



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

DANILO THADEU E SILVA FERREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAS PARA O AUXÍLIO NAS PRÁTICAS
DE BOMBAS DO LABORATÓRIO DE OPERAÇÕES UNITÁRIAS DA UFPB.**

JOÃO PESSOA/PB
2018

DANILO THADEU E SILVA FERREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAS PARA O AUXÍLIO NAS PRÁTICAS
DE BOMBAS DO LABORATÓRIO DE OPERAÇÕES UNITÁRIAS DA UFPB.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Química, na Universidade
Federal da Paraíba como requisito parcial para a
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Química.

Orientador: Prof. Dr. Alfredo Ismael Curbelo
Garnica

JOÃO PESSOA/PB
2018

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

F383d Ferreira, Danilo Thadeu e Silva.

Desenvolvimento de ferramentas para o auxílio nas práticas de bombas do laboratório de operações unitárias da ufpb. / Danilo Thadeu e Silva Ferreira. - João Pessoa, 2018.
50 f.

Orientação: Prof Dr Alfredo Ismael Curbelo Garnica
Garnica.

Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. Bombas. 2. Centrífugas. 3. Fluido. I. Garnica, Prof Dr Alfredo Ismael Curbelo Garnica. II. Título.

UFPB/BC

DANILO THADEU E SILVA FERREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAS PARA O AUXÍLIO NAS PRÁTICAS
DE BOMBAS DO LABORATÓRIO DE OPERAÇÕES UNITÁRIAS DA UFPB.**

Trabalho Final de Curso apresentado ao curso de
Engenharia Química da Universidade Federal da
Paraíba como requisito parcial para a obtenção do título
de bacharel.

João Pessoa, 12 de junho de 2018

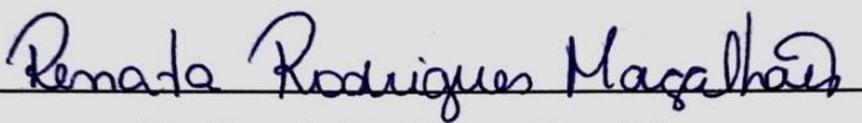
BANCA EXAMINADORA



Prof(a). Dr(a). Alfredo Ismael Curbelo Garnica



Prof(a). Dr(a). Fabíola Dias Curbelo



Ma. Renata Rodrigues Magalhães



Ma. Evanice Medeiros de Paiva

Este trabalho é dedicado as pessoas que estiveram ao meu lado e me apoiaram: meus pais Cledson e Lúcia, a minha irmã Rafaela. E a minha namorada e melhor amiga Thialle, que sempre acreditou em mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por toda saúde e força para superar todas as adversidades.

Ao meu orientador, por toda orientação, apoio.

A minha família que esteve sempre ao meu lado, com todo o amor e incentivo.

A minha namorada, por todo amor, companheirismo e paciência nessa longa caminhada.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

Tendo em vista como o transporte de fluido de um ponto a outro é de suma importância para as indústrias, o estudo desse tema é de bastante interesse para o engenheiro químico. Um fluido é uma substância que se deforma com a aplicação de uma tensão de cisalhamento, podendo ser classificado como líquido ou gás dependendo de como o mesmo se comporta em um dado volume de controle. Para o estudo de bombas é de suma importância o entendimento da equação de energia, pois a equação de Bernoulli é uma aplicação da mesma dado algumas considerações, tendo equações que são capazes de mostrar o desempenho de uma bomba a partir de análises experimentais. No presente trabalho visou-se o desenvolvimento de uma ferramenta matemática computacional para o auxílio dos alunos de graduação nas práticas envolvendo o entendimento de bombas centrífugas, e afim de se obter o resultado esperado foi necessário a realização dos experimentos no modulo de bombas disponível no laboratório de operações unitárias do departamento de engenharia química da Universidade Federal da Paraíba. Como principais resultados do trabalho, as curvas de desempenho da bomba foram obtidas e de forma conjunta a ferramenta matemática foi desenvolvida e testada garantindo a sua utilização pelos futuros alunos, para que auxilie no aprendizado e no desenvolvimento crítico e interpretativo de dados experimentais.

Palavras-Chaves: bombas, centrífugas, fluido.

ABSTRACT

Considering how the transport of fluid from one point to another is of paramount importance to industries, the study of this topic is of great interest to the chemical engineer. A fluid is a substance that deforms with the application of a shear stress, and can be classified as liquid or gas depending on how it behaves in a given volume of control. For the study of pumps, it is very important to understand the energy equation, since the Bernoulli equation is an application of the same given some considerations, having equations that are able to show the performance of a pump from experimental analyzes. In the present work, the development of a computational mathematical tool was used to aid undergraduate students in the practices involving the understanding of centrifugal pumps, and in order to obtain the expected result it was necessary to carry out the experiments in the pump module available in the laboratory of unitary operations of the chemical engineering department of the Federal University of Paraíba. As the main results of the work, the performance curves of the pump were obtained and together the mathematical tool was developed and tested ensuring its use by the future students, so that it helps in the learning and the critical and interpretative development of experimental data.

