



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS DE RUSSAS**

**LUIZ DAVID BANDEIRA CAMINHA**

**AUTOMAÇÃO DA BANCADA DE MECÂNICA DOS FLUIDOS PARA OBTENÇÃO  
DA CURVA CARACTERÍSTICA DA BOMBA.**

**RUSSAS - CE**

**2023**

LUIZ DAVID BANDEIRA CAMINHA

AUTOMAÇÃO DA BANCADA DE MECÂNICA DOS FLUIDOS PARA OBTENÇÃO DA  
CURVA CARACTERÍSTICA DA BOMBA.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, Campus Russas, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Camilo Augusto Santos Costa.

RUSSAS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- C191a Caminha, Luiz David Bandeira.  
Automação da bancada de mecânica dos fluidos para obtenção da curva característica da bomba / Luiz David Bandeira Caminha. – 2023.  
69 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2023.  
Orientação: Prof. Dr. Camilo Augusto Santos Costa.
1. Bancada Experimental. 2. Medição de Pressão. 3. Automação. 4. Arduino. 5. Curva Característica de Bombas. I. Título.

CDD 620.1

---

LUIZ DAVID BANDEIRA CAMINHA

AUTOMAÇÃO DA BANCADA DE MECÂNICA DOS FLUIDOS PARA OBTENÇÃO DA  
CURVA CARACTERÍSTICA DA BOMBA.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada  
ao curso de Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal do Ceará, Campus  
Russas, como requisito parcial para obtenção  
do título de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Camilo Augusto Santos Costa  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Silvia Teles Viana  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Caroliny Gomes de Oliveira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.  
À minha família.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por colocar seus planos acima dos meus desejos, por iluminar meus caminhos e me encorajar a superar os maiores desafios. A Ele, minha maior gratidão e amor.

Ao professor Dr. Camilo, pelo investimento, orientação, paciência e apoio na realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Alexandre, pela pronta disponibilidade em ajudar e por ceder um dos equipamentos fundamentais à realização deste trabalho.

Aos meus pais, Luiz e Socorro, pelo amor e dedicação que depositaram sobre mim durante toda minha vida. Vocês são o meu alicerce. Obrigado por tudo.

À minha tia, Inês (*in memoriam*) por todo amor, carinho, cuidado e suporte oferecido fisicamente e espiritualmente. Jamais esquecerei seus ensinamentos diários de humildade e amor ao próximo.

À minha linda namorada, Ana Valéria, por estar ao meu lado durante todos esses anos, compartilhando momentos maravilhosos. Seu apoio inabalável têm sido uma benção em minha vida.

A todos os familiares e amigos que de alguma forma contribuíram positivamente para minha formação. Em especial a Ilda, Mailson, Sávio, Pablo e John.

Visto que nossa vida começa e termina com a necessidade de afeto e cuidados, não seria sensato praticarmos a compaixão e o amor ao próximo enquanto podemos? (Dalai Lama).

## RESUMO

As curvas características das bombas são diagramas que representam a influência das grandezas que constituem o seu funcionamento, sendo a principal delas a relação entre vazão e altura manométrica. Tais curvas são comumente construídas em ensaios de laboratório por meio de bancadas hidráulicas. No entanto, a medição manual dessas variáveis pode ser um processo complexo, custoso e muitas vezes impreciso. A automação da medição de variáveis fluidodinâmicas permite a coleta de dados em tempo real e a leitura direta em sistemas de armazenamento e tratamento de dados, tornando o processo de análise dos resultados mais ágil e eficiente. A fim de obter a curva característica da instalação e da bomba, através da medição da pressão, foram instalados transdutores de pressão em pontos específicos, sendo utilizado um microcontrolador Arduino como sistema de aquisição e tratamento de dados. Os dados de pressão foram comparados com os medidos nos manômetros analógicos da bancada, que possuem boa precisão, e com os resultados do fabricante, validando os dados obtidos. As comparações se deram de forma satisfatórias, apresentando um pequeno desvio. Desta forma, é possível afirmar que a implementação de um sistema autônomo de medição na bancada foi bem-sucedida.

**Palavras-chave:** Bancada Experimental; Medição de Pressão; Automação; Arduino; Curva Característica de Bombas.

## ABSTRACT

The Characteristic Curves of the Pumps are diagrams that represent the influence of the variables that make up their operation, the main one being the relationship between the rate of fluid flow and dynamic head. Such curves are commonly constructed in laboratory tests using hydraulic benches. However, manually measuring these variables can be a complex, costly and often inaccurate process. The automation of measurement of fluid dynamic variables allows the collection of data in real time and direct reading in data storage and treatment systems, making the process of analyzing results more agile and efficient. In order to obtain the characteristic curve of the installation and the pump, by measuring the pressure, pressure transducers were installed at specific points, using an Arduino microcontroller as a data acquisition and treatment system. Pressure data were compared with those measured on analog manometers, which have good accuracy, and with the manufacturer's results, validating the data obtained. The comparisons were satisfactory, showing a small deviation. In this way, it is possible to state that the implementation of an autonomous measurement system on the bench was successful.

**Keywords:** Experimental Bench; Pressure Measurement; Automation; Arduino; Pump Characteristics Curve.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de uma Bomba Centrífuga .....	21
Figura 2 - Curva Característica da Instalação.....	22
Figura 3 - Curva Característica da Bomba (CCB).....	23
Figura 4 – Relação da rotação de uma bomba centrífuga.....	24
Figura 5 - Ponto de Funcionamento .....	24
Figura 6 – Vazão através de um plano em uma área definida.....	26
Figura 7 – Representação da velocidade média na seção .....	26
Figura 8 – Escoamento por um Tubo de Corrente.....	27
Figura 9 – Corte de um tubo Venturi.....	29
Figura 10 – Dimensões do Tubo Venturi .....	31
Figura 11 – Esquema de uma Bomba Centrífuga.....	32
Figura 12 - Bancada de Mecânica dos Fluidos MF1000.....	34
Figura 13 - Bombas Centrífugas.....	35
Figura 14 - Descrição dos principais componentes.....	35
Figura 15 - Painel Controle das Bombas.....	36
Figura 16 - Painel de Manômetros.....	36
Figura 17 – Transdutor MPX5050DP.....	38
Figura 18 – Fiação (MPX5050DP).....	38
Figura 19 – Transdutor de pressão manométrica (60 psi).....	39
Figura 20 – Fiação .....	40
Figura 21 – Tomadas de pressão no tubo Venturi.....	41
Figura 22 – Esquema de conexão das portas (MPX5050DP) .....	41
Figura 23 – Tomadas de pressão na Bomba 1 .....	42
Figura 24 - Pressão na saída da bomba vs. Pressão na entrada da bomba.....	43
Figura 25 - Arduino MEGA 2560 .....	44
Figura 26 - Preenchimento da tubulação da bomba.....	46
Figura 27 – Diagrama Hidráulico da Bancada.....	47
Figura 28 – Curvas Características da Bomba.....	50
Figura 29 – Modificação da CCB devido ao tempo de uso.....	51
Figura 30 – Curvas Características da Instalação .....	52
Figura 31 – Ponto de Funcionamento da Bomba 1 .....	53
Figura 32 – Diagrama esquemático .....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de Entrada .....	49
Tabela 2 – Resultados da Curva Característica da Instalação (Transdutores).....	66
Tabela 3 – Resultados da Curva Característica da Instalação (Manômetros) .....	66
Tabela 4 – Resultados da Curva Característica da Bomba (Transdutores) .....	67
Tabela 5 – Resultado da Curva Característica da Bomba (Manômetros).....	67
Tabela 6 – Resultados da Curva Característica da Instalação (Fabricante).....	69
Tabela 7 – Resultados da Curva Característica da Bomba (Fabricante) .....	69

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

IDE	Ambiente Integrado de Desenvolvimento
CCI	Curva Característica da Instalação
CCB	Curva Característica da Bomba
ADC	Conversor Analógico Digital
SAD	Sistema de Aquisição de Dados

## LISTA DE SÍMBOLOS

$Q$	Vazão em volume	$m^3/s$
$V$	Volume	$m^3$
$t$	Tempo	$s$
$\Delta x$	Comprimento do caminho	$m$
$A$	Área da seção	$m^2$
$v_p$	Velocidade do fluido em um ponto	$m/s$
$v_m$	Velocidade média	$m/s$
$\gamma$	Peso específico da água	$kg/m^3$
$Q_m$	Vazão mássica	$kg/s$
$H$	Carga total	$m$
$z$	Eixo vertical	$m$
$P$	Pressão do fluido	$Pa$
$\rho$	Densidade do fluido	$kg/m^3$
$g$	Aceleração da gravidade	$m/s^2$
$C_D$	Coefficiente de descarga	
$H_B$	Carga manométrica disponível de uma bomba	$m$
$H_0$	Carga total no nível de captação	$m$
$H_{est}$	Carga estática de elevação	$m$
$H_{inst}$	Carga requerida pela instalação	$m$
$H_{SF}$	Carga total na seção final	$m$
$H_p$	Perda de carga entre as sessões	$m$
$H_0$	Carga total no nível de captação	$m$
$\Delta Z$	Carga potencial	$m$
$\frac{\Delta P}{\rho \cdot g}$	Carga de pressão	$m$
$\frac{v^2}{2g}$	Carga cinética	$m$
$h_f$	Perda de carga distribuída	$m$
$f_A$	Fator de atrito	

$L$	Comprimento	$m$
$D$	Diâmetro	$m$
$h_f$	Perda de carga distribuída	$m$
$V_S$	Tensão de saída do transdutor	$V$
$V_F$	Tensão de alimentação do transdutor	$V$
$V_{Analógico}$	Sinal analógico de entrada do conversor	$V$

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	17
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral</i> .....	17
<b>1.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	17
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do Trabalho</b> .....	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	19
<b>2.1</b>	<b>Visão Geral</b> .....	19
<b>2.2</b>	<b>Bombas Centrífugas</b> .....	20
<i>2.2.1</i>	<i>Curvas Características</i> .....	21
<i>2.2.1.1</i>	<i>Curva Característica da Instalação</i> .....	22
<i>2.2.1.2</i>	<i>Curva Característica da Bomba</i> .....	23
<i>2.2.1.3</i>	<i>Ponto de Funcionamento</i> .....	24
<b>3</b>	<b>MODELOS MATEMÁTICOS</b> .....	25
<b>3.1</b>	<b>Equação da Vazão</b> .....	25
<i>3.1.1</i>	<i>Equação da Continuidade</i> .....	25
<i>3.1.2</i>	<i>A Equação de Bernoulli e o Tubo Venturi</i> .....	28
<b>3.2</b>	<b>Equação da Carga Manométrica Total</b> .....	32
<b>4</b>	<b>APARATO EXPERIMENTAL</b> .....	34
<b>4.1</b>	<b>Descrição da Bancada</b> .....	34
<b>4.2</b>	<b>Descrição dos Transdutores</b> .....	37
<i>4.2.1</i>	<i>Transdutor MPX5050DP</i> .....	37
<i>4.2.2</i>	<i>Transdutor de pressão manométrica (60 psi)</i> .....	39
<b>4.3</b>	<b>Equipamentos e Técnicas de Medição</b> .....	40
<i>4.3.1</i>	<i>Pressão</i> .....	40
<i>4.3.2</i>	<i>Vazão</i> .....	41
<i>4.3.3</i>	<i>Altura Manométrica Total</i> .....	42
<i>4.3.4</i>	<i>Sistema de Aquisição de Dados</i> .....	43
<b>5</b>	<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....	46
<b>5.1</b>	<b>Configuração e Checagens Iniciais</b> .....	46
<i>5.1.1</i>	<i>Determinação do Offset dos Transdutores de Pressão</i> .....	46
<i>5.1.2</i>	<i>Preenchimento do Corpo da Bomba</i> .....	46
<i>5.1.3</i>	<i>Sangria dos Manômetros de Pressão</i> .....	47

<b>5.2</b>	<b>Determinação da Curva Característica da Instalação .....</b>	<b>47</b>
<b>5.3</b>	<b>Determinação da Curva Característica da Bomba .....</b>	<b>48</b>
<b>5.4</b>	<b>Testes Realizados .....</b>	<b>48</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>50</b>
<b>6.1</b>	<b>Curvas Características da Bomba.....</b>	<b>50</b>
<b>6.2</b>	<b>Curvas Características da Instalação .....</b>	<b>51</b>
<b>6.3</b>	<b>Ponto de Funcionamento.....</b>	<b>52</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>54</b>
<b>7.1</b>	<b>Trabalhos Futuros .....</b>	<b>55</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>56</b>
	<b>APÊNDICE A – CÓDIGOS COMPUTACIONAIS.....</b>	<b>59</b>
	<b>APÊNDICE B – DADOS COLETADOS EXPERIMENTALMENTE .....</b>	<b>66</b>
	<b>APÊNDICE C – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DESENVOLVIDO .</b>	<b>68</b>
	<b>ANEXO A – DADOS DO FABRICANTE .....</b>	<b>69</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história, a humanidade tem se dedicado à tarefa de movimentar fluidos para diversas finalidades. Com o passar do tempo, a observação e a intuição foram substituídas por metodologias científicas, responsáveis pelo desenvolvimento da tecnologia atual. A mecânica dos fluidos é a ciência que estuda o transporte de fluidos, e suas demais aplicações na engenharia. Para obter resultados esperados em relação ao desempenho e rendimento, é fundamental compreender e modelar os fenômenos que a envolvem (SANTOS, 2007). Modelos matemáticos, que descrevem os fenômenos de escoamento, como suas soluções analíticas e numéricas são empregados em diversas áreas das ciências térmicas, cujos resultados têm se mostrados satisfatórios, quando comparado com medições empíricas.

Segundo Silva e Schneider (2013), nos termos da engenharia, a prática aliada ao estudo teórico previamente visto, possibilita que o estudante desenvolva habilidades e competências essenciais para a sua futura atuação como engenheiro. Para Jesus, et al. (2022, p. 102): “As bancadas didáticas são dispositivos usados para avaliar e validar os conceitos teóricos vistos em sala de aula”. Nesse contexto, as Bancadas de Mecânica dos Fluidos são uma importante ferramenta para o aperfeiçoamento do processo de aprendizagem, pois, além de aproximarem o aluno da ciência e tecnologia, estimulam sua criatividade através da exploração dos conhecimentos teóricos por meio da prática.

Com a utilização das bancadas experimentais de mecânica dos fluidos, é possível determinar características importantes das bombas centrífugas, como por exemplo, a vazão que elas são capazes de produzir em diferentes níveis de pressão. Esses dados são cruciais para um bom dimensionamento de sistemas hidráulicos, bem como para a escolha da bomba mais adequada para cada aplicação.

No entanto, a coleta manual de dados pode ser um processo demorado e propenso a erros humanos. Diante disso, a automação das medições em bancadas de ensaio de bombas hidráulicas torna-se um recurso bastante interessante. A automação pode permitir que as medições sejam feitas de forma mais rápida e confiável. Além disso, a automação também permite a análise e processamento em tempo real dos dados coletados.

