

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS  
CAMPUS AVANÇADO DE POÇOS DE CALDAS  
BACHARELADO INTERDISCIPLINAR CIÊNCIA E TECNOLOGIA

SPYRIDION HARITOS BORGES  
EDUARDO CORREA

**DIMENSIONAMENTO E CALIBRAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO  
DE VAZÃO UTILIZANDO UM SENSOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL**

POÇOS DE CALDAS/MG

2019

SPYRIDION HARITOS BORGES

EDUARDO CORREA

**DIMENSIONAMENTO E CALIBRAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO  
DE VAZÃO UTILIZANDO UM SENSOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL**

Monografia apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal de Alfenas, *Campus* Poços de Caldas

Orientador: Laos Alexandre Hirano

Coorientador: Marcos Vinicius Rodrigues

POÇOS DE CALDAS/MG

2019

SPYRIDION HARITOS BORGES

EDUARDO CORREA

**DIMENSIONAMENTO E CALIBRAÇÃO DE UM EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO UTILIZANDO UM SENSOR DE PRESSÃO DIFERENCIAL.**

Trabalho de Conclusão de Curso I, supervisionado pelo Orientador Dr. Laos Alexandre Hirano, como parte das exigências para obtenção do título de Bacharel Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia.

Trabalho aprovado. Poços de Caldas xx de julho de 2019:

---

Dr. Laos Alexandre Hirano

Orientador

---

Dr. Marcos Vinicius Rodrigues

Coorientador

---

Dr. Marlus Pinheiro Rolemberg

Convidado

POÇOS DE CALDAS/MG

Julho de 2019

Dedicamos primeiramente a Deus, pois Ele nos permitiu essa conquista. Aos nossos familiares e amigos que estiveram presentes e nos apoiaram durante todo o caminho percorrido.

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Alfenas pela oportunidade oferecida e disponibilidade dos equipamentos e laboratórios.

Aos Professores Drs. Laos Alexandre Hirano e Marcos Vinícius Rodrigues pelo conhecimento transmitido, apoio e confiança na realização deste trabalho.

Aos Técnicos Ícaro Hissao Rocha Manda e Bruno Dias de Souza pela paciência, por toda ajuda oferecida na montagem do protótipo e na realização dos experimentos laboratoriais.

Agradecemos também aos familiares e amigos que nos apoiaram durante todo o período de pesquisa e graduação.

## RESUMO

A vazão é uma variável fundamental em diversos processos industriais, como nos setores alimentício, de mineração e químico. Na unidade curricular de Mecânicas dos Fluidos, presente no curso de Bacharelado em Ciências e Tecnologia, oferecida pela Universidade Federal de Alfenas, campus Poços de Caldas, os discentes realizam a prática de determinação da vazão. Esta unidade curricular é obrigatória para a formação de engenheiros químicos e um dos pré-requisitos para a obtenção do registro no Conselho Regional de Engenharia e Agronomia (CREA). Porém, a prática apresenta problemas de execução devido à falta de um instrumento capaz de determinar a variação de pressão causada por um obstáculo no interior do conduto e, conseqüentemente, o valor da vazão. Com este princípio, a monografia presente apresenta o desenvolvimento de um protótipo capaz de aperfeiçoar a prática através da utilização de uma plataforma Arduino UNO e um sensor de pressão diferencial piezoresistivo MPX5700DP, obtendo uma maior precisão nos resultados e melhor custo/benefício. Para o desenvolvimento do protótipo, a calibração da pressão diferencial do sensor foi realizada e uma resposta linear referente a pressão imposta foi obtida, comprovando a informação apresentada pelo fabricante e a eficiência e confiabilidade na determinação de pressão diferencial. A medição da vazão do projeto baseia-se na variação de pressão causada por uma placa de orifício, definida pelo sensor, relacionando as variáveis de vazão e pressão diferencial pelos conceitos de mecânicas dos fluidos. A calibração da vazão apresentou uma resposta coerente à esperada pela revisão bibliográfica e o erro associado a medida é aceitável para um instrumento com fins didáticos. Por fim, o medidor utilizado é capaz de realizar leituras confiáveis e rápidas com um custo de R\$ 187,21 reais, valor bem abaixo do que é encontrado no mercado, comprovando as justificativas e hipóteses deste projeto.

**Palavras-chave:** Sensor de Pressão Diferencial Piezoresistivo, Medidor de Vazão, Calibração.

## ABSTRACT

The Flow rate is a fundamental variable in several industrial processes, as food industry, mining and chemical processes. In the curricular unit of Fluid Mechanics, present in the course of Bachelor of Science and Technology, offered by the Federal University of Alfenas, Poços de Caldas campus, the students perform the practice of determining the flow rate. This curricular unit is mandatory for training of chemical engineers and one of the prerequisites for a registration service at the Regional Council of Engineering and Agronomy (CREA). However, the practice presents problems of execution due to the lack of an instrument capable of determining the pressure variation caused by an obstacle inside the conduit and, consequently, the flow rate. With this principle, the present monograph presents the development of a prototype capable of improving the practice through the use of an Arduino UNO platform and a piezoresistive differential pressure sensor MPX5700DP, obtaining a greater accuracy in the results and better cost benefit. For the development of the prototype, the differential pressure calibration of the sensor was performed and a linear response to the pressure imposed was obtained, proving the information presented by the manufacturer and the efficiency and reliability in the differential pressure determination. The measurement of flow rate in this project is based on pressure variation by an orifice board, defined by the sensor, relating the flow rate and differential pressure variables by the concepts of fluid mechanics. The flow calibration presented a coherent response to that expected by the bibliographic review and the error associated with the measurement is acceptable for an instrument with didactic purposes. Lastly, the meter used is able to perform reliable and fast readings with a cost of R\$ 187.21, value well below what is found on the market, proving the justifications and hypotheses of this project.

**Keywords:** Piezoresistive differential pressure sensor, determination of flow rate, calibration.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sensor de pressão por membrana.....	12
Figura 2: Sensor de pressão por capacitância .....	13
Figura 3: Sensor de pressão piezoelétrico. ....	13
Figura 4: Configuração do sensor de pressão diferencial. ....	14
Figura 5: Tipos de deflexão da membrana de um sensor de pressão diferencial. ....	15
Figura 6: Tipos de placas de orifício.....	18
Figura 7: Desenho esquemático de um escoamento através de uma placa de orifício .....	19
Figura 8: Diagrama e esquematização do orifício. ....	20
Figura 9: Fluxograma das etapas realizadas neste trabalho.....	21
Figura 10: Fluxograma das etapas para a montagem do circuito de aquisição e interface.....	21
Figura 11: Desenho técnico do Sensor MPX5700DP.....	22
Figura 12: Output vs. Differential Pressure. ....	24
Figura 13:Desacoplamento da fonte de alimentação e filtragem de saída recomendados.....	25
Figura 14: Esquematização do circuito. ....	27
Figura 15: Placa contendo os manômetros em U usados na calibração da pressão. ....	28
Figura 16: Modelo da placa de orifício instalada. ....	29
Figura 17: Posicionamento do sensor em relação a placa de orifício. ....	30
Figura 18: Circuito de aquisição e interface. ....	31
Figura 19: Regressão linear dos pontos obtidos experimentalmente para calibração da pressão.....	34
Figura 20: Validação da regressão linear do sensor de pressão diferencial. ....	35
Figura 21: Regressão linear dos pontos obtido experimentalmente para a calibração da vazão.....	38
Figura 22: Validação da regressão linear do transdutor de vazão corrigida.....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características de Operação ( $V_S = 5.0 \text{ Vdc}$ , $T_a = 25^\circ\text{C}$ , $P_1 > P_2$ ).....	23
Tabela 2: Conexões do display 16x2 com Arduino. ....	26
Tabela 3: Relação de preços e custo total da montagem do protótipo.....	32
Tabela 4: Dados obtidos experimentalmente na calibração de pressão. ....	33
Tabela 5: Valores obtidos na linearização da curva de calibração de pressão. ....	34
Tabela 6: Resultados obtidos na linearização da curva de calibração da pressão corrigida.....	35
Tabela 7: Resultados obtidos na calibração da vazão. ....	37
Tabela 8: Valores obtidos na linearização da curva de calibração da vazão. ....	38
Tabela 9: Resultados obtidos na linearização da curva de calibração da vazão corrigida.....	39

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 Pressão .....	11
2.2 Sensor de Pressão .....	11
2.3 Exemplo de Sensores de Pressão .....	12
2.3.1 Membrana.....	12
2.3.2 Capacitância .....	12
2.3.3 Piezoelétricos .....	13
2.4 Sensor de Pressão Diferencial .....	13
2.5 Aplicação da medição de pressão diferencial .....	16
2.6 Vazão .....	16
2.7 Medição de Vazão .....	17
2.7.1 Placa de Orifício.....	17
3. MATERIAS E MÉTODOS .....	21
3.1 Circuito de Aquisição e Interface .....	21
3.1.1 Materiais .....	21
3.1.2 Sensor de Pressão Diferencial .....	22
3.1.3 Filtro .....	24
3.1.4 Microcontrolador .....	25
3.1.5 Interface .....	25
3.1.6 Circuito Elétrico .....	27
3.2 Calibração do Sensor ( $\Delta P$ ) .....	27
3.2.1 Materiais .....	27
3.2.2 Procedimento Experimental .....	28
3.3 Calibração da vazão.....	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
4.1 Descrição do Protótipo.....	31
4.2 Calibração da Pressão .....	32
4.3 Calibração da Vazão .....	36
5. CONCLUSÃO .....	40
6. REFERÊNCIAS.....	41

## 1. INTRODUÇÃO

Na Universidade Federal de Alfenas, campus Poços de Caldas, são oferecidos os cursos de Engenharia Química, Engenharia Ambiental, Engenharia de Minas e Bacharelado em Ciências e Tecnologia (BCT). Este último tem o objetivo de oferecer uma base científica, tecnológica e humanística para os graduandos que pretendem ingressar nos cursos de engenharia.