Keywords: pump, centrifugal, fluid.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	9
2.1. <i>Propriedades dos fluidos</i>	9
2.1.1. <i>Massa específica.....</i>	9
2.1.2. <i>Volume específico.....</i>	10
2.1.3. <i>Peso específico</i>	10
2.1.4. <i>Densidade</i>	11
2.1.5. <i>Pressão</i>	11
2.1.6. <i>Viscosidade absoluta ou dinâmica</i>	12
2.1.7. <i>Viscosidade cinemática</i>	13
2.1.8. <i>Pressão de vapor e Cavitação.....</i>	14
2.1.9. <i>Tensão superficial</i>	14
2.2. <i>Teorema de Bernoulli.....</i>	15
2.3. <i>Perda de carga</i>	17
2.3.1. <i>Perda de carga normal (h_{fn}).....</i>	18
2.3.2. <i>Perda de carga localizada (h_{fL}).....</i>	19
2.3.2.1. <i>Método do fator K</i>	20
2.3.2.2. <i>Método do comprimento equivalente</i>	20
2.4. <i>Bombas</i>	21
2.4.1. <i>Bombas Centrífugas</i>	21
2.4.1.1. <i>Funcionamento das bombas centrífugas</i>	21
2.4.1.2. <i>Curvas características.....</i>	22
2.4.1.2.1. <i>Curva de carga (H) versus vazão (Q)</i>	22
2.4.1.2.2. <i>Curva de potência absorvida (Pot_{abs}) versus vazão (Q).....</i>	23
2.4.1.2.3. <i>Curva de rendimento total (η) versus vazão (Q).....</i>	24
2.4.1.2.4. <i>Curva NPSH versus vazão (Q).....</i>	24
2.4.1.3. <i>Curva do sistema</i>	25
2.4.1.4. <i>Associação de bombas.....</i>	26
2.4.1.4.1. <i>Bombas em paralelo</i>	27
2.4.1.4.2. <i>Bombas em série.....</i>	27
3. MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1. <i>Equipamento.....</i>	28
3.2. <i>Metodologia.....</i>	29

3.2.1. <i>Preparação do equipamento</i>	29
3.2.2. <i>Obtenção das curvas características para as bombas individuais</i>	29
3.2.2.1. <i>Bomba 1 (BC1)</i>	29
3.2.2.2. <i>Bomba 2 (BC2)</i>	30
3.2.3. <i>Obtenção das curvas características para a associação das bombas</i>	31
3.2.3.1. <i>Em Paralelo</i>	31
3.2.3.2. <i>Em Série</i>	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1. <i>Dados experimentais</i>	33
4.2. <i>Curvas Características</i>	39
4.2.1. <i>Carga versus vazão</i>	39
4.2.2. <i>Potências versus vazão</i>	40
4.2.3. <i>Rendimento total versus vazão</i>	44
4.2.4. <i>Curva do sistema</i>	45
4.3. <i>Ferramenta computacional</i>	49
5. CONCLUSÃO	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1. INTRODUÇÃO

Um fluido é uma substância que se deforma continuamente sob ação de uma tensão de cisalhamento (tangencial), menos que seja uma tensão muito pequena (LIVI, 2010). Um subconjunto das fases da matéria, os fluidos incluem os líquidos, os gases, os plasmas e, de certa maneira, os sólidos plásticos.

Todos os fluidos possuem a propriedade de não resistir à deformação, por tanto tem a capacidade de fluir, quando o fluido é um gás ele flui até ocupar todo o volume do recipiente que o contém, e quando um líquido flui ele forma uma superfície livre (ROMA, 2006).

Existem dois tipos de turbomáquinas, as que adicionam energia (bombas) e aquelas que extraem energia (turbinas). O prefixo turbo é uma palavra latina que significa rotação ou giro, apropriado para dispositivos rotativos (WHITE, 2011).

A bomba é a mais antiga máquina de transferência de energia para um fluido que se conhece. Há pelo menos dois projetos que datam de antes de Cristo: (1) as rodas de água com conchas impulsionadas na parte inferior da roda, ou noras, usadas na Ásia e na África (1000 a.C.) e (2) a bomba de parafuso de Arquimedes (250 a.C.), que ainda é fabricada nos dias de hoje para movimentar misturas líquido-sólido. Turbinas de rodas com remos eram usadas pelos romanos em 70 a.C., e os moinhos de vento da Babilônia datam de 700 a.C.

(WILSON *apud* WHITE, 2011, p. 763)

Tendo em vista o auxílio nas práticas relacionadas a bombas no departamento de engenharia química da universidade federal da Paraíba, este trabalho propõe criar um material comparativo e de apoio, para nortear os alunos durante a disciplina de operações unitárias experimental. E para isso é necessário fazer testes que possam validar a ferramenta, e serão realizados testes das bombas de forma individual e associando elas em série e em paralelo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Propriedades dos fluidos

A apresentação das propriedades dos fluidos é de fundamental importância entendimento dos processos que ocorrem no estudo de bombas hidráulicas (MATTOS; FALCO, 1998).

2.1.1. Massa específica

É a razão entre a massa (m) de uma porção compacta e homogênea de uma substância e o volume (V) que ela ocupa. No sistema internacional (SI) a unidade é kg/m^3 . Matematicamente assume a seguinte expressão (MATTOS; FALCO, 1998):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

2.1.2. Volume específico

O volume específico é o inverso da massa específica, ou seja, é o valor da massa que uma unidade de volume de uma substância contém. É mais relevante quando se está estudando escoamentos compressíveis. No SI a unidade é m³/kg. Matematicamente assume a seguinte expressão (MATTOS; FALCO, 1998):

$$\vartheta_e = \frac{V}{m} \quad (2)$$

2.1.3. Peso específico

O peso específico de uma substância é uma razão entre o peso de uma determinada substância e uma unidade de volume (HIBBELER, 2016). Essa é uma definição generalizada, que carece de um pouco de conceituação, sabe-se que o “peso” é uma função da aceleração da gravidade em que a substância se encontra, como garante a Segunda Lei de Newton (MATTOS; FALCO, 1998).