Nas indústrias e laboratórios, existem diversos sistemas de aquisição de dados, que variam desde modelos analógicos simples até sistemas totalmente digitais, com altas taxas de amostragem e baixo ruído. O Arduino é uma plataforma de hardware e software livre que permite a criação de sistemas eletrônicos interativos de forma acessível. Ele é composto por uma placa que contém um microcontrolador, conectores e circuitos eletrônicos, além de um

ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) que facilita a criação de códigos para controle e monitoramento de dispositivos. Devido à sua versatilidade, a placa Arduino pode ser facilmente utilizada em conjunto com sensores de pressão para aquisição e controle de dados. Desta forma, esse sistema se mostra um aliado nas medições de laboratório, onde a taxa de amostragem e ruídos são considerados baixos.

## **1.1 Objetivos**

Nesta seção é apresentado os objetivos do presente trabalho, os quais estão divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

### ***1.1.1 Objetivo Geral***

Este trabalho tem por objetivo geral realizar a implementação de um sistema autônomo de medição de pressão em uma bancada hidráulica, para levantar, de forma experimental, os parâmetros característicos da instalação e da bomba, comparando os resultados com os medidos utilizando os instrumentos clássicos da bancada e com os dados fornecidos pelo fabricante.

## **1.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Instalar transdutores de pressão em pontos específicos da bancada;
- Utilizar o microcontrolador Arduino como sistema de aquisição de sinais elétricos dos transdutores de pressão;
- Exibir os sinais no monitor serial da IDE do Arduino;
- Realizar a integração do Arduino com a linguagem Python;
- Converter estes sinais para dados;
- Apresentar estes dados para o usuário;
- Realizar experimentos para a construção da curva característica da bomba e da instalação;
- Analisar os dados obtidos através dos experimentos;
- Comparar os resultados experimentais com os obtidos por meio dos manômetros analógicos, bem como com os dados fornecidos pelo fabricante.

### **1.3 Estrutura do Trabalho**

No capítulo 2 é apresentado a revisão bibliográfica realizada durante este trabalho. Este capítulo também traz alguns conceitos sobre as bombas centrífugas no contexto da bancada de mecânica dos fluidos.

No capítulo 3 é apresentado o modelo matemático para a determinação da curva característica da bomba e do sistema.

No capítulo 4 é mostrado o aparato experimental desenvolvido.

O capítulo 5 trata do desenvolvimento dos ensaios experimentais para determinação da curva característica da instalação e da bomba, mostrando detalhadamente cada processo e procedimento realizado.

No capítulo 6 são expostos os resultados dos experimentos, realizando uma comparação entre as medições feitas pelos transdutores e manômetros, bem como os dados fornecidos pelo fabricante da bancada.

Por fim, no capítulo 7 é apresentado a conclusão do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma visão geral dos trabalhos experimentais voltados para a exploração da instrumentação por meio de transdutores e microprocessadores, como abordagens alternativas aos métodos tradicionais de medição de pressão. Além disso, serão abordados alguns conceitos relacionados às bombas centrífugas.

### 2.1 Visão Geral

A mecânica dos fluidos é a área da física que estuda o comportamento dos fluidos em relação às forças que agem sobre eles e está intimamente relacionada com o funcionamento das bombas centrífugas. As bombas centrífugas são utilizadas para transferir fluidos de um local para outro, como em sistemas de irrigação, sistemas de refrigeração, sistemas de distribuição de água, entre outros. Segundo Barreto (2017, p. 1): “Os avanços tecnológicos na hidráulica levaram à necessidade de quantificar o desempenho das bombas o que é feito utilizando um banco de ensaio de bombas respeitando normas internacionais específicas”.

No Brasil, os testes realizados em bombas seguem a norma da ABNT NBR 6397:1975 - Ensaio de bombas hidráulicas de fluxo. No âmbito internacional, são utilizadas normas do Hydraulic Institute ou da American Society of Mechanical Engineers - ASME dos EUA (Gomes e Carvalho, 2012).

Segundo Gomes e Carvalho (2012, p. 35): “Dependendo dos recursos disponíveis, as medições podem ser totalmente automatizadas, empregando-se sistemas de aquisição de dados e técnicas de controle, principalmente para a variação da vazão e pressão”.

Com a rápida expansão do uso dos microprocessadores, houve uma significativa diminuição nos custos associados a esses componentes, o que, por sua vez, tem viabilizado sua aplicação em equipamentos de leitura e armazenamento de dados (GOMIDE 1998). De acordo com a MarketsandMarkets (2022), o mercado de transdutores de pressão em 2022 foi de US\$ 2,9 bilhões e deverá atingir US\$ 3,5 bilhões até 2027. O mercado está sendo impulsionado pela crescente adoção da automação em diversos setores, como petróleo e gás, químico e saúde, para aumentar a eficiência operacional e reduzir custos.

A pressão é medida em muitos setores importantes, como análise de combustão, indústria automotiva, aerodinâmica, controle de fluidos, produção e dentro da medicina. Além disso, através da pressão é possível deduzir diversas outras variáveis de processo, tais como nível, vazão e volume (HJELMGREN, 2003).

Devido a sua capacidade de medir grandezas físicas e traduzir para um sinal de saída, os transdutores são dispositivos muito usados para determinar as variáveis ou condições físicas de um sistema (THOMAZINI, 2005).

Enfocando os trabalhos experimentais que buscam explorar a instrumentação com transdutores e microprocessadores como alternativa aos métodos tradicionais de medição de pressão, podemos destacar os seguintes trabalhos:

Barreto (2017), realizou um estudo promissor ao unir os domínios da hidráulica com a aquisição e processamento de sinais. No âmbito desse trabalho, ele efetuou a substituição da instrumentação preexistente em um banco de ensaio de bombas por uma capaz de aferir valores em toda a faixa operacional da bomba e assim realizou experimentos para levantar as curvas características da bomba. Para isso, usou o microcontrolador Arduino para aquisição e processamento dos sinais dos diversos transdutores instalados.

Barros e Rosa (2018), realizaram uma análise comparativa das curvas do coeficiente de descarga de um tubo Venturi, obtidas por meio da coleta manual de dados com um manômetro em U e por um sistema automatizado com um transdutor de diferença de pressão MPX 5050, controlado por uma placa Arduino. Os resultados experimentais destacaram que a abordagem automatizada pode oferecer leituras de vazão com grande confiabilidade, ao mesmo tempo em que se mantém acessível em termos de custos.

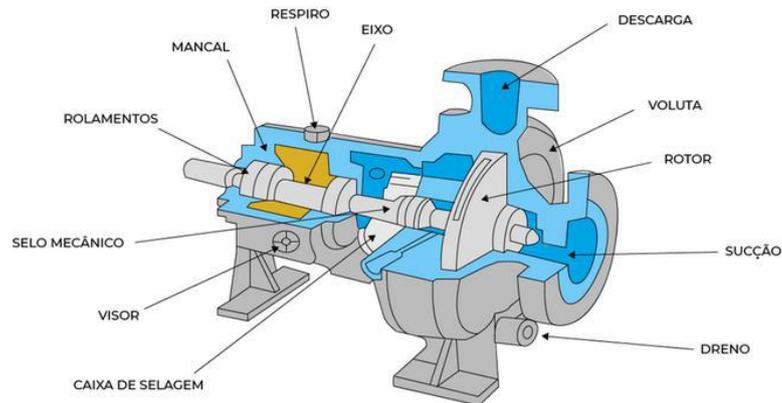
Cid e Correa (2019), desenvolveram um tubo Venturi, construído com materiais de baixo custo, equipado com um microcontrolador Arduino e sensores de pressão. O dispositivo proposto no estudo permitiu, por meio da análise dos dados de pressão gerados pelos sensores, obter a velocidade do escoamento do ar no interior do tubo.

Froes (2023), desenvolveu um medidor de vazão digital para uso em linha de gases. O projeto combinou uma placa de orifício com um sensor de pressão diferencial piezoresistivo e utilizou um microcontrolador Arduino para processamento do sinal e indicação da vazão.

## **2.2 Bombas Centrífugas**

Segundo Karassik (1960), as Bombas Centrífugas são um tipo específico de máquinas pertencentes à classe das Turbobombas. Estas bombas recebem energia mecânica de uma fonte motora e fornecem parte desta energia a um líquido, sob forma de energia cinética, a fim de transportá-lo por escoamento. A Figura 1 mostra o detalhamento com as principais peças que compõe uma Bomba Centrífuga.

Figura 1 - Esquema de uma Bomba Centrífuga



Fonte: Tractian (2021).

Nas Bombas Centrífugas, o deslocamento da água é gerado devido ao movimento rotativo do rotor, que ao girar, provoca a rotação do fluido contido em suas pás, transmitindo a força centrífuga para as partículas do líquido. A água, então, move-se na direção radial e é direcionada para o bocal de descarga. Com isso, a pressão no perímetro do rotor e a energia cinética da água aumentam, enquanto no centro do rotor é gerada uma pressão negativa, provocando o deslocamento da água em direção aos canais do rotor, percorrendo a voluta e finalmente, escoando pelo bocal de descarga. Devido à sua arquitetura, é necessário que o rotor esteja imerso em água, pois caso contrário, a pressão negativa gerada pelo ar girando não será capaz de fazer com que o fluido seja sugado para o interior da bomba (LENCASTRE, 2005).

Desta forma, a relação das energias (mecânica, cinética e de pressão), ocorrem com base na criação de um ponto de baixa pressão, que atua na sucção, e um ponto de alta pressão, que atua na descarga, ou recalque. Para isso, é necessário que ocorra a transformação de energia mecânica (fornecida pelo motor) em energia cinética, proporcionando velocidade ao fluido. Em seguida, parte da energia cinética deve ser transformada em energia de pressão, para que o fluido consiga vencer as alturas de deslocamento (OLIVEIRA, 2017).

### 2.2.1 *Curvas Características*

A compreensão das curvas características desempenha um papel central no projeto e operação de sistemas hidráulicos. Nesta seção, serão apresentadas duas curvas fundamentais que desempenham papéis cruciais na análise hidráulica: a Curva Característica da Instalação (CCI) e a Curva Característica da Bomba (CCB).

### 2.2.1.1 Curva Característica da Instalação

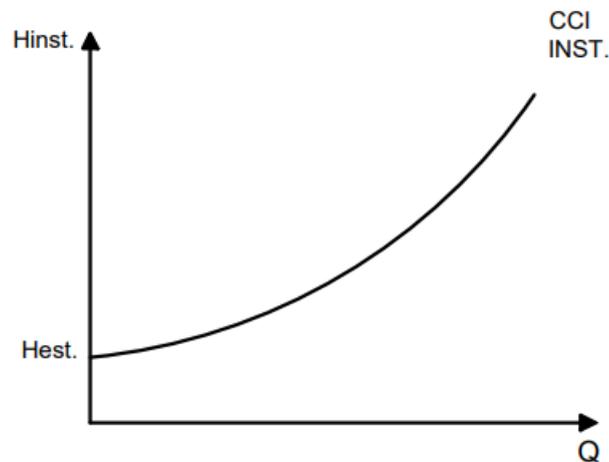
Segundo Santos (2007, p. 51): “Para estabelecemos as necessidades de uma instalação não precisamos da presença da bomba, basta reservarmos um espaço para a colocação da mesma”. Diante disso, antes de escolher qual bomba será instalada em um sistema hidráulico, deve-se ter conhecimento sobre qual o valor de energia por unidade de peso (altura manométrica total) que um sistema necessita conforme a vazão de trabalho, ou seja, qual a demanda de altura manométrica e vazão requerida por uma instalação. Santos (2007), divide a altura manométrica em dois tipos:

- $H_{inst}$  = Altura manométrica necessária para instalação
- $H_B$  = Carga manométrica disponível de uma bomba

A primeira representa a energia requerida para impulsionar a água através da instalação, levando em consideração diversos fatores, como perdas de carga devido ao atrito nas tubulações, elevação estática do fluido, acessórios e outros componentes do sistema. Já a segunda representa a disponibilidade de energia que uma bomba é capaz de fornecer. A carga ou altura manométrica total de uma instalação pode ser relacionada em uma curva em função da vazão, esta curva é conhecida como Curva Característica da Instalação (CCI).

A relação entre altura manométrica e vazão é evidenciada na Figura 2, onde pode-se observar que quanto maior a vazão, maior a altura manométrica necessária fornecida pela bomba. O  $H_{est}$  é chamado de carga ou altura estática de elevação e representa a soma de todas as cargas que não dependem da vazão.

Figura 2 - Curva Característica da Instalação



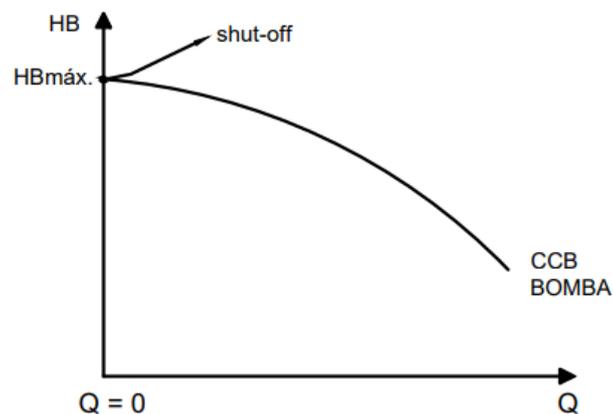
Fonte: Modificado de Santos (2007, p.53).

### 2.2.1.2 Curva Característica da Bomba

As Curvas Características da Bomba (CCB) são diagramas que representam as características de funcionamento de uma bomba, mostrando a influência das grandezas que constituem o seu funcionamento, sendo a principal delas a variação da altura manométrica em relação à vazão. Tais curvas são comumente construídas em ensaios de laboratório por meio de bancadas hidráulicas (CARVALHO, 1977).

A Figura 3 apresenta a relação entre altura manométrica ( $H_B$ ) e vazão ( $Q$ ) de uma bomba centrífuga típica. A partir dela é possível observar que o aumento da vazão resulta em uma diminuição da altura manométrica, isto é, a diminuição da capacidade da bomba elevar um líquido. Segundo Carvalho (1977), ao dificultar o caminho do fluido, acrescentando algum tipo de resistência ao seu escoamento, a quantidade de fluido passando pela tubulação irá diminuir, causando uma diminuição da vazão, sendo necessário um aumento da carga manométrica da bomba afim de vencer os obstáculos presente na instalação. Caso não haja resistência ao escoamento, a vazão será máxima e a carga manométrica mínima. O ponto “Shut-off” (Figura 3), ocorre com o fechamento total do circuito hidráulico, o mesmo representa a altura manométrica máxima correspondente à vazão nula.