Dentre as Unidade Curriculares (UC) oferecidas no curso de Bacharelado em Ciências e Tecnologia, a UC de mecânica dos fluidos apresenta um papel estratégico na formação de um bacharel em ciência e tecnologia assim como na formação de engenheiros. Em especial sobre a formação em engenharia química, esta UC é um dos pré-requisitos para obtenção do registro no Conselho Regional de Engenharia e Agronomia (CREA).

A UC de mecânicas dos fluidos possui uma carga horária de 72 horas de aulas teóricas e 36 horas em atividades de laboratório. Entre as diversas práticas abordadas na UC em laboratório, o experimento para medir vazão de um fluido através de um conduto é usualmente realizada. Na prática em questão é utilizado um obstáculo que causa uma variação de pressão relacionada com a vazão de um fluido. Atualmente, a vazão é obtida pela razão entre o volume medido através de um recipiente graduado e o tempo cronometrado, enquanto a pressão diferencial é medida por meio de um manômetro em U. No entanto, a prática apresenta diversos problemas na execução, trazendo resultados errôneos.

A condição física do manômetro em U está entre os fatores que influenciam no aumento do erro. O instrumento não se encontra nas perfeitas condições de uso e, para grandes pressões, o fluido manométrico (água) é arrastado para fora do mesmo, havendo a necessidade da troca do fluido por mercúrio. Por sua vez, o mercúrio apresenta erros de leitura mais significativos do que a água devido a menor variação de cota na leitura do manômetro, além de ser um metal pesado e nocivo para a saúde e meio ambiente. O desalinhamento da régua de leitura e o refluxo do fluido manométrico para dentro da tubulação também são fatores que contribuem para a impressão dos resultados.

Uma possível solução para estes problemas é a compra de um medidor de vazão por meio da pressão diferencial, que apresenta uma faixa custo aproximado de 000 a 000 fornecido pelo site 000. Outra solução é integrar um sistema equivalente utilizando componentes de baixo custo. Estes componentes vêm se popularizando em virtude do crescimento da tendência DIY (Do It by Yourself), ou do português, “Faça você mesmo”, amplamente divulgada nas mídias sociais.

O objetivo deste trabalho é a construção de um sistema para medir vazão através de um sensor de pressão diferencial com interface elétrica de baixo custo, afim de substituir o modelo atual que apresenta diversos problemas na prática de medição de vazão dentro da UC mecânica dos fluidos.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Pressão**

A Pressão é uma grandeza escalar que determina a ação de uma ou mais forças em um espaço, podendo ser causada por um líquido, gás ou sólido. Portanto, a pressão é dada pela razão da força normal e a área onde está sendo aplicada (BRUNETTI, 2008).

### **2.2 Sensor de Pressão**

Diversos processos industriais possuem a necessidade de realizar a medição de pressão, como os relacionados com a distribuição de fluidos (líquidos e gases). O sensor de pressão é o dispositivo utilizado para medir determinada pressão de um fluido. As pressões são classificadas em pressão absoluta, quando o vácuo é a referência, pressão relativa, quando a pressão atmosférica é a referência, e pressão diferencial, quando qualquer ponto diferente do vácuo ou atmosfera é tomado como referência.

Entre os diversos tipos de sensores de pressão, os sensores com interface elétrica geram um sinal elétrico do tipo digital ou analógico que está relacionado com a pressão que lhe é exercida. Estes dispositivos são utilizados em diversas aplicações, como em processos de controle e monitoramento, instrumentalização da vazão de um fluido, medição da velocidade do ar em túneis de vento e medição de

nível de líquidos e estanqueidade. O conhecimento do modo como esses sensores funcionam e do seu uso, portanto, são de grande importância (BRAGA, 2007).

### 2.3 Exemplo de Sensores de Pressão

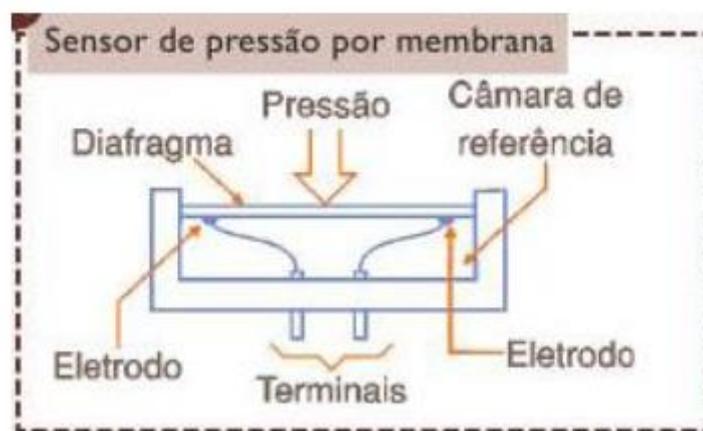
Os três principais tipos de sensores que são utilizados nas aplicações laboratoriais e industriais são o de membrana, capacitância e piezoelétricos.

#### 2.3.1 Membrana

Os sensores de pressão mais comuns são os de membrana com configuração em ponte de Wheatstone. O Sensor é constituído por um diafragma que possui um elemento piezo

resistivo. À aplicação de uma pressão no diafragma promove a deformação do mesmo, alterando a resistividade do meio e fazendo com que haja a variação da tensão que é medida por um circuito externo (BRAGA, 2007).

Figura 1: Sensor de pressão por membrana.



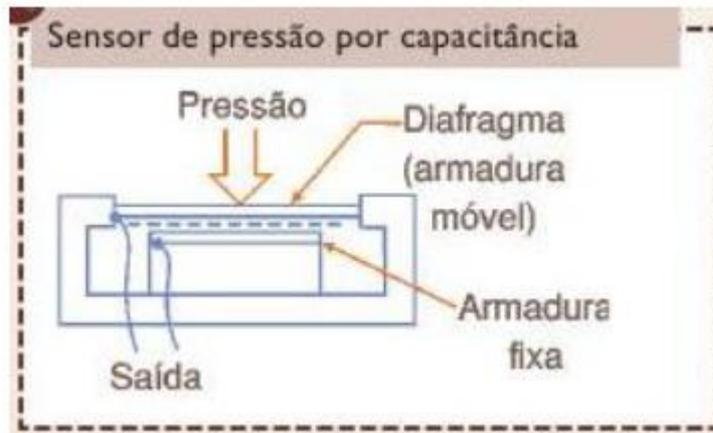
Fonte: BRAGA, 2007

#### 2.3.2 Capacitância

O sensor de capacitância se baseia na variação da capacitância entre um diafragma que se deforma e uma placa fixa no seu interior.

Com o aumento da pressão aplicada ao diafragma, a armadura móvel que ele representa se aproxima da armadura fixa e, com isso, a capacitância do sensor aumenta. Estes sensores são sensíveis e possuem uma resposta linear estável, todavia também são sensíveis à alta temperatura e exigem circuitos mais complexos para processar o sinal que fornecem, ou seja, a capacitância (BRAGA, 2007).

Figura 2: Sensor de pressão por capacitância

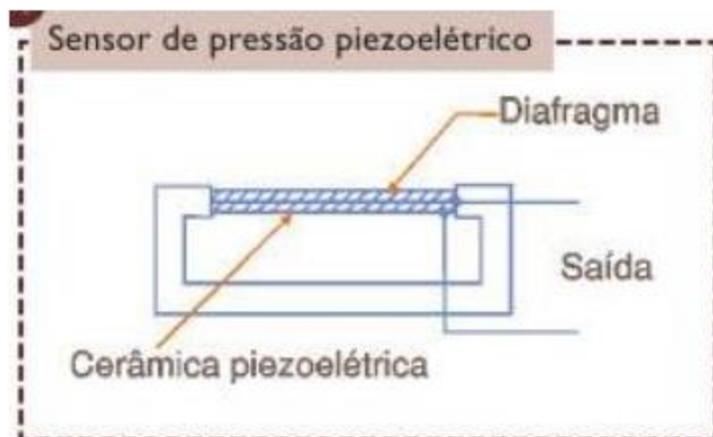


Fonte: BRAGA, 2007

### 2.3.3 Piezoelétricos

Este sensor funciona por meio do contato de uma agulha com um cristal piezoelétrico. À medida que se muda a pressão da agulha sobre o cristal, ele se deforma, gerando uma tensão elétrica na saída do sensor. Essa tensão é proporcional à pressão da agulha sobre o elemento sensor (BRAGA, 2007).

Figura 3: Sensor de pressão piezoelétrico.



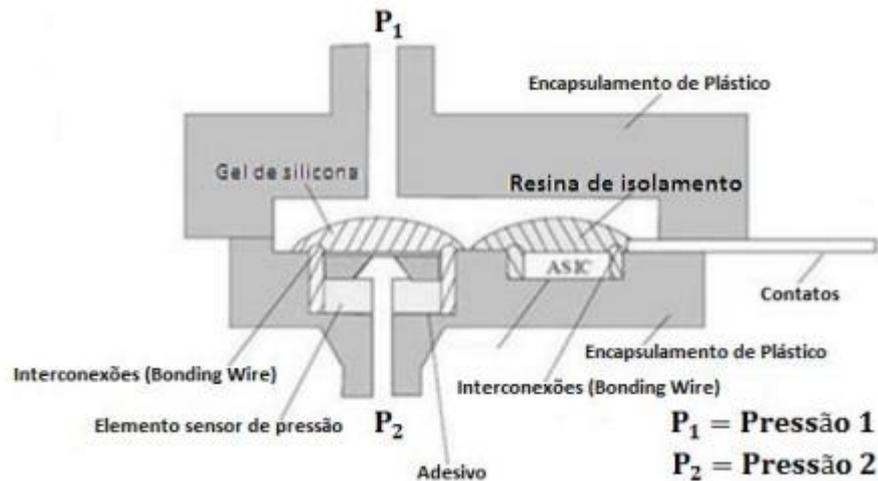
Fonte: BRAGA, 2007

### 2.4 Sensor de Pressão Diferencial

A configuração de sensores de pressão diferencial são as mesmas dos sensores de pressão relativa e absoluta, em que as pressões de referência são a pressão atmosférica e a pressão de zero absoluto (SENSORS, (2008b)). Na figura 4

uma configuração interna de um sensor de pressão diferencial é apresentada. As entradas de fluido representadas pelas siglas P1 e P2 da figura 4 permitem que o fluido alcance o elemento sensível a pressão, o qual é constituído por uma membrana de silício e protegida por um gel de silicone.