Em que a força peso (F_g) pode ser escrita da seguinte forma:

$$F_g = m * g \quad (3)$$

m – massa do corpo

g – aceleração da gravidade no local

Pela definição de peso específico, temos:

$$\gamma = \frac{F_g}{V} \quad (4)$$

Aplicando o que diz a Segunda Lei de Newton.

$$\gamma = \frac{m * g}{V} \quad (5)$$

E pela definição de massa específica, relaciona-se o peso específico a massa específica de uma substância ou fluido. A unidade no SI é N/m^3 (HIBBELER, 2016).

$$\gamma = \rho * g \quad (6)$$

2.1.4. Densidade

A densidade de uma substância é a razão entre a massa específica ou peso específico da substância em questão e a de outra substância padrão a uma temperatura específica, normalmente utilizada para líquidos. Comumente a substância padrão é a água a uma temperatura de 4 °C e na pressão atmosférica de 1 atm (HIBBELER, 2016). Por ser a razão entre duas propriedades iguais é uma quantidade adimensional (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

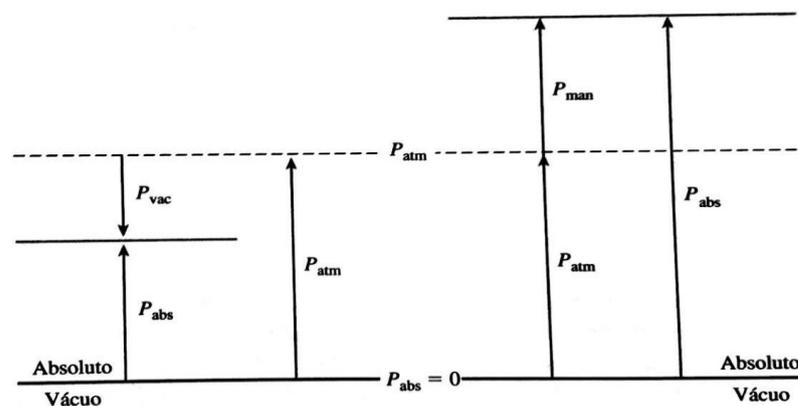
$$d = \frac{\rho}{\rho_{\text{água}}} = \frac{\gamma}{\gamma_{\text{água}}} \quad (7)$$

2.1.5. Pressão

Quando um fluido está em repouso com relação a superfície em que se encontra, a viscosidade do fluido não provoca efeito de cisalhamento sobre a superfície, então apenas atua a força normal, e o efeito dessa força é chamado de pressão (HIBBELER, 2016). Logo pressão é a força normal exercida por um fluido por unidade de área. O termo pressão é associado a um gás ou um líquido, para sólidos o termo equivalente é tensão normal. No SI a unidade é N/m^2 , que corresponde a Pascal (Pa) (ÇENGEL; BOLES, 2013).

Existem algumas denominações diferentes para pressão decorrente do referencial adotado no momento da medição, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 - Pressão absoluta, manométrica e de vácuo



- Pressão absoluta (P_{abs}): é medida em relação ao vácuo absoluto, ou seja, pressão absoluta igual a zero;
- Pressão manométrica (P_{man}): sendo o valor obtido pela maioria dos equipamentos de medição de pressão, o valor da pressão manométrica é em relação a pressão atmosférica local.
- Pressão de vácuo (P_{vac}): são pressões abaixo da pressão atmosférica local, ou seja, valores negativos da pressão manométrica.

2.1.6. Viscosidade absoluta ou dinâmica

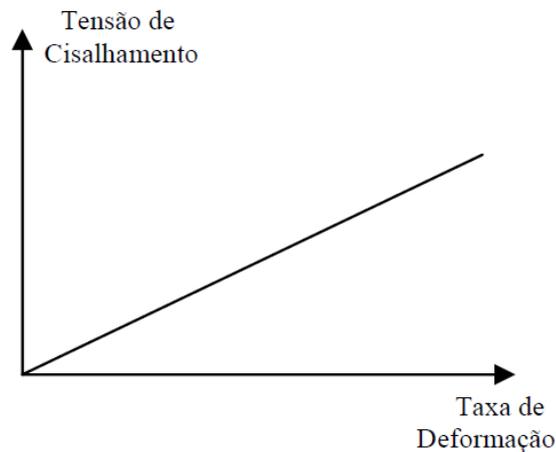
Uma propriedade do fluido que mede a resistência ao movimento de uma camada superior para uma camada adjacente, ocorrendo apenas quando uma força tangencial ou de cisalhamento é aplicada ao fluido (HIBBELER, 2016).

A viscosidade é uma constante de proporcionalidade que relaciona a tensão de cisalhamento (τ) com a taxa de deformação ($\Delta V/\Delta X$), a expressão matemática resultando é chamada de lei de viscosidade de Newton (MATTOS; FALCO, 1998).

$$\tau = \mu * \frac{\Delta V}{\Delta X} \quad (8)$$

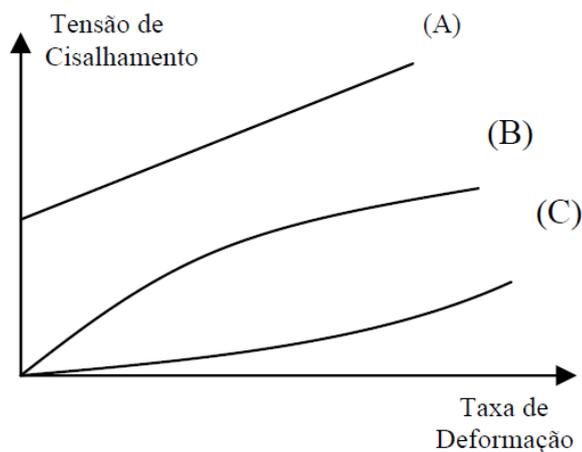
Todos os fluidos que seguem essa lei, ou seja, tem um comportamento linear em um gráfico de tensão de cisalhamento versus taxa de deformação são chamados de fluidos newtonianos (Fig. 2), já aqueles fluidos que possuem um comportamento não-linear, são chamados de não newtonianos (Fig. 3). Os não newtonianos eles possuem valores diferentes de viscosidade dependendo da taxa de deformação, e é denominada de viscosidade aparente, fluidos que aumentam a viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação são chamados de fluidos dilatantes, e o que exibem o comportamento oposto são chamados de fluidos pseudoplásticos (ÇENGEL; CIMBALA, 2015). Um comportamento interessante em relação aos fluidos não newtonianos é o do plástico de *Bingham*, ou ideal, que em determinado momento se comporta como sólido e em outro momento como fluido. O plástico de *Bingham* pode resistir sem escoar, até uma determinada taxa de cisalhamento, porém, quando esse valor é ultrapassado o material escoar normalmente, como um fluido newtoniano (Fig. 3) (PEREIRA; *et al.*, 2002).