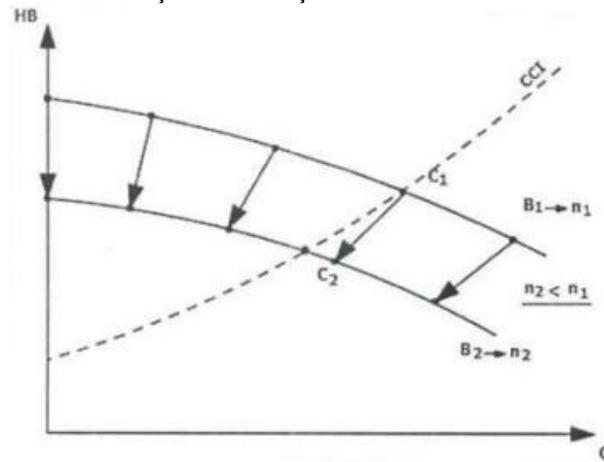
Figura 3 - Curva Característica da Bomba (CCB)



Fonte: Modificado de Santos (2007, p.54).

Segundo Santos (2007), a quantidade de fluxo e pressão gerada por uma bomba centrífuga é influenciada pela variação do diâmetro, da rotação e da forma do rotor. Quanto maior a velocidade de rotação do rotor ou o diâmetro do mesmo, maior será a vazão e a pressão resultantes. O efeito da variação da rotação é mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Relação da rotação de uma bomba centrífuga

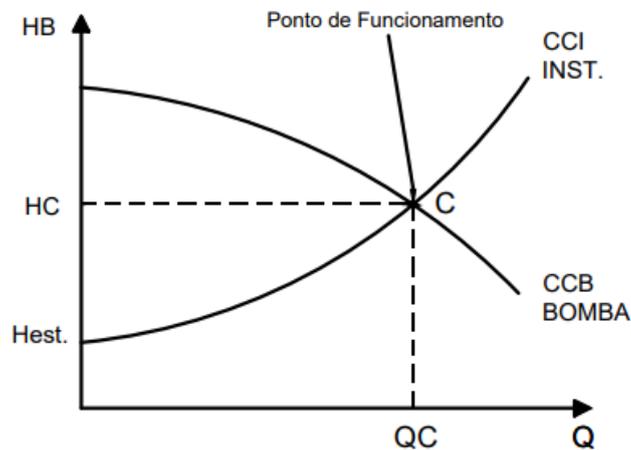


Fonte: Modificado de Santos (2007, p.85).

### 2.2.1.3 Ponto de Funcionamento

Para se alcançar o melhor funcionamento de um sistema, é necessário associar o estudo do conjunto instalação e bomba. Sobrepondo a curva característica da instalação à curva característica da bomba, obtém-se o ponto de funcionamento do sistema (Figura 5).

Figura 5 - Ponto de Funcionamento



Fonte: Modificado de Santos (2007, p.55).

No ponto de intersecção entre as duas curvas (Figura 5), a bomba consegue fornecer ao fluido a altura manométrica ( $H_C$ ) necessária para que o mesmo consiga escoar pela instalação hidráulica com uma vazão ( $Q_C$ ). Este ponto representa o equilíbrio de funcionamento do sistema hidráulico e indica em quais condições uma bomba irá operar em uma instalação (SANTOS, 2007).

### 3 MODELOS MATEMÁTICOS

Neste capítulo, serão apresentadas a formulação matemática para a determinação da curva característica da bomba e do sistema, além das simplificações adotadas.

#### 3.1 Equação da Vazão

De acordo com Mataix (1972), a determinação da vazão é uma área de grande relevância na mecânica dos fluidos. Ao longo do tempo, foram desenvolvidas diversas técnicas a fim de medir o escoamento. Entre elas, destaca-se a medição indireta, cujo equacionamento é baseado nos conceitos apresentados nesta seção.

##### 3.1.1 Equação da Continuidade

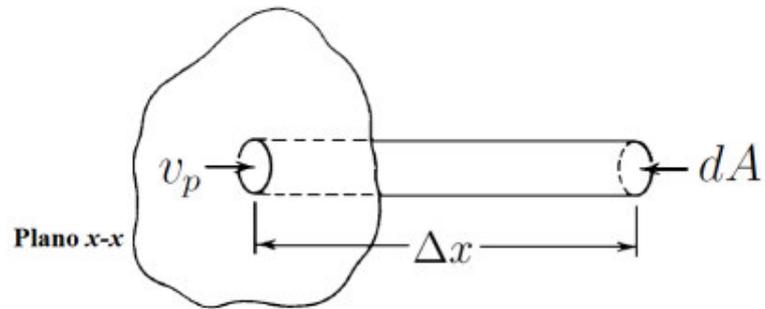
Estabelecendo uma área  $A$  no plano  $x - x$ , por onde passa um determinado volume de fluido ao longo de um intervalo de tempo, conforme representado na Figura 6, a vazão na seção de área  $A$  pode ser descrita pela equação (1) (BENEDICT, 1984):

$$Q = \frac{V}{\Delta t} = \int \frac{\Delta x dA}{\Delta t} = \int v_p dA \quad (1)$$

onde,

$Q$	Vazão em volume
$V$	Volume
$t$	Tempo
$\Delta x$	Comprimento do caminho
$A$	Área da seção
$v_p$	Velocidade do fluido em um ponto

Figura 6 – Vazão através de um plano em uma área definida

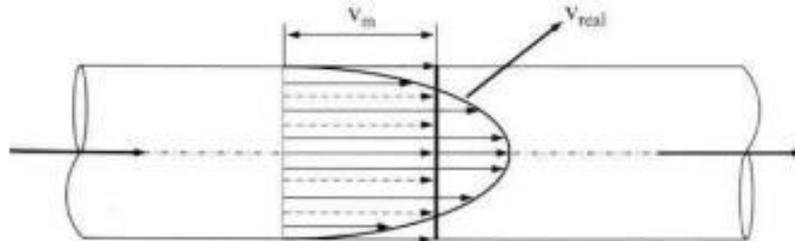


Fonte: Benedict (1984)

Dessa forma, considerando a velocidade média do fluido na seção como uma velocidade uniforme que ao ser aplicada em vez da velocidade real, produziria a mesma vazão na seção (Figura 7), a equação (1) torna-se a equação (2) (BRUNETTI, 2008):

$$Q = v_m \cdot A \quad (2)$$

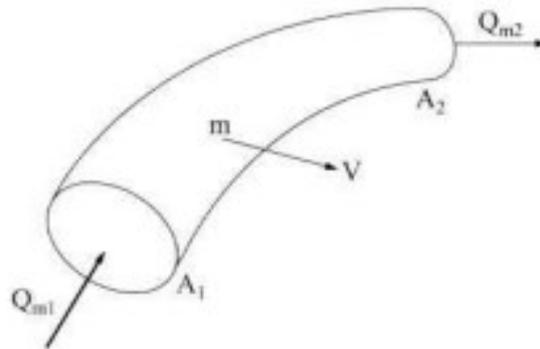
Figura 7 – Representação da velocidade média na seção



Fonte: Franco Brunetti (2008)

A equação da continuidade é baseada no princípio da conservação de massa, o qual estabelece que, em regime permanente, a massa de fluido que entra em uma seção de um tubo de corrente (Figura 8), deve ser igual à massa que o abandona, desde que ambas as medições sejam feitas no mesmo intervalo de tempo (BENEDICT, 1984).

Figura 8 – Escoamento por um Tubo de Corrente



Fonte: Franco Brunetti (2008)

Logo:

$$Q_{m1} = Q_{m2} \quad (3)$$

onde,

$Q_{m1}$  Vazão em massa na seção de entrada

$Q_{m2}$  Vazão em massa na seção de saída

Assim, segundo Mataix (1972), para sistemas com escoamento em regime permanente de líquidos incompressíveis, as vazões em massa e em volume permanecem constantes, ou seja:

$$Q_1 = Q_2 \quad (4)$$

onde,

$Q_1$  Vazão em volume na seção de entrada

$Q_2$  Vazão em volume na seção de saída

Substituindo a equação (2) em (4), tem-se a equação da continuidade para um fluido incompressível (5):

$$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 \quad (5)$$

onde,

$v_1$  Velocidade média na seção de entrada

$A_1$  Área da seção de entrada

$v_2$  Velocidade média na seção de saída

$A_2$  Área da seção de saída

### 3.1.2 A Equação de Bernoulli e o Tubo Venturi

A equação de Bernoulli afirma que a soma das energias mecânicas associadas a uma partícula de fluido é constante ao longo de uma linha de corrente durante um escoamento em regime permanente quando os efeitos da compressibilidade e do atrito são desprezíveis (MATAIX, 1972).

De acordo com Brunetti (2008), as energias envolvidas são:

- Energia potencial: É a forma de energia associada à posição de um sistema em relação a um plano de referência no campo gravitacional.
- Energia de pressão: Equivale ao trabalho potencial das forças de pressão que agem no escoamento do fluido.
- Energia cinética: É a forma de energia associada ao movimento de um fluido.

Baseado nessas condições e no fato de que a energia não pode ser criada nem destruída, apenas transformada, é possível deduzir a equação de Bernoulli (6), que permite realizar o balanço das energias, assim como é feito para as massas, por meio da equação da continuidade (BRUNETTI, 2008):

$$H = z + \frac{P}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g} = \text{constante} \quad (6)$$

onde,

$H$	Carga total
$z$	Eixo vertical
$P$	Pressão do fluido
$\rho$	Densidade do fluido
$g$	Aceleração da gravidade
$v$	Velocidade do fluido

De acordo com Mataix (1972), a equação de Bernoulli também pode ser expressa entre dois pontos quaisquer ao longo da mesma linha de corrente:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \quad (7)$$

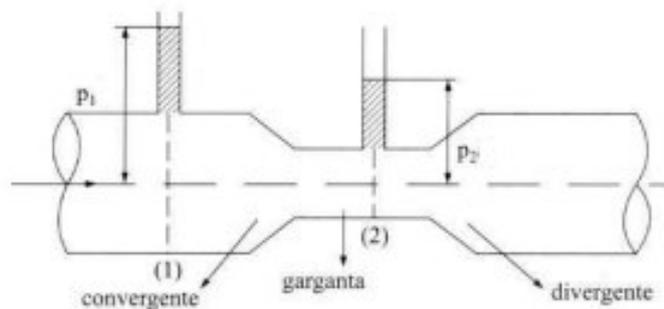
Portanto, a equação de Bernoulli mostra que em um escoamento de fluido incompressível com atrito desprezível, quando houver um aumento na velocidade do fluido haverá uma diminuição da pressão e vice-versa (BRUNETTI, 2008). Esse fenômeno é explicado pelo princípio da conservação de energia que garante que as cargas totais do sistema permanecem constantes, ou seja:

$$H_1 = H_2 \quad (8)$$

Embora a equação de Bernoulli envolva várias condições restritivas e simplificadoras, ela serve de base para a solução de diversos problemas práticos de escoamento de fluidos. Um dispositivo que se beneficia deste princípio é o medidor de vazão tipo Venturi (MATAIX, 1972).

O medidor de vazão tipo Venturi é um dispositivo utilizado para medir a velocidade do escoamento e a vazão de líquidos incompressíveis através da variação da pressão que ocorre durante o fluxo através de um tubo com um cone de entrada que converge para uma região mais estreita, denominada garganta e em seguida aumenta num cone divergente (Figura 9). A diminuição na área de escoamento resulta em um aumento na velocidade do fluido, ocasionando uma queda de pressão (BRUNETTI, 2008).

Figura 9 – Corte de um tubo Venturi



Fonte: Modificado de Franco Brunetti (2008, p. 216)

Considerando fluido ideal, sem que haja perdas, aplicando a equação de Bernoulli, entre os pontos 1 e 2 da Figura 9, tem-se

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \quad (9)$$

onde,

$P_1$	Pressão do fluido no ponto 1
$\rho$	Densidade do fluido
$g$	Aceleração da gravidade
$v_1$	Velocidade do fluido no ponto 1
$P_2$	Pressão do fluido no ponto 2
$v_2$	Velocidade do fluido no ponto 2

De acordo com a equação da continuidade para estas mesmas condições,

$$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 \text{ ou } v_1 = \left(\frac{A_2}{A_1}\right) \cdot v_2 \quad (10)$$

onde,

$v_1$	Velocidade do fluido no ponto 1
$A_1$	Área da seção no ponto 1
$v_2$	Velocidade do fluido no ponto 2
$A_2$	Área da seção no ponto 2

Combinando as equações (9) e (10), realizando algumas transformações algébricas e isolando a velocidade  $v_2$ , tem-se,

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \cdot \left(1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}\right)}} \quad (11)$$

onde,

$v_2$	Velocidade no ponto 2
$P_1$	Pressão do fluido no ponto 1
$P_2$	Pressão do fluido no ponto 2
$\rho$	Densidade do fluido
$A_2$	Área da seção no ponto 2
$A_1$	Área da seção no ponto 1

No entanto, a equação (11) não corresponde à realidade, uma vez que ela é obtida considerando que não haja nenhuma perda. Na realidade, é inevitável a ocorrência de perdas de pressão devido aos efeitos do atrito e, portanto, a velocidade real será menor que a teórica. Portanto, acrescenta-se um coeficiente de descarga  $C_D$  (BRUNETTI, 2008). Segundo Brunetti (2008), o valor do coeficiente de descarga, geralmente pode ser adotado entre 0,95 e 0,99 da vazão teórica. Assim, a equação da vazão real para um tubo Venturi fica:

$$Q = C_D \cdot A_2 \cdot \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \cdot (1 - \frac{A_2^2}{A_1^2})}} \quad (12)$$

onde,

$Q$	Vazão [ $m^3/s$ ]
$C_D$	Coeficiente de descarga [Adimensional]
$A_2$	Área da seção na garganta do Venturi [ $m^2$ ]
$P_1$	Pressão do fluido na entrada do Venturi [Pa]
$P_2$	Pressão do fluido na garganta do Venturi [Pa]
$\rho$	Densidade da água [ $kg/m^3$ ]
$A_1$	Área da seção na entrada do Venturi [ $m^2$ ]

A empresa Nova Didacta, fabricante da bancada, sugere o valor de 0,98 como coeficiente de descarga  $C_D$  do Venturi.

A Figura 10 mostra as dimensões do tubo Venturi.

Figura 10 – Dimensões do Tubo Venturi

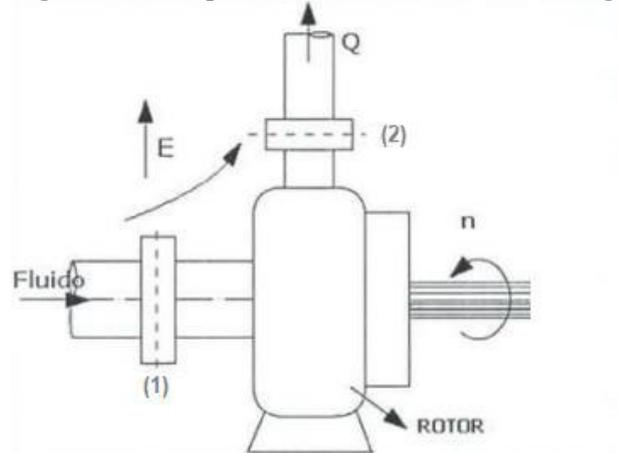


Fonte: Modificado de Sistema de Ensaio para Mecânica dos Fluidos (2016, p.47)

### 3.2 Equação da Carga Manométrica Total

Segundo Alé (2010), a carga manométrica total correspondente a uma determinada vazão pode ser obtida num sistema em operação aplicando a equação da conservação da energia entre a entrada e saída da bomba.

