvimento de medidores e transmissores, sendo eles para medidores deprimogênicos, como por placa de orifício, utilizando fenômenos físicos baseados na equação da continuidade e de Bernoulli; medidores lineares, como tipo turbina, ultrassônicos e eletromagnético, que possuem sinal de entrada diretamente proporcional e linearmente à vazão; medidores volumétricos, mais comumente utilizados para medir o volume em litros ou em metros cúbicos; e por fim os medidores em canais abertos, aplicados quando líquidos escoam por gravidade em dutos abertos ou parcialmente preenchidos (DELMÉE, 2003).

O princípio escolhido para estudo e desenvolvimento do projeto foi o medidor de vazão eletromagnético, por apresentar, segundo Molina (2008), confiabilidade e exatidão da medição, não possuir obstrução na passagem do fluido, capacidade de executar a medição de líquidos com sólidos em suspensão, perda de carga desprezível, grande faixa de operação e fluxo contínuo.

Os medidores de vazão eletromagnéticos também oferecem sensores não-invasivos, podem ser utilizados com fluidos ácidos, alcalinos e ionizados com condutividade, em condições limpas, sujos, corrosivos, erosivos ou viscosos e suspensões, porém não são adequados para uso em medição de fluxo de hidrocarbonetos ou gás. São capazes de medir o fluxo bidirecional, tanto a montante como a jusante (LI KE, 2014).

O medidor eletromagnético de vazão tem seu princípio de funcionamento baseado na lei de indução. A possibilidade de induzir tensões em líquidos movendo-se através de campos magnéticos foi descoberta por Faraday, em 1832, mas o primeiro dispositivo foi desenvolvido por Williams, em 1930. O primeiro avanço real no assunto veio do campo médico onde Kolin (1936, 1941) introduziu muitas ideias que são agora prática padrão. O interesse industrial em medidores de vazão eletromagnéticos vem crescendo nos últimos anos (BAKER, 2005).

O funcionamento consiste em que bobinas geram um campo magnético sobre a secção transversal do tubo medidor, dois eletrodos que conseguem captar diferença de potencial elétrico estão instalados em um ângulo reto na parede do tubo (INCONTROL, 2014). Caso não haja vazão, nenhuma tensão induzida é verificada à princípio entre os dois eletrodos, uma vez que as partículas eletricamente carregadas do líquido condutor estão uniformemente distribuídas, no entanto quando se inicia a vazão no tubo medidor, o campo aplica uma força sobre as partículas carregadas, como resultado, as partículas carregadas positiva e negativamente são separadas e coletadas em lados opostos da parede do tubo. Neste ponto uma tensão se forma, sendo detectada e medida pelos dois eletrodos. Esta tensão é diretamente proporcional à velocidade do fluxo na tubulação, assim sendo, juntamente com uma secção transversal conhecida do tubo, a vazão do sistema pode ser calculada. Quanto maior a velocidade do fluxo, maior será a separação das partículas carregadas e maior será a tensão detectada nos eletrodos (RIBEIRO, 2004).

1.1 Motivação

A inspiração para o projeto surge do momento da percepção da constante necessidade industrial por avanços tecnológicos, melhorias contínuas, variedade de processos executados pela indústria, cada qual com suas características e peculiaridades, surgimento de novos setores e processos necessitando de instrumentação e automação, e a importância da vazão no controle de qualidade do produto, segurança e eficiência na produção.

1.2 Objetivos

Desenvolver, projetar e implementar um medidor eletromagnético de vazão para instrumentação e automação de processos, que possuam a necessidade de mensurar a vazão, possuindo custo acessível, permitindo assim maior acessibilidade à tecnologia, sem perder qualidade de medição, exatidão e tecnologia.

A partir deste objetivo geral são propostos os objetivos específicos listados abaixo:

- Estudar e compreender o funcionamento de medidores de vazão eletromagnéticos;
- Projetar e desenvolver placas eletrônicas para o projeto;
- Propor um protótipo de medidas elétricas e instrumentação com base na medição eletromagnética de vazão;
- Desenvolver um método de condicionamento e processamento dos sinais para as medições coletadas;
- Desenvolver e aplicar estratégias de testes e calibração.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são apresentados os assuntos pertinentes ao desenvolvimento do projeto, sendo abordado os conceitos teóricos sobre a variável vazão, exibindo diferentes princípios de medição e medidores, funcionamento e o estudo teórico em que consiste a medição de vazão utilizando um medidor eletromagnético e descrito a instrumentação eletrônica para tratamento do sinal captado.

2.1 Considerações sobre a variável vazão

A vazão é definida como sendo a quantidade de fluido que passa por um elemento primário por unidade de tempo (MARTINS, 1998). Geralmente, a medição é feita aproveitando-se o efeito de uma interação entre o fluido e o medidor, sendo assim, as propriedades dos fluidos precisam ser conhecidas em detalhe (DELMÉE, 2003). Porém, como o foco do projeto não está na explicação de propriedades de fluido, elas serão apenas citadas quando necessário no decorrer do desenvolvimento.

A vazão pode ser definida tanto por volume por quantidade de tempo quanto por massa por quantidade de tempo. A vazão volumétrica é medida em m^3/s , e definida pela razão entre a vazão em massa, kg/s , e a massa específica de referência do fluido, kg/m^3 . Como a massa específica dos fluidos variam conforme pressão e temperatura, é necessário que a vazão volumétrica seja expressa com relação a uma massa específica de referência, na pressão e temperatura de referência (FRANÇA, 2003).

A vazão mássica é preferível expressar em termos de vazão em massa, apresentando a vantagem de que não é necessário definir nenhuma condição de referência, portanto não é necessário estimar a massa específica de referência (HAYWARD, 1979).

2.2 Considerações sobre medidores de vazão

A classificação dos medidores de vazão pode ser realizada na divisão de acordo com o princípio de medição: medidores deprimogênicos, lineares, volumétricos e em canais abertos (DELMÉE, 2003).

Medidores de vazão deprimogênicos, são constituídos basicamente por três elementos, um obstrutor da passagem do fluido, um transmissor de pressão diferencial e um instrumento receptor (MARTINS, 1998). O princípio de funcionamento é relacionado a geração de diferença de pressões pela passagem do fluido por uma restrição no canal, que se vincula com a vazão que circula em uma relação determinável, fundamentado nas leis da física, a partir da equação da continuidade e de Bernoulli (BOJORGE, 2014).

São considerados lineares os medidores que produzem um sinal diretamente proporcional à vazão, com fator de proporcionalidade constante ou aproximadamente constante na faixa de medição, diferenciando dos deprimogênicos, cuja saída é inerente a quadrática em função da vazão (DELMÉE, 2003). A teoria de funcionamento varia entre os diversos métodos de medição de vazão linear, entre eles estão medidores por turbinas, ultrassônicos e o eletromagnético.

Medidores volumétricos, destinam essencialmente à medição de volumes, em litros ou em metros cúbicos ao invés de vazão, tendo-se a vazão volumétrica e a densidade do fluido pode-se deduzir a vazão mássica. Na prática, medem-se a vazão volumétrica, a pressão estática e a temperatura do processo para se obter a vazão mássica, desde que a composição do fluido seja constante. O medidor mais comum é o baseado no princípio de Coriolis (RIBEIRO, 2004).

Os medidores de canal aberto são normalmente do tipo vertedouro ou calha Parshall, sendo utilizado com maior frequência na agricultura em irrigações e em dejetos industriais. Ao contrário dos medidores deprimogênicos, que medem a diferença de pressão, mede-se o nível antes e depois do elemento primário que também provoca uma variação de velocidade de escoamento localizada (BEGA, 2011).

A cada princípio de funcionamento correspondem características diferentes que limitam as aplicações a faixas de diâmetro, pressões, temperaturas, viscosidade e impurezas. Fatores como a perda de carga introduzida pelo medidor na tubulação e os trechos retos disponíveis também influenciam no sistema (DELMÉE, 2003). A medição de vazão pode ser realizada para vazões muito pequenas, médias e muito grandes. Portanto a precisão e a aplicação determinam o tipo de medidor de vazão a ser utilizado, além de que, estes fatores estão diretamente ligados ao seu custo (SOISSON, 2002). O quadro 1 apresenta a classificação dos medidores para cada princípio apresentado.

Quadro 1 – Classificação dos medidores de vazão

Medidores de Vazão							
Deprimogênios		Lineares		Volumétricos		Em canais abertos	
Placa de Orifício	T	Área Variável	Λ	Diafragma	G	Calhas	L
Bocal	T	Coriolis	Λ	Disco de natação	L	Vertedores	L
Venturi	T	Eletromagnético	LC	Palheta	L		
Pitot	T	Térmico	Λ	Pistão oscilante	L		
Pitot de média	T	Turbina	T	Pistão recíproco	L		
Centrífugo	A	Ultrassônico	T	Lóbulo	G		
Laminares	G	Vórtice	T	Engrenagem	L		
				Semi-imerso	G		

Fonte: Adaptado Delmée (2003).

Os princípios de medição da tabela são compatíveis com:

- T – para medição de líquidos, gases e vapor;
- G – para medição de gases, exclusivamente;
- L – para medição de líquidos, exclusivamente;
- LC – para medição de líquidos condutores de eletricidade, exclusivamente;
- Λ – indica que não é usado para vapores, salvo exceção;

2.3 Medidor de vazão eletromagnético

Os medidores magnéticos baseiam-se na lei de Faraday: quando um condutor móvel se desloca num campo magnético, é gerada nas suas extremidades uma força eletromotriz (fem) proporcional à intensidade do campo magnético, ao seu comprimento e à velocidade de deslocamento (DELMÉE, 2003). O medidor de vazão eletromagnético consiste em um tubo curto por onde o fluido é guiado com a necessidade de a parede interna ser construída por um material isolante, para não ocorrer curto-circuito entre os eletrodos de captação de sinal. Ao longo do tubo, são instalados dois eletrodos, distantes de D , em metros, que perfuraram a tubulação sendo fixados em seu interior paralelamente ao revestimento interno da tubulação. Um campo magnético, com densidade de fluxo B , em Tesla, é aplicado perpendicularmente ao sentido de escoamento do fluido. O fluido possuindo uma condutividade específica e atravessando, com uma velocidade v , em m/s, as linhas de campo irá induzir uma força eletromotriz e , em volts, nos terminais dos eletrodos (SOISSON, 2002). A Figura 1 ilustra o princípio básico de funcionamento. Portanto a fem, e , gerada pode ser relacionada por:

$$e = B \cdot D \cdot v \quad (1)$$

Sendo a vazão volúmica Q , em m^3/s , dada por:

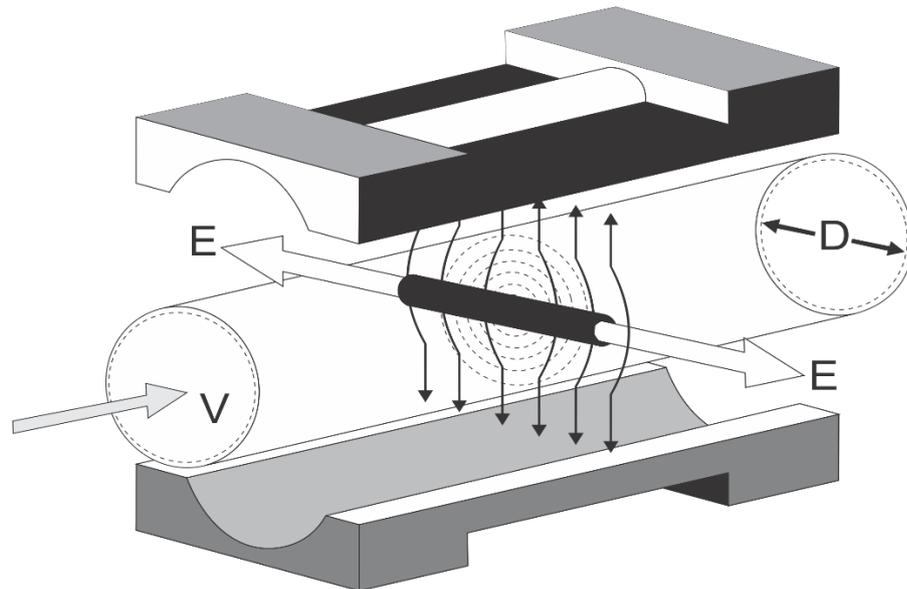
$$Q = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \cdot v \quad (2)$$

Substituindo a equação (1) em (2), encontra-se que:

$$Q = \left(\frac{e \cdot (\pi/4) \cdot D}{B} \right) \quad (3)$$

Portanto o princípio de funcionamento deste tipo de medidor exige que o fluido do processo conduza eletricidade, limitando sua aplicação aos fluidos condutivos e não magnéticos, excluindo a aplicabilidade para fluidos derivados do petróleo (BEGA, 2011).

Figura 1 – Esquemático de funcionamento do medidor eletromagnético



Fonte: Adaptado de Delmée (2003, p. 189).

O campo magnético pode ser gerado por um ímã permanente ou por bobinas excitadas por uma corrente alternada. Com líquidos que apresentam baixa condutividade em um campo contínuo, os eletrodos tendem a se polarizarem. Os efeitos de polarização podem ser eliminados ou minimizados a partir da aplicação de um campo alternado (SOISSON, 2002). Poucas aplicações utilizam ímãs permanentes por apresentarem problemas como este de formação de sais isolantes nos eletrodos, fazendo a utilização de bobinas mais frequente (BEGA, 2011).

Inicialmente, as bobinas eram excitadas pela corrente da rede elétrica, ou seja, 60 Hz, porém apresentavam um consumo elevado de energia. Prefere-se atualmente utilizar uma corrente contínua pulsante com baixa frequência, 6,25 Hz, reduzindo o consumo de energia e facilitando a filtragem do sinal elétrico (DELMÉE, 2003).

Segundo Bega (2011), por se tratar de um sinal na ordem de microvolts, existe a necessidade de realizar um condicionamento apropriado para a medição, sendo assim um bom sistema de aterramento indispensável, portanto quando a tubulação é constituída de material isolante existe a necessidade da colocação de anéis de aterramento.

Medidores de vazões eletromagnéticos não são afetados pela viscosidade, densidade ou turbulência. O sinal gerado varia linearmente com a vazão, sendo a resposta a variações de vazões captadas instantaneamente, outra propriedade é que a perda de carga num medidor eletromagnético é a mesma de um tubo reto com mesmo diâmetro e comprimento (SOISSON, 2002).