Figura 2 - Comportamento de um fluido newtoniano



Fonte: PEREIRA, 2002.

Figura 3 - Comportamento de fluido não newtoniano.. (A) Plástico de Bingham; (B) Pseudoplásticos; (C) Dilatante



Fonte: PEREIRA, 2002.

2.1.7. Viscosidade cinemática

Outra maneira de se expressar a viscosidade do fluido é utilizando-se a viscosidade cinemática, que nada mais é do que a razão entre a viscosidade dinâmica e a massa específica. No SI possui unidade de m^2/s (HIBBELER, 2016).

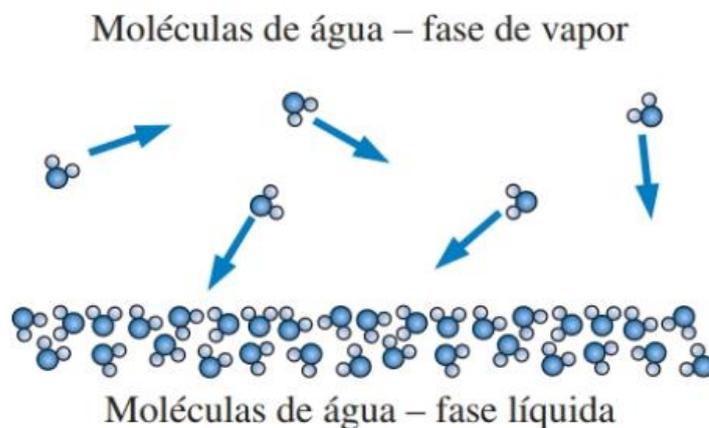
$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (9)$$

É utilizado o termo cinemática, pois a força não participa das dimensões da viscosidade cinemática (HIBBELER, 2016).

2.1.8. Pressão de vapor e Cavitação

Uma quantidade de líquido em um recipiente fechado, possui uma certa fração vaporizada. Essa fração é limitada pelo equilíbrio entre os estados líquido e gasoso da substância em questão, ou seja, quando o número de moléculas escapando que escapam da superfície da substância é igual ao número de moléculas que retornam a superfície (POTTER; WIGGERT, 2009). Pressão de vapor é definida como a pressão exercida pelo vapor de uma substância quando existe um equilíbrio de fases em uma determinada temperatura (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

Figura 4 - Representação de pressão de vapor



Fonte: ÇENGEL; CIMBALA, 2015

Quando em um escoamento de líquido a pressão em um local é menor do que a pressão de vapor do fluido que está escoando, ocorre em uma vaporização não planejada, formando bolhas no local. Esse fenômeno é conhecido por cavitação (POTTER; WIGGERT, 2009). Quando essas bolhas entram em regiões com maiores pressões, elas colapsam e causam ondas de choque altamente destrutivas e com pressões bastante elevadas. A cavitação é uma causa comum da diminuição do desempenho e erosão de pás de hélices, sendo uma consideração muito relevante no projeto de bombas e turbinas hidráulicas (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

2.1.9. Tensão superficial

Não tendo como um líquido se expandir livremente, ele formara uma interface com outro líquido ou um gás. As moléculas dentro do líquido se repelem devido a sua proximidade, o que acontece na interface é que metade da sua vizinhança está ausente, ocasionando uma força atrativa maior no sentido do interior do fluido (WHITE, 2011). Isso causa uma tensão na superfície do líquido que é conhecida como tensão superficial, e pode ser entendida como a

energia por unidade de área, que é equivalente a força por unidade de comprimento necessária para se formar o filme (MATTOS; FALCO, 1998).

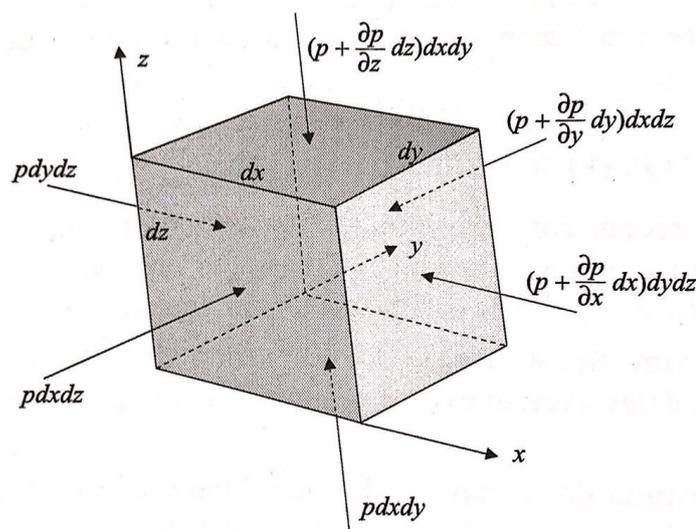
2.2. Teorema de Bernoulli

A representação diferencial é de bastante aplicação em fenômenos de transporte, já que permite uma descrição detalhada de um fenômeno. O transporte de quantidade de movimento, tratado na mecânica dos fluidos, estuda a influência que existe entre o movimento e força, ou pressão, em fluidos escoando (ROMA, 2006).

Algumas simplificações foram consideradas para o desenvolvimento de equações que descrevessem esse tipo de fenômeno, sendo a mais importante a de que o fluido é ideal, ou seja, é incompressível e tem viscosidade nula, logo não tem atrito. Uma das primeiras equações que se utiliza dessa hipótese é a equação de Euler, que deduziu para um fluido ideal escoando em regime permanente (ROMA, 2006).