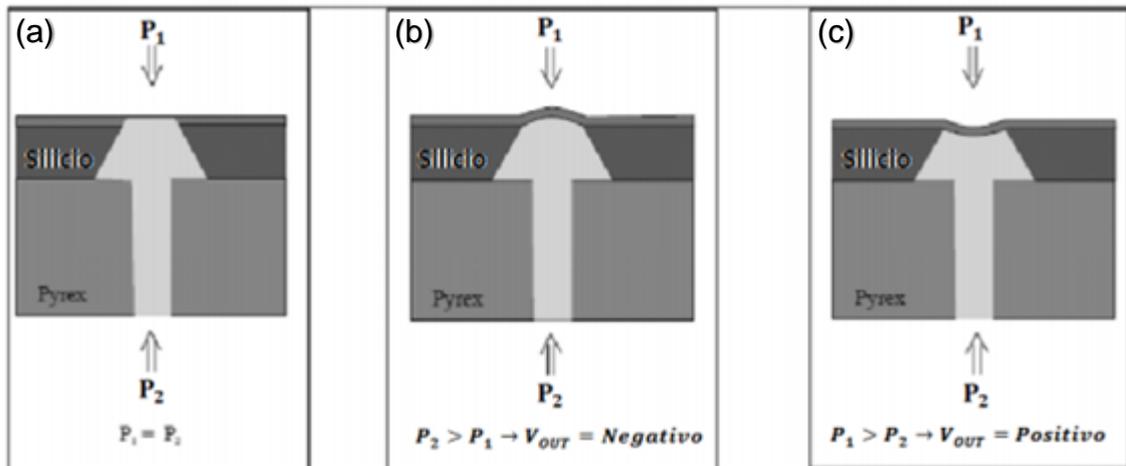
Figura 4: Configuração do sensor de pressão diferencial.



Fonte: SENSORS, (2008b).

A membrana de silício é deformada sempre que as pressões  $P_1$  e  $P_2$  são diferentes. Em situações em que  $P_1 = P_2$ , a membrana não deforma conforme demonstrada na figura 5-a. Caso  $P_1$  seja diferente de  $P_2$ , a membrana deforma formando uma região convexa com cavidade para cima caso  $P_1 < P_2$ , ou para baixo caso  $P_1 > P_2$ , conforme representadas nas figuras 5-b e 5-c, respectivamente.

Figura 5: Tipos de deflexão da membrana de um sensor de pressão diferencial.



Fonte: SENSORS, (2008b).

O funcionamento dos sensores de pressão diferencial são baseados em duas regras gerais. A primeira regra estabelece que a máxima pressão diferencial ( $P_{max}$ ) é definida pela característica física do sensor (SENSORS, (2008b)), conforme definido pelas equações 1 e 2.

$$P_1 - P_2 < P_{max} \quad (1)$$

$$P_2 - P_1 < P_{max} \quad (2)$$

Em que  $P_1$  e  $P_2$  são as pressões aplicadas nas duas pontas do sensor.

A segunda regra está relacionada com a resistência do encapsulamento do sensor à uma pressão aplicada simultaneamente nas suas duas pontas de entrada, determinando que tanto  $P_1$  quanto  $P_2$  não podem exceder um certo valor de pressão, apresentado na equação 3.

$$P_1, P_2 \leq P_{System} \quad (3)$$

O  $P_{System}$  é denominado como máxima pressão do sistema ou máxima pressão de linha.

A saída do sensor de pressão, em alguns casos, não é somente proporcional a pressão diferencial, mas também a um grau específico da pressão de linha. Este efeito é determinado como sensibilidade do sensor a pressão de linha (SENSORS, (2008b)).

### **2.5 Aplicação da medição de pressão diferencial**

A medição de pressão diferencial é aplicada de forma indireta para instrumentalizar outras variáveis físicas do tipo industrial e laboratorial. Esta aplicação é utilizada na determinação do nível em tanques fechados, estanqueidade ou da vazão através da variação de pressão causado por uma placa de orifício, que é o tratado neste projeto.

### **2.6 Vazão**

A vazão é considerada a terceira unidade de grandeza mais medida nos processos, possuindo diversas aplicações, desde simples medições de vazão de água em tratamentos de residências até nas grandes indústrias com diferentes fluidos. O tipo de fluido, condições de temperatura, do ambiente e espaço físico disponível são fatores que devem ser considerados para garantir a precisão da medida (CASSIOLATA e ALVES, 2006).

A vazão é dada pela quantidade volumétrica de um fluido que atravessa uma tubulação em um determinado tempo, ou seja, vazão é a rapidez com que uma certa quantidade de fluido atravessa uma tubulação, podendo ser calculada através da equação 4 ou equação 5 (WHITE, 2011).

$$Q = \frac{V}{t}, \quad (4)$$

$$Q = v A, \quad (5)$$

em que:

$Q$  = Vazão.

$V$  = Volume.

$t$  = tempo.

$v$  = velocidade.

$A$  = área transversal do escoamento.

## **2.7 Medição de Vazão**

Medidores de fluxo ou vazão são equipamentos para se obter a medida de um fluxo volumétrico ou gravimétrico de um fluido. Essas medidas podem ser realizadas de diversas maneiras com princípios físicos distintos. Atualmente, em processos gerais, estes medidores possuem uma alta relevância, pois garantem que um determinado fluxo seja fornecido a uma taxa adequada durante o processo, proporcionando uma maior confiabilidade no produto final (CASSIOLATA e ALVES, 2006).

Um dos métodos mais utilizados em medidores de vazão é a medição de pressão diferencial a partir de um obstáculo numa tubulação. Exemplos desses obstáculos são a placa de orifício, o tubo de Venturi, o tubo de Pitot e o bocal. Os medidores de vazão são formados por dois elementos, o elemento primário está associado com a tubulação, interferindo no escoamento e resultando um diferencial de pressão, já o elemento secundário é o responsável pela leitura desta pressão, ou seja, um medidor de pressão diferencial (DELMÉE, 2003).

A análise da vazão operacional, as características do fluido, assim como da operação e instalação, e o custo e exatidão são critérios importantes que devem ser levados em consideração na hora da escolha dos medidores.

### **2.7.1 Placa de Orifício**

A placa de orifício é o elemento primário de vazão do tipo obstrução mais utilizado. Este elemento é aplicado na medição de vazão de líquidos limpos e com baixa viscosidade, da maioria dos gases e do vapor d'água em baixa velocidade.

A placa de orifício é um elemento de precisão satisfatória classificada como deprimogênio, uma vez que esta promove a redução da seção transversal a fim de obter a vazão. Sua estrutura é composta por uma placa transversal ao escoamento, de pequena espessura, na qual é usinado um furo cilíndrico.

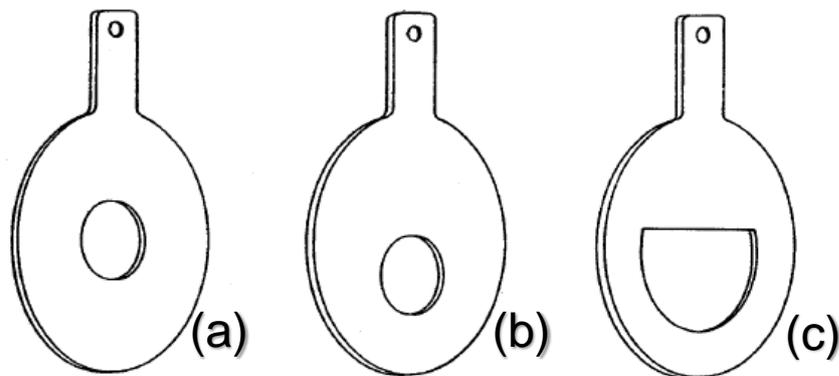
As placas podem ser de diferentes tipos a depender da forma e localização do orifício (DELMÉE, 2003).

- Orifício concêntrico (a): A placa de orifício concêntrica é utilizada para líquidos, gases e vapor que não possuem sólidos em suspensão.

- Orifício Excêntrico (b): A placa de orifício excêntrico é usada quando se tem fluido com sólidos em suspensão, os quais possam ser retidos e acumulados na base da placa, sendo o orifício posicionado na parte de baixo do tubo.

- Orifício segmental (c): A placa de orifício segmental possui uma abertura para passagem de fluido, disposta em forma de segmento de círculo. É destinada para uso em fluidos laminados e com alta porcentagem de sólidos em suspensão.

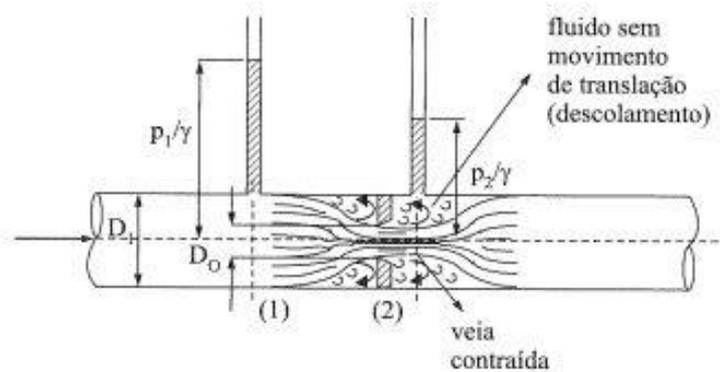
Figura 6: Tipos de placas de orifício.



Fonte: DELMÉE, 2003.

A variação na seção transversal do escoamento gera o aumento da velocidade e a queda da pressão. Porém, como ocorre uma variação brusca da área é gerada uma grande turbulência que resulta em uma “perda de carga”, além de menor precisão na medição da pressão (FERREIRA, 2007).

Figura 7: Desenho esquemático de um escoamento através de uma placa de orifício



Fonte: BRUNETTI, 2008.