Figura 11 – Esquema de uma Bomba Centrífuga



Fonte: Modificado de SANTOS (2007, p.73).

Considerando a Figura 11, substituindo as cargas das seções (1) e (2) e escrevendo em função da carga manométrica total, tem-se:

$$H = \Delta Z + \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} + \frac{\Delta v^2}{2g} \quad (13)$$

onde,

$\Delta Z$	Carga potencial
$\frac{\Delta P}{\rho \cdot g}$	Carga de pressão
$\frac{\Delta v^2}{2g}$	Carga cinética

A equação (13) estabelece três parcelas que recebem acréscimo devido ao funcionamento da bomba.

A variação da carga potencial representa a diferença de cotas entre a entrada e saída da bomba. Segundo Santos (2007) este valor é pequeno em relação aos outros.

Já a variação da carga cinética corresponde a diferença de velocidade na entrada e saída da bomba. De acordo com Santos (2007), quando as tubulações de aspiração e recalque de uma bomba possuem diâmetros idênticos ou apresentam uma diferença insignificante, a variação da velocidade é mínima. Diante disso, a carga cinética associada ao fluxo pode ser negligenciada.

Embora a equação da energia associada a passagem do fluido pela bomba envolva três parcelas de cargas, segundo Santos (2007), as parcelas da carga cinética e potencial são geralmente menores em comparação com a carga de pressão e, portanto, podem ser desprezadas. Dessa forma, a equação da carga manométrica é dada por:

$$H = \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} \quad (14)$$

onde,  $H$  é a altura manométrica da bomba [ $m$ ],  $\rho \cdot g = \gamma$  é o peso específico da água [ $N/m^3$ ] e  $\Delta P$  é a variação da pressão entre a entrada e saída da bomba [ $Pa$ ].

## 4 APARATO EXPERIMENTAL

Nesta seção será descrito o aparato experimental utilizado para o levantamento da curva característica da bomba e do sistema.

### 4.1 Descrição da Bancada

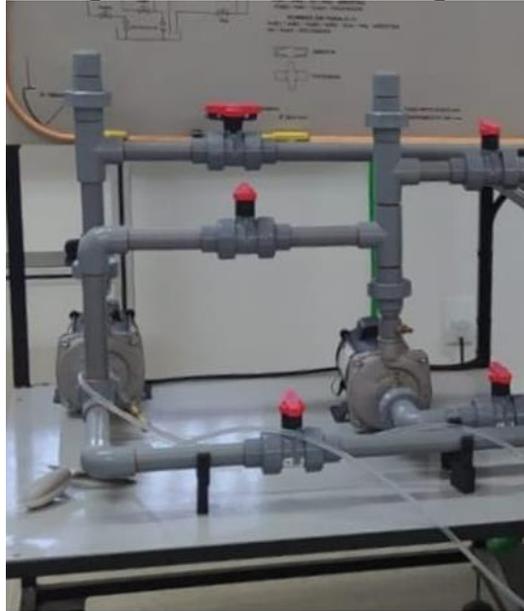
A bancada utilizada neste trabalho encontra-se no Laboratório de Ciências Térmicas da Universidade Federal do Ceará – Campus Russas (Figura 12). A empresa Nova Didacta (2016), descreve a bancada como sendo um equipamento que permite a realização de experimentos práticos relativos à Mecânica dos Fluidos. Seu sistema conta com duas bombas centrífugas (Figura 13), que podem ser associadas em série ou paralelo, ou ainda utilizadas individualmente.

Figura 12 - Bancada de Mecânica dos Fluidos MF1000.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

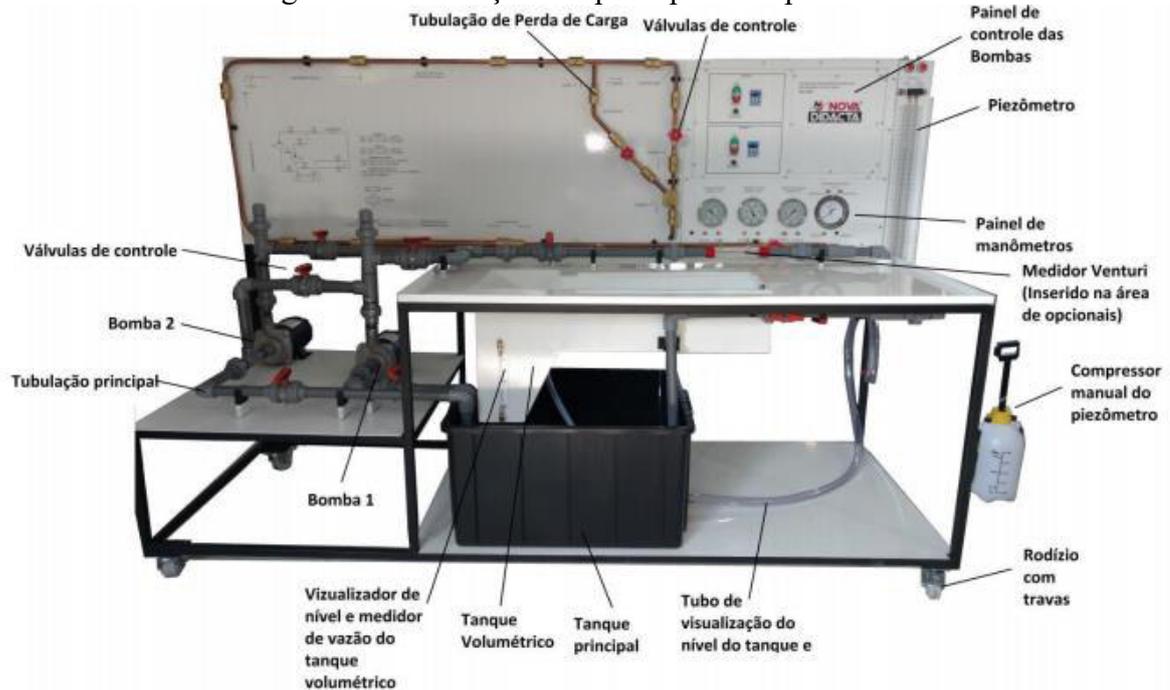
Figura 13 - Bombas Centrífugas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

As bombas promovem o deslocamento da água do reservatório ao longo de um circuito hidráulico fechado, composto por tubulações, válvulas de controle do tipo esfera e medidor de vazão tipo Venturi. A Figura 14, indica os principais componentes do equipamento.

Figura 14 - Descrição dos principais componentes.



Fonte: Sistema de Ensaio para Mecânica dos Fluidos (2016).

O sistema dispõe de um painel para controle dos motores das bombas (Figura 15), onde é possível realizar o acionamento, parada e controle de velocidade individual para as duas bombas. A rotação de cada motor é controlada por um inversor de frequência e exibida em tempo real em um display.

Figura 15 - Painel Controle das Bombas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Além disso, o sistema conta com um painel de manômetros de pressão (Figura 16), composto por quatro manômetros de Bourdon que podem ser conectados em pontos específicos através de mangueiras com sistema de engate rápido. Eles também contam com conectores para que seja feita a sangria do sistema, evitando leituras incorretas decorrente do ar acumulado no interior das tubulações.

Figura 16 - Painel de Manômetros.



Fonte: Sistema de Ensaio para Mecânica dos Fluidos (2016).

Cada manômetro desempenha uma função específica na medição das pressões. O primeiro manômetro é dedicado à medição da pressão de sucção da bomba 1. O segundo manômetro é utilizado para medir a pressão de sucção da bomba 2. O terceiro manômetro é empregado para medir a pressão de recalque de ambas as bombas. Por fim, há um manômetro dedicado à medição da diferença de pressão. Para obter essa diferença, é necessário conectar as duas mangueiras em dois pontos de interesse, onde a entrada identificada pela marcação (+) representa o ponto de maior pressão e a entrada identificada pela marcação (-) representa o ponto de menor pressão.

## **4.2 Descrição dos Transdutores**

Os transdutores de pressão são aparelhos capazes de converter o valor da pressão a qual estão submetidos em um sinal correspondente. Este sinal pode ser usado como entrada para sistemas de controle e monitoramento com o objetivo de determinar a pressão aplicada (THOMAZINI, 2005).

Frequentemente os termos transdutores e sensores são confundidos. Segundo Thomazini (2005), os sensores são dispositivos capazes de detectar a variável física de interesse. Já os transdutores são os aparelhos como um todo, que converte a informação a qual o sensor é submetido em um sinal detectável e de fácil medição.

Para Thomazini (2005, p. 20): “Há uma série de características relacionadas aos sensores que devem ser levadas em consideração na hora da seleção do instrumento mais indicado para uma dada aplicação”. Os sensores podem ser classificados em função da pressão de referência, sendo absoluta, diferencial e manométrica. Os sensores de pressão absoluta medem a pressão em relação ao vácuo, já os sensores de pressão diferencial medem a diferença de pressão entre dois pontos. Por último, os sensores de pressão manométrica medem a pressão em relação à pressão atmosférica. Além disso, os sensores possuem especificações técnicas que devem ser analisadas como tensão, faixa de medição e a forma de transmissão do sinal.

### **4.2.1 Transdutor MPX5050DP**

O MPX5050DP é um tipo de transdutor que utiliza o efeito piezorresistivo. Esse efeito é baseado na capacidade de um material semicondutor de ter sua resistividade elétrica modificada em resposta a tensões mecânicas (SMITH, 1954). O transdutor é constituído por um diafragma feito de silício, no qual uma alteração na pressão provoca uma variação

correspondente na resistência elétrica do transdutor. Essa variação na resistência resulta em uma mudança correspondente na tensão de saída.

O transdutor MPX5050DP (Figura 17) é capaz de medir variações de pressão na faixa de 0 a 50 kPa e converter essa pressão em um sinal de saída que varia de 0,2 V a 4,7 V. Para operar corretamente, o transdutor requer uma alimentação de 5 V.

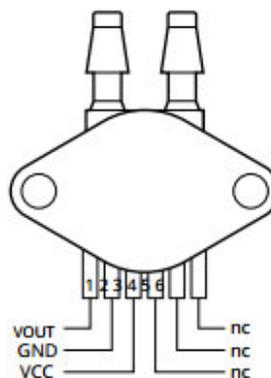
Figura 17 – Transdutor MPX5050DP.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Na Figura 18, ilustrada abaixo, é apresentado um esquema do transdutor, juntamente com as funções atribuídas a cada um dos seus pinos. O sinal de saída é obtido no pino 1 e sua variação está diretamente ligada com a variação de pressão. O pino 2 é utilizado para aterrar o dispositivo, enquanto o pino 3 é conectado a uma fonte de tensão de 5 V. Os demais pinos (4, 5 e 6) não possuem função (NXP SEMICONDUCTORS, 2021).

Figura 18 – Fiação (MPX5050DP)



Fonte: NXP Semiconductors (2021)

Ao consultar o datasheet do sensor de pressão, encontra-se a seguinte equação que relaciona o valor da pressão com a tensão medida na saída do transdutor:

$$V_S = V_F \cdot (0,018 \cdot P + 0,04) \quad (15)$$

onde,  $V_S$  é a tensão de saída do transdutor [V],  $V_F$  é a tensão de alimentação do transdutor (5 V) e  $P$  é a pressão medida [KPa].

O processamento deste sinal será abordado em detalhes mais à frente, na seção 4.3.4.

#### **4.2.2 Transdutor de pressão manométrica (60 psi)**

O transdutor de pressão manométrica (60 psi) (Figura 19), é alimentado por uma tensão de 5 V, sendo sua saída um sinal em tensão variável entre 0,5 V e 4,5 V e diretamente proporcional à pressão medida (0 a 60 psi).

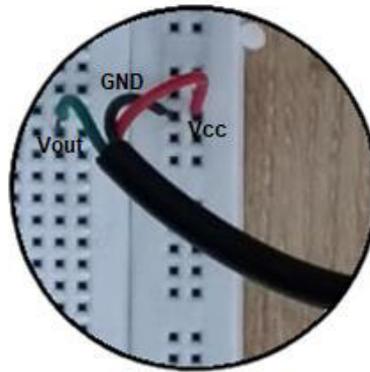
Figura 19 – Transdutor de pressão manométrica (60 psi)



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Figura 20 ilustra a fiação contida na extremidade do transdutor, onde o sinal de saída é obtido no fio verde. O fio preto é utilizado para aterrar o dispositivo, enquanto o fio vermelho é conectado a uma fonte de tensão de 5 V.

Figura 20 – Fiação



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A função de transferência que relaciona pressão (psi) e tensão (V) de acordo com a faixa de leitura, fornecida pelo fabricante, pode ser observada na equação (16).

$$V_S = (0,067 \cdot P + V_F) \quad (16)$$

onde,  $V_S$  é a tensão de saída do transdutor [V],  $V_F$  é a tensão de alimentação do transdutor (5 V) e  $P$  é a pressão medida [KPa].

### 4.3 Equipamentos e Técnicas de Medição

Nesta seção, serão apresentados os equipamentos e as técnicas de medição empregados neste trabalho.

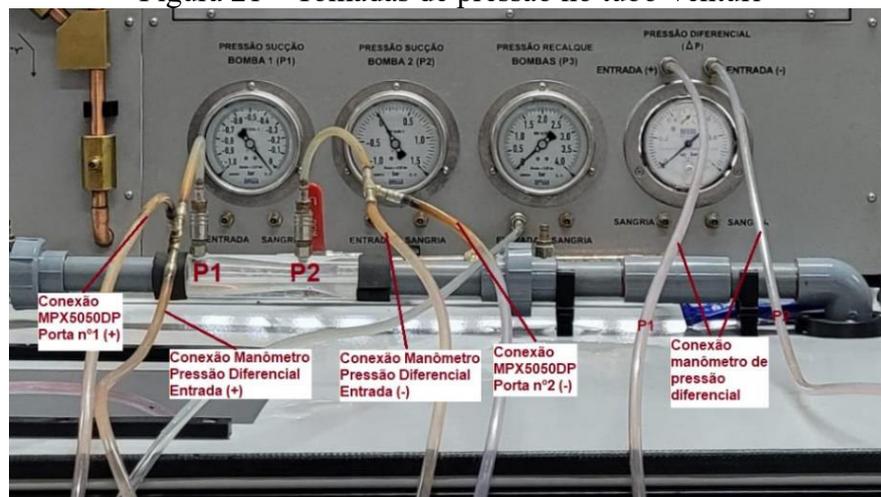
#### 4.3.1 Pressão

Na montagem existente, a medição da pressão era realizada por meio de manômetros que podiam ser conectados em pontos específicos através de mangueiras com sistema de engate rápido. Para possibilitar o uso simultâneo dos sensores de pressão e dos manômetros, foi utilizado um "T de conexão", o qual permitiu a interligação, em paralelo, dos sensores e manômetros ao mesmo ponto de medição. Com essa alteração, tornou-se possível a aquisição dos valores da pressão tanto pelos manômetros convencionais quanto pelos sensores, proporcionando uma comparação direta entre as duas medidas.