2.4 Instrumentação eletrônica com amplificadores operacionais

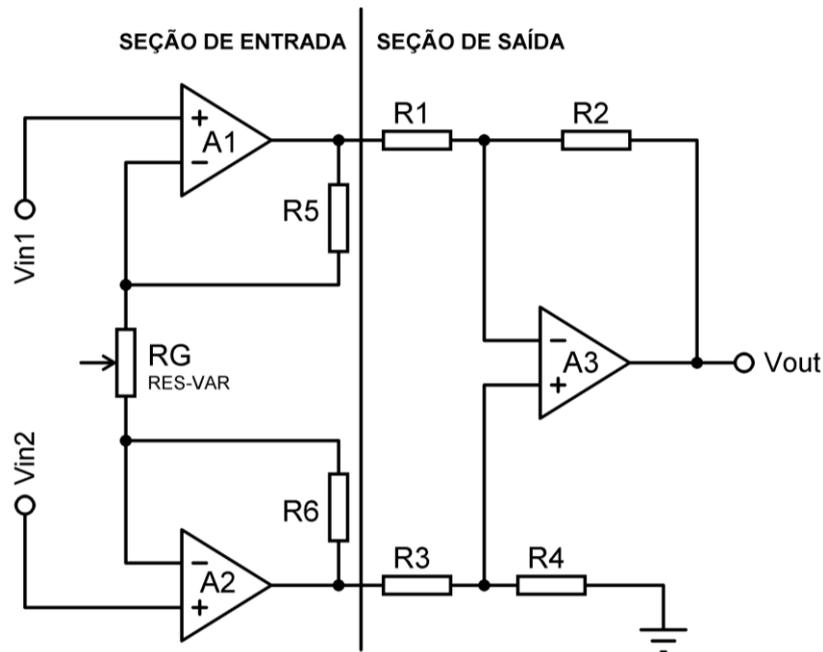
Os amplificadores de instrumentação utilizando três amplificadores operacionais são utilizados por projetistas de instrumentação, por apresentar características desejadas, como elevado CMR (*common mode rejection*), elevada impedância de entrada e baixo offset.

A Figura 2 apresenta a configuração do circuito amplificador. Uma única resistência de ganho, R_G , é conectada entre as junções de soma dos dois buffers de entrada. A tensão de entrada diferencial completa aparecerá agora através de R_G (porque a tensão na junção de soma de cada amplificador é igual à tensão aplicada à sua entrada positiva). Uma vez que a tensão de entrada amplificada (nas saídas de A_1 e A_2) aparece diferencialmente através das três resistências, R_5 , R_G e R_6 , o ganho diferencial pode ser variado simplesmente mudando R_G (BOYLESTAD, 2004).

Segundo Kitchin, existe ainda uma outra vantagem, sendo o circuito configurado com suas resistências de relação de correspondência, nenhuma correspondência de resistor adicional é necessária quando os ganhos são modificados. Assumindo que $R_5 = R_6$, $R_1 = R_3$ e $R_2 = R_4$, então

$$V_{out} = (V_{in2} - V_{in1}) \left(1 + 2 \cdot \frac{R_5}{R_G} \right) \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \quad (4)$$

Figura 2 – Configuração do circuito amplificador



Fonte: Adaptado Boylestad (2004).

Esta topologia apresenta alta rejeição a tensões de modo comum, ganho elevado, ganho ajustável apenas com um resistor, impedância de entrada (diferencial e de modo comum) elevada em ambas as entradas (INSTRUMENTAÇÃO, 2017).

Como a tensão em R_G é igual a V_{in} , sendo $V_{in} = (V_{in2} - V_{in1})$, a corrente através de R_G será igual a (V_{in} / R_G) . Os amplificadores A1 e A2, portanto, funcionarão com ganho e amplificarão o sinal de entrada. Nota-se, no entanto, que se uma tensão de modo comum for aplicada às entradas do amplificador, as tensões de cada lado de R_G serão iguais e nenhuma corrente fluirá (nem, portanto, através de R_5 e R_6), assim os amplificadores A1 e A2 funcionarão com ganho unitário. Em teoria, isto significa que o circuito tem ganho na extremidade frontal como desejado (determinado por R_G) sem aumentar o ganho em modo comum e o erro. Ou seja, o sinal diferencial será aumentado por ganho, mas o erro de modo comum não, então a relação $(\text{Ganho } (V_{DIFF}) / (V_{ERROR CM}))$ aumentará. Assim, CMR (quanto maior o CMR maior será a atenuação em dB do sinal) teoricamente aumentará em proporção direta ao ganho - uma propriedade útil (KITCHIN, 2006). Além disto se o amplificador tiver ganho unitário, somente os offsets dos amplificadores de entrada vão ser significativos na determinação do offset de saída. Se os amplificadores de entrada forem iguais o

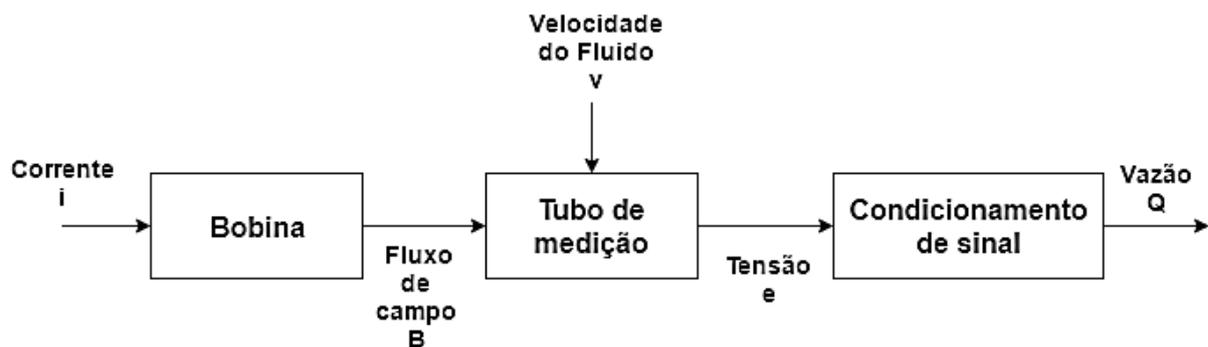
drift na saída do amplificador fica reduzido. Nesta configuração o primeiro estágio é responsável pelo ganho e o segundo estágio é responsável pelo CMR (INSTRUMENTAÇÃO, 2017).

Portanto elevado CMR mais um ganho elevado é de grande importância em aplicações que lidam com sinais de baixíssima amplitude e provenientes de ambientes ruidosos, tornando assim a aplicação do amplificador de instrumentação eficiente em instrumentação (KITCHIN, 2006).

3 METODOLOGIA

O processo de desenvolvimento de um protótipo consiste primeiramente na construção do sistema de medição, composto pela tubulação condutora do fluido, confecção de duas bobinas geradoras de campo magnético, quatro eletrodos de sinal, dois para captação do sinal elétrico gerado pela passagem do fluido e os outros dois na entrada e saída do medidor para realizar o aterramento do sistema. Um sistema de tratamento e interpretação do sinal de tensão gerado nos eletrodos também se faz necessário, sendo a tensão gerada nos terminais muito baixa. A Figura 3 apresenta um diagrama de blocos do comportamento do sistema e interação entre os componentes do qual é composto resultando na saída final desejada, a vazão.

Figura 3 – Diagrama de blocos do circuito de medição.



Fonte: Autoria própria.

3.1 Análise da linearidade e características de transferência das variáveis estudadas

Segundo Halliday (2009), para uma bobina circular de raio R , com N espiras, percorrida por uma corrente i , o campo magnético gerado sobre um ponto situado no eixo central z da bobina, pode ser demonstrado como

$$B = \frac{\mu N i R^2}{2(R^2 + z^2)^{3/2}} \quad (5)$$

Sendo μ a permeabilidade magnética do material em $Wb/A.m$. Como pode ser analisado na equação 5, a densidade de campo gerada no ponto determinado é influenciada apenas pela corrente que atravessa o fio condutor e o número de espiras, uma vez que os demais elementos da equação se apresentam como constantes para o sistema, portanto podem ser agrupados em uma constante K_n definida por

$$K_n = \frac{\mu R^2}{2(R^2+z^2)^{3/2}} \quad (6)$$

Substituindo a equação 6 em 5, fica-se com

$$B = N i K_n \quad (7)$$

A relação do campo magnético com o valor de tensão gerado nos terminais é dada pela equação 1, sendo D a distância entre os eletrodos constante e uma vez definido os valores para corrente e quantidade de espiras o valor da densidade de campo no ponto central da tubulação será também um valor escalar constante, alterando apenas o sentido do vetor em uma frequência de 6,25 Hz recomendado pelas bibliografias estudadas, portanto a equação da tensão nos eletrodos pode ser reescrita como

$$e = K . v \quad (8)$$

Sendo $K = B.D = N.i.K_n.D$. A tensão gerada tem relação direta com a vazão da tubulação representada pela equação 3, como B e D são constantes.

$$Q = K' . e \quad (9)$$

Sendo $K' = \pi.D/4.B$. É possível observar então que a vazão se relaciona com a tensão por meio de uma constante de proporcionalidade, sendo uma relação do tipo $y = b.x$. Porém pode ocorrer de a equação se apresentar como $y = a + b.x$, devido a presença de ruídos ou residual de tensão, fator este que pode ser

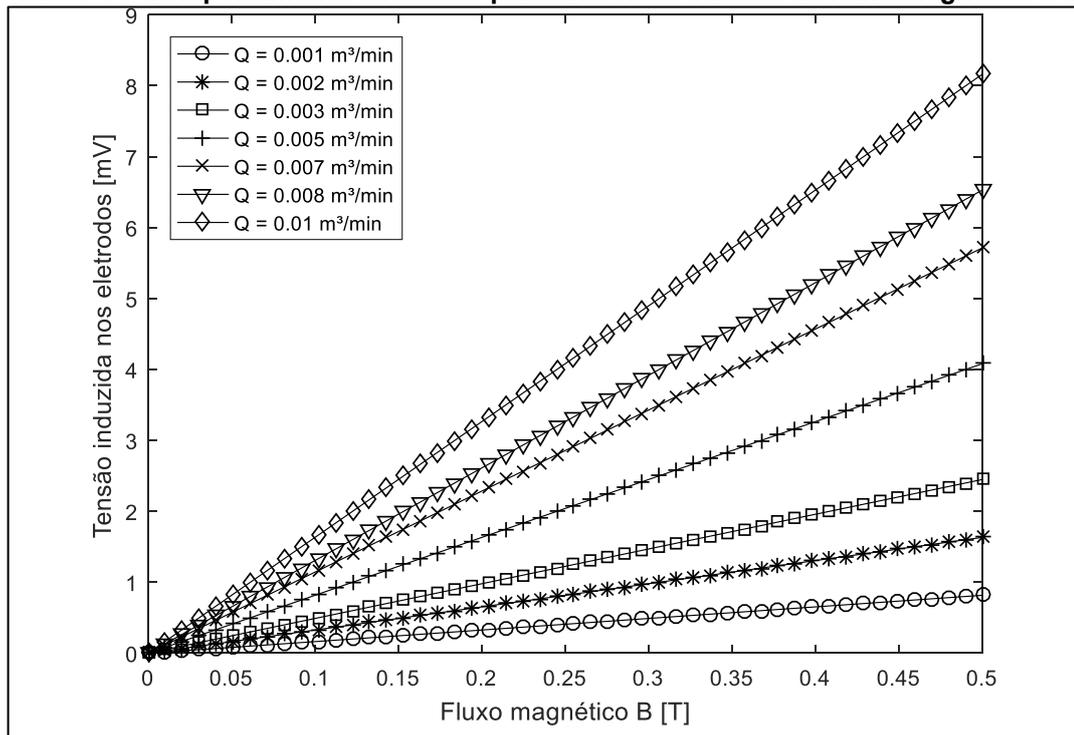
solucionado realizando um ajuste de zero. Portanto, pelo princípio da superposição, é possível afirmar que a vazão varia de forma linear a tensão gerada, uma vez que

$$Q(e_1 + e_2) = K' \cdot (e_1 + e_2)$$

$$Q(e_1 + e_2) = K' \cdot e_1 + K' \cdot e_2 \quad (10)$$

Para uma análise mais qualitativa do comportamento do sistema é gerado o Gráfico 1 que relaciona a interação da saída do sistema, tensão e , em mV, para diferentes valores tanto de fluxo magnético (T), quanto de vazão volumétrica (m^3/min). Observa-se que com a variação de uma das variáveis em análise, a tensão varia de forma linear a uma taxa constante.

Gráfico 1 – Comportamento da tensão para diferentes valores de fluxo magnético e vazão.



Fonte: Autoria própria.

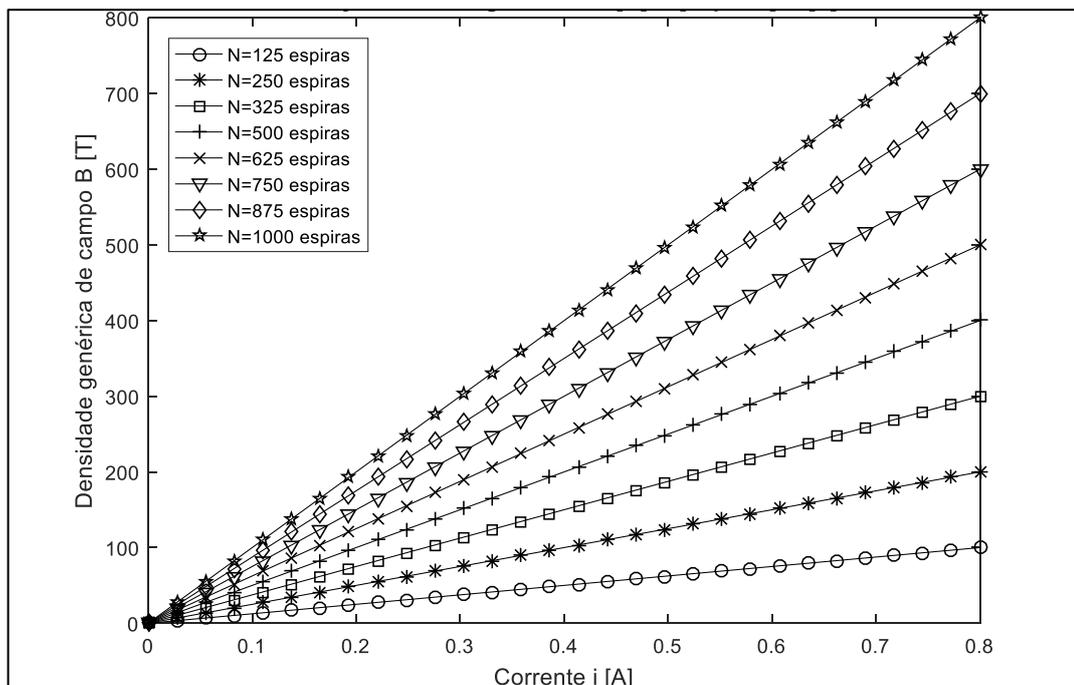
3.2 Bobinas geradoras de campo magnético

As bobinas são responsáveis pela geração do campo magnético do sistema, que na interação com o fluido, permite a geração de potencial nos eletrodos,

portanto devem ser posicionadas de forma diametralmente opostas no tubo de forma que o campo gerado seja perpendicular ao eixo dos eletrodos. O campo gerado está diretamente relacionado na precisão, linearidade e dependência do perfil de velocidades do medidor.