A relação entre a vazão e a perda de carga é realizada pelo balanço de energia utilizando a equação da conservação de massa e a equação de Bernoulli nos pontos (1) e (2) da Figura 7 e é dada pela equação 6.

$$Q = K A_o \sqrt{2g \frac{\Delta P}{\gamma}} \quad (6):$$

no qual:

Q = Vazão.

A<sub>o</sub> = Área da tubulação.

ΔP = Pressão diferencial.

g = gravidade.

γ = Peso específico do fluido.

A constante K é um coeficiente adimensional que relaciona as características do fluido, escoamento e tubulação.

$$K = \frac{c_d}{\sqrt{1 - c_c^2 \left(\frac{D_o}{D}\right)^4}} \quad (7)$$

onde:

C<sub>d</sub>: Coeficiente de descarga.

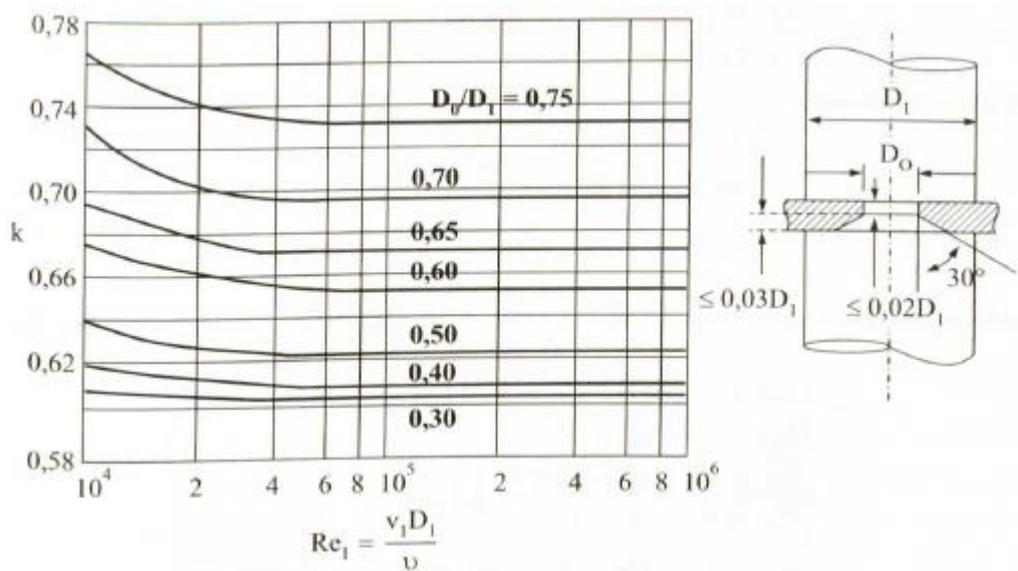
C<sub>c</sub>: Coeficiente de contração.

Do: Diâmetro do orifício.

D: Diâmetro da tubulação.

O coeficiente K, além de calculado através da fórmula empírica, também pode ser relacionado com o número de Reynolds de aproximação e a razão do diâmetro interno (Do) e diâmetro externo (D). Desse modo, através do diagrama K em função de Re e  $\frac{D_o}{D}$ , apresentada na figura 8, encontra-se o valor do coeficiente. O diagrama só deve ser utilizado para orifícios normalizados conforme o indicado na própria imagem (BRUNETTI, 2008).

Figura 8: Diagrama e esquematização do orifício.



Fonte: BRUNETTI, 2008.

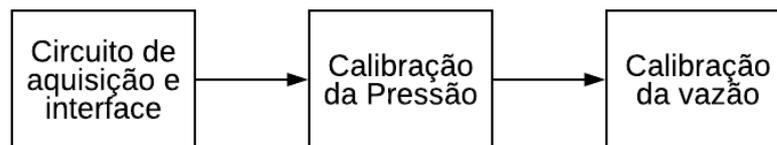
Para simplificar a equação 6, as constantes  $A_0$ ,  $g$  e  $y$  foram incluídas ao coeficiente K e uma relação direta entre a queda da pressão e a vazão pôde ser obtida pela equação 8:

$$Q = k \sqrt{\Delta P} \quad (8)$$

### 3. MATERIAS E MÉTODOS

Os materiais e as estratégias utilizadas para a obtenção de um transdutor de vazão utilizando um sensor de pressão diferencial e os métodos de calibração necessários para a realização deste trabalho serão descritos neste capítulo. A figura 9 apresenta a esquematização das etapas realizadas.

Figura 9: Fluxograma das etapas realizadas neste trabalho.



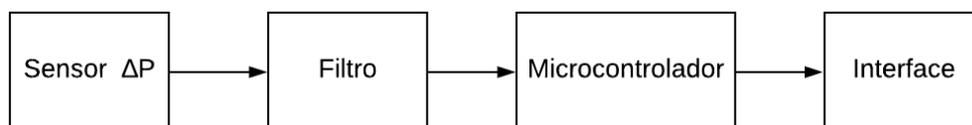
Fonte: Do Autor.

#### 3.1 Circuito de Aquisição e Interface

Um circuito de aquisição e interface capaz de relacionar a vazão com variação de pressão causada por uma placa de orifício, isto é, um protótipo capaz de captar pequenas variações de voltagem na saída do sensor e converte-las em valores de vazão, foi construído através dos conceitos aprendidos em Mecânicas dos Fluidos juntamente com os conceitos de programação.

Os valores de vazão e pressão diferencial são apresentados para o usuário através de uma interface. A Figura 10 mostra a estratégia utilizada para a montagem do circuito de aquisição e interface.

Figura 10: Fluxograma das etapas para a montagem do circuito de aquisição e interface.



Fonte: Do Autor.

##### 3.1.1 Materiais

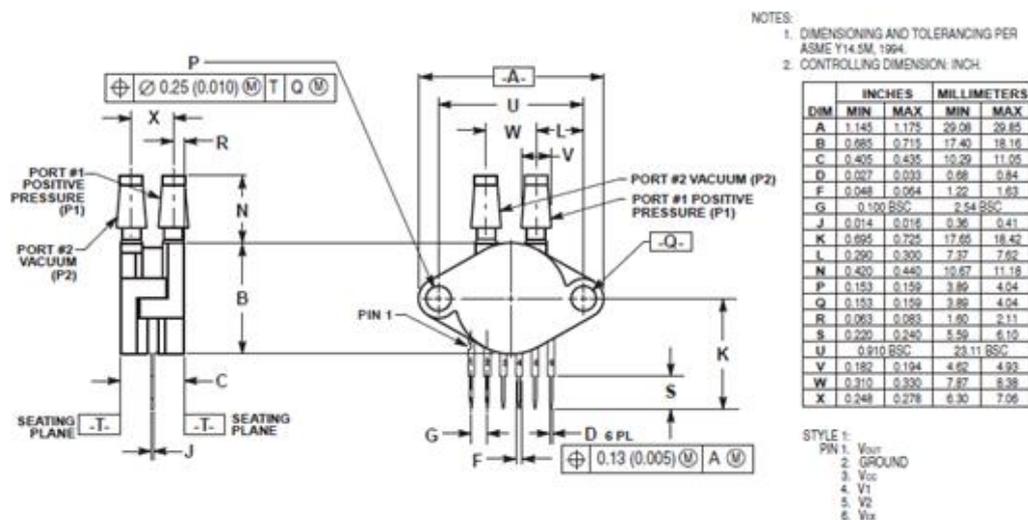
Os seguintes componentes elétricos foram utilizados para a montagem do protótipo:

- Jumpers.
- 3 Resistores de 1 k $\Omega$ .
- 1 Capacitor de 490 pF.
- 1 Capacitor de 1,0  $\mu$ F.
- 1 Capacitor de 0,01  $\mu$ F.
- 3 Botões.
- Fios de ligação.
- Display de 16:2.
- Arduino UNO.
- Sensor MPX5700DP.
- 1 Protoboard.

### 3.1.2 Sensor de Pressão Diferencial

A escolha de um sensor que mede a diferença de pressão entre dois pontos para relacionar a vazão através dos conceitos de mecânicas dos fluidos foi o primeiro passo a ser realizado. De acordo com um estudo considerando o melhor custo/benefício e facilidade de operação e instalação, escolheu-se um sensor da série MPX5700 fabricado pela Motorola, capaz de medir a pressão diferencial, manométrica e absoluta. Entre os da série, o sensor MPX5700DP (Figura 11), que mede a pressão diferencial entre dois pontos, foi o mais apropriado para esta aplicação.

Figura 11: Desenho técnico do Sensor MPX5700DP



Fonte: Datasheet.

O MPX5700DP é um sensor de pressão de silício monolítico projetado para uma ampla gama de aplicações, desde medidores de nível até para determinação de vazões em tubulações. Assim, onde há a necessidade de uma medida da diferença de pressão entre dois pontos, existe uma demanda por um sensor de pressão diferencial. Segue abaixo as especificações técnicas do sensor MPX5700DP fornecida pelo fabricante.