### 4.3.2 Vazão

Na entrada e garganta do tubo Venturi foi instalado o transdutor de pressão diferencial MPX5050DP, em paralelo com o manômetro de pressão diferencial (Figura 21). Os valores de pressão obtidos foram utilizados para o cálculo da vazão a partir da equação desenvolvida na seção 3.1.

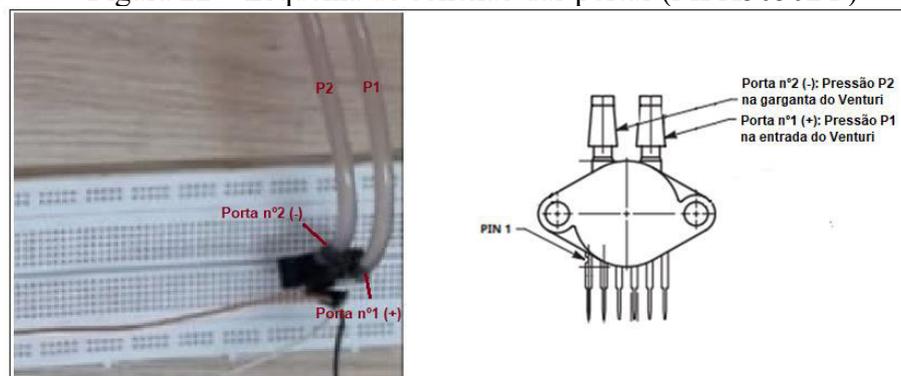
Figura 21 – Tomadas de pressão no tubo Venturi



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Figura 22 ilustra o esquema de conexão das portas do transdutor de pressão diferencial MPX5050DP com os respectivos pontos de tomada de pressão.

Figura 22 – Esquema de conexão das portas (MPX5050DP)



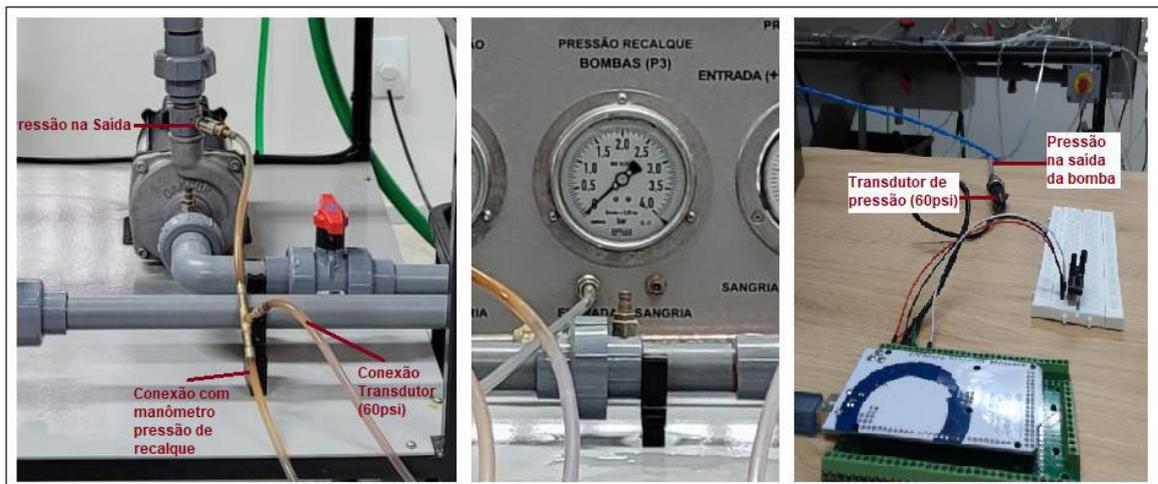
Fonte: Adaptado de NXP Semiconductors (2021)

### 4.3.3 *Altura Manométrica Total*

Na saída da bomba 1, foi instalado um transdutor de pressão manométrica (60 psi), em paralelo com o manômetro de pressão de recalque (P3) (Figura 23).

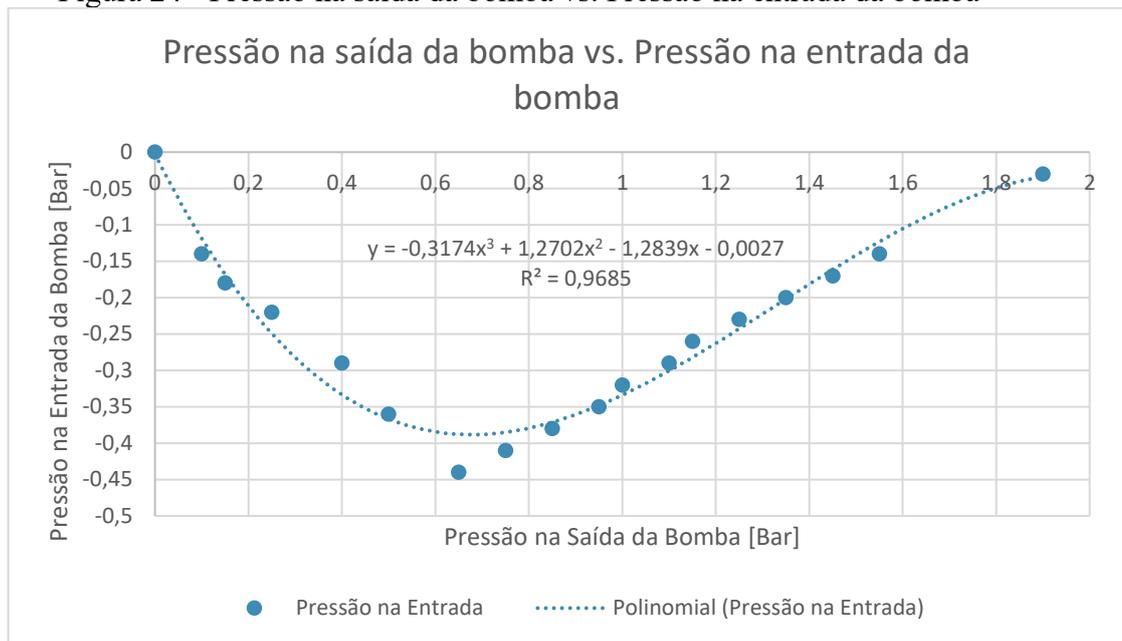
No entanto, devido a uma falha no sistema de engate rápido, não foi possível obter diretamente a pressão de sucção na entrada da bomba. A vedação dos conectores pneumáticos não era completamente eficaz, permitindo a entrada de ar no sistema. Esse vazamento comprometia o funcionamento adequado da bomba. Para contornar essa questão, foi desenvolvida uma equação polinomial utilizando a técnica de regressão por mínimos quadrados. Essa equação foi baseada nos dados experimentais fornecidos no manual do fabricante da bancada (Figura 24). Ela possibilitou uma estimativa aproximada da pressão na entrada da bomba a partir da pressão na saída. Com essa abordagem, foi possível contornar o problema mencionado e dar continuidade aos experimentos.

Figura 23 – Tomadas de pressão na Bomba 1



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Figura 24 - Pressão na saída da bomba vs. Pressão na entrada da bomba



Fonte: Adaptado de Sistema de Ensaio para Mecânica dos Fluidos (2016).

Os valores de pressão obtidos foram utilizados para o cálculo da altura manométrica a partir da equação desenvolvida na seção 3.2.

#### 4.3.4 Sistema de Aquisição de Dados

Os Sistemas de Aquisição de Dados (SAD) são instrumentos utilizados na medição científica, responsáveis por coletar sinais que medem variáveis físicas de interesse. Em geral, esses sistemas são compostos por sensores e transdutores, microprocessadores e interfaces de comunicação com o computador (EMILIO, 2013).

De forma resumida, o processo de aquisição de dados começa com a coleta da variável física pelos sensores ou transdutores, que convertem essa informação em sinais elétricos. Em seguida, esses sinais são enviados aos sistemas de aquisição de dados, onde são convertidos para linguagem de máquina e transmitidos para o sistema computacional. Com isso, estes dados podem ser analisados por meio de técnicas matemáticas e estatísticas (EMILIO, 2013).

Neste trabalho foi utilizado o Arduino MEGA 2560 (Figura 25), para o processamento dos sinais dos sensores e a aquisição de dados. O Arduino foi desenvolvido na Itália, no ano de 2005, com o objetivo de criar uma plataforma eletrônica de código e hardware livre que possibilitasse a criação de projetos de baixo custo, permitindo que pessoas de todo o mundo

acesassem facilmente tecnologias avançadas que interagem com o mundo físico (ARDUINO, 2022).

O fabricante oferece um ambiente de desenvolvimento integrado chamado Arduino IDE, no qual é possível realizar a escrita do programa, compilar e transferir o código para a memória do microcontrolador. Diferentemente da maioria dos sistemas de microcontroladores, o software Arduino IDE pode ser usado nos sistemas operacionais Windows, Macintosh OSX e Linux (ARDUINO, 2022).

As placas Arduino são capazes de ler entradas e transformá-la em uma saída. Com isso, torna-se possível medir variáveis físicas, realizar cálculos numéricos e tomar decisões lógicas a partir do processamento computacional.

As placas destes modelos dispõem de 54 pinos digitais que podem ser configuradas tanto como entrada quanto como saída e 16 entradas analógicas. Além disso, a placa do Arduino possui na sua parte central um microcontrolador; Conversor Analógico para Digital (ADC); temporizadores, interface de comunicação e outros. A programação do Arduino é feita utilizando uma linguagem similar a C e C++ (FONSECA; VEJA, 2011).

Figura 25 - Arduino MEGA 2560



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Neste trabalho, o microcontrolador Arduino é empregado para adquirir e interpretar o sinal de tensão elétrica gerado pelos transdutores de pressão. Para isso, o sinal analógico de tensão elétrica passa por uma conversão para sinal digital por meio do ADC de 10 bits. A entrada do conversor recebe um sinal analógico que varia de 0 a 5 V, enquanto a saída produz um sinal digital cujos valores estão compreendidos entre 0 e 1023, seguindo uma proporção determinada pela equação (17).

$$ADC = \frac{V_{Analógico}}{5} \cdot 1023 \quad (17)$$

onde,  $ADC$  é a saída digital do conversor [*inteiro*] e  $V_{Analógico}$  é o sinal analógico de entrada do conversor [V].

A placa Arduino dispõe de uma fonte de referência de 5 V que alimenta ambos os transdutores. A alimentação do Arduino é estabelecida através da conexão USB com o computador.

Os sinais digitais são processados usando o Arduino IDE. Inicialmente, são armazenadas 100 medições dos valores obtidos pelo ADC, com uma frequência de amostragem de 9600 Hz. Em seguida, é calculada a média aritmética desses valores para reduzir possíveis oscilações nas tensões elétricas emitidas pelos transdutores. Os sinais digitais são organizados em colunas e exibidos no terminal serial do Arduino.

Para integrar o Arduino IDE com a linguagem de programação Python, utiliza-se a biblioteca Pyserial. Essa biblioteca possibilita a comunicação com o Arduino por meio da porta serial e a leitura de todos os dados recebidos. Os sinais de cada transdutor são armazenados em variáveis, convertidos em valores de tensão e aplicados em suas funções correspondentes.

Por fim, os valores de pressão, vazão e altura manométrica são armazenados em listas e exibidos na tela do computador. Isso permite que o usuário visualize os valores medidos e os salve ao concluir o experimento.

Os códigos desenvolvidos no Arduino IDE e em Python estão disponíveis no Apêndice A – Códigos Computacionais. O diagrama esquemático do circuito desenvolvido encontra-se no Apêndice C – Diagrama Esquemático do Circuito Desenvolvido.

## 5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo será descrito o procedimento experimental utilizado para o levantamento da curva característica da instalação e da bomba.

### 5.1 Configuração e Checagens Iniciais

Os passos iniciais, que devem ser realizados antes dos experimentos, são as checagens dos componentes da bancada, para que não ocorra nenhum tipo de interferência nos resultados acarretando erros grotescos.

#### 5.1.1 *Determinação do Offset dos Transdutores de Pressão*

O offset de um transdutor é determinado pela diferença entre o valor de saída real, quando deveria ser nulo, e o valor de referência esperado nessas condições. Para determinar o offset, é necessário expor os transdutores ao ambiente, sem a aplicação de qualquer pressão sobre eles. Após a determinação do offset, os valores de saída dos transdutores são ajustados com base no offset calculado.

#### 5.1.2 *Preenchimento do Corpo da Bomba*

Primeiramente, antes mesmo de ligar a bancada, deve-se checar o nível de água nas tubulações da bomba e no tanque, para que ela não opere sem água e acabe sendo danificada. Caso seja necessário, deve-se abrir a tampa de recalque da bomba e preencher toda a tubulação da bomba com água limpa (Figura 26).

Figura 26 - Preenchimento da tubulação da bomba.



Fonte: Sistema de Ensaio para Mecânica dos Fluidos (2016).

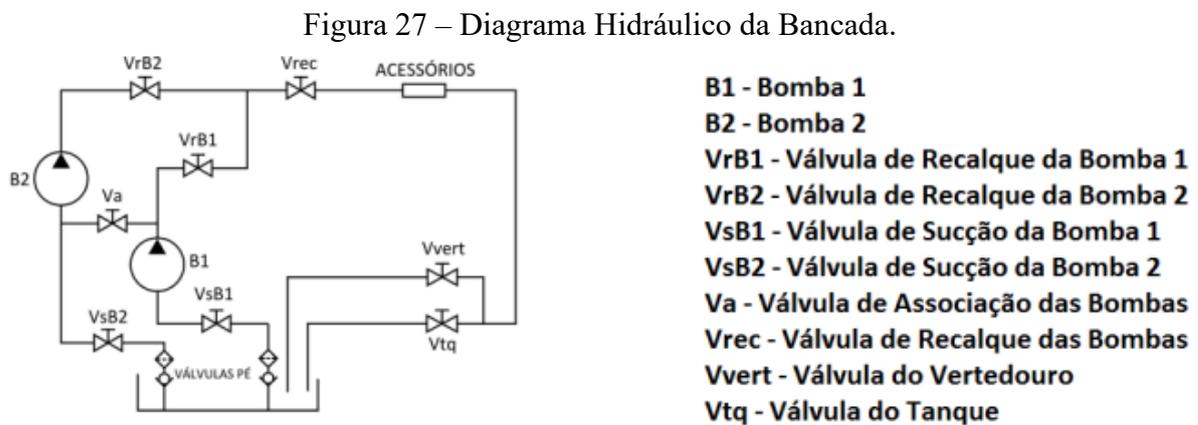
### 5.1.3 Sangria dos Manômetros de Pressão

Após isso, os experimentos devem ser conduzidos sem a presença de quaisquer bolhas de ar nas mangueiras que se conectam ao sistema de medição. Para remover essas bolhas, é necessário realizar um procedimento conhecido como sangria. Esse processo envolve a conexão das tubulações a um ponto específico da bancada responsável pela eliminação das bolhas de ar.