A partir da equação 7, considerando a constante $K_n = 1$, ou seja, não levando em consideração as dimensões nem características magnéticas do material, o Gráfico 2 é gerado para um número de espiras variando entre 125 e 1000 voltas e a corrente variando de 0 até 800 mA, é possível analisar o efeito de cada uma das variáveis da bobina sobre o fluxo de campo. Portanto a bobina deverá possuir suas características limitadas e pré-determinadas por estes valores.

Gráfico 2 – Relação entre as variáveis no fluxo magnético



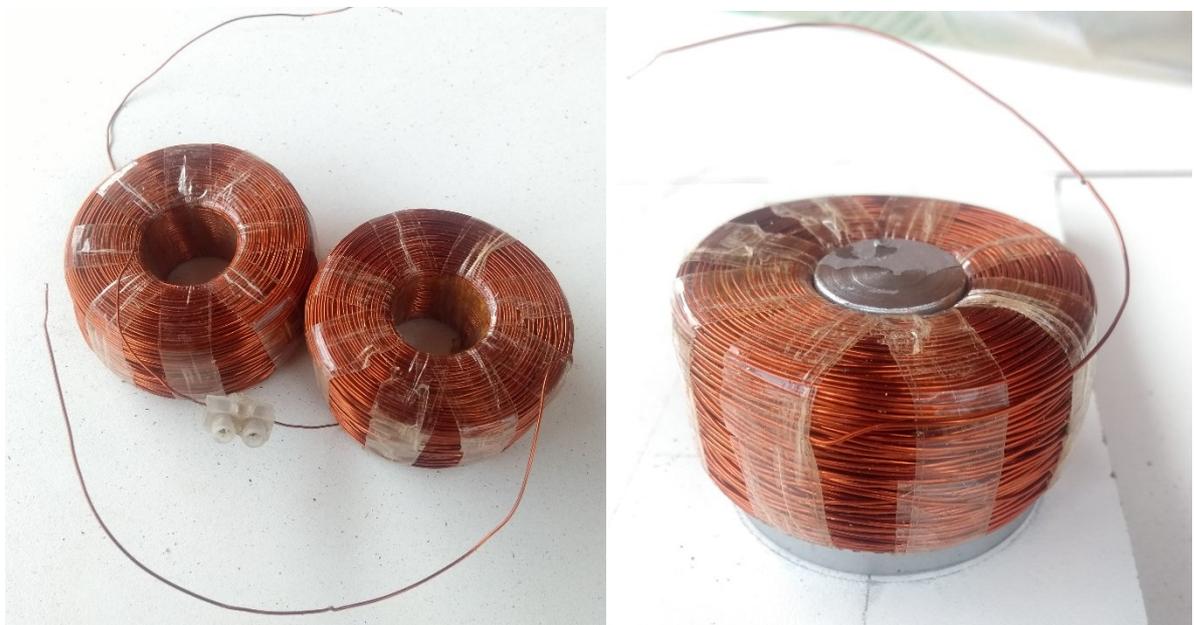
Fonte: Autoria própria.

É possível observar graficamente que o impacto da quantidade de espiras da bobina é muito maior sobre o campo gerado, do que a aplicação de uma corrente maior, o que já era esperado devido as dimensões e grandezas das duas variáveis sobre a equação 7, uma vez que a quantidade de voltas está na casa das centenas e milhares enquanto a corrente está disposta nas casas decimais, além de que a corrente existe ainda uma limitação imposta pela capacidade máxima de condução do fio, isto é, caso haja a necessidade de amplificar o campo gerado é mais viável dar preferência para o incremento de N.

As bobinas foram construídas com fio de cobre esmaltado 23 AWG com 0,574 mm de diâmetro e permite a aplicação de uma corrente máxima de 730 mA. A opção por este número de fio de cobre esmaltado deve-se ao baixo diâmetro e volume que apresenta com a capacidade de transmitir a corrente necessária para a execução do projeto. Foram enroladas 1000 voltas para formar um solenoide com 5 cm de altura, por 2,5 cm de diâmetro interno e 6 cm de diâmetro externo. Para o núcleo foi utilizado uma peça de aço 1020 com 2,5 cm de diâmetro e 5 cm de altura, a escolha do material ferromagnético para formar o núcleo é realizada com o objetivo de obter um fluxo maior e mais denso das linhas de campo formadas pelo eletroímã.

A tensão aplicada é de 12V alternada com frequência de 6,25 Hz e a resistência R_b das bobinas é de $18,5 \Omega$, portanto através da lei de Ohm a corrente elétrica que atravessa o sistema é de 0,65 A, portanto não existe a necessidade da utilização de um resistência para limitar a corrente, sendo que a corrente que atravessa as bobinas é suportada pelo fio de cobre utilizado.

Figura 4 – Bobinas montadas



Fonte: Autoria própria.

O cálculo do campo magnético gerado pelo eletroímã foi realizado por meio de engenharia reversa, utilizando o valor de vazão do tanque 2 da estrutura de testes como referência Q_2 , velocidade do fluido v , a tensão gerada nos eletrodos e_2 a partir do gráfico gerado na seção 4.3 e o diâmetro da tubulação D . Substituindo estes valores nas equações 2 e 1 é possível determinar o campo magnético que atravessa o sistema.

Assumindo como referência a vazão gerada pelo tanque 2

$$Q_2 = 24,18 \text{ L/min} = 0,000403 \text{ m}^3/\text{s}$$

e o diâmetro $D = 0,016 \text{ m}$, temos que

$$V = 2,004 \text{ m/s}$$

Como $R_g = 953 \Omega$, substituindo na equação 11, temos que $G = 52,42$.

Sendo assim, com tensão $e = 6,353 \text{ mV}$, portanto

$$B = 0,198 \text{ T}$$

3.3 Montagem do protótipo e estrutura de testes e calibração

O protótipo do medidor de vazão foi montado utilizando uma seção de mangueira de silicone transparente para ser o tubo de medição, comumente utilizada em aplicações sanitárias, com diâmetro de 16 mm e comprimento de 25 cm.

O tubo de medição é o componente do circuito por onde percorrerá o fluido. Este deve ser instalado no local em que se deseja realizar a medição da vazão. Deve permitir a passagem do campo gerado pelas bobinas, para isso é necessário que não seja constituído de material com propriedades ferromagnéticas.

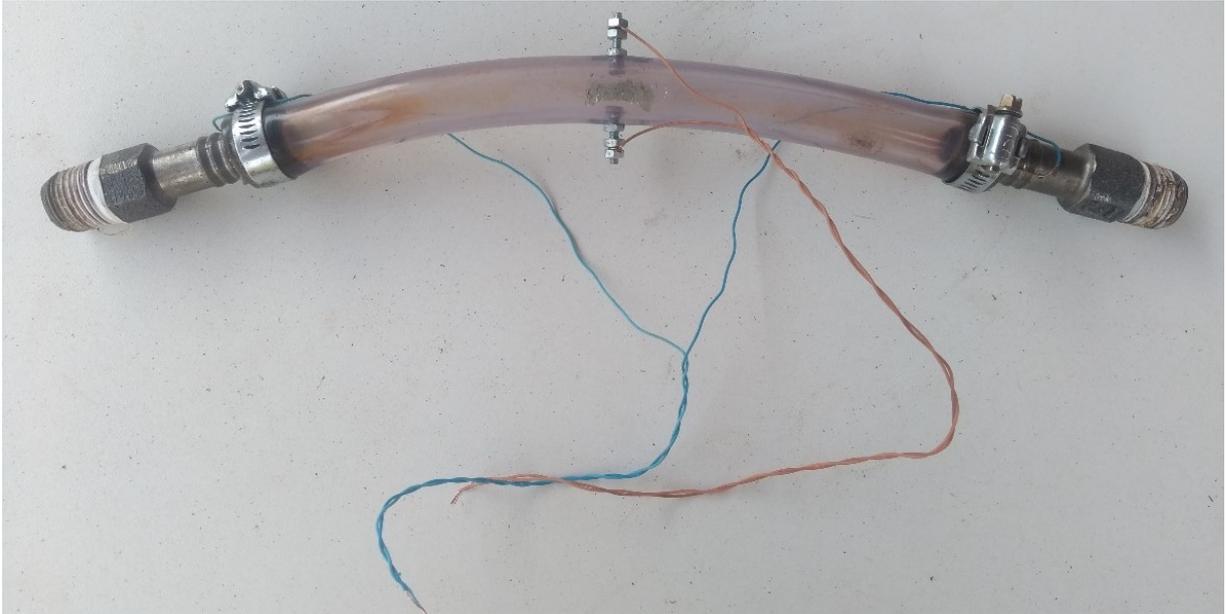
A tensão gerada nos eletrodos instalados nas paredes da tubulação não deve ser curto circuitada, portanto o tubo deve ser construído por um material isolante, ou ao menos sua parede interna deve ser isolante.

Foram instalados dois eletrodos ao centro da mangueira utilizando dois parafusos de latão, possuindo 3 mm de diâmetro e 14 mm de comprimento, porém de lados opostos, ou seja, um de frente para o outro, estes serão os eletrodos responsáveis por captar o diferencial de tensão gerado pelo fluido quando atravessar a seção transversal do tubo a uma determinada velocidade v . Os eletrodos de captação foram instalados de forma a ficarem o menos invasivos ao processo possível, a fim de evitar a perda de carga, sendo assim, a distância interna entre os eletrodos é de 16 mm. Na entrada e na saída do tubo são instaladas duas conexões de 1/2" em metal para conectar o protótipo ao restante da linha e também para utilizar como eletrodos de referência, sendo conectados um par de fios trançados a eles e ao sistema de aterramento do protótipo, para garantir que o fluido tenha tensão zero na entrada e saída do equipamento.

Os eletrodos são os elementos responsáveis pela detecção da tensão gerada e pelo aterramento do circuito na entrada e saída da tubulação, estando em contato direto com o fluido, portanto dependendo da aplicação e do fluido do processo, deve ser fabricado com diferentes materiais, resistentes a abrasão, porém sem perder condutividade elétrica.

A posição dos eletrodos na tubulação é de extrema importância, devendo estar posicionados de forma mais equidistante possível, ou seja, diametralmente opostos. Os fios responsáveis por levar o sinal captado pelos eletrodos para o circuito de tratamento devem estar bem fixados para evitar ruídos provenientes de mau-contatos. A Figura 5 apresenta a montagem do tubo de medição com os eletrodos devidamente instalados.

Figura 5 – Tubo de medição em silicone com os eletrodos e conexões instalados



Fonte: A autoria própria.

Para a fixação de todos os componentes do protótipo foi construída uma plataforma utilizando chapas de madeira MDF com 15 mm de espessura, 40 cm de comprimento, 26 cm de largura e 23 cm de altura. Ao centro da estrutura foi fixado um dos núcleos ferromagnético das bobinas e aos seus lados feitos dois furos para atravessar parafusos de fixação da outra chapa de madeira que fica do lado oposto e onde também foi instalada a outra bobina eletromagnética. Um andar foi construído em um dos lados da estrutura para a instalação do circuito eletroeletrônico. A Figura 6 apresenta a estrutura completa de fixação.

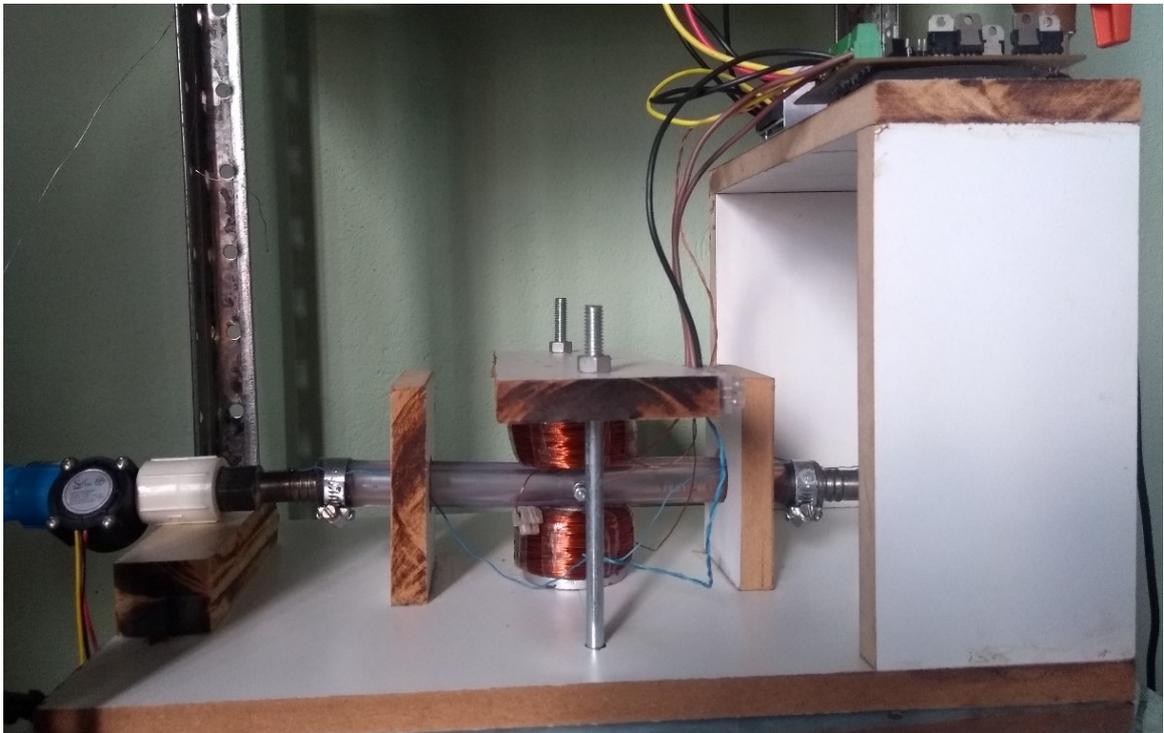
A seção de mangueira utilizada para montagem do tubo passante foi instalada na estrutura de MDF de forma que os eletrodos de medição estivessem alinhados de forma perpendicular ao sentido do campo magnético gerado pelos eletroímãs, e fixada para evitar movimentação durante o processo de testes o que poderia ocasionar alteração dos parâmetros devido a mudança da posição dos eletrodos causado por um possível movimento da tubulação. A Figura 7 apresenta a montagem final de todo o protótipo.

Figura 6 – Estrutura de sustentação do protótipo em MDF



Fonte: Autoria própria.