A equação de Euler é uma aplicação da segunda lei de Newton para um elemento de fluido ideal, escoando em regime laminar, produzindo equações para cada direção das coordenadas cartesianas (Fig. 5), aonde se relaciona as forças de pressão e de inércia (ROMA, 2006).

Figura 5 - Pressões em um elemento de volume de controle



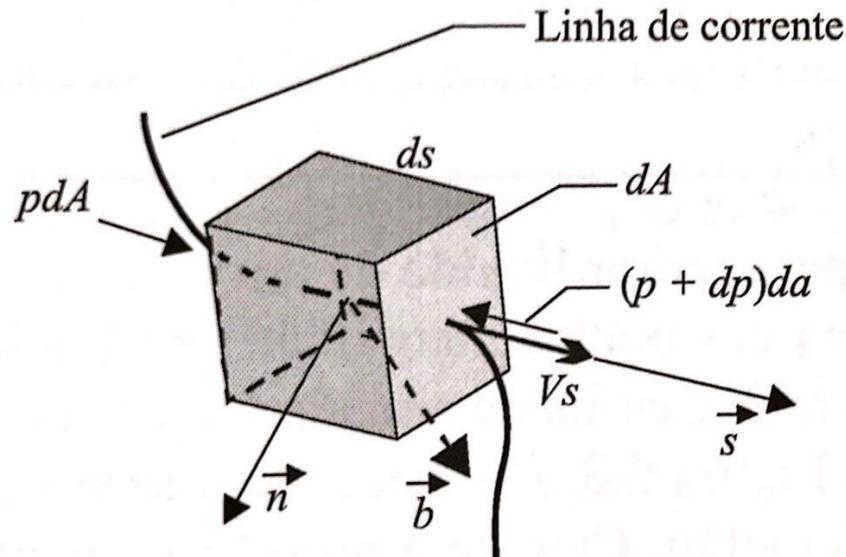
Fonte: ROMA, 2006

A forma mais compacta da equação de Euler a partir de operadores de cálculo vetorial, a torna independente do sistema de coordenadas.

$$-\rho * \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} * \nabla) * \vec{V} \right) = \vec{\nabla} * (p + \rho * g * z) \quad (10)$$

A integração da equação de Euler, ao longo de uma linha de corrente no escoamento (Fig. 6) é chamada de equação de Bernoulli (LIVI, 2010).

Figura 6 - Elemento de volume sobre uma linha de corrente



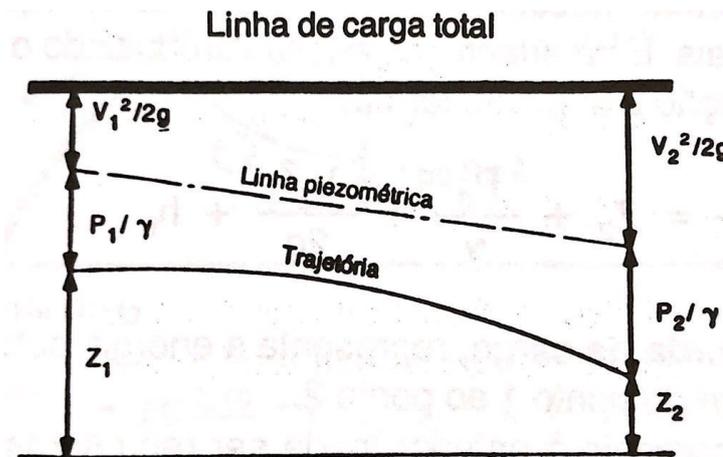
Fonte: ROMA, 2006

Adotando a condição de regime permanente e realizando algumas manipulações algébricas, a equação de Bernoulli possui a seguinte forma (ROMA, 2006).

$$z + \frac{V^2}{2 * g} + \frac{P}{\rho * g} = constante = H \quad (11)$$

Em que os termos são denominados por carga, sendo cada uma responsável por um tipo de influência no deslocamento do fluido. O primeiro termo é a carga de elevação, que representa a energia potencial do fluido, o segundo termo é a carga da velocidade, que representa a elevação necessária para que um fluido atinja a velocidade V durante a queda livre sem atrito e por fim o ultimo termo é a carga de pressão, que representa a altura de uma coluna de fluido que produz a pressão estática P (Fig. 7). O termo H é a carga total do escoamento, então pode-se definir a equação de Bernoulli como “a soma das cargas da pressão, velocidade e elevação ao longo de uma linha de corrente é constante durante um escoamento estacionário, quando a compressibilidade e os efeitos de atrito são desprezíveis” (ÇENGEL; CIMBALA, 2015, p. 206).

Figura 7 - Representação gráfica do teorema de Bernoulli



Fonte: MATTOS; FALCO, 1998

Quando a equação de Bernoulli é aplicada a dois pontos da mesma linha de corrente a seguinte expressão é obtida.

$$z_1 + \frac{V_1^2}{2 * g} + \frac{P_1}{\rho * g} = z_2 + \frac{V_2^2}{2 * g} + \frac{P_2}{\rho * g} \quad (12)$$