## 5.2 Determinação da Curva Característica da Instalação

Conforme visto na seção 2.2.1.2, ao modificar a velocidade de rotação da bomba, ocorre um deslocamento na curva característica da bomba, afetando os valores de vazão e carga manométrica disponíveis para o sistema. Dessa forma, ao variar a rotação da bomba em diferentes faixas, obtém-se diversos pontos de funcionamento, cada um com valores de pressão e vazão correspondentes. Unindo estes pontos, obtém-se a curva característica da instalação.

A Figura 27 mostra o diagrama hidráulico das tubulações da bancada.



Fonte: Sistema de Ensaio para Mecânica dos Fluidos (2016).

Para a realização deste experimento, foi utilizada a bomba 1, seguindo o seguinte procedimento:

- Abrir as válvulas: VsB1; VrB1; Vrec; Vtq.
- Manter fechada as válvulas VsB2; VrB2; Va; Vvert.
- Conectar uma mangueira na saída da bomba 1, na entrada do manômetro (P3) e na entrada do transdutor de pressão (60 psi), conforme detalhado na seção 4.3.3.

- Conectar uma segunda mangueira na entrada do Venturi, na entrada (+) do manômetro de pressão diferencial e na porta nº1 do transdutor MPX5050DP, conforme detalhado na seção 4.3.2. Conectar uma terceira mangueira na garganta do Venturi, na entrada (-) do manômetro de pressão diferencial e na porta nº2 do transdutor MPX5050DP, conforme detalhado na seção 4.3.2.
- Dar partida ao motor da bomba 1 e operá-la a rotação de 3300 rpm, conforme estabelecido no manual do fabricante da bancada.
- Compilar o programa na IDE do Arduino e logo em seguida compilar o programa escrito em Python.
- Realizar os testes operando a bomba 1 nas rotações de 3300 rpm, 2900 rpm, 2500 rpm, 2100 rpm, 1700 rpm, e 1300 rpm, conforme definido no manual do fabricante da bancada.

Dessa maneira, para cada rotação foram registrados os respectivos resultados de carga manométrica total e vazão. Estes resultados serão discutidos posteriormente no 6.

### **5.3 Determinação da Curva Característica da Bomba**

Conforme discutido na seção 2.2.1.2, existe uma relação inversa entre a vazão e a carga manométrica da bomba. O aumento da vazão reduz a capacidade da bomba em elevar o líquido. Ao introduzir resistência ao escoamento, dificultando o fluxo do fluido, é possível controlar a vazão do sistema, obtendo assim vários pontos de carga manométrica correspondentes. Esses pontos podem ser unidos para obter a curva característica da bomba. Para isso, será utilizada a válvula de recalque da tubulação para controlar a vazão e obter as pressões correspondentes.

Para a realização deste experimento, foi adotado o mesmo procedimento detalhado na seção anterior (5.2). Porém, os testes foram realizados com a rotação da bomba constante a 3300 rpm, e a válvula de recalque foi fechada gradativamente em vários passos de 0,02 bar de pressão diferencial, conforme estabelecido no manual do fabricante.

Dessa maneira, para cada passo da válvula foram registrados os respectivos resultados de carga manométrica total e vazão. Estes resultados serão discutidos posteriormente no 6.

### **5.4 Testes Realizados**

Na Tabela 1 são mostrados os parâmetros de entrada utilizados nos experimentos.

Tabela 1 – Parâmetros de Entrada

---

Fluido	Água
Temperatura [°C]	26
Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	997
Viscosidade [m <sup>2</sup> /s]	0,00000088
Pressão Atmosférica [Pa]	101325
Gravidade [m/ s <sup>2</sup> ]	9,81
A1 Venturi [m <sup>2</sup> ]	0,000464
A2 Venturi [m <sup>2</sup> ]	0,000189
CD Venturi	0,98

---

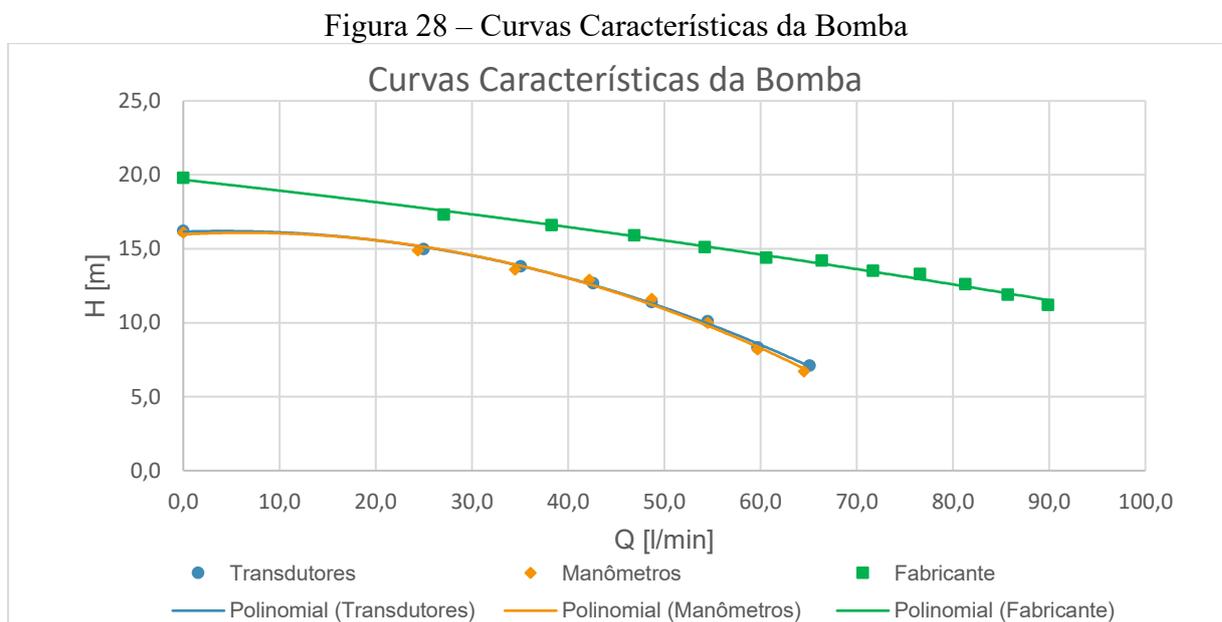
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados neste capítulo foram obtidos por meio de ensaios experimentais, seguindo os procedimentos descritos nas seções 5.2 e 5.3. A partir desses resultados, foram criados gráficos para facilitar a comparação entre as medições feitas pelos transdutores e manômetros, bem como os dados fornecidos pelo fabricante da bancada. As curvas aqui apresentadas foram geradas usando ajustes polinomiais de segunda ordem com base nos pontos experimentais adquiridos ou calculados (Apêndice B – Dados Coletados Experimentalmente e Anexo A – Dados do Fabricante).

### 6.1 Curvas Características da Bomba

A Figura 28 apresenta uma comparação entre as curvas  $H(Q)$  obtidas por meio da análise dos sinais dos transdutores, das medições realizadas utilizando os manômetros da bancada e os dados fornecidos no manual do fabricante da bancada.



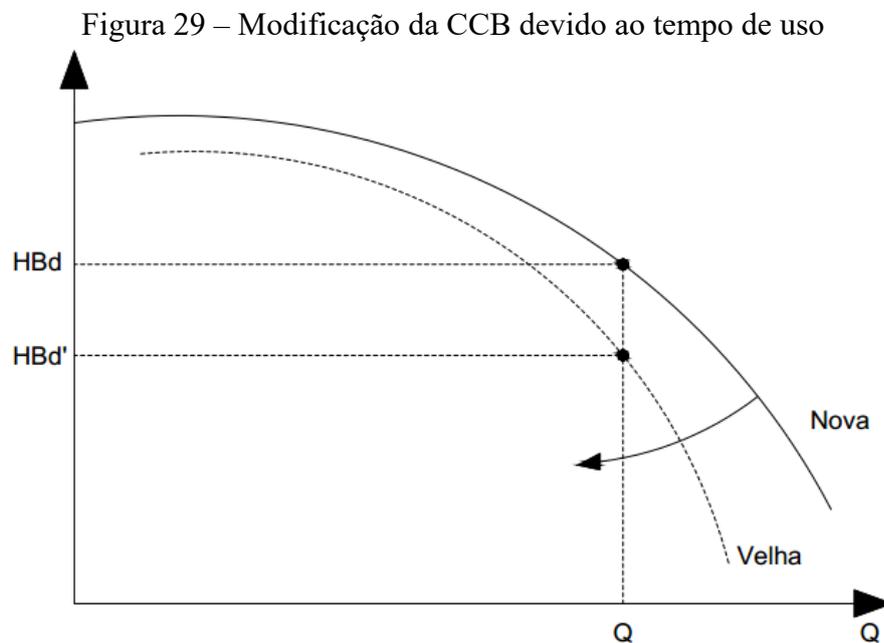
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

As curvas acima exibem a característica típica de uma CCB. Seu comportamento é condizente com o padrão esperado, sendo uma curva de segundo grau onde o aumento da vazão provoca uma diminuição na altura manométrica.

Através da análise da Figura 28, pode-se observar que as curvas obtidas a partir dos dados dos transdutores e dos manômetros possuem uma boa sobreposição, sendo difícil distingui-las. O ponto de shut-off obtido a partir dos dados dos transdutores e manômetros, são 16,2 m e 16,1 m, respectivamente.

No entanto, verifica-se facilmente que a curva baseada nos dados fornecidos pelo fabricante encontra-se acima das demais, com o ponto de shut-off marcado em 19,8 m.

Uma hipótese plausível para explicar essa discrepância é o desgaste da bomba utilizada neste experimento. Segundo Santos (2007), ao longo do tempo, a degradação dos componentes internos ou danos causados pelo uso contínuo provocam a queda da CCB (Figura 29).



Fonte: Modificado de Santos (2007, p.66).

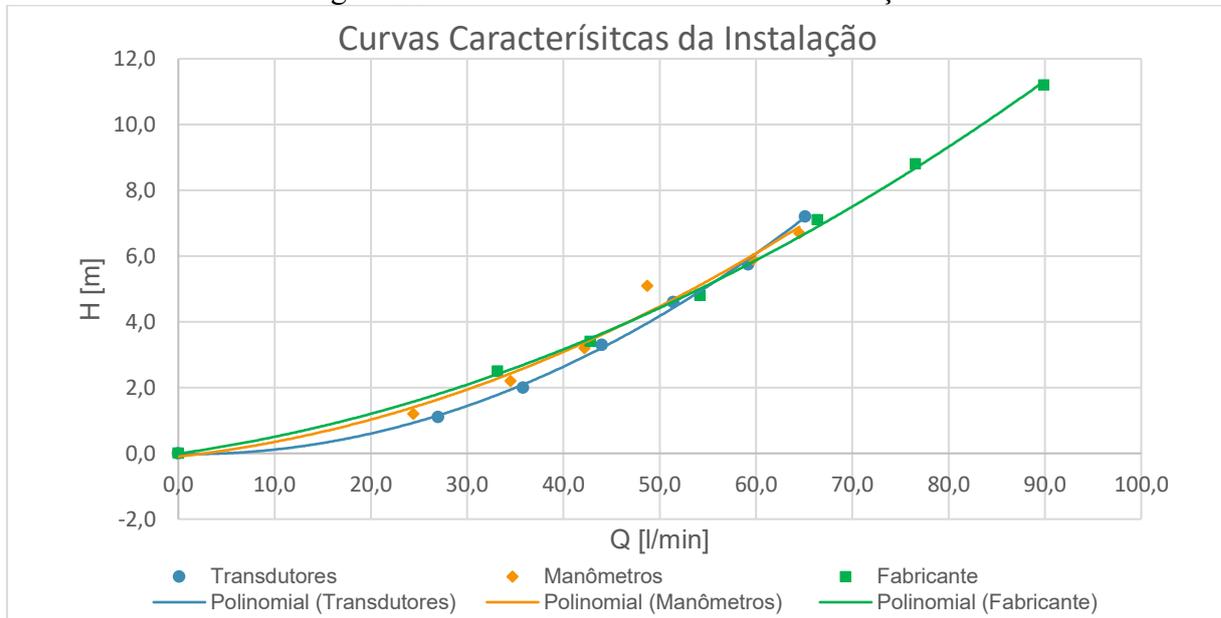
De acordo com Santos (2007, p.66): “Não devemos usar as curvas correspondentes de uma bomba nova, fornecida pelo fabricante, para uma bomba que está sendo utilizada há muito tempo”.

## 6.2 Curvas Características da Instalação

Na Figura 30 verifica-se que ambas as curvas possuem comportamento típico de uma CCI. Conforme esperado, a curva da instalação é uma curva de segundo grau, em que o aumento de vazão demanda um aumento de carga. A bomba opera ao longo de um circuito hidráulico

fechado, onde o reservatório encontra-se abaixo da sucção da bomba. Logo a carga necessária para vazão nula é 0.

Figura 30 – Curvas Características da Instalação



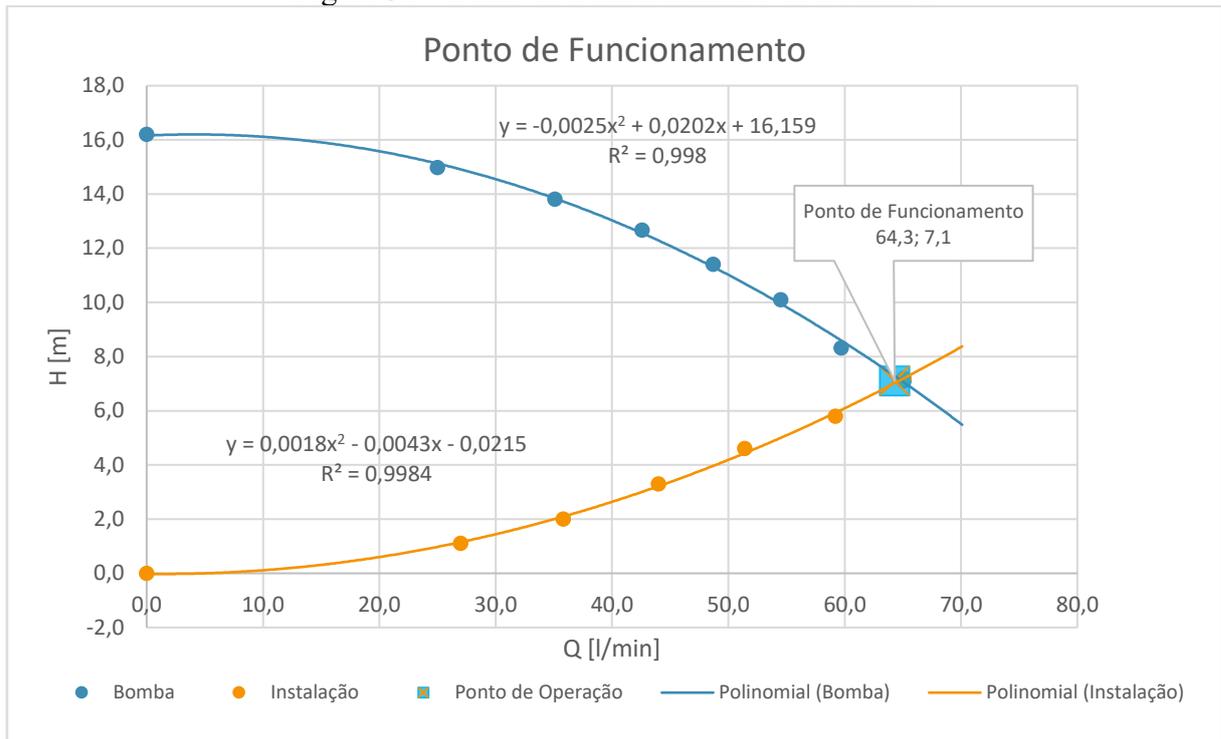
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Nas faixas comuns de operação, as curvas apresentam comportamentos semelhantes. Conforme esperado, a curva obtida a partir dos dados fornecidos pelo fabricante consegue fornecer informações em uma faixa ainda maior. Isso se deve à maior capacidade da bomba do fabricante em alcançar valores mais elevados de vazão e altura manométrica.