Figura 7 – Montagem final da estrutura do protótipo



Fonte: Autoria própria.

Para a realização dos testes, foram instalados 2 tanques com 20 litros cada em 2 diferentes alturas, todos os dois interconectados por tubulação de PVC de $\frac{1}{2}$ " com ligação ao protótipo, com isto é possível obter 2 valores de vazões diferentes para o sistema, sendo utilizados tanto para testes quanto para a calibração do equipamento. O primeiro tanque está a uma altura de 38 cm do protótipo e o tanque 2 está a 43 cm do tanque 1, conforme mostrado na Figura 8. O circuito de teste e calibração possui válvulas nas entradas e saídas dos dois tanques para selecionar a vazão de qual dos tanques irá atravessar o protótipo, além de possuir uma válvula também na saída do medidor para manter o sistema com vazão zero e com o tubo completamente preenchido, com o objetivo de obter o comportamento do sistema e realizar o trim de zero na calibração e parametrização do equipamento. Todo o fluido dos 2 tanques é armazenado em um terceiro reservatório no final do circuito e então redistribuídos para o sistema através de uma bomba d'água instalada na saída.

Figura 8 – Montagem final da estrutura de testes e calibração

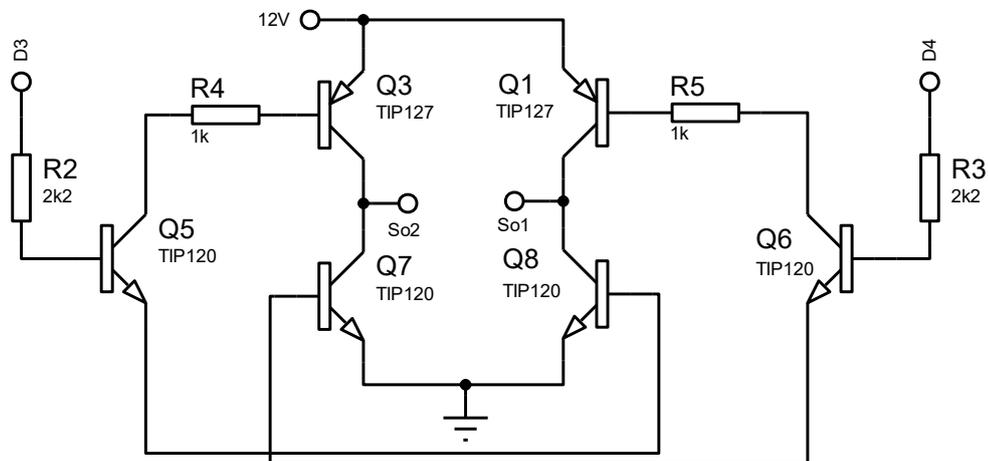


Fonte: Autoria própria.

3.4 Circuito amplificador e condicionador de sinal e gerador de frequência

Para o circuito de geração da frequência aplicado nas bobinas eletromagnéticas é utilizado um circuito ponte H, conforme apresentado na Figura 9, para a alternância do sentido da corrente que atravessa o fio de cobre da bobina. As portas digitais D3 e D4 do *Arduino* são utilizadas e programadas para garantir a frequência de 6.25 Hz conforme comumente utilizada para aplicações industriais.

Figura 9 – Circuito da ponte H desenvolvido para o protótipo



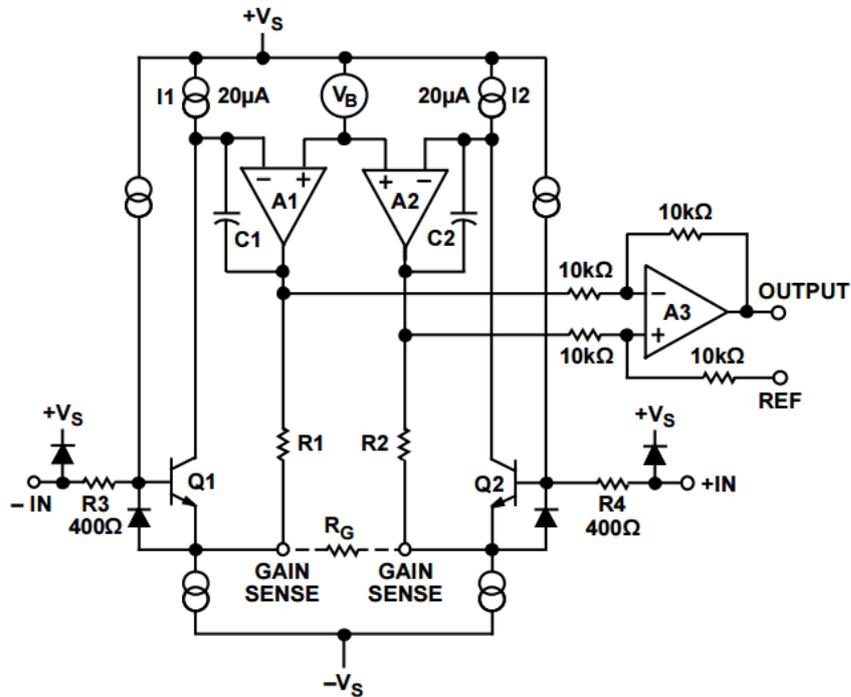
Fonte: Autoria própria.

O sinal de tensão gerado nos eletrodos é detectado na ordem de μV ou mV , necessitando assim de um ganho para a medição, pois com amplitude tão pequena é facilmente sujeito a interferências por diversos dispositivos presentes no local de instalação, ocasionando ruídos no sinal e conseqüentemente apresentando erros de medição.

Para evitar tais problemas utiliza-se um amplificador de instrumentação com características dispostas na seção 2.4. O modelo escolhido é o CI AD620, com ganho, G , variando de 1 até 10.000, sendo configurado pelo valor da resistência R_G , instalada externamente ao CI e escolhida de acordo com as necessidades do projeto, tendo seu ganho relacionado com a equação 11 (ANALOG DEVICES). O circuito interno do componente de amplificação é apresentado na Figura 5.

$$G = 1 + \frac{49 \text{ k}\Omega}{R_G} \quad (11)$$

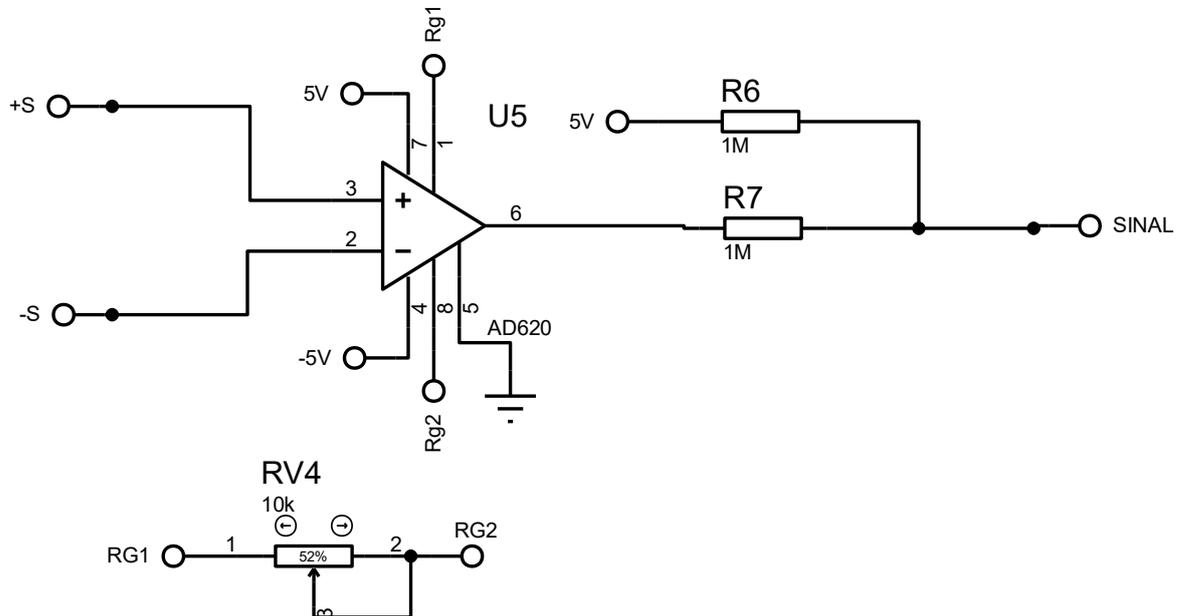
Figura 10 – Circuito amplificador de instrumentação AD620



Fonte: Analog Devices.

A aquisição e condicionamento da tensão captada nos eletrodos de medição é realizada por um estágio inicial para amplificar o sinal utilizando um amplificador de instrumentação modelo AD620, com um potenciômetro conectado no local da resistência R_G , Figura 10, para variação do ganho de acordo com a resposta encontrada nos testes realizados. Após a amplificação é realizado o condicionamento do sinal de forma a evitar correntes e tensões negativas na entrada analógica do Arduino, para isso o circuito de divisor de tensão resistivo condiciona o sinal de -5 a 5V para 0 a 5V, conforme mostrado na Figura 11.

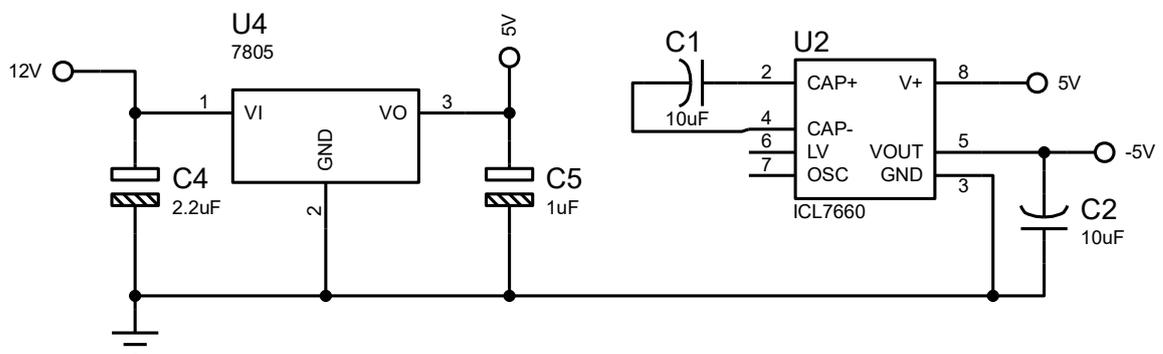
Figura 11 – Circuito amplificador e condicionador do sinal dos eletrodos



Fonte: Autoria própria.

Para a alimentação de todos os componentes e a geração de uma tensão negativa de alimentação no amplificador AD620 é desenvolvido um circuito para condicionar as tensões, uma vez que a alimentação do circuito é realizada por uma fonte de tensão DC de 12V 3A, Figura 12.

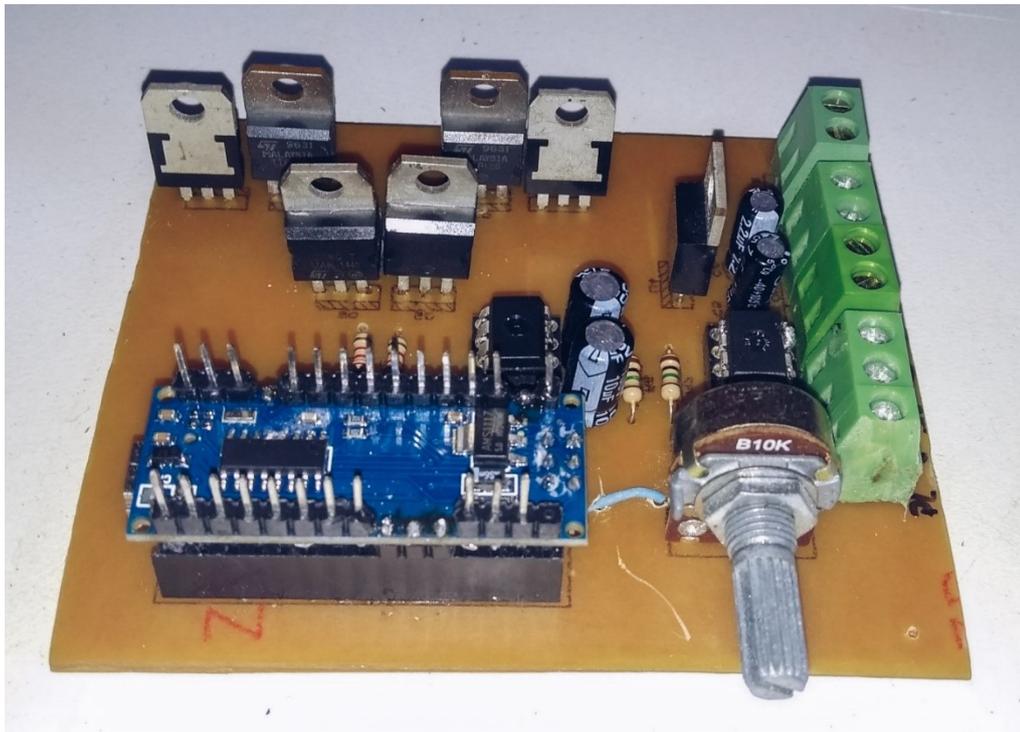
Figura 12 – Regulador e inversor de tensão desenvolvido para o protótipo



Fonte: Autoria própria.

Todos os componentes foram soldados a uma placa PCB desenvolvida para aplicação. Bornes de ligação foram também soldados na placa para a conexão de todos os elementos do protótipo e alimentação da placa. A Figura 13 apresenta a montagem final da placa.

Figura 13 – Placa eletrônica final do protótipo



Fonte: A autoria própria.

3.5 Aquisição de dados

A aquisição dos dados gerados pelo protótipo é realizada utilizando a comunicação serial do microcontrolador *Arduino* com o software *MATLAB*, ou seja, o *Arduino* é responsável por realizar a leitura e condicionamento do sinal e então, através da comunicação serial, transmite os dados para o software *MATLAB*.

O *Matrix Laboratory (MATLAB)* é um software de computação científica para análise e visualização de dados, resolve numericamente problemas matemáticos com muita eficiência. A estrutura de código é desenvolvida utilizando linguagem C e trata-se de um sistema interativo em que realiza seus cálculos utilizando matrizes como elemento básico e que não requer seu dimensionamento. Trata-se de uma ferramenta com linguagem de programação de alto nível que tem como principais funções a construção de gráficos, compilação de funções, manipulação de funções específicas de cálculo e variáveis simbólicas (BECKER, 2010).

Além disso, o *MATLAB* possui muitas bibliotecas auxiliares, chamadas de *toolboxes*, disponibilizando diversas funções já definidas, reduzindo o trabalho e o tempo gasto na utilização e execução de operações.