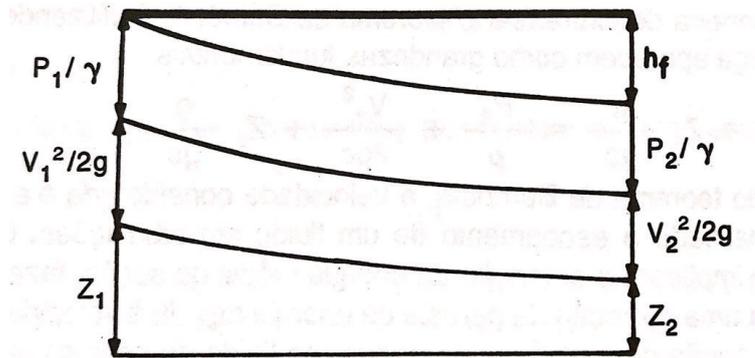
2.3. Perda de carga

No teorema de Bernoulli apresentado em (12) é considerando a hipótese de ser um fluido perfeito, que desconsidera a perda de energia devido ao trabalho de atrito, viscosidade e turbilhonamento. Por tanto é necessária uma adaptação quando se trata de fluidos reais, e para isso adicionamos um termo que expressa essas perdas de energia, o h_f (MATTOS; FALCO, 1998).

$$z_1 + \frac{V_1^2}{2 * g} + \frac{P_1}{\rho * g} = z_2 + \frac{V_2^2}{2 * g} + \frac{P_2}{\rho * g} + h_f \quad (13)$$

Este termo é conhecido como perda de carga, e representa a energia perdida para um líquido se deslocar de um ponto 1 para um ponto 2 (MATTOS; FALCO, 1998). Como a equação (13), a representação gráfica pode ser feita, porém deve se considerar o termo de h_f como na Figura 8.

Figura 8 - Representação gráfica da equação de Bernoulli com a perda de carga



Fonte: MATTOS; FALCO, 1998

Para calcular o termo perda de carga é preciso desmembrá-lo em dois outros, sendo denominadas de perda de carga normal (h_{fn}) e perda de carga localizada (h_{fL}), logo o h_f é a soma dessas outras duas perdas de carga (MATTOS; FALCO, 1998).

2.3.1. Perda de carga normal (h_{fn})

A parede das tubulações retas causa uma perda de pressão distribuída ao longo do comprimento do tubo, fazendo com que a pressão total diminua ao decorrer da tubulação, as expressões capazes de calcular esse tipo de perda de carga foram desenvolvidas tanto para escoamentos laminares como turbulentos, porém o foco será na perda de carga em regime turbulento por ser o objeto de estudo do presente trabalho.

O regime turbulento não permite uma análise apenas teórica, necessitando de dados experimentais. E algumas equações foram desenvolvidas para representar a perda de carga, sendo a mais aceita e utilizada atualmente a determinada por Darcy-Weisbach (MATTOS; FALCO, 1998).

$$h_{fn} = \frac{\Delta P}{\gamma} = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * g} \quad (14)$$

Sendo,

D – Diâmetro interno das tubulações;

V – Velocidade;

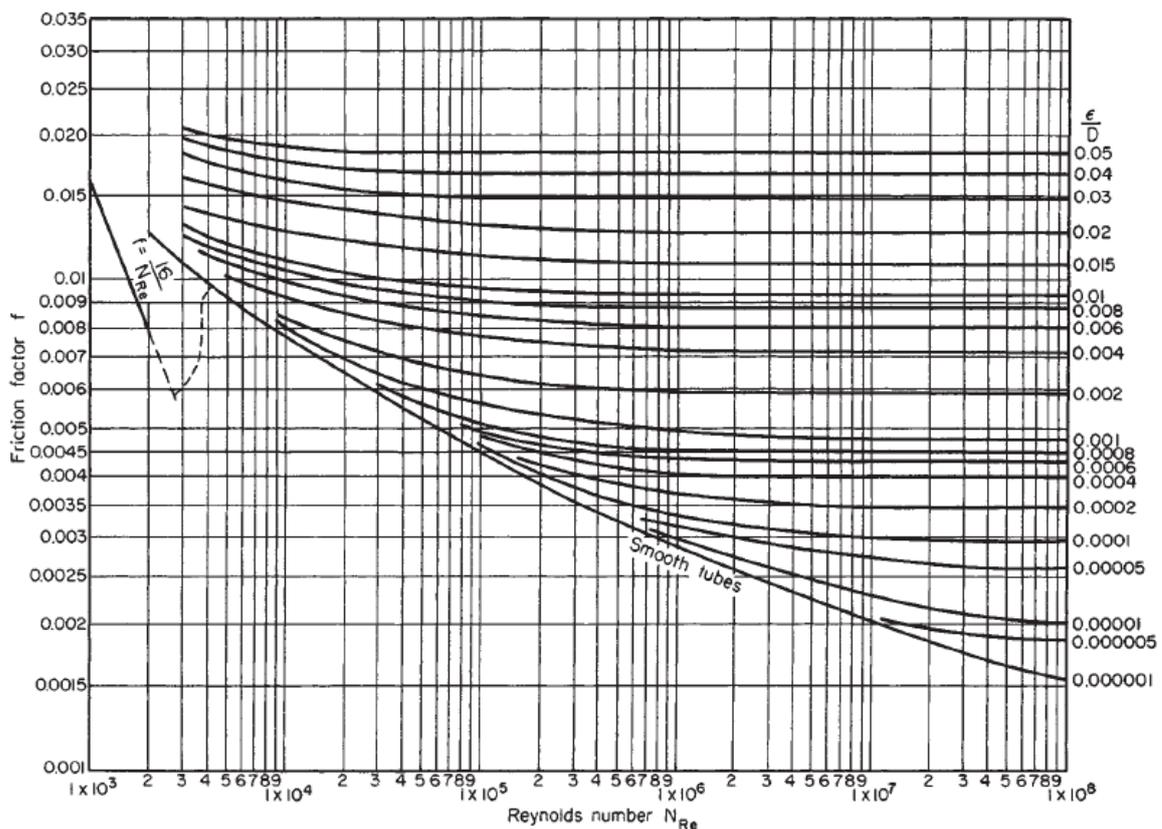
L – Comprimento da tubulação;

g – Gravidade;

f – Coeficiente de atrito.