### 6.3 Ponto de Funcionamento

Por fim, juntando a CCI e a CCB, obtidas pelos dados coletados dos transdutores, e determinando o ponto de interseção das curvas, obtém-se o ponto de funcionamento da instalação, onde a vazão  $Q \approx 64,3 \text{ l/min}$  a uma carga manométrica  $H \approx 7,1 \text{ m}$  (Figura 31).

Figura 31 – Ponto de Funcionamento da Bomba 1



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

O ponto em que as curvas se interceptam representa o equilíbrio de funcionamento do sistema e qualquer alteração nas condições de ensaio, instalação ou bomba o modificará. Portanto, para se alcançar o melhor funcionamento de um sistema, é necessário associar o estudo do conjunto instalação e bomba.

## 7 CONCLUSÃO

Em virtude da natureza do trabalho realizado, é pertinente distinguir as conclusões referentes ao desenvolvimento da instrumentação da bancada das conclusões obtidas a partir dos ensaios experimentais.

Na montagem experimental tradicional da bancada, todas as variáveis são medidas utilizando instrumentos clássicos, o que dificulta a realização dos experimentos por uma única pessoa. A fabricante da bancada recomenda sua utilização em dupla, onde um indivíduo é responsável pela operação da bancada, enquanto o outro registra os dados lidos nos manômetros.

O uso do Arduino Mega para o controle e processamento dos sinais revelou-se uma escolha vantajosa, oferecendo a capacidade de conectar todos os transdutores a esse dispositivo e tratar os sinais de maneira satisfatória. A possibilidade de ajustar a programação da placa proporcionou uma montagem do sistema extremamente versátil, sendo possível realizar a coleta dos dados de forma automática e salvá-los para análise em etapa subsequente. Além disso, a integração da IDE do Arduino com a linguagem Python permitiu a utilização de algumas bibliotecas que aceleraram o desenvolvimento do código.

Convém informar que as dimensões do tubo Venturi mencionadas no manual do fabricante apresentam divergências ao longo dos diversos capítulos. Na parte destinada às características do tubo Venturi é informado que a área da seção transversal na garganta do Venturi é de  $0,000189 \text{ m}^2$ , enquanto na seção dedicada aos experimentos para obtenção da CCI e CCB é mencionado uma área de  $0,000209 \text{ m}^2$ . Após contato com o fabricante, foi esclarecido que a dimensão correta da área da seção transversal do tubo Venturi é de  $0,000189 \text{ m}^2$ . As divergências encontradas se deram devido a um problema de atualização nas tabelas da seção, resultando na replicação das dimensões da primeira versão do tubo Venturi ( $0,000209 \text{ m}^2$ ), já atualizada. O fabricante garantiu que os valores dos experimentos presentes na tabela não foram afetados por esse erro. Diante disso, para os experimentos realizados neste trabalho adotou-se a área da seção transversal da garganta do tubo Venturi como sendo  $0,000189 \text{ m}^2$ .

Em relação aos experimentos, embora não tenha sido possível obter diretamente a pressão na entrada da bomba, devido à ineficaz vedação dos conectores pneumáticos, os resultados experimentais foram, em geral, muito satisfatórios em relação aos objetivos propostos. Não foram encontradas diferenças significativas entre os dados obtidos por meio dos manômetros e transdutores. Já em relação aos dados do manual do fabricante percebe-se um notório deslocamento da curva da bomba fornecido pelo fabricante da bancada em relação à

curva obtida neste trabalho. Fato que se explica devido ao tempo de uso da bomba e possíveis desgastes dos componentes internos. A curva da instalação obtida pelos dados dos manômetros presente na bancada e os transdutores de pressão também tiveram boa sobreposição.

A pressão obtida através dos transdutores foi comparada com a obtida através dos manômetros não tendo sido observado uma diferença superior a 1% do fundo de escala.

Através da revisão bibliográfica, foi possível adquirir o embasamento necessário para analisar as diferenças encontradas entre o experimento realizado neste trabalho e o experimento exposto no manual do fabricante. De maneira geral, o modelo proposto demonstrou ser adequado para a realização dos experimentos. As curvas obtidas apresentaram o comportamento típico de uma CCI e CCB, estando todas em conformidade com a literatura.

## **7.1 Trabalhos Futuros**

A bancada disponibiliza uma série de experimentos que podem ser realizados utilizando o arranjo experimental apresentado.

Neste trabalho, utilizou-se a Bomba 1 para a realização dos experimentos. Porém, há a possibilidade de obter as curvas características para as associações em série e paralelo das Bombas 1 e 2. Com isso, será possível verificar a mudança no ponto de funcionamento, bem como no comportamento das curvas sob diferentes configurações.

Conforme discutido na seção 3.1.2, o coeficiente de descarga do tubo Venturi é um fator crucial para corrigir as perdas associadas à geometria do dispositivo, neste trabalho utilizou-se o valor de 0,98, conforme sugerido no manual do fabricante. Esse coeficiente pode ser obtido experimentalmente, sendo uma ótima oportunidade para estudar qual a influência da vazão na variação do mesmo.

Outra proposta consiste em conduzir experimentos para determinar as perdas de carga em pontos específicos da bancada de mecânica dos fluidos e, posteriormente, comparar os resultados obtidos com as informações disponíveis no manual do fabricante.

## REFERÊNCIAS

ALÉ, J. A. V. **Sistemas Fluidomecânicos: Sistemas de Bombeamento**. Porto Alegre: PUCRS, 2010.

ARDUINO. **About Arduino**. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/about>. Acesso em: 07 jul. 2022.

BARRETO, T. E. S. **Desenvolvimento da instrumentação de um banco de ensaio de bombas**. 2017. 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10362/34217>. Acesso em: 05 jul. 2022.

BARROS, G. G.; ROSA, H. M. P. Determinação e análise de coeficiente de descarga de um tubo de venturi com auxílio de um sensor de diferença de pressão mpx5050. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, Viçosa, v. 4, n. 2, p. 0225 – 0228, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.18540/jcecv14iss2pp0225-0228>. Acesso em: 02 set. 2022.

BENEDICT, R. P. **Fundamentals of Temperature, Pressure, and Flow Measurements**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1984.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluidos**. 2. Ed. São Paulo: Pearson, 2008.

CARVALHO, D. F. **Instalações elevatórias: Bombas**. Belo Horizonte:IPUC, 1977.

CID, A. S.; CORREA, T. Venturino: análise da variação de pressão em um tubo de Venturi utilizando Arduino e sensor de pressão. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Rio de Janeiro, v. 41, n. 3, jan. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0333>. Acesso em 01 set. 2023.

EMILIO, M. P. **Data Acquisition Systems: From Fundamentals to Applied Design**. 1. ed. New York: Springer, 2013.

FONSECA, E. G. P.; VEJA, A. S. Tutorial sobre Introdução a Projetos Utilizando o Kit de Desenvolvimento Arduino. In: Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 39., 2011, Blumenau. **Anais eletrônicos** [...] Blumenau: ABENGE, 2011. p. 1 – 7. Disponível em: [http://www.telecom.uff.br/pet/petws/downloads/artigos/cobenge\\_2011/COBENGE\\_art1677\\_2\\_ARDUINO\\_2011\\_08\\_30.pdf](http://www.telecom.uff.br/pet/petws/downloads/artigos/cobenge_2011/COBENGE_art1677_2_ARDUINO_2011_08_30.pdf). Acesso em: 26 ago. 2022.

FROES, F. Desenvolvimento de um medidor de vazão digital empregando placa de orifício para uso em linha de gases. **Revista Científica Semana Acadêmica**. Fortaleza, n. 230, fev. 2023. Disponível em: <https://semanaacademica.org.br/artigo/desenvolvimento-de-um-medidor-de-vazao-digital-empregando-placa-de-orificio-para-uso-em-linha>. Acesso em: 05 set. 2023.

GOMES, H. P.; CARVALHO, P. S. O. **Manual de sistemas de bombeamento: eficiência energética**. 1. ed. Joao Pessoa: Editora Universitária – UFPB. 2012.

GOMIDE, R. Monitoramento para manejo da irrigação: instrumentação, automação e métodos. In: FARIA, M.A., SILVA, E.L., VILELA, L.A.A., PEREIRA, G.M. **Manejo de irrigação**. Poços de Caldas: SBEA/UFLA/DEG, 1998. p.133-238. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/81661/1/Monitoramento-manejo-1.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2023.

HJELMGREN, J. Dynamic Measurement of Pressure: A Literature Survey. **SP Measurement Technology**, Borås, 2003. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962216/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 03 jul. 2022.

JESUS, A. G.; SANTOS, C. S.; SOUSA, D. H. P.; BERTOLDO, M. S. M.; VIEIRA, D.; NETO, A. M. S. Bancada Didática para Ensaio em Mecânica dos Fluidos. **Revista Processos Químicos**, Goiânia, v. 16, n. 30, p. 99 – 110, mai. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.19142/rpq.v16i30.637>. Acesso em: 15 jul. 2022.

KARASSIK, I.J.; CARTER, R. **Centrifugal Pumps: Selection, Operation and Maintenance**. New York: Dodge Corporation, 1960.

LENCASTRE, A. **Hidráulica Geral**. Lisboa: Ed. FCT, 2005.

MATAIX, Cláudio. **Mecânica de Fluidos Y Máquinas Hidráulicas**. 2. Ed. México: harper & row publishers inc., 1972. 582p.

NXP, B. V. **Data Shet MPX 5050**. NXP Semiconductors, 2021. Disponível em: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPX5050.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2021.

OLIVEIRA, F. S. **Readequação da prática de Laboratório de Engenharia Química: Associação de Bombas**. 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/20557>. Acesso em: 19 jun. 2022.

PRESSURE transmitter market by sensing technology, type (absolute, gauge, differential pressure, and multivariable), fluid type (liquid, gas, and steam), application (level, pressure, and flow), industry and region (2022-2027). **MarketsandMarkets**, 2022. Disponível em: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/pressure-transmitters-market-937.html>. Acesso em: 05 set. 2023.

SANTOS, L. **Sistema de Ensaio para Mecânica dos Fluidos**. Nova Didacta, 2016.

SANTOS, S. L. **Bombas & Instalações Hidráulicas**. São Paulo: LCTE EDITORA, 2007.

SILVA, F. E. de C.; SCHNEIDER, F. A. Projeto e construção de uma bancada didática para ensaio de bombas centrífugas. In: Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 41., 2013, Gramado. **Anais eletrônicos** [...] Gramado: ABENGE, 2013. p. 1 – 12. Disponível em: [https://turing.pro.br/anais/COBENGE-2013/pdf/117403\\_1.pdf](https://turing.pro.br/anais/COBENGE-2013/pdf/117403_1.pdf). Acesso em: 15 jul. 2022.

SMITH, C. S., Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon, **Physical Review**, Vol. 94, 1954. Disponível em: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.94.42>. Acesso em: 14 fev. 2022.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. d. **Sensores Industriais: Fundamentos e**

Aplicações. São Paulo: Editora Érica, 2005.

TRACTIAN. **Bomba Centrífuga: quais pontos de análise de vibração.** Disponível em: <https://tractian.com/blog/bomba-centrifuga>. Acesso em: 16 dez. 2021.

## APÊNDICE A – CÓDIGOS COMPUTACIONAIS

### 1) Código IDE Arduino

```
#define saidaSensor1 A0
#define saidaSensor2 A1
#define saidaSensor_mpx A2

float valorSensor1 = 0; //leitura anaógica do sensor 1
float valorSensor2 = 0; //leitura anaógica do sensor 2
float valorSensorMPX = 0;
int cont = 0;
float soma1 = 0;
float soma2 = 0;
float soma3 = 0;
int amostra = 100;

void setup() {
  pinMode(saidaSensor1,INPUT);
  pinMode(saidaSensor2,INPUT);
  pinMode(saidaSensor_mpx,INPUT);
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  cont +=1;
  valorSensor1 = analogRead(saidaSensor1);
  valorSensor2 = analogRead(saidaSensor2);
  valorSensorMPX = analogRead(saidaSensor_mpx);
  soma1 += valorSensor1;
  soma2 += valorSensor2;
  soma3 += valorSensorMPX;
  if(cont==amostra){
```

```

Serial.print(soma1/cont); //Imprime na porta serial a média de 100 amostras de sinal do
sensor 1
Serial.print(" ");
Serial.print(soma2/cont); //Imprime na porta serial a média de 100 amostras de sinal do
sensor 2
Serial.print(" ");
Serial.println(soma3/cont); //Imprime na porta serial a média de 100 amostras de sinal do
sensor MPX 5050DP
cont = 0;
soma1 = 0;
soma2 = 0;
soma3 = 0;
delay(1000); // Repete o processo a cada segundo
}
}

```

## 2) Código Python

```

"""
Created on Thu Dec 16 16:31:26 2021
@author: Luiz David Bandeira Caminha
Revisão
"""

import serial
import time
import math
import numpy as np
import CoolProp.CoolProp as cp

porta = "COM3"
velocidade = 9600
fluido = 'Water' #Dados do coolprop
temp = 299.15 #K
pres_atm = 101325 #Pa