O software tem suas origens apenas para cálculos matemáticos matriciais, porém com o tempo tornou-se mais completo e amplamente utilizado nas áreas de engenharia (INGLE, 2007). Para este trabalho o software foi utilizado para o processamento de sinais e geração de resultados graficamente. O software recebe do *Arduino* o valor de tensão gerado nos eletrodos e o valor da vazão detectada no medidor de referência e é responsável por converter, parametrizar e comparar os dados obtidos.

3.6 Sensor de fluxo de água modelo YF-S201b

O fluxômetro de referência utilizado para os ensaios e calibração foi o YF-S201b, apresentado na Figura 14, que possui simples princípio de funcionamento (modelo tipo turbina) e comunicação com o *Arduino*. Sua estrutura é composta por uma espécie de válvula em cata-vento com um ímã acoplado e um sensor hall para enviar um sinal PWM para o microcontrolador (THEORYCIRCUIT).

Cada hélice do sensor possui aproximadamente 2.5 mm de distância entre elas, cada vez que uma hélice passa pelo sensor hall é gerado um pulso que é identificado por uma porta digital no *Arduino*, gerando uma interrupção no sistema para incrementar a quantidade de pulsos gerados. Através da totalização do valor de

pulsos captados durante 2 segundos de intervalo o microcontrolador realiza o cálculo e a conversão e fornece o valor de vazão momentânea do sistema.

Figura 14 – Fluxômetro de referência utilizado



Fonte: Autoria própria.

O fluxômetro apresenta faixa de leitura de 1 L/min até 30 L/min, pressão máxima de 2 Mpa, diâmetro de conexão de $\frac{1}{2}$ " e interno de 0.78 mm, exatidão de 10% (THEORYCIRCUIT). Este equipamento foi instalado na saída de todo o circuito de testes, logo após o protótipo do medidor eletromagnético.

3.7 Filtro média móvel

A simplicidade na implementação torna deste filtro um dos mais comumente usados no processamento digital de sinais. Este filtro digital é basicamente uma média de um determinado número M de pontos captados do sinal de entrada $x[i + j]$, no caso do projeto a tensão detectada nos eletrodos, para produzir um único sinal de saída $y[i]$, conforme mostrado na equação 12 que apresenta o princípio matemático de funcionamento do filtro (ANTONIOU, 2000).

O fato de apresentar apenas operações de soma, torna computacionalmente simples a sua execução, desta forma, dispositivos com baixa capacidade de processamento são capazes de implementar a filtragem.

$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i + j] \quad (12)$$

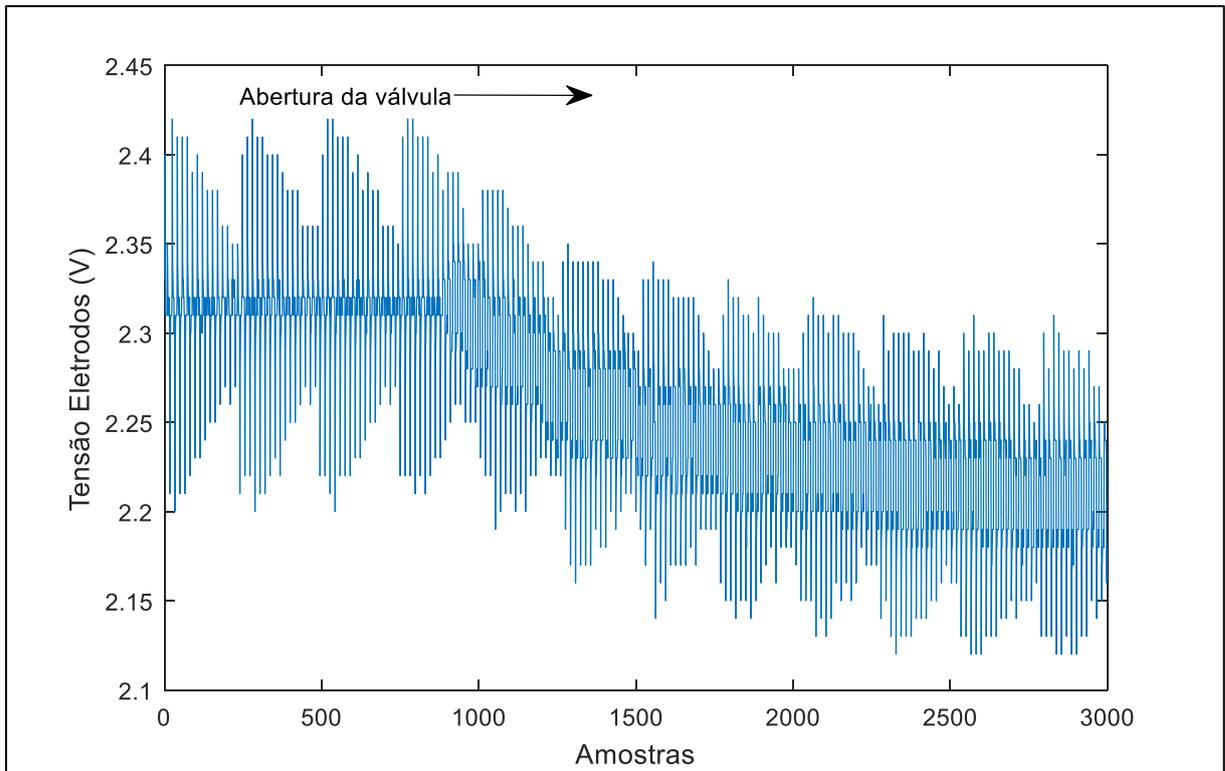
O filtro apresenta excelente desempenho para a redução de ruídos e mantém inalterada a resposta ao degrau do sistema, fator importante para o projeto, uma vez que os sinais de entrada do protótipo são frequentes degraus de amplitude proporcional a variação da vazão no equipamento. A quantidade de ruído reduzida é dada pela raiz quadrada do número de amostras M definidos no filtro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antes de iniciar os testes no protótipo foi verificada a vazão gerada pelos dois tanques com a ajuda do fluxômetro de referência. As vazões máximas encontradas foram de 24,18 L/min para o tanque 2 e de 16,91 L/min para o tanque 1. Os testes do protótipo foram realizados em 2 ensaios diferentes com o objetivo qualitativo do funcionamento do protótipo, a análise quantitativa é realizada no momento da calibração. Após a confirmação do funcionamento, análise e interpretação dos resultados foi realizada a calibração do protótipo utilizando como referência o valor de vazão detectado pelo fluxômetro. Cada etapa é descrita, analisada e comentada nos itens a seguir.

4.1 Primeiro ensaio

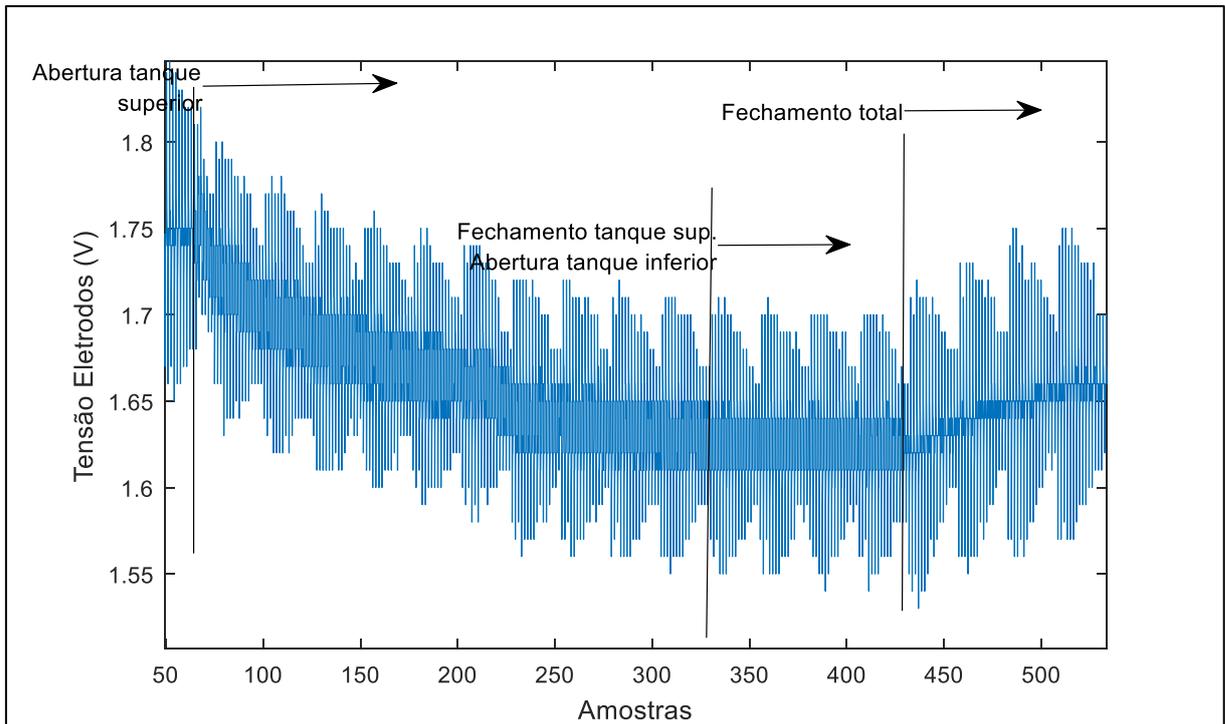
Para o primeiro ensaio o sistema foi submetido a 2 diferentes simulações. A primeira apresentada no Gráfico 3 foi realizada inicialmente com o sistema fechado com vazão zero, em seguida a vazão do tanque 2 foi liberada para a verificação da resposta do sistema. Os dados obtidos não sofreram nenhum tipo de filtragem ou tratamento, apenas um ganho de valor aproximado 53 foi aplicado a tensão de entrada gerada nos eletrodos. Assim sendo, é possível observar que existe ainda muito ruído no sistema, possuindo picos indesejáveis de tensão, porém, mais ao centro, a amplitude do sinal possui um comportamento interessante, em que quando o sistema apresenta uma determinada vazão a amplitude central do sinal possui uma variação considerável, além também de existir o deslocamento da curva.

Gráfico 3 – Simulação 1 realizada no primeiro ensaio

Fonte: Autoria própria.

Um comportamento semelhante ao da primeira simulação, Gráfico 3, é possível observar também na segunda simulação realizada, apresentada no Gráfico 4. O sistema inicia fechado, depois ocorre a abertura da válvula do tanque 2 e após alguns segundos é aberta a válvula do tanque 1 e fechada a do tanque 2, por fim a vazão é zerada com o fechamento do sistema.

Gráfico 4 – Simulação 2 realizada no primeiro ensaio

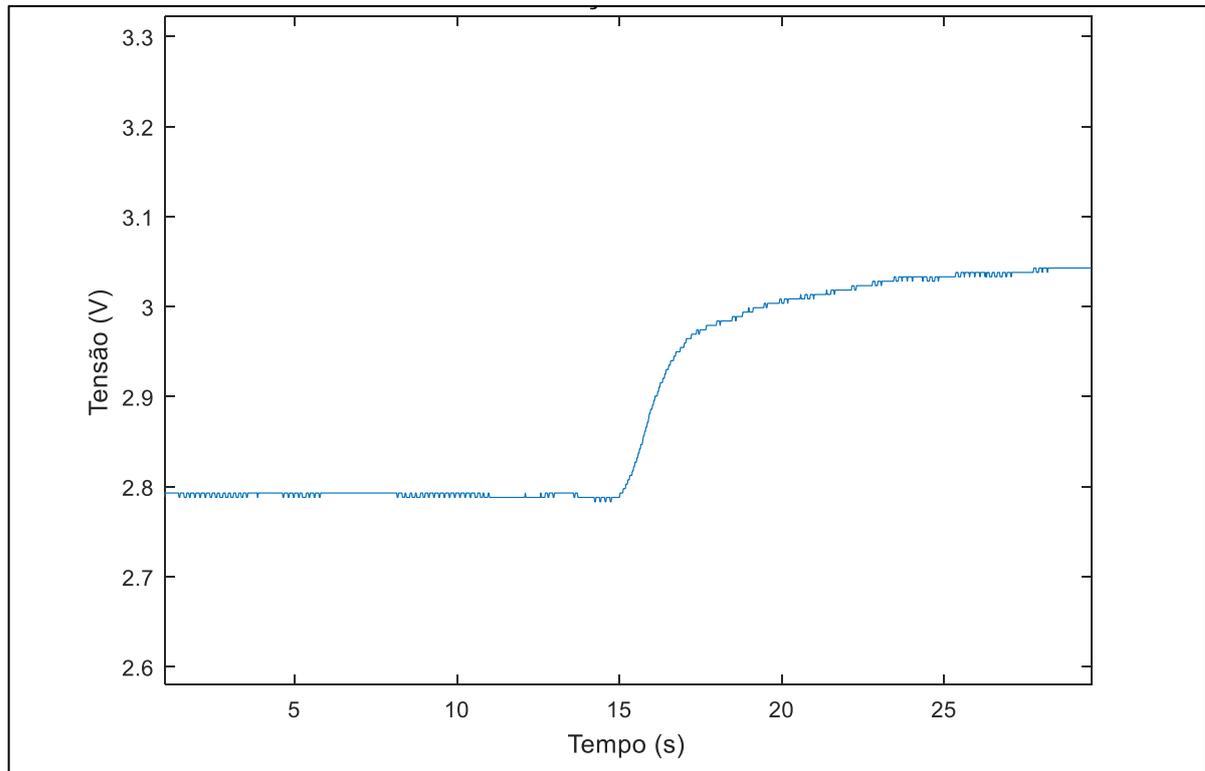


Fonte: Autoria própria.

As simulações realizadas permitem afirmar que existe um valor de tensão gerado e que ele é proporcional a vazão que atravessa o protótipo, mesmo apresentando muito ruído e picos indesejáveis. Para corrigir o sinal gerado, foi implementado um filtro digital de média móvel, com 50 coeficientes.