O coeficiente de atrito é obtido através de formulas teórico-experimentais ou gráficos e é uma função do número de Reynolds e da rugosidade relativa (e/D) da tubulação em questão. Uma das formas mais comuns de se determinar o f , é utilizando o gráfico de Moody (Fig. 9), o qual tem o fator de atrito para diversos tipos de tubulações (rugosidades relativas) diferentes e em função do número de Reynolds. Algumas fórmulas desenvolvidas por estudiosos podem ser utilizadas, dentro de certos limites, para substituir o gráfico de Moody, porém as mesmas as vezes são cálculos bem complexos e que acabam tornando um pouco complicado a determinação do coeficiente de atrito (MATTOS; FALCO, 1998).

Figura 9 - Diagrama de Moody



Fonte: PERRY, 1997

2.3.2. Perda de carga localizada (h_{rL})

Normalmente em grandes extensões de tubulações a perda de carga localizada é desprezada, porém quando estamos falando de plantas industriais ou prediais, os acessórios são bastante utilizados, exemplos desses acessórios são conexões e válvulas. Quando presentes nas tubulações causam distúrbios, como deslocamento da camada superficial e a criação de vórtices. Esses distúrbios causam uma grande perda de pressão, que é chamada de perda de carga

localizada, também conhecida como perda de carga acidentais. Existem dois métodos baseados em experimentos que permitem calcular a perda de carga localizada, que são: método do fator K e método do comprimento equivalente (FILHO, 2015).

2.3.2.1. Método do fator K

É um método que determina uma proporcionalidade entre a perda de carga e a componente de energia cinética do escoamento, sendo o K a constante de proporcionalidade que é determinada para cada tipo de acessório (eq. 16), o qual pode variar com a forma da conexão e, rigorosamente, com o diâmetro. O fator K deve ser obtido junto ao fabricante do acessório em questão (FILHO, 2015).

$$h_{fL} = K * \frac{V^2}{2 * g} \quad (15)$$

Alguns exemplos para valores de K estão na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de K para alguns acessórios

<i>Acessórios</i>	<i>K (rosca)</i>	<i>K (solda, flange)</i>
<i>Curva 90°</i>	0,70	0,40
<i>Cotovelo 90°</i>	1,50	0,90
<i>Tê em linha</i>	0,90	0,60
<i>Tê saída lateral</i>	2,00	1,00
<i>Válvula gaveta (aberta)</i>		0,15
<i>Válvula globo (aberta)</i>		6

Fonte: FILHO, 2015

2.3.2.2. Método do comprimento equivalente

Este método consiste basicamente em representar a perda de carga no acessório como um comprimento de tubulação que reproduziria, nas mesmas condições, a mesma perda de carga. Sendo obtido o comprimento de todos os acessórios presentes, a perda de carga é calculada como se a tubulação fosse um único trecho reto de comprimento total, L_{total} (MATTOS; FALCO, 1998).

$$L_{total} = L_{reto} + \sum_1^n L_{eq} \quad (16)$$

E a perda de carga total, envolvendo toda a tubulação e acessórios, será:

$$h_f = f * \frac{L_{total}}{D} * \frac{V^2}{2 * g} \quad (17)$$

2.4. Bombas

As máquinas podem ser definidas como elementos dinâmicos de conversão de energia. De uma forma geral, a energia mecânica é uma das formas envolvidas nessas conversões. Elas são definidas a partir da conversão que realizam, sendo, máquinas elétricas (ME) as que convertem energia elétrica em energia mecânica, máquinas térmicas (MT) convertem energia térmica em energia mecânica, e por fim as máquinas hidráulicas (MH) convertem energia hidráulica em energia mecânica. Sendo classificadas como motoras quando a energia primária (elétrica, térmica ou hidráulica) é convertida em energia mecânica, e quando o oposto ocorre é classificada como geradora (FILHO, 2015).

As bombas são MH geradoras, sempre utilizadas quando é necessário aumentar a pressão de um fluido, com o objetivo de transportá-lo pela tubulação de um lado a outro da planta, com base em vazões e pressões estabelecidas pelo processo (FILHO et. al. *apud* GOUVEA, 2008).

2.4.1. Bombas Centrífugas

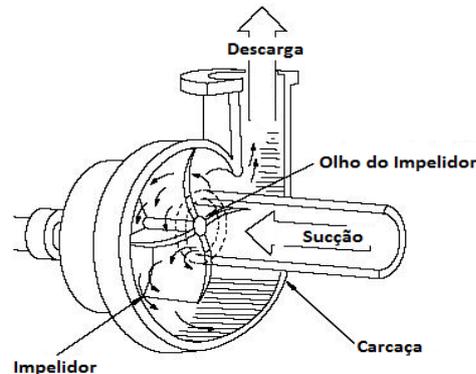
A transferência de energia ao fluido, nas bombas centrífugas, ocorre por meio da rotação do eixo onde está montado o rotor, com um número específico de pás ou palhetas. A geometria do rotor e suas palhetas caracteriza o tipo da bomba centrífuga e influencia a forma como a energia é transferida ao fluido e sua direção na saída do rotor. As características construtivas e do sistema onde opera, determinam a vazão da bomba (GOUVEA, 2008).

2.4.1.1. Funcionamento das bombas centrífugas

Uma bomba centrífuga possui duas partes principais: um impelidor ou rotor, que impõe um movimento giratório ao líquido, e uma carcaça, que direciona o líquido para a região do impelidor e transporta-o para fora sob uma pressão mais alta. Na Fig. 10 mostra uma bomba centrífuga típica de sucção única. O impelidor é instalado em um eixo e é frequentemente acionado por um motor elétrico. A carcaça inclui os bocais de sucção e descarga e aloja também o conjunto impelidor. A parte da carcaça que circunda o impelidor é chamada voluta. O líquido entra via bocal de sucção para o olho do impelidor e viaja ao longo da cobertura, desenvolvendo um movimento rotativo devido às pás do impelidor. Ele deixa o alojamento da voluta

periféricamente a uma pressão mais alta através do bocal de descarga (POTTER; WIGGERT, 2009).