Tabela 1: Características de Operação ( $V_S = 5.0$  Vdc,  $T_a = 25^\circ\text{C}$ ,  $P_1 > P_2$ .)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Pressure Range <sup>(1)</sup> Gauge, Differential: MPX5700D Absolute: MPX5700A	$P_{OP}$	0 15	— —	700 700	kPa
Supply Voltage <sup>(2)</sup>	$V_S$	4.75	5.0	5.25	Vdc
Supply Current	$I_O$	—	7.0	10	mAdc
Zero Pressure Offset <sup>(3)</sup> Gauge, Differential (0 to 85°C) Absolute (0 to 85°C)	$V_{off}$	0.088 0.184	0.2 —	0.313 0.409	Vdc
Full Scale Output <sup>(4)</sup> (0 to 85°C)	$V_{FSO}$	4.587	4.7	4.813	Vdc
Full Scale Span <sup>(5)</sup> (0 to 85°C)	$V_{FSS}$	—	4.5	—	Vdc
Accuracy <sup>(6)</sup> (0 to 85°C)	—	—	—	$\pm 2.5$	% $V_{FSS}$
Sensitivity	V/P	—	6.4	—	mV/kPa
Response Time <sup>(7)</sup>	$t_R$	—	1.0	—	ms
Output Source Current at Full Scale Output	$I_{O+}$	—	0.1	—	mAdc
Warm-Up Time <sup>(8)</sup>	—	—	20	—	ms

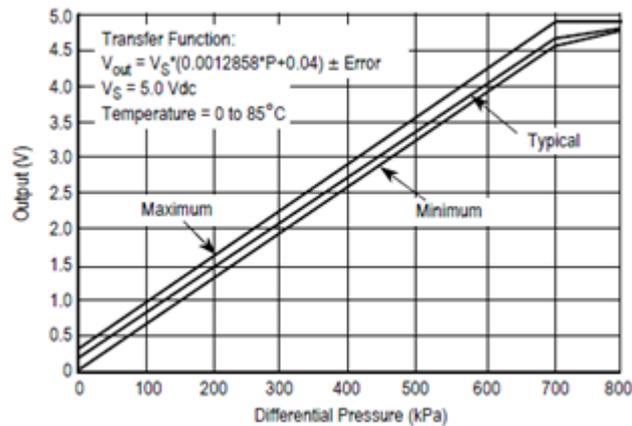
Fonte: Datasheet.

Basicamente, a série MPX5700 são transdutores de pressão em tensão elétrica, baseados no sistema Piezo-resistivo ou *Strain Gage*, onde relacionam à mudança da resistência elétrica com a deformação/contração como resultado da pressão aplicada. Na sua grande maioria são formados por elementos cristalinos (*Strain Gage*) interligados em ponte (*Wheatstone*) com outros resistores que provém o ajuste de zero, sensibilidade e compensação de temperatura.

Existem versões capazes de medir pequenas diferenças de pressão (de 0 a 0,04 atm) e outras de grandes variações (de 0 a 10 atm), podendo medir pressão absoluta (em relação ao vácuo), pressão diferencial (a diferença entre duas pressões  $p_1$  e  $p_2$ ) ou manométrica (em relação à pressão atmosférica). No caso do MPX5700DP há faixa de medição varia de 0 até 700 kPa e possui um compensador de temperatura em uma faixa de 0 a 85°C.

A alimentação do mesmo é de 4,75V à 5,25V, e a tensão de saída varia de 0,2V a 4,7V. A relação entre o sinal de saída do sensor e a pressão diferencial é linear, como mostra a figura 12.

Figura 12: Output vs. Differential Pressure.



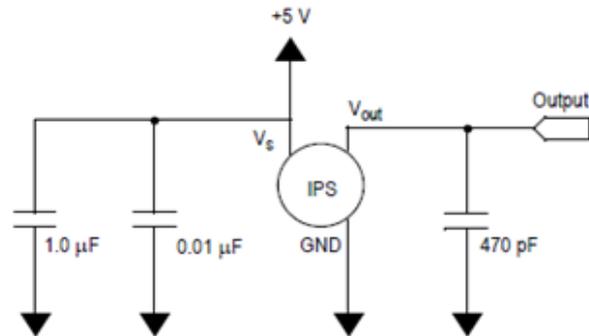
Fonte: Datasheet.

A pressão diferencial é dada pela equação da reta (figura 12) conforme o datasheet disponibilizado pelo fabricante. O sensor trabalha com confiabilidade em uma faixa de temperatura de 0 ~ 85°C e possui um erro de 2,5% do valor de pressão diferencial obtido para esta faixa de temperatura. A realização da calibração do sensor para a obtenção de resultados mais precisos será necessária.

### 3.1.3 Filtro

O sinal de saída do sensor é provido de ruídos e interferências que fazem com que o mesmo flutue, causando instabilidade e conseqüentemente incertezas nos resultados. Portanto, é necessário a instalação de um sistema de filtro com capacitores nos pinos de entrada ( $V_s$ ) e saída ( $V_{out}$ ) do sensor conforme o fabricante recomenda.

Figura 13: Desacoplamento da fonte de alimentação e filtragem de saída recomendados



Fonte: Datasheet.

### 3.1.4 Microcontrolador

Devido ao sistema piezo-resistivo incluído no MPX5700DP, em que a voltagem está diretamente ligada a diferença de pressão imposta sobre o sensor, é possível realizar a leitura de pequenas variações de voltagens com a ajuda de um microcontrolador, nesse caso, o Arduino UNO R3. Todo o desenvolvimento do protótipo também foi realizado nesta plataforma, como por exemplo, a instalação da interface para comunicação entre o usuário e o dispositivo.

Para o funcionamento do mesmo foi implementado um código com uma estrutura de menus no Arduino UNO R3 controlados por botões (menos, menu, mais). O código utiliza uma linguagem do próprio microcontrolador, baseada em C/C++, no qual foi implementado as curvas de calibração encontradas no projeto, com o intuito de melhorar a relação do sinal lido pelo microcontrolador e o valor de vazão.

### 3.1.5 Interface

Junto com o sistema de leitura de voltagem, um Display 16:2 foi instalado para o fornecimento dos valores de pressão diferencial e de vazão, facilitando a interação protótipo/usuário. As conexões do display no Arduino foram feitas conforme a tabela 2.

Tabela 2: Conexões do display 16x2 com Arduino.

<b>Conexões LDC 16x2 – HD44780</b>		
<b>Pino LDC</b>	<b>Função</b>	<b>Ligação</b>
1	Vss	GND
2	Vdd	VCC 5V
3	V0	-
4	RS	Pino 8 Arduino
5	RW	GND
6	E	Pino 9 Arduino
7	D0	-
8	D1	-
9	D2	-
10	D3	-
11	D4	Pino 10 Arduino
12	D5	Pino 11 Arduino
13	D6	Pino 12 Arduino
14	D7	Pino 13 Arduino
15	A	Vcc 5V
16	K	GND

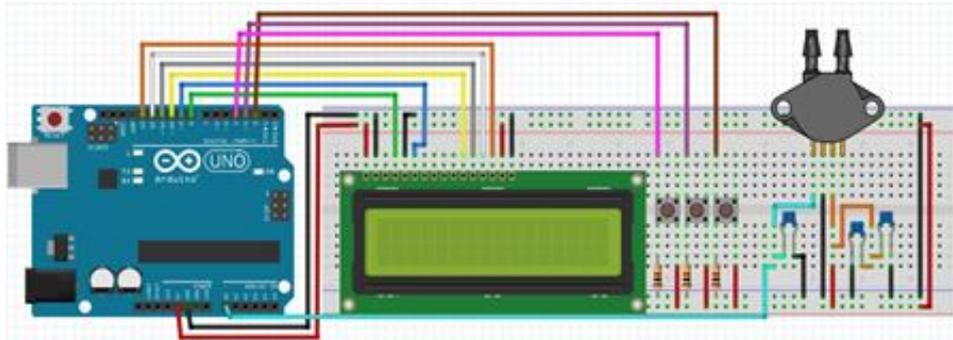
Fonte: Do Autor.

Um conjunto de botões para o controle do painel do protótipo foram incluídos através da utilização de resistores Pull-Down, em que um resistor fica ligado junto ao sinal que se deseja ler e que serve para manter a entrada em nível lógico baixo quando nenhum outro componente estiver conduzindo. Quando é acionado o botão, a entrada vai para um nível lógico alto e assim é feito o reconhecimento da ação.

### 3.1.6 Circuito Elétrico

Seguindo os passos descritos no circuito de aquisição e interface, um protótipo capaz de realizar a leitura de voltagem emitida pelo sensor, juntamente com uma interface para a manipulação do mesmo, foi desenvolvido, conforme o circuito esquematizado abaixo.

Figura 14: Esquematização do circuito.



Fonte: Do Autor.

Os botões referentes aos botões de menos (esquerdo), menu (meio) e mais (direito), foram ligados nas portas digitais D4, D3 e D2, respectivamente.

O pino 1 (Vout) do sensor foi ligado na porta analógica A0 para a leitura da voltagem, sinal analógico no qual é convertido em sinal digital pelo conversor analógico/digital (ADC) instalado no microcontrolador. O pino 2 (GND) foi conectado ao terra e o pino 3 (Vcc) na tensão de saída do Arduino, considerando o sistema de filtro do sinal com os capacitores estabelecido pelo fabricante.

## 3.2 Calibração do Sensor ( $\Delta P$ )

### 3.2.1 Materiais

Na calibração do sensor de pressão diferencial foram utilizados os seguintes materiais:

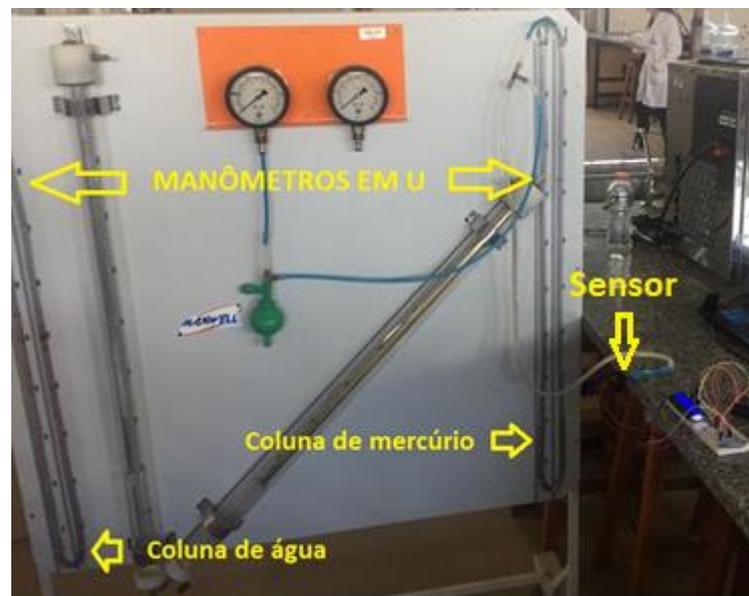
- Mangueiras de silicone.
- Manômetros em U.
- Pipeta de sucção.
- Regra graduada.