4.2 Segundo ensaio

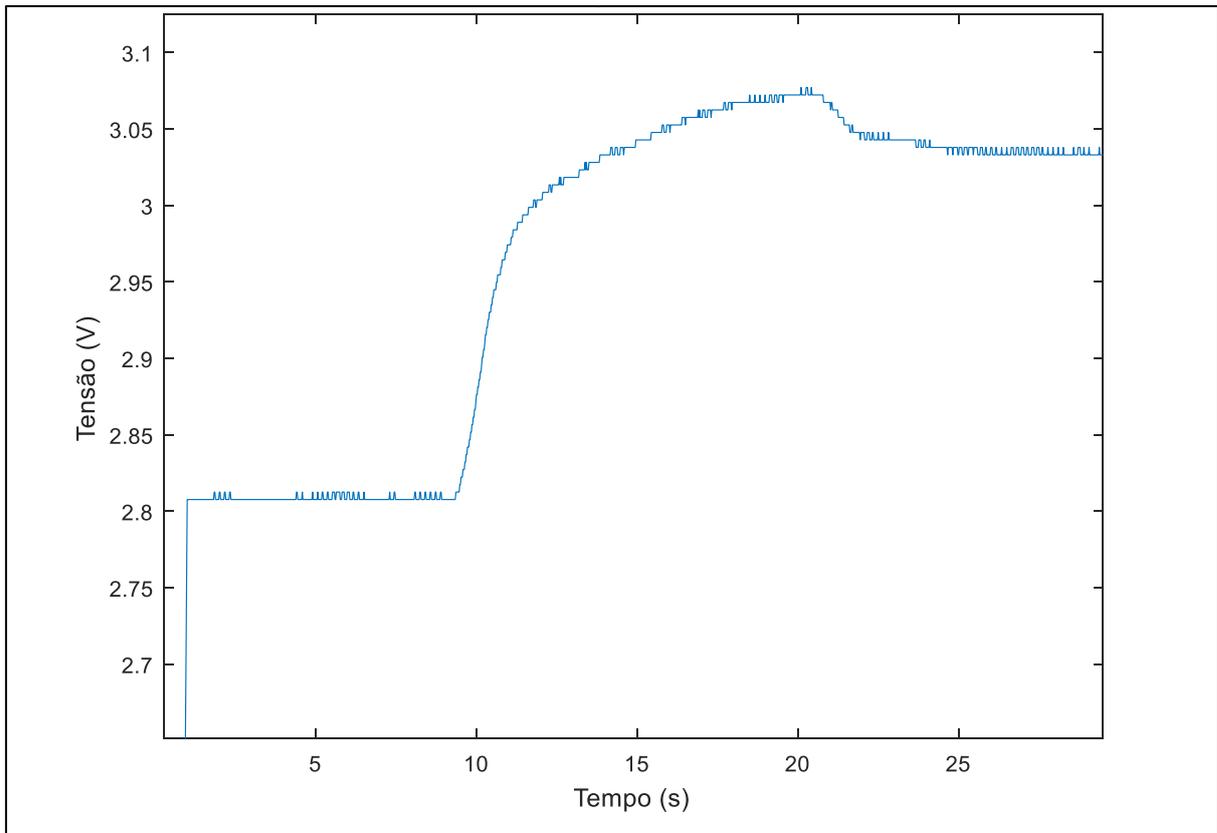
Para o segundo ensaio os dados obtidos do protótipo foram submetidos a um filtro digital de média móvel com 50 amostras implementado na programação interna do *Arduino*. Na primeira simulação o sistema iniciou com vazão zero e então após 15 segundos a vazão do tanque 2 foi liberada. O Gráfico 5 apresenta o resultado gerado.

Gráfico 5 – Simulação 1 realizada no segundo ensaio

Fonte: Autoria própria.

Uma segunda simulação é realizada aplicando ao sistema 3 diferentes vazões, a primeira é o sistema com vazão zero, após alguns segundos a vazão do tanque 2 é aplicada e por fim é alterada a vazão para a proporcionada pelo tanque 1. O Gráfico 6 apresenta o resultado gerado.

Gráfico 6 – Simulação 2 realizada no segundo ensaio



Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos no segundo ensaio foram muito mais satisfatórios apresentando diferentes valores do sistema em diferentes vazões. O resultado se tornou mais claro e limpo, sendo possível observar a variação do valor de tensão nas diferentes vazões dos tanques, porém a aplicação do filtro causa um atraso na resposta do sistema a mudanças, mas nenhum fator que cause problemas na medição.

4.3 Calibração do protótipo

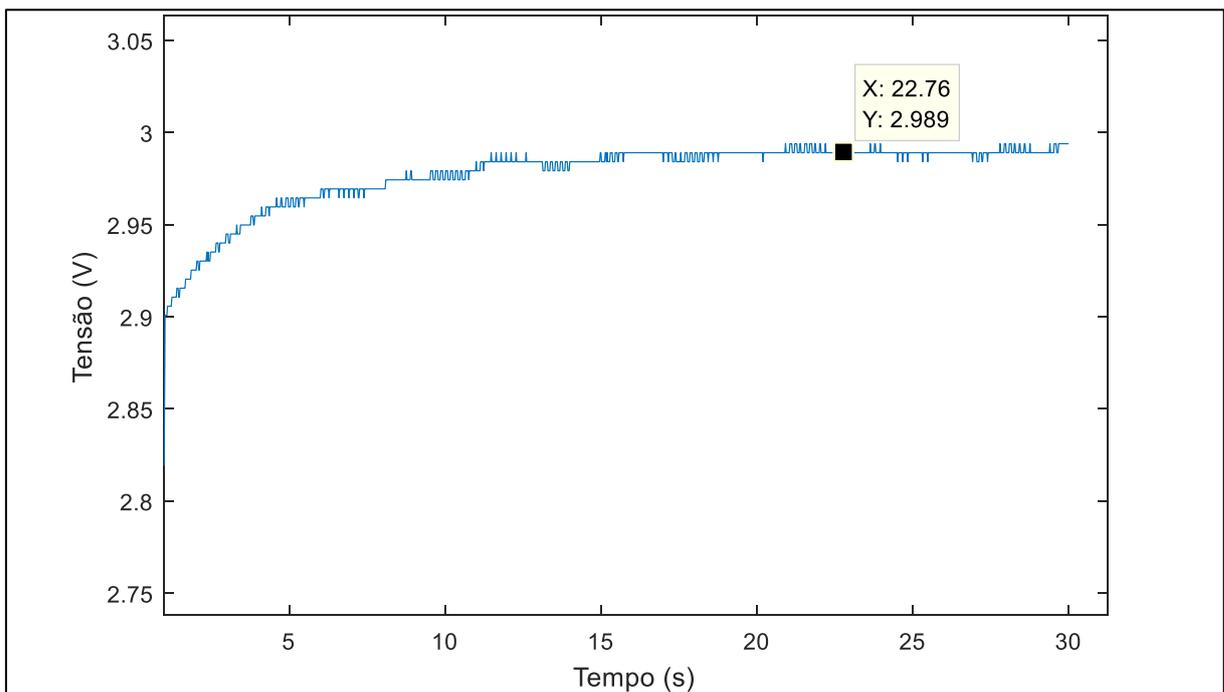
O processo de calibração foi realizado de forma a obter a tensão gerada pelo fluxo contínuo da vazão de cada um dos tanques. Previamente, utilizando o fluxômetro de referência, foram determinadas as vazões que atravessariam o protótipo, sendo Q_1 para a vazão do tanque 1 e Q_2 para a vazão do tanque 2.

$$Q_1 = 16,91 \frac{L}{min}$$

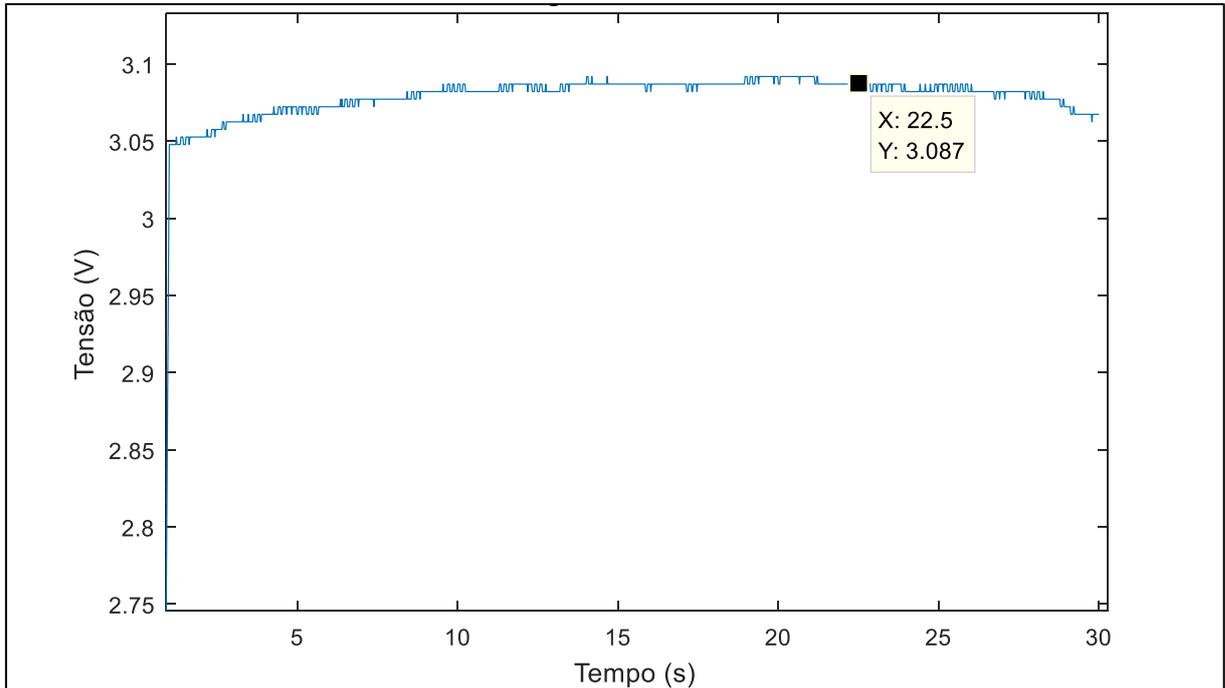
$$Q_2 = 24,18 \frac{L}{min}$$

Os gráficos abaixo apresentam os valores de tensão e gerados por Q_1 e Q_2 . Vale salientar que a obtenção dos resultados é realizada com o fluxo já contínuo, sem sofrer alterações, o atraso presente no gráfico na determinação final de e deve-se a utilização do filtro de média móvel.

Gráfico 7 – Tensão gerada pela vazão Q1



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 8 – Tensão gerada pela vazão Q2

Fonte: Autoria própria.

Conforme apresentado na seção 3.1 a vazão Q se relaciona com a tensão e por meio de uma constante K' definida por $\pi \cdot D/4B$, assim sendo, os cálculos a seguir são realizados com o objetivo de confirmar a linearidade do sistema.

Assumindo $B_2 = 0,198 T$ determinado na seção 3.2, os mesmos cálculos são realizados para determinar o campo B_1 . Tendo que a vazão gerada pelo tanque 1

$$Q_1 = 16,91 L/min = 0,000282 m^3/s$$

e o diâmetro $D = 0,016 m$, temos que

$$V_1 = 1,402 m/s$$

Sendo assim, com tensão $e_1 = 4,483 mV$

$$B_1 = 0,1999 T$$

A partir de B_1 e B_2 calculados, substituindo na equação em K' , tem-se que

$$K_1 = 0,0629$$

$$K_2 = 0,0634$$

A tabela abaixo apresenta o valor estimado da vazão gerada pela tensão e_1 encontrada utilizando os parâmetros determinados a partir de e_2 e Q_2 e a equação 9.

Tabela 1 – Dados obtidos a para a vazão Q1 a partir da vazão Q2

$B_2(T)$	$D(m)$	K'_2	$e_1(mV)$	Q_1 calculada (L/min)	Q_1 real (L/min)
0,198	0,016	0,0634	4,483	17,06	16,91

Fonte: Autoria própria.

Os valores encontrados para os diferentes tanques possuem pequenas divergências, o que permite concluir a linearidade e a proporcionalidade K' entre a Q e e . O Gráfico 9 é gerado utilizando os dados da tabela 2, a partir destes valores é possível determinar a linha tendência e a equação linear do sistema, apresentada na equação 13.

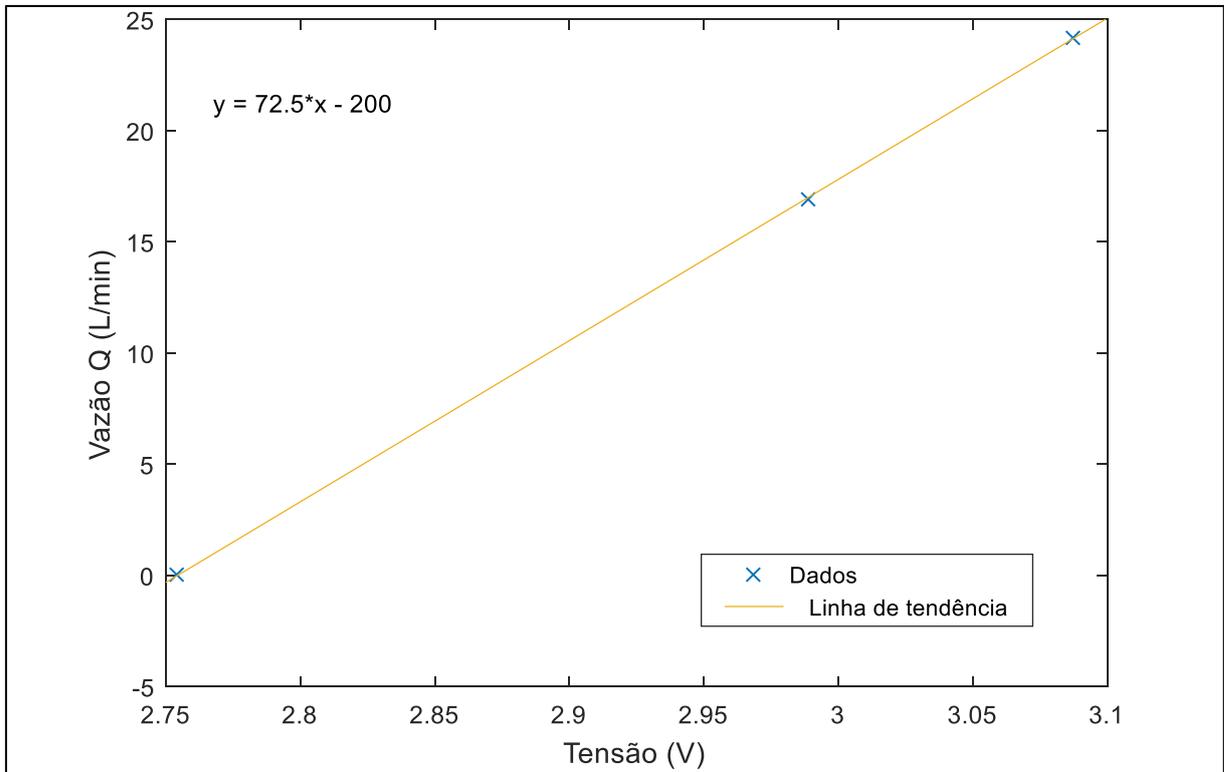
Tabela 2 – Valores calculados de vazão para cada valor de tensão

$e(V)$	$Q(L/min)$
2,754	0
2,989	16,91
3,087	24,18

Fonte: Autoria própria.

$$y = 72,5 * x - 200 \quad (13)$$

Gráfico 9 – Dados e linha de tendência obtida para o sistema



Fonte: Autoria própria.