Figura 10 - Representação de partes mais importantes de uma bomba centrífuga



Fonte: Full Mecânica - Lo que hay que saber de una bomba centrífuga (Editada)

2.4.1.2. Curvas características

Para a determinação do ponto de trabalho, ou seja, a vazão, carga, potência consumida e rendimento de uma bomba em um sistema, é uma função das características da bomba e do sistema. Por isso é importante um conhecimento das curvas características da bomba, normalmente fornecida pelo fabricante da bomba, mas podem ser obtidas a partir de experimentos (MATTOS; FALCO, 1998).

2.4.1.2.1. Curva de carga (H) versus vazão (Q)

A carga pode ser definida como a energia por unidade de massa ou energia por unidade de peso. Apesar de ser mais consistente para a análise teórica a utilização de energia por unidade de massa, no campo prático do estudo de bombas é tradicionalmente utilizado a carga como sendo energia por unidade de peso (MATTOS; FALCO, 1998).

$$\frac{kgf * m}{kgf} = m$$

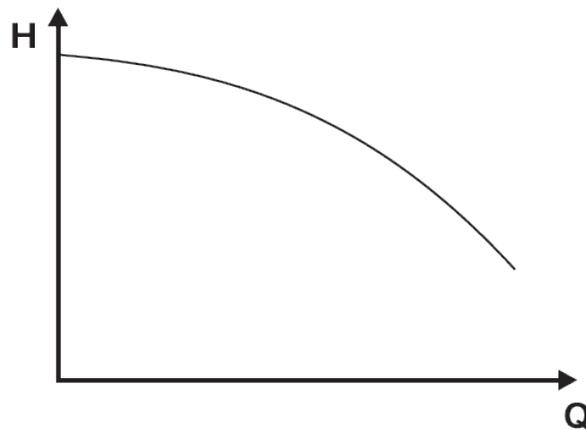
Como é possível verificar pelo balanço de unidades, a carga possui a unidade de comprimento, logo também pode ser entendida como a altura que a bomba é capaz de produzir, sendo denominada de altura monométrica total. O cálculo dessa altura é uma aplicação de Bernoulli com algumas considerações, como: a vazão é igual em todos os pontos do sistema, logo a velocidade também é igual, as perdas de cargas são desconsideradas e a diferença entre o ponto de descarga e de sucção são pequenos, portanto são desprezíveis (FILHO, 2015).

$$z_{sucção} + \frac{V_{vác}^2}{2 * g} + \frac{P_{vác}}{\rho * g} + H_b = z_{desc} + \frac{V_{desc}^2}{2 * g} + \frac{P_{desc}}{\rho * g} + h_f$$

$$H_b = \frac{P_{desc} - P_{vác}}{\gamma} \quad (18)$$

Na maioria dos casos a representação gráfica da altura monométrica total segue o perfil ilustrado na figura 11.

Figura 11 - Representação da curva carga da bomba versus vazão



Fonte: Escola da vida

2.4.1.2.2. Curva de potência absorvida (P_{abs}) versus vazão (Q)

A potência útil da bomba vem da multiplicação de energia específica pela vazão mássica (FILHO, 2015).

$$P_{útil} = e * \dot{m} = \rho * g * Q * H_b = \gamma * Q * H_b \quad (19)$$

Sendo: $P_{útil}$ – Potência útil fornecida pela bomba ao fluido;

$e = g * H_b$ – Energia específica;

$\dot{m} = \rho * Q$ – Vazão mássica;

$\gamma = \rho * g$ – Peso específico.

Para a potência útil, $P_{útil}$, a bomba exige uma potência, chamada de potência absorvida que é maior do que $P_{útil}$ para que seja possível vencer as perdas internas (FILHO, 2015).

$$P_a = U * I * \cos\varphi \quad (20)$$

Sendo: P_a – Potencia absorvida pela bomba;

U – Tensão elétrica;

I – Corrente elétrica;

$\cos\varphi$ - Fator de potência do motor elétrico.

2.4.1.2.3. Curva de rendimento total (η) versus vazão (Q)

O rendimento hidráulico de uma bomba é definido como a relação entre a potência útil entre ao fluido e a potência absorvida pela bomba para o seu acionamento (FILHO, 2015).

$$\eta = \frac{P_{\text{útil}}}{P_a} \quad (21)$$

Considerando que não existe uma variação de vazão na tubulação então o rendimento hidráulico se torna o rendimento total ou também chamado de eficiência da bomba (FILHO, 2015).

2.4.1.2.4. Curva NPSH versus vazão (Q)

Qualquer liquido pode sofrer mudança de estado e passar para a fase de vapor. Quando essa mudança tem início, observa-se a formação de bolhas. A pressão e a temperatura de vaporização são propriedades dependentes. Para cada temperatura de vaporização existe uma pressão correspondente (FILHO, 2015).

Haverá formação de bolhas no escoamento sempre que a pressão atingir um valor inferior à pressão de vaporização para uma dada temperatura. A menor pressão de uma instalação “em sucção” ocorre na entrada da bomba. O arraste de bolhas para dentro da bomba pode causar sérios problemas devido à cavitação. Portanto, o projeto da instalação deve garantir que a pressão na entrada da bomba seja superior à pressão de vaporização para a temperatura de trabalho. NPSH (Net Positive Suction Head) pode ser fisicamente interpretado como a energia por unidade de peso existente no flange de sucção, que está acima da pressão de vapor do fluido (FILHO, 2015).

$$NPSH_{disp} = \frac{P_s}{\gamma} + z_s + \frac{P_{atm} - P_{vapor}}{\gamma} - h_{fs} \quad (22)$$

Sendo: $NPSH_{disp}$ – O NPSH disponibilizado pela instalação

P_s – Pressão no reservatório de sucção