- Protótipo desenvolvido

### 3.2.2 Procedimento Experimental

Com a ajuda de uma placa contendo dois manômetros em U (coluna d'água e de mercúrio), demonstrado na figura 15, foi realizado um método indireto de calibração da pressão do sensor para a obtenção da curva de calibração que relaciona o sinal emitido pelo sensor e a pressão.

Figura 15: Placa contendo os manômetros em U usados na calibração da pressão.



Fonte: Do Autor.

A calibração da pressão foi dividida em duas faixas de medição. Para valores menores de pressão ( $42 < \text{ADC} < 53$ ), realizou-se com o manômetro em U de coluna de água e, para valores de pressão maiores ( $53 < \text{ADC} < 63$ ), o de coluna de mercúrio. Para cada faixa de medição, 11 pontos foram coletados e realizados em triplicata, garantindo uma maior precisão.

O sensor foi fixado na bancada e o valor do sinal analógico de saída, para cada aplicação de pressão feita com o auxílio de uma pipeta de sucção, foi coletado. A mesma pressão aplicada no sensor foi exercida em um manômetro em U e anotou-se a diferença de cota para a obtenção da pressão utilizando o teorema de Stevin (equação 9).

$$\Delta P = \rho g \Delta h , \quad (9)$$

em que:

$\Delta P$ : Diferença de pressão.

$\rho$ : Densidade do fluido manométrico.

$g$ : Gravidade.

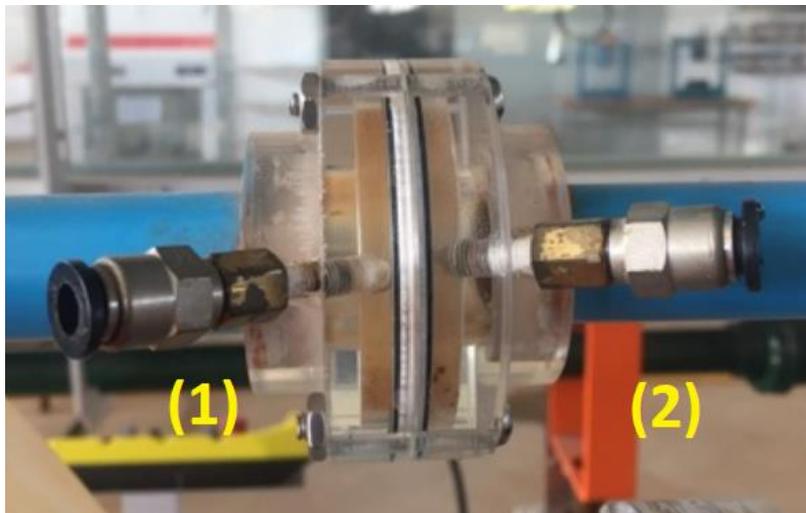
$\Delta h$ : Diferença de cota.

Cada valor recebido no microcontrolador foi relacionado à pressão obtida com a diferença de cota dada pelo manômetro em U.

### 3.3 Calibração da vazão

A calibração da vazão foi baseada na variação de pressão causada por uma placa de orifício instalada em uma bancada hidráulica. A placa de orifício utilizada possui diâmetro interno  $D = 12,10$  mm e diâmetro externo  $D_o = 21,5$  mm.

Figura 16: Modelo da placa de orifício instalada.

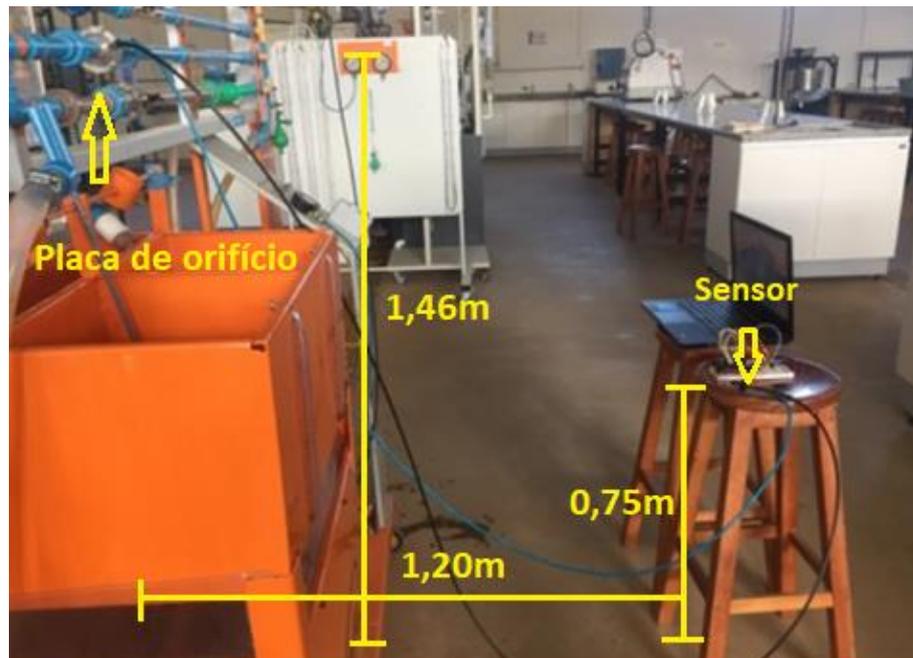


Fonte: Do Autor.

A saída (1) da placa de orifício (figura 16) foi ligada a porta 1 (pressão positiva) do sensor e a saída (2) ligada na porta 2 (pressão de vácuo), a fim de captar a variação de pressão a cada vazão imposta sobre o mesmo.

O sensor foi fixado em uma altura pré-estabelecida durante toda a calibração para evitar flutuações devido ao peso da água no duto que interliga sensor/placa, como apresentado na figura 17.

Figura 17: Posicionamento do sensor em relação a placa de orifício.



Fonte: Do Autor.

Com a ajuda de uma proveta de 2000 mL e um cronômetro digital foi realizado a calibração da vazão. Primeiramente, o valor do sinal recebido no microcontrolador (ADC) correspondente a pressão diferencial com a válvula totalmente fechada (Vazão = 0 l/s), foi anotado. Feito isso, a válvula reguladora de vazão foi aberta até que se atingisse um sinal digital ADC = 55, e o tempo correspondente ao enchimento de um certo volume pré-estabelecido foi observado para a utilização no cálculo de determinação da vazão (equação 4), correspondente a sua variação de pressão. O processo foi repetido mais 9 vezes, de 5 em 5 ADC, até chegar em 90 ADC.

Por fim, todas as etapas anteriores foram repetidas mais 11 vezes para obtenção de uma relação mais precisa da vazão com a variação de pressão, causada pela placa de orifício.

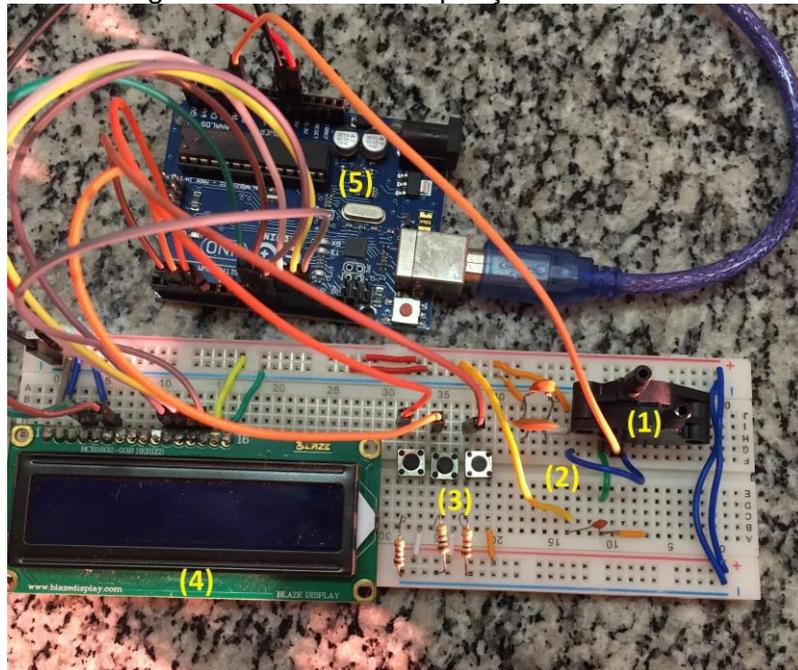
#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados o protótipo do sensor construído, a fim de instrumentalizar a vazão, e os resultados experimentais dos ensaios da calibração de pressão e vazão, sendo estes discutidos com base nos dados e erros obtidos.

#### 4.1 Descrição do Protótipo

A aquisição do protótipo foi realizada como citada no Capítulo 3.1, em que o circuito integrado ainda se encontra sem nenhum encapsulamento devido a possíveis ajustes finais, como mostrado na figura 18.

Figura 18: Circuito de aquisição e interface.



Fonte: Do Autor.

O circuito de aquisição e interface é constituído por um microcontrolador Arduino UNO R3 (5), um Display 16x2 (4), um conjunto de botões ligados em resistores Pull-Down (3), um sistema de filtro utilizando capacitores para minimizar os ruídos do sinal lido pela porta analógica do microcontrolador (2), e por fim, o sensor de pressão diferencial (1).

O custo total para a construção do protótipo foi de R\$ 187,71 reais, baseado nos preços fornecidos pela loja de equipamento eletrônicos Eletronote, localizada em Poços de Caldas. A relação de preços e quantidades é apresentado na tabela a seguir.

Tabela 3: Relação de preços e custo total da montagem do protótipo.

<b>Acessórios</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Preço R\$</b>
Arduino UNO R2	1	45,00
Capacitores	3	1,50
Jumpers	17	7,00
Resistores	3	0,21
Display 16x2	1	16,00
Sensor MPX5700DP	1	100,00
Protoboard	1	15,00
<b>TOTAL</b>	-	<b>187,71</b>

Fonte: Do autor.

Mesmo o orçamento baseado em uma única loja, o valor gasto para o desenvolvimento do protótipo está bem abaixo da média encontrada no mercado para medidores de vazão, comprovando o melhor custo/benefício do protótipo desenvolvido.