Para a calibração do protótipo foi escolhido o K_2' como parâmetro de proporcionalidade que relaciona Q com e representada pela equação 9, assim considerando que

$$e = \frac{\text{senal} - \text{trimZero}}{G} \quad (14)$$

Sendo *senal* o valor de tensão detectado nos eletrodos do protótipo, *trimZero* o valor de tensão detectado com vazão zero e G o ganho de sinal aplicado pelo amplificador. Substituindo a equação 14 em 9, temos, em m^3/s , que

$$Q = K' * \frac{\text{senal} - \text{trimZero}}{G} \quad (15)$$

Como $\text{trimZero} = 2,754 \text{ V}$, $G = 52,42$ e $K' = 0,0634$, substituindo os valores na equação 15, obtém-se

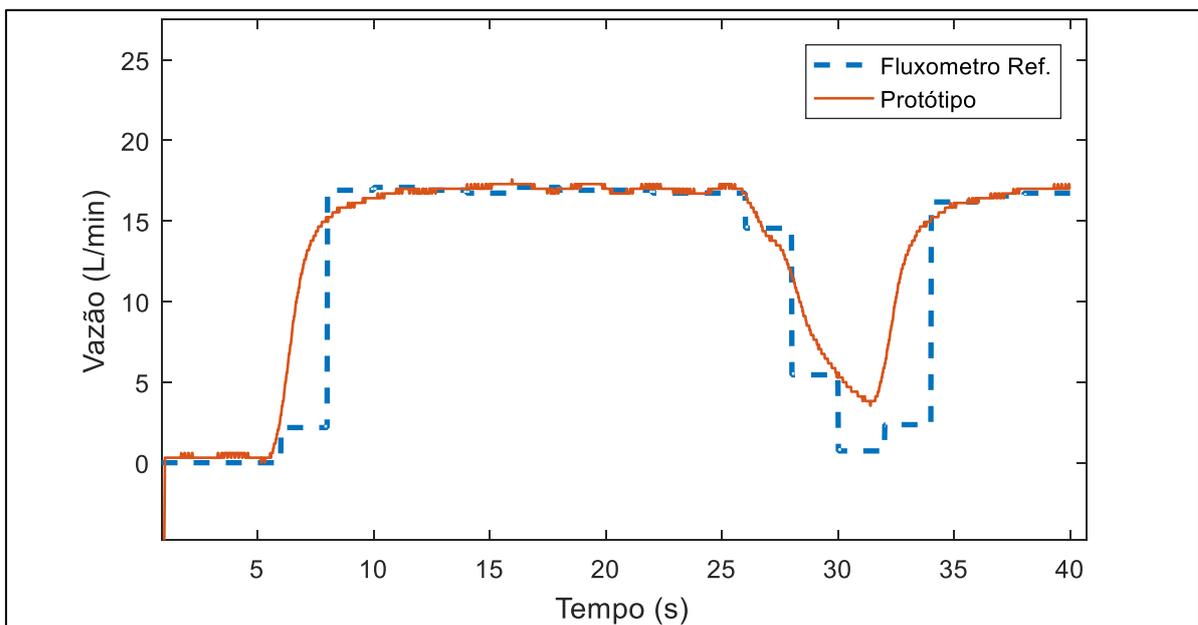
$$Q = 0,00121 * \text{senal} - 0,00333 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

Convertendo para L/min , a equação final de parametrização é dada por

$$Q = 72,6 * sinal - 199,85 \quad (16)$$

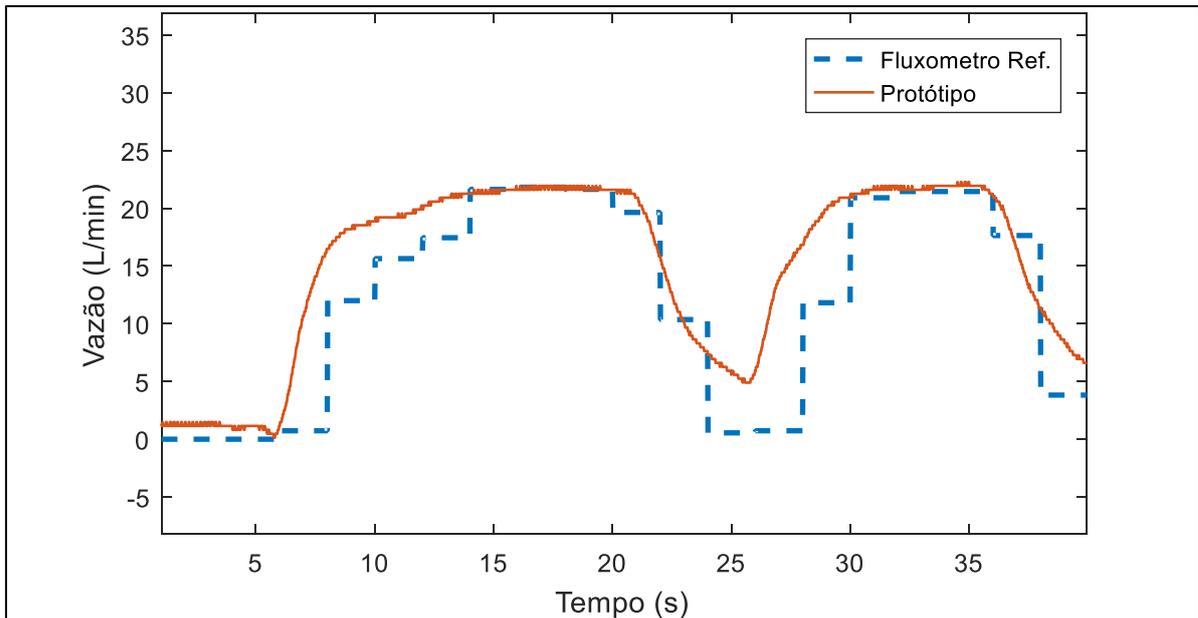
Com equação 16 definida, foi aplicada no código de processamento digital do sinal, para conversão em tempo real do valor de tensão para vazão, em L/min , sendo possível realizar a comparação com os valores fornecidos pelo fluxômetro de referência utilizado. Os gráficos abaixo demonstram um comparativo entre a vazão de referência e a obtida no protótipo. Os valores obtidos como referência apresentam suas variações em degraus, isso ocorre devido a taxa de atualização da variável ocorrer a cada 2 segundos, intervalo em que é realizado o incremento dos pulsos gerados e a conversão para o valor de vazão apresentado.

Gráfico 10 – Comparação entre a vazão do protótipo com a referência para Q1



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 11 – Comparação entre a vazão do protótipo com a referência para Q2



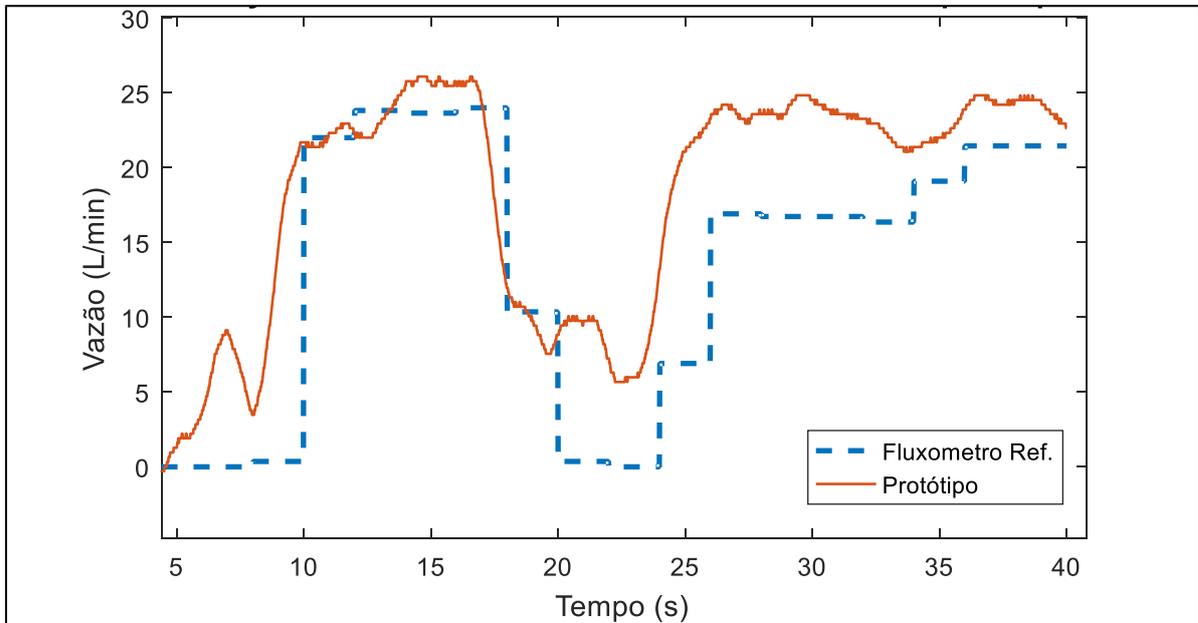
Fonte: Autoria própria.

A geração dos resultados foi realizada separadamente para cada um dos tanques com o objetivo de evitar a formação de bolhas na tubulação e causar interferências e erros de medição, sendo então realizada a variação da vazão utilizando apenas a válvula instalada após o protótipo. A partir destes resultados e gráficos gerados é possível visualizar de forma mais qualitativa o comportamento do protótipo frente a diferentes vazões, percebe-se que a diferença entre as duas curvas é muito pequena quando estabilizada a vazão, porém quando ocorre uma variação, o protótipo apresenta uma rápida resposta e estabilização do valor quando aumentada a vazão e uma rápida resposta, porém uma lenta estabilização quando reduzido o fluxo.

No Gráfico 12 é apresentado o resultado do teste realizado alterando a vazão por meio de válvulas instaladas anteriormente ao protótipo, isso causa na tubulação a formação de bolhas, responsáveis por gerar erros de medição e maiores ruídos no sistema. Observa-se que o erro entre as duas variáveis comparadas aumenta comprometendo a confiabilidade da medição, é importante salientar que a presença de bolhas na tubulação é fator crítico apenas para o medidor eletromagnético, conforme já explicado na seção 2, o fluxômetro de referência

utilizado não apresenta quaisquer influência para a determinação da vazão instantânea sofrida por formação de bolhas na tubulação.

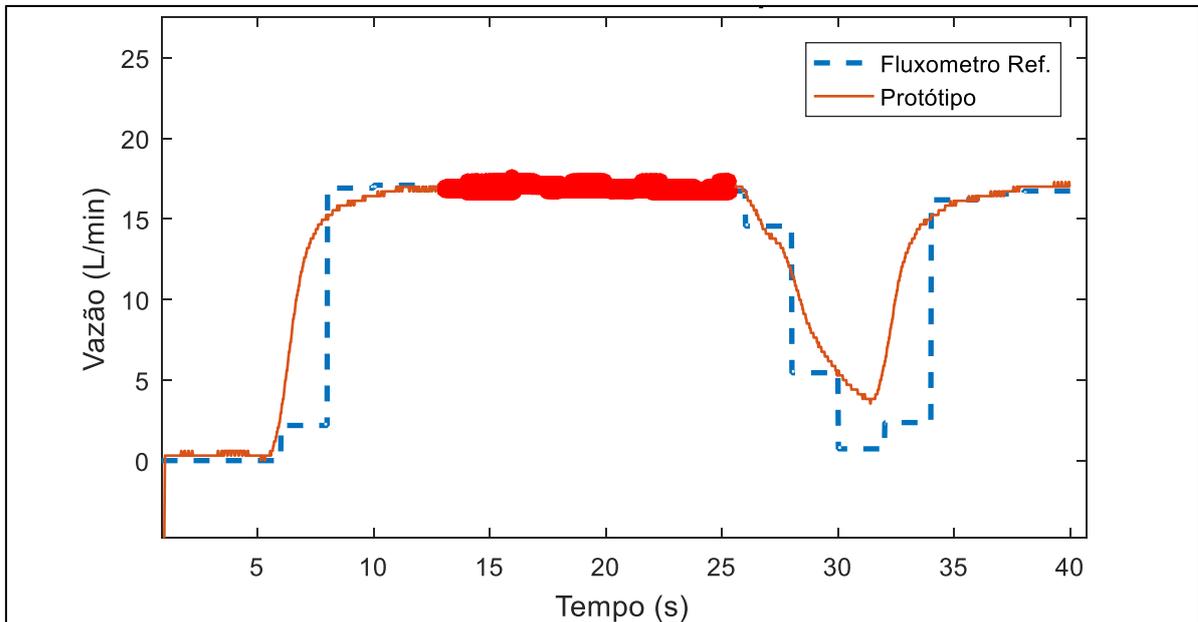
Gráfico 12 - Comparação entre a vazão do protótipo com a referência para variação com bolhas



Fonte: Autoria própria.

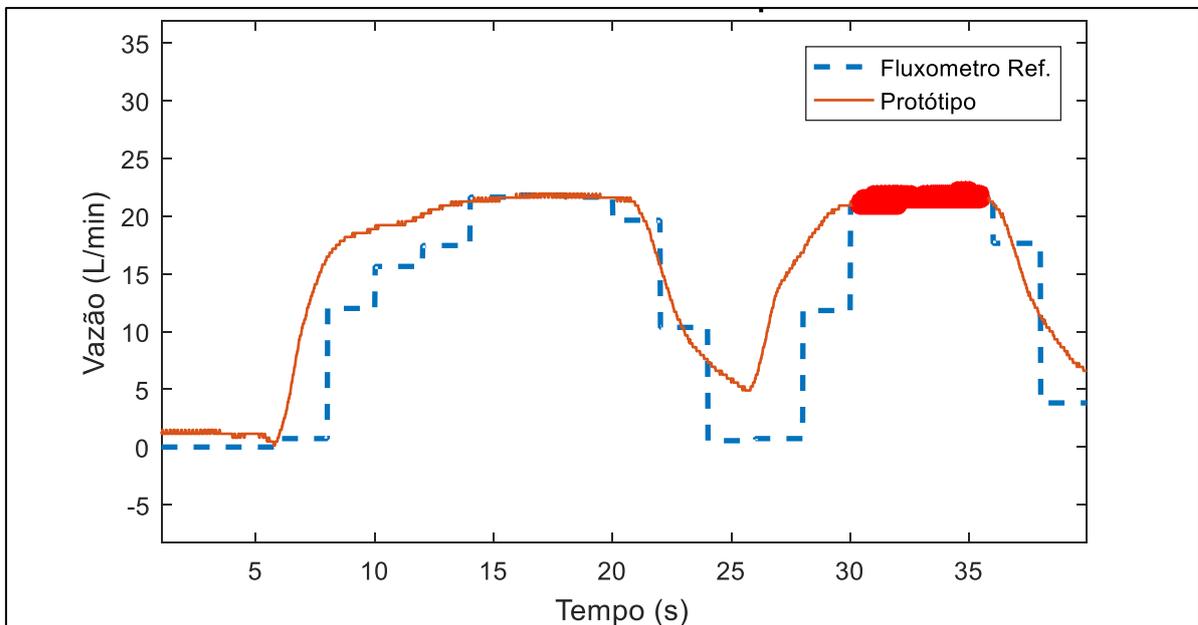
A seguir, tendo os valores para comparação de ambos os medidores, foi realizada a análise estatística do equipamento em desenvolvimento utilizando os dados das medições realizadas com a vazão considerada perfeita para o instrumento, ou seja, tubo completamente preenchido e sem a presença de bolhas, conforme apresentados nos Gráficos 10 e 11 anteriores. Foram realizados os cálculos assumindo como base de dados os valores nos intervalos destacados nos Gráficos 13 e 14. A Tabela 3 apresenta os valores estatísticos calculados nesta análise.