```

```
rho_agua = cp.PropsSI('D', 'T', temp, 'P', pres, fluido)
valor_analogico_1 = 0.0
valor_analogico_2 = 0.0
valor_analogico_mpx = 0.
tensao1 = 0.0
tensao2 = 0.0
tensao_mpx = 0.0
offset_1 = 0.007
offset_2 = 0.033
offset_mpx = -0.030
pressao_psi_1 = 0.0
pressao_bar_1 = 0.0
pressao_bar_1_vet = []
pressao_entrada_vet = []
pressao_psi_2 = 0.0
pressao_bar_2 = 0.0
pressao_bar_2_vet = []
pressao_bar_mpx = 0.0
pressao_bar_mpx_vet = []
pressao_dif_venturi = 0.0
pressao_dif_venturi_vet = []
altura_manometrica_total = 0.0
altura_manometrica_total_vet = []
velocidade_fluido = 0.0
vazao1 = 0.0
vazao1_vet = []
i = 0
soma_1 = 0.0
media_1 = 0.0
soma_2 = 0.0
media_2 = 0.0
soma_3 = 0.0
media_3 = 0.0
arduino = serial.Serial (porta, velocidade); #Conexão com a porta do arduino
```

```

def calcular_tensao_sensor(valor_analogico,offset):    #Converte o sinal do ADC em
tensão
    return (valor_analogico*5/(1024.0)) + offset

def calcular_pressao_bar_sensor_1(tensao):
    pressao_psi = ((tensao - 0.4999998)/0.06666667)    #Função escrita de acordo com os
dados do fabricante do sensor 1
    return pressao_psi*0.0689476                    #Retorna o valor de pressão em bar

def calcular_pressao_bar_sensor_2(tensao):
    pressao_psi = ((tensao - 0.5)/0.26666667)        #Função escrita de acordo com os
dados do fabricante do sensor 2
    return pressao_psi*0.0689476                    #Retorna o valor de pressão em bar

def calcular_pressao_bar_sensor_mpx(tensao):
    pressao_kpa = ((tensao/5)-0.04)/0.018            #Função escrita de acordo com os
dados do fabricante do sensor MPX5050DP
    return pressao_kpa*0.01                          #Retorna o valor de pressão em bar

def velocidade_do_fluido (dif_pressao, densidade_agua):
    D1 = 24.3/1000
    D2 = 15.55/1000
    A1 = math.pi*math.pow(D1, 2)/4
    A2 = math.pi*math.pow(D2, 2)/4
    dif_pressao_pascal = dif_pressao * 100000        #Fator de conversão para pascal
    velocidade_fluido1                               =
math.sqrt((2*dif_pressao_pascal)/(densidade_agua*((math.pow(A1, 2)/math.pow(A2, 2)-
1))))
    return velocidade_fluido1

def vazao_teorica_venturi(velocidade_fluido):
    cd = 0.98
    A1 = 0.00046376976

```

```

vazao = cd*A1*velocidade_fluido
vazao_l_min = vazao*60000 #Fator conversão m^3/s para l/min
return vazao_l_min

def carga_manometrica_total_H (pressao_saida, i):
    peso_especifico_agua = 9810
    pressao_entrada_bomba = (-0.3174*(pressao_saida**3))+(1.270*(pressao_saida**2))-
(1.2839*pressao_saida)-0.0027 #Equação polinomial para relacionar a
    pressão de saída e entrada da bomba.
    pressao_entrada_vet.insert(i, pressao_entrada_bomba)
    dif_pressao_bomba_pascal = (pressao_saida-pressao_entrada_bomba)*100000 #Fator
de conversão para pascal
    print("pressão na entrada: ", pressao_entrada_bomba, " ", " pressão na
saída",pressao_saida, " " " altura
manométrica",dif_pressao_bomba_pascal/peso_especifico_agua, end=" ")
    return dif_pressao_bomba_pascal/peso_especifico_agua

while i < 100:
    ""
    while i < 100: # Somatório das 100 primeiras medidas
de tensões
        linha = str(arduino.readline())
        linhaFormat = linha[2:-5]
        valor_analogico_1 = float(linhaFormat.split(" ")[0])
        valor_analogico_2 = float(linhaFormat.split(" ")[1])
        valor_analogico_mpx = float(linhaFormat.split(" ")[2])
        tensao1 = (valor_analogico_1*5/(1024.0))
        tensao2 = (valor_analogico_2*5/(1024.0))
        tensao_mpx = (valor_analogico_mpx*5/(1024.0))
        soma_1 += tensao1
        soma_2 += tensao2
        soma_3 += tensao_mpx
        i += 1

```

```

media_1 = soma_1/i          # Média das 100 tensões
media_2 = soma_2/i          # Obs: Este procedimento deve ser realizado
sem os transdutores estarem conectados à bancada
media_3 = soma_3/i
offset_1 = 0.5 - media_1
offset_2 = 0.5 - media_2
offset_mpx = 0.2 - media_3
print("Offset Sensor 1: %.15f"%offset_1," ", "Offset Sensor 2: %.15f"%offset_2,"
",media_3," ", "Offset sensor mpx: %.15f" %offset_mpx)
break
'''

linha = str(arduino.readline()) #Armazena na string "linha" os valores impressos na serial
do arduino
linhaFormat = linha[2:-5] #Comando para limpar as duas primeiras e as cinco últimas
colunas

valor_analogico_1 = float(linhaFormat.split(" ")[0]) #Divide o conteúdo da string em
colunas e transforma os valores analógicos da primeira coluna em float
valor_analogico_2 = float(linhaFormat.split(" ")[1]) #Divide o conteúdo da string em
colunas e transforma os valores analógicos da segunda coluna em float
valor_analogico_mpx = float(linhaFormat.split(" ")[2])

tensao1 = calcular_tensao_sensor(valor_analogico_1, offset_1) #Converte o sinal
analógico em tensão
pressao_bar_1 = calcular_pressao_bar_sensor_1(tensao1)
pressao_bar_1_vet.insert(i, pressao_bar_1)

tensao2 = calcular_tensao_sensor(valor_analogico_2, offset_2) #Converte o sinal
analógico em tensão
pressao_bar_2 = calcular_pressao_bar_sensor_2(tensao2)
pressao_bar_2_vet.insert(i, pressao_bar_2)

tensao_mpx = calcular_tensao_sensor(valor_analogico_mpx, offset_mpx) #Converte o
sinal analógico em tensão

```

```
pressao_bar_mpx = calcular_pressao_bar_sensor_mpx(tensao_mpx)
pressao_bar_mpx_vet.insert(i, pressao_bar_mpx)

velocidade_fluido = velocidade_do_fluido(pressao_bar_mpx,rho_agua)

vazao1 = vazao_teorica_venturi(velocidade_fluido)
vazao1_vet.insert(i, vazao1)

altura_manometrica_total = carga_manometrica_total_H(pressao_bar_1, i)

altura_manometrica_total_vet.insert(i, altura_manometrica_total)

#print("pressão na saída: ",pressao_bar_mpx, " ", "vazao: ",vazao1_vet[i], " altura
manométrica", altura_manometrica_total, "pressão dif: ",pressao_dif_venturi,"i: ", i)

print("Pressão Diferencial: ",pressao_bar_mpx_vet[i], " ", "Vazão", vazao1_vet[i], " ", "i:
",i )
    i+=1
i=0
arduino.close()
```

## APÊNDICE B – DADOS COLETADOS EXPERIMENTALMENTE

Nas tabelas abaixo são mostrados os resultados dos experimentos para levantamento da CCI, obtidos por meio da análise dos sinais dos transdutores (Tabela 2) e das medições realizadas utilizando os manômetros (Tabela 3).

Tabela 2 – Resultados da Curva Característica da Instalação (Transdutores)

Rotação da bomba 1 [rpm]	Pressão na entrada da bomba [bar]	Pressão na saída da bomba [bar]	Altura manométrica [m]	Pressão diferencial Venturi [bar]	Vazão [l/min]
3300	-0,33	0,38	7,2	0,143	65,1
2900	-0,28	0,29	5,8	0,118	59,2
2500	-0,23	0,22	4,6	0,089	51,4
2100	-0,17	0,16	3,3	0,065	44,0
1700	-0,11	0,09	2,0	0,043	35,8
1300	-0,06	0,05	1,1	0,025	27,0
0	0,00	0,00	0,0	0,000	0,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 3 – Resultados da Curva Característica da Instalação (Manômetros)

Rotação da bomba 1 [rpm]	Pressão na entrada da bomba [bar]	Pressão na saída da bomba [bar]	Altura manométrica [m]	Pressão diferencial Venturi [bar]	Vazão [l/min]
3300	-0,31	0,35	6,7	0,14	64,5
2900	-0,28	0,30	5,9	0,12	59,7
2500	-0,25	0,25	5,1	0,08	48,7
2100	-0,17	0,15	3,2	0,06	42,2
1700	-0,12	0,10	2,2	0,04	34,5
1300	-0,06	0,05	1,2	0,02	24,4
0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Nas tabelas abaixo são mostrados os resultados dos experimentos para levantamento da CCB, obtidos por meio da análise dos sinais dos transdutores (Tabela 4) e das medições realizadas utilizando os manômetros (Tabela 5).

Tabela 4 – Resultados da Curva Característica da Bomba (Transdutores)

<b>Pressão na entrada da bomba [bar]</b>	<b>Pressão na saída da bomba [bar]</b>	<b>Altura manométrica [m]</b>	<b>Pressão diferencial Venturi [bar]</b>	<b>Vazão [l/min]</b>
-0,32	0,38	7,1	0,143	65,1
-0,36	0,46	8,3	0,120	59,7
-0,38	0,60	10,1	0,100	54,5
-0,39	0,74	11,4	0,080	48,7
-0,37	0,88	12,7	0,061	42,6
-0,32	1,03	13,8	0,042	35,1
-0,26	1,21	15,0	0,021	25,0
-0,17	1,42	16,2	0,000	0,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

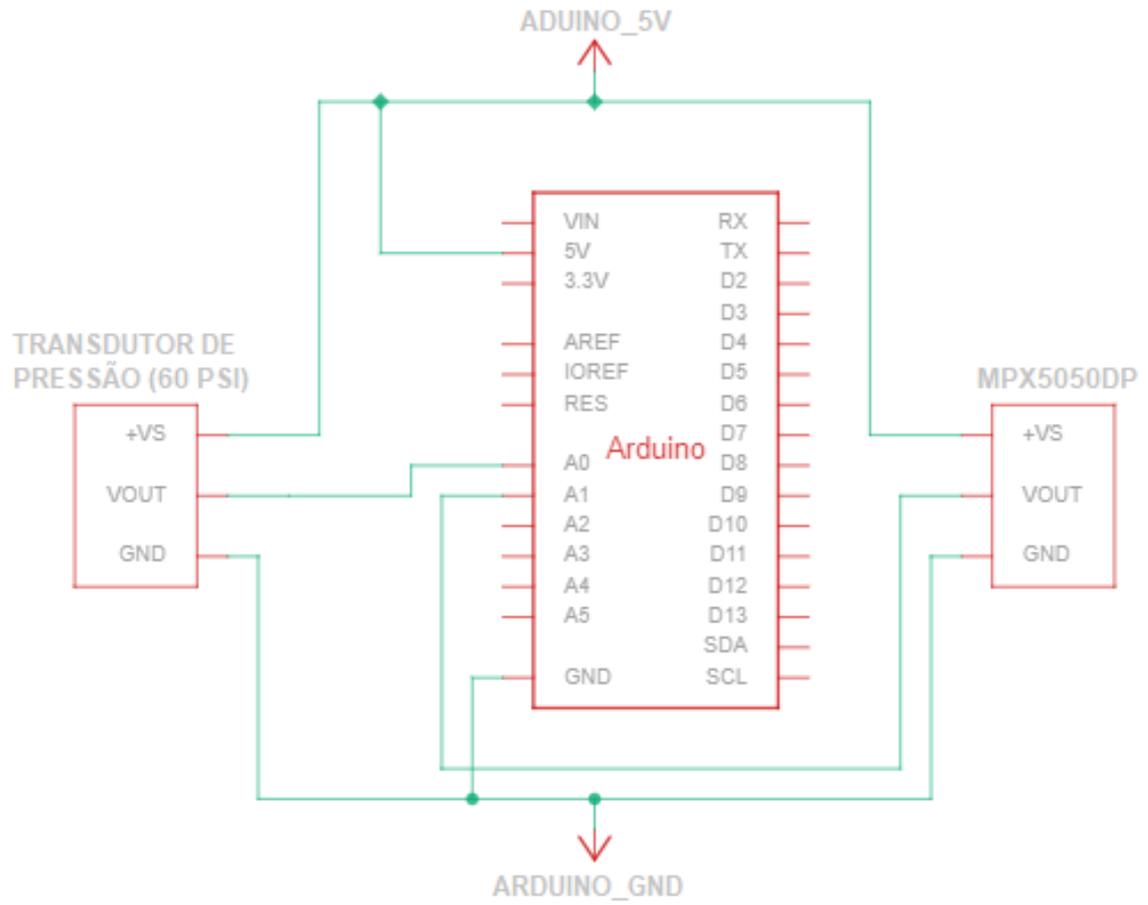
Tabela 5 – Resultado da Curva Característica da Bomba (Manômetros)

<b>Pressão na entrada da bomba [bar]</b>	<b>Pressão na saída da bomba [bar]</b>	<b>Altura manométrica [m]</b>	<b>Pressão diferencial Venturi [bar]</b>	<b>Vazão [l/min]</b>
-0,31	0,35	6,7	0,14	64,5
-0,35	0,45	8,2	0,12	59,7
-0,38	0,60	10,0	0,10	54,5
-0,39	0,75	11,6	0,08	48,7
-0,36	0,90	12,9	0,06	42,2
-0,33	1,00	13,6	0,04	34,5
-0,26	1,20	14,9	0,02	24,4
-0,18	1,40	16,1	0,00	0,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

**APÊNDICE C – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO DESENVOLVIDO**

Figura 32 – Diagrama esquemático



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

## ANEXO A – DADOS DO FABRICANTE

Tabela 6 – Resultados da Curva Característica da Instalação (Fabricante)

Rotação da bomba 1 [rpm]	Pressão na entrada da bomba [bar]	Pressão na saída da bomba [bar]	Altura manométrica [m]	Pressão diferencial Venturi [bar]	Vazão [l/min]
3300	-0,44	0,65	11,2	0,22	89,9
2900	-0,36	0,50	8,8	0,16	76,6
2500	-0,29	0,40	7,1	0,12	66,4
2100	-0,22	0,25	4,8	0,08	54,2
1700	-0,18	0,15	3,4	0,05	42,8
1300	-0,14	0,10	2,5	0,03	33,2
0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,0

Fonte: Sistema de Ensaio para Mecânica dos Fluidos (2016).

Tabela 7 – Resultados da Curva Característica da Bomba (Fabricante)

Pressão na entrada da bomba [bar]	Pressão na saída da bomba [bar]	Altura manométrica [m]	Pressão diferencial Venturi [bar]	Vazão [l/min]
-0,44	0,65	11,2	0,22	89,9
-0,41	0,75	11,9	0,20	85,7
-0,38	0,85	12,6	0,18	81,3
-0,35	0,95	13,3	0,16	76,6
-0,32	1,00	13,5	0,14	71,7
-0,29	1,10	14,2	0,12	66,4
-0,26	1,15	14,4	0,10	60,6
-0,23	1,25	15,1	0,08	54,2
-0,20	1,35	15,9	0,06	46,9
-0,17	1,45	16,6	0,04	38,3
-0,14	1,55	17,3	0,02	27,1
-0,03	1,90	19,8	0,00	0,0

Fonte: Sistema de Ensaio para Mecânica dos Fluidos (2016).