#### **4.2 Calibração da Pressão**

Na calibração da pressão foram obtidos valores de pressão diferencial entre a pressão imposta por uma pêra de sucção e a pressão atmosférica. Com a relação entre o valor lido no manômetro em U com o sinal de saída do sensor é construída a curva de calibração.

O manômetro em U de coluna d'água apresentou problemas para valores de pressão maiores que 8,1 kPa, pois o peso d'água não era capaz de segurar a pressão imposta. Assim, para valores maiores que 8,1 kPa, foi trocado o fluido manométrico por mercúrio, devido ao seu peso específico aproximadamente 13 vezes maior que o da água, sendo possível então determinar valores maiores de pressão diferencial.

O erro da pressão diferencial foi determinado pela soma do erro do sensor ao erro instrumental e estatístico. O erro do sinal obtido pelo microcontrolador é nulo, pois o valor de ADC é absoluto e invariável. A média dos resultados obtidos e seus erros correspondente se encontram na Tabela 4.

Tabela 4: Dados obtidos experimentalmente na calibração de pressão.

Coluna de Água		Coluna de Mercúrio	
ADC	Pressão Média $\pm$ Erro	ADC	Pressão Média $\pm$ Erro
42	0 $\pm$ 10	53	8930 $\pm$ 270
43	990 $\pm$ 50	54	10000 $\pm$ 322
44	1790 $\pm$ 127	55	10670 $\pm$ 308
45	2513 $\pm$ 170	56	11425 $\pm$ 318
46	3190 $\pm$ 140	57	12314 $\pm$ 350
47	3980 $\pm$ 170	58	12980 $\pm$ 390
48	4890 $\pm$ 140	59	13780 $\pm$ 380
49	5680 $\pm$ 60	60	14540 $\pm$ 390
50	6490 $\pm$ 170	61	15380 $\pm$ 416
51	7413 $\pm$ 214	62	16000 $\pm$ 422
52	8100 $\pm$ 240	63	16850 $\pm$ 440

Os valores obtidos com o manômetro em U de coluna d'água e manômetro em U de coluna de mercúrio teve uma boa subsequência, sendo possível a união dos resultados dos mesmos. Após a coleta de dados, realizou-se a regressão linear dos pontos obtidos e foi determinada a equação de calibração da pressão.

Figura 19: Regressão linear dos pontos obtidos experimentalmente para calibração da pressão.

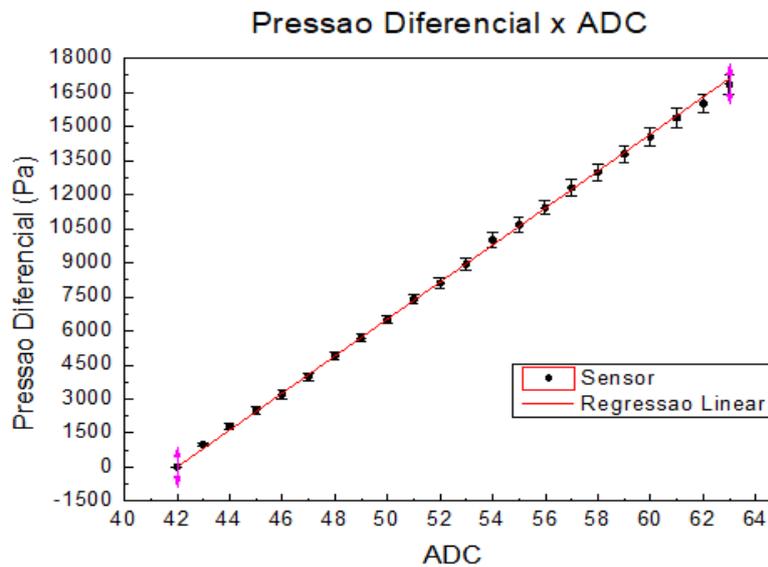


Tabela 5: Valores obtidos na linearização da curva de calibração de pressão.

<b><math>y = a x + b</math></b>	
<b>a ± erro</b>	814,35 ± 5
<b>b ± erro</b>	-34195,7 ± 240
<b>R<sup>2</sup></b>	0,9921

A linearização da curva resultante da calibração de pressão apresentou um coeficiente angular  $a = 814,35 \text{ Pa} \pm 6 \text{ Pa}$ , um coeficiente linear  $b = -34195,7 \text{ Pa} \pm 240 \text{ Pa}$  e um ajuste de  $R^2 = 0,99921$ . A equação da reta teve um pequeno fundo de escala, pois para o valor de ADC = 42, a pressão calculada através da equação da reta é de 7 Pa e, experimentalmente, a diferença de pressão é nula. Dessa forma, uma correção do fundo de escala foi realizada para zerar o sensor no ponto inicial.

A subtração de 7 Pa de cada valor obtido de pressão calculado pela curva foi efetuada e um melhor ajuste, que relaciona o valor de ADC (eixo x) pela pressão (eixo y), apresentado (Figura 20).

Figura 20: Validação da regressão linear do sensor de pressão diferencial.

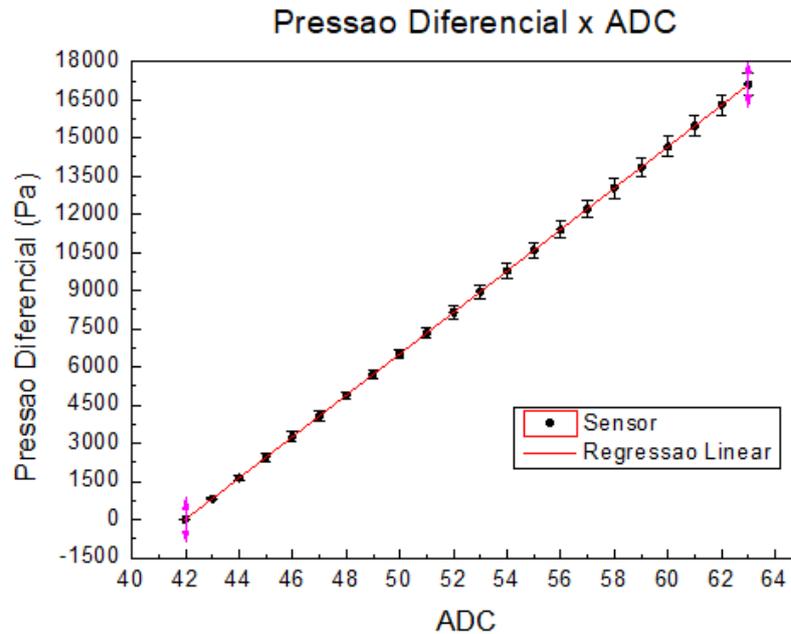


Tabela 6: Resultados obtidos na linearização da curva de calibração da pressão corrigida.

<b><math>y = a x + b</math></b>	
<b>a ± erro</b>	814,34 ± 6
<b>b ± erro</b>	-34202,28 ± 240
<b>R<sup>2</sup></b>	1

Após a correção do fundo de escala, a curva resultante da calibração que melhor relaciona a pressão diferencial com o valor do sinal digital, lido pelo microcontrolador, apresentou um coeficiente angular  $a = 814,34 \text{ Pa} \pm 5,62 \text{ Pa}$  e coeficiente linear  $b = -34202,28 \text{ Pa} \pm 238,08 \text{ Pa}$ . Por fim, o coeficiente ( $R^2$ ) que verifica a qualidade do ajuste da reta dos pontos se igualou a 1. Como a aquisição do instrumento de medição de pressão diferencial é para fins didáticos, a reta apresentou um ajuste aceitável e os erros associados estão dentro dos padrões de erro instrumental previstos para a aplicação.

A relação entre a pressão diferencial e o sinal de saída do sensor é linear, conforme o fabricante menciona. O sinal digital (ADC), encontrado pela linearização

da curva de calibração da pressão corrigida, foi convertido para valores de tensão (V) e a diferença de pressão para quilo Pascal. Obtendo-se a seguinte equação:

$$P = 166,78 \text{ kPa} \times V_{out} - 34,202 \text{ KPa} \quad (10)$$

A curva fornecida pelo fabricante (figura 12) foi manipulada, isolando a pressão diferencial e considerando a tensão de entrada  $V_s = 5V$ , para que fosse possível a comparação com a curva obtida pela calibração, conforme a equação 11.

$$P = 155,54 \text{ kPa} \times V_{out} - 31,10 \text{ KPa} \quad (11)$$

A curva da calibração (pressão x voltagem) se aproxima bastante com a relação fornecida pelo fabricante e a discrepância da equação 10 em relação a 11 é devido a adequação às condições estabelecidas na calibração, garantindo mais precisão aos resultados.

A faixa utilizada para a calibração do sensor foi de ADC = 42 ( $\cong 0,205V$ ) a ADC = 63 ( $\cong 0,293V$ ), muito pouco aproveitada visto que o valor de ADC varia de ADC = 0 (0v) a ADC = 1024 (5V). Assim, a instalação de um amplificador no sinal de saída do sensor, procedimento o qual não foi abordado neste trabalho, seria necessário para uma maior sensibilidade do sensor e aproveitamento da faixa fornecida pelo mesmo.

### 4.3 Calibração da Vazão

Na calibração da vazão foi correlacionado a raiz da variação da pressão em uma placa de orifício, obtido pela curva de calibração da pressão, com a vazão obtida experimentalmente. Devido à alta vazão e, conseqüentemente, a alta velocidade do fluido, criava-se um regime turbulento, fazendo com que o valor recebido pelo microcontrolador flutuasse e o erro associado aumentasse.

A altura do sensor em relação a placa de orifício é crucial pois o peso da coluna d'água que fica no conduto, interligando a placa e o sensor, varia à medida que a diferença de cota é alterada, fazendo com que os valores do sinal recebido também

se alterem. Desse modo, uma altura fixa para o sensor foi determinada durante a coleta de dados.

Outro ponto crucial para a montagem da curva de calibração de vazão é o fechamento da válvula reguladora de vazão antes do desligamento da bomba centrífuga, fazendo com que a água não retorne e os dutos da tubulação não sejam esvaziados. Caso contrário, os valores recebidos são alterados.