Gráfico 13 – Intervalo utilizado para a análise estatística para vazão Q1



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 14 - Intervalo utilizado para a análise estatística para vazão Q2



Fonte: Autoria própria.

Tabela 3 – Análise estatística do protótipo para as vazões Q1 e Q2 isentas de bolhas

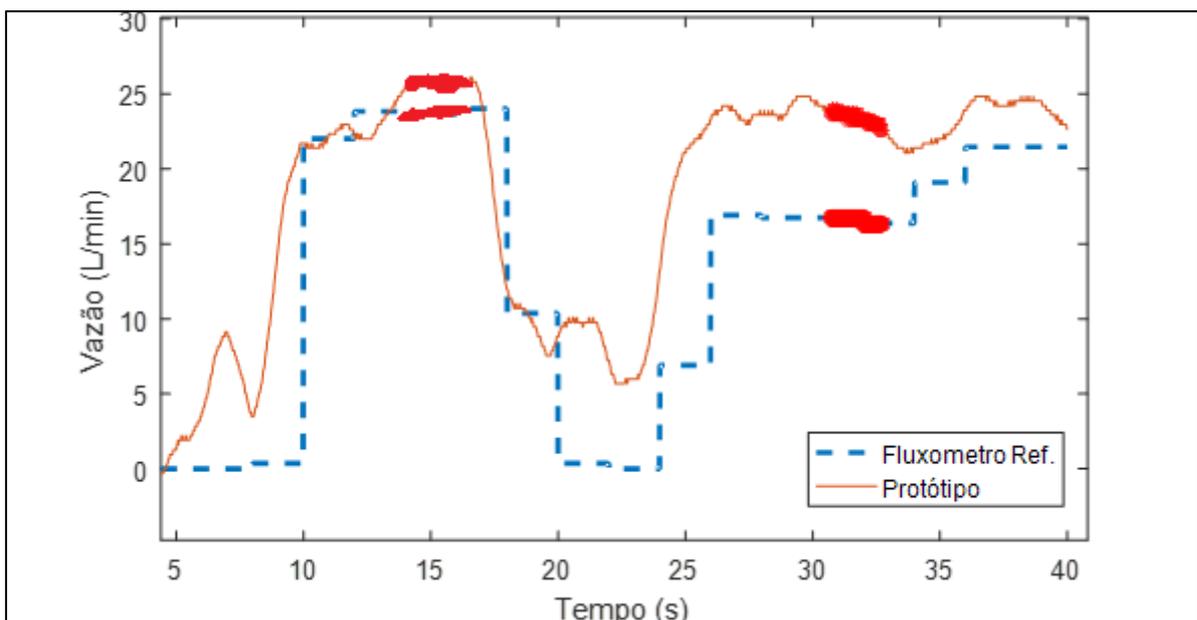
	Vazão Protótipo (L/min)	Vazão de Referência (L/min)	Erro percentual
	Média ± desvio padrão	Média ± desvio padrão	Média ± desvio padrão
Q1	17,042 ± 0,204	16,861 ± 0,131	1,060 ± 1,370
Q2	21,796 ± 0,208	21,289 ± 0,250	2,352 ± 1,210

Fonte: Autoria própria.

Pode-se perceber que o equipamento possui um erro percentual muito pequeno entre os resultados obtidos com os dois medidores, possuindo uma boa exatidão, porém quando elevada a vazão o percentual de erro e o desvio padrão das amostras aumentam apresentando um maior erro percentual, $2,352 \pm 1,210$, quando a vazão Q2 é aplicada.

Com o objetivo de comparar numericamente a influência de bolhas sobre sistema, foi realizada a análise estatística também sobre os dados obtidos no Gráfico 12 considerando os valores captados nos intervalos destacados no Gráfico 15. Os resultados são apresentados na Tabela 4.

Gráfico 15 - Intervalo utilizado para a análise estatística para vazão com presença de bolhas



Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 - Análise estatística do protótipo para as vazões Q1 e Q2 com a presença de bolhas

	Vazão Protótipo (L/min)	Vazão de Referência (L/min)	Erro porcentual
	Média ± desvio padrão	Média ± desvio padrão	Média ± desvio padrão
Q1	23,341 ± 0,275	16,600 ± 0,178	28,881 ± 0,520
Q2	25,736 ± 0,252	23,670 ± 0,101	8,028 ± 1,040

Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos apresentaram um erro porcentual muito maior do que nos testes realizados anteriormente, passou de $2,352 \pm 1,210\%$ para $8,028 \pm 1,040\%$ quando aplicado Q2 e de $1,060 \pm 1,370\%$ para $28,881 \pm 0,520\%$ quando aplicado Q1. No momento de alteração da vazão Q2 para Q1, em $t = 24$ segundos, a quantidade de bolhas na tubulação aumenta consideravelmente, conseqüentemente a diferença entre a leitura do protótipo e o fluxômetro de referência também aumentam.

5 CONCLUSÃO

O projeto apresenta o estudo dos princípios de funcionamento, métodos de construção para todos os elementos do protótipo, a forma correta de montagem e instalação final do medidor eletromagnético, detalhes da parametrização para interpretação e conversão do sinal de tensão gerado para vazão que atravessa a tubulação, calibração do equipamento e também resultados quantitativos e qualitativos das medições realizadas com instrumento, tendo como referência um fluxômetro do tipo túrbida que realiza os cálculos da vazão instantânea baseados em pulsos gerados pelas suas hélices captados por um sensor hall.

Uma estrutura de testes foi desenvolvida para a execução dos ensaios. A estrutura apresenta dois diferentes níveis de altura, isto permitiu a obtenção de dois diferentes valores de vazão para o sistema, garantindo também que em qualquer momento dos testes a vazão seria a mesma.

Testes iniciais foram realizados com o objetivo de comprovar o princípio teórico e o funcionamento do protótipo. O sinal gerado é na ordem dos mV, portanto um circuito amplificador é necessário para a leitura do valor pelo conversor A/D utilizado. Aplica-se um ganho de 53 utilizando a variação da resistência no potenciômetro instalado no amplificador de instrumentação AD620. Os resultados obtidos apresentaram um perfil de curva que aponta a geração de sinal quando existe a presença de fluxo na tubulação, porém contendo muito ruído e inconsistência na medição, este problema foi solucionado invertendo as entradas dos eletrodos no circuito de amplificação e também desenvolvendo um filtro de média móvel para suavização dos ruídos gerados.

No segundo ensaio, realizado já com o filtro implementado, os resultados se mostraram de forma muito mais satisfatória, apresentando uma curva de tensão clara e pouco ruidosa diretamente proporcional a variação da vazão no sistema, o que comprova e permite afirmar a veracidade do princípio de funcionamento do medidor eletromagnético.

Comprovado o funcionamento, realizou-se a parametrização das variáveis envolvidas no sistema, para isso foram captadas as tensões geradas no protótipo e a

vazão no fluxômetro de referência para cada um dos tanques da estrutura de testes. Foi definido a partir destes valores uma linha de tendência que determina a vazão de acordo com o valor de tensão captados nos eletrodos. O campo magnético também é calculado utilizando os valores determinados em testes, de forma a aplicar uma engenharia reversa.

Para definir a linha de tendência utilizada, foram definidos como base os valores detectados pela vazão $Q_2 = 24,18 \text{ L/min}$, assim a conversão da tensão para vazão, realizada pelo sistema de aquisição, é definida pela equação 16. Com todos os parâmetros e a equação de parametrização e conversão definidos, foram realizados os testes de comparação da leitura da vazão do protótipo com a referência. Os resultados obtidos nos Gráficos 9 e 10 apresentaram uma boa precisão e resposta para o medidor eletromagnético, a estabilização é rápida quando detectado um aumento da vazão, porém quando a vazão é reduzida o sistema tende a demorar mais para estabilizar e atingir o valor final.

Em seguida, foi realizada a calibração do protótipo, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3. Utilizando a análise estatística dos resultados, é possível perceber que o erro apresentado é pequeno, $1,060 \pm 1,370 \%$ para $21,29 \text{ L/min}$ e de $2,352 \pm 1,210 \%$ para $16,68 \text{ L/min}$ o que permite concluir que o protótipo possui uma excelente precisão quando a tubulação está completamente preenchida e sem a presença de bolhas. Porém, quando o sistema é submetido a testes que causam a formação de bolhas no tubo, os resultados obtidos não se apresentam satisfatoriamente e os erros de medição são muito maiores, $8,028 \pm 1,040 \%$ para $23,67 \text{ L/min}$ e de $28,881 \pm 0,520 \%$ para $16,60 \text{ L/min}$.

O sistema possui sensibilidade mecânica e elétrica o que pode ser justificada pela construção completamente artesanal da estrutura do medidor, portanto qualquer variação e deslocamento do protótipo como um todo ou qualquer um de seus elementos, como os eletrodos de captação, podem causar diferenças nas medições.

O projeto desenvolvido atingiu todos os objetivos propostos e os resultados obtidos e análises permitem concluir que o protótipo do medidor desenvolvido possui a capacidade de realizar a medição da vazão com uma boa precisão, porém apenas quando as condições de fluxo se apresentam nas condições ideais, quando existe qualquer variação nessas condições, como a formação de bolhas, a leitura e a

precisão são prejudicadas. Para projetos futuros podem ser considerados o estudo da interferência e erros causados por ar na tubulação e uma forma de compensar e amenizar a sua influência na medição, outro trabalho interessante é realizar a medição e análise do comportamento do medidor quando aplicada vazão com um fluido diferente de água verificando se a tensão encontrada varia para diferentes fluidos utilizados, existe também a possibilidade de desenvolver um sistema de detecção e medição da vazão quando a tubulação está parcialmente preenchida.

REFERÊNCIAS

- ANALOG DEVICES. **Low Cost Low Power Instrumentation Amplifier**: Datasheet AD620. Disponível em: <<http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD620.pdf>>. Acesso em: 04 maio de 17.
- ANTONIOU, A. **Digital filters**: analysis, design and applications. 2 ed. New York: McGraw-Hill, 2000.
- BAKER, R. C. **Flow measurement handbook**: industrial designs, operating principles, performance, and applications. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 2005.
- BEGA, E. A (Org.) ... [et. Al.]. **Instrumentação industrial**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.
- BECKER, A. J.; SILVA, D. M. I.; DIAS, F. H. S.; PINHEIRO, L. K. **Noções básicas de programação em MATLAB**. Santa Maria: UFSM, 2010.
- BOJORGES, N. **Sistemas de Medição de Vazão**. Departamento de Engenharia Química e de Petróleo da UFF. Disponível em: <http://professor.ufop.br/sites/default/files/adrielle/files/aula_7_1.pdf>. Acesso em: 05 de abril 2017.
- BOYLESTAD, R. L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.
- COLANTONIO, R. **Estudo e implementação de um medidor de vazão eletromagnético para pesquisa na área de circulação assistida**, Tese de Mestrado, São Caetano do Sul: IMT, 2007.
- DELMÉE, G. J. **Manual de medição de vazão**. 3. ed. rev. e atual. São Paulo: Edgard Blucher, 2003.
- FRANÇA, F. A. **Instrumentação e Medidas: grandezas mecânicas**, UNICAMP 2007.
- GONÇALVES, M. G. **Monitoramento e controle de processos, 2**. Rio de Janeiro: Petrobrás; Brasília: SENAI/DN, 2003.
- HALLIDAY, D. **Fundamentos de física: eletromagnetismo, vol3**. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- HAYWARD, A. T. J. **Flowmeters**: a basic guide and source-book for users. London: The Macmillian Press LTD, 1979.

INCONTROL S. A. **Manual de operação e instalação:** medidor e transmissor de vazão. Disponível em: <http://www.levelcontrol.com.br/Fotos/Vazao/VMS_Jul14.pdf> Acesso em: 05 de abril 2017.

INGLE, V. K.; PROAKIS, J. G. **Digital signal processing using MATLAB.** 3. ed. Stamford: Cengage Learning, 2007.

KE, L; SLATTERY, C. **Electromagnetic flow meters achieve high accuracy in Industrial applications.** [S.l.]: Analog Dialogue, 2014.

KITCHIN, C; COUNTS, L. **A designer's guide to instrumentation amplifiers.** 3. ed. USA: Analog Devices, 2006.

MARTINS, N. **Manual de medição de vazão:** através de placas de orifício, bocais e venturis. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

MIRANDA, I. S. L. **Presença de ar no sistema de abastecimento de água:** influências na macro e micromedição, Trabalho de Diplomação, Porto Alegre: UFRS, 2011.

MOLINA, R. V. **Desenvolvimento de Procedimentos de Auto-Teste em Sensores de Vazão Eletromagnéticos,** Tese de Doutorado, Itajubá: UNIFEI, 2008.

RIBEIRO, M. A. **Medição de vazão:** fundamentos e aplicações. 6. ed. Salvador: Tek Treinamento & Consultoria, 2004.

SBEB. **Instrumentação e técnicas de medidas:** amplificadores e circuitos especiais. Disponível em: <http://www.peb.ufrj.br/cursos/eel710/EEL710_Modulo04.pdf>. Acesso em: 10 maio 2017.

SOISSON, H. E. **Instrumentação industrial.** Curitiba: Hemus S.A, 2002.

TAYLOR, F. J. **Digital filters:** principles and applications with MATLAB. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2012.

THEORYCIRCUIT. **Water Flow Sensor YF-S201 Arduino Interface.** Disponível em: <www.theorycircuit.com/water-flow-sensor-yf-s201-arduino-interface/>. Acesso em: 16 maio de 19.

TIEJUN, L. **Development of an electromagnetic flowmeter with dual frequency excitation.** Telkomnika, v.10, n.8, pp. 2013-2019, dez 2012.

TIPLER, P. A. **Física:** eletricidade e magnetismo, ótica, vol2. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

APÊNDICE A – FLUXO DE CONTROLE IMPLEMENTADO NO ARDUINO