O erro da vazão foi obtido através da soma do erro instrumental e estatístico, sendo o erro da pressão rebatido no erro da vazão. Os resultados gerados estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Resultados obtidos na calibração da vazão.

<b>ADC</b>	<b><math>\Delta P</math> (Pa)</b>	<b><math>\sqrt{\Delta P}</math> (<math>\sqrt{\text{Pa}}</math>)</b>	<b>Vazão (l/s) <math>\pm</math> Erro</b>
42	0	0	0 $\pm$ 0,050
45	2443	49,4	0,193 $\pm$ 0,056
50	6514	80,7	0,295 $\pm$ 0,060
55	10586	102,9	0,355 $\pm$ 0,066
60	14658	121,0	0,411 $\pm$ 0,070
65	18729	136,8	0,465 $\pm$ 0,074
70	22801	151,0	0,518 $\pm$ 0,079
75	26873	163,9	0,567 $\pm$ 0,083
80	30944	175,9	0,595 $\pm$ 0,087
85	35016	187,0	0,637 $\pm$ 0,090
90	39088	197,7	0,683 $\pm$ 0,096

A regressão linear dos pontos foi realizada e a curva de calibração que relaciona a vazão pela raiz da pressão diferencial obtida (Figura 21).

Figura 21: Regressão linear dos pontos obtido experimentalmente para a calibração da vazão.

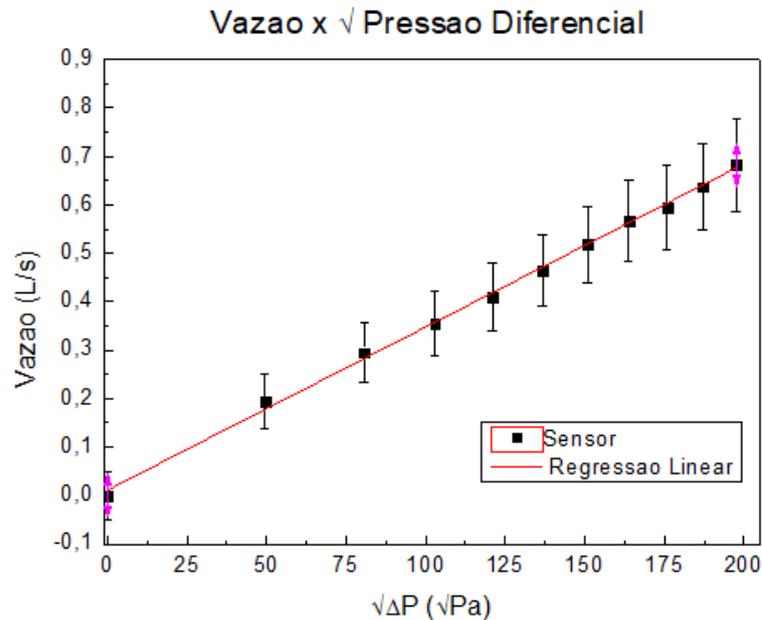


Tabela 8: Valores obtidos na linearização da curva de calibração da vazão.

<b><math>y = a x + b</math></b>	
<b>a ± erro</b>	0,00337 ± 0,0003
<b>b ± erro</b>	0,01093 ± 0,04
<b>R<sup>2</sup></b>	0,9977

A curva de calibração de vazão obtida apresentou coeficiente angular  $a = 0,00337 \text{ l/s} \pm 0,0003 \text{ l/s}$ , coeficiente linear  $b = 0,01093 \text{ l/s} \pm 0,04$  e o ajuste da curva  $R^2 = 0,9977$ .

Assim como na calibração da pressão, a curva obtida através da regressão linear retorna um valor de vazão igual a  $Q = 0,01093 \text{ l/s}$  no ponto  $\Delta P = 0 \text{ Pa}$ , embora o valor de vazão esperado pela equação seja zero. Dessa forma, uma correção no fundo de escala do sensor para zerar o mesmo no ponto inicial foi realizada através da subtração de  $0,01093 \text{ l/s}$  em cada valor de vazão encontrado pela curva, alcançando uma melhor relação entre a queda de pressão na placa de orifício e a vazão (figura 22).

Figura 22: Validação da regressão linear do transdutor de vazão corrigida.

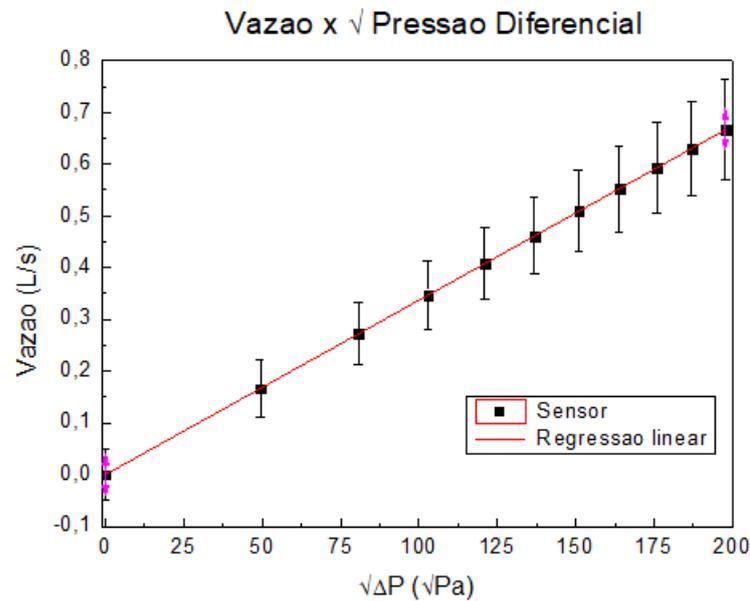


Tabela 9: Resultados obtidos na linearização da curva de calibração da vazão corrigida.

<b><math>y = a x + b</math></b>	
<b>a</b> ± erro	0,00337 ± 0,003
<b>b</b> ± erro	0,0001 ± 0,04
<b>R<sup>2</sup></b>	1

Após a correção do fundo de escala, a curva resultante da calibração que melhor relaciona a vazão com a raiz da pressão diferencial, apresentou um coeficiente angular  $a = 0,00337 \pm 0,0003$  l/s, coeficiente linear  $b = 0,0001 \pm 0,04$  e um ajuste  $R^2 = 1$ . A curva apresentou um ajuste ótimo e o erro associado a medida ocorre devido a erros sistemáticos e instrumentais na obtenção dos dados. Este erro é aceitável visto que o desenvolvimento do protótipo é voltado para fins didáticos.

A relação entre a vazão e a raiz quadrada da variação de pressão causada pelo obstáculo na tubulação é linear, como observado na equação 6.

A área da tubulação, o peso específico da água e a gravidade estão agregadas a constante  $K$  (equação 8), que é o coeficiente angular da reta. Com o intuito de

comparar o valor experimental de  $K$  com a literatura, desagregou-se seus componentes. Os valores de vazão foram convertidos para  $m^3/s$  e foi encontrado o coeficiente  $K = 0,613$  para uma relação  $D_o/D = 0,58$ , valor próximo ao esperado pelo diagrama apresentado na figura 8.

Por fim, as curvas de calibração referentes a pressão e vazão obtidas neste trabalho foram implementadas junto ao código do microcontrolador, no qual permite que o instrumento desenvolvido mensure vazão nas condições em que foi calibrado.

## 5. CONCLUSÃO

Um protótipo capaz de captar variações de pressão em uma placa de orifício e transformá-los em valores de vazão, utilizando os conceitos visto em Mecânica dos Fluidos, foi construído. O protótipo opera através da captação da voltagem dada por um sensor de pressão diferencial piezoresistivo, de baixo custo, com compensador de temperatura.

O sensor de pressão diferencial MPX5700DP cumpriu com as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante, já que a relação da pressão com a deformação e conseqüentemente com a voltagem de saída do sensor é linear. Além disso o MPX5700DP é um sensor de fácil instalação e manipulação, com um erro irrelevante para fins didáticos, mostrando-se um dispositivo aceitável para ser utilizado nas aulas práticas de Mecânica dos Fluidos.

O protótipo desenvolvido apresenta um custo total de R\$187,21 reais, valor bem abaixo dos medidores de vazão encontrados atualmente no mercado.

Após a análise dos resultados na calibração da placa de orifício, comprovou-se que a relação entre a vazão e a raiz quadrada do diferencial de pressão é linear, conforme previsto na equação 6.

Por fim, a faixa utilizada para a calibração do sensor foi muito pouca aproveitada, visto que a mesma varia de  $ADC = 0$  (0V) a  $ADC = 1024$  (5V), porém fica aberto para trabalhos futuros a introdução de um amplificador na voltagem de saída do sensor para retornar este problema, ganhando uma maior sensibilidade e

aproveitamento da faixa de trabalho do mesmo aumentando a confiabilidade nos resultados.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] BRAGA, Newton C. Sensores de pressão, como usar? **Mecatrônica Fácil**, Ano:6, Número:36, set /2007
- [2] BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos Fluidos**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prendice Hall, 2008. 431 p.
- [3] CASSIOLATA, César; ALVES, Evaristo. **Mecatrônica Atual** - Ano 5 - Edição 26 - Fev. /Mar/06
- [4] DELMEÉ, Gerrard. J. **Manual de medição de vazão**; 3ª Edição – 2003; Editora Edgard Blücher Ltda.
- [5] FERREIRA, Cláudio C.S, **Avaliação macro e micro geométrico de dispositivos utilizados na indústria do petróleo e gás**. 2007. 66. Tese (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte.
- [6] ISO. BS EN ISO 5167-1:2003. **Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross section conduit running full**. General principles and requirements: BSI Group 2003.
- [7] SENSORS, A. A. D. **Modern pressure sensor technology Differentials pressure – an ambiguous term**. 2008b Disponível em: < <http://www.amsys.info/sheets/amsys.en.wp03.pdf> >
- [8] WHITE, Frank M. **Mecânica dos Fluidos**. 6. ed. Porto Alegre: Amgh Editora Ltda, 2011. 880 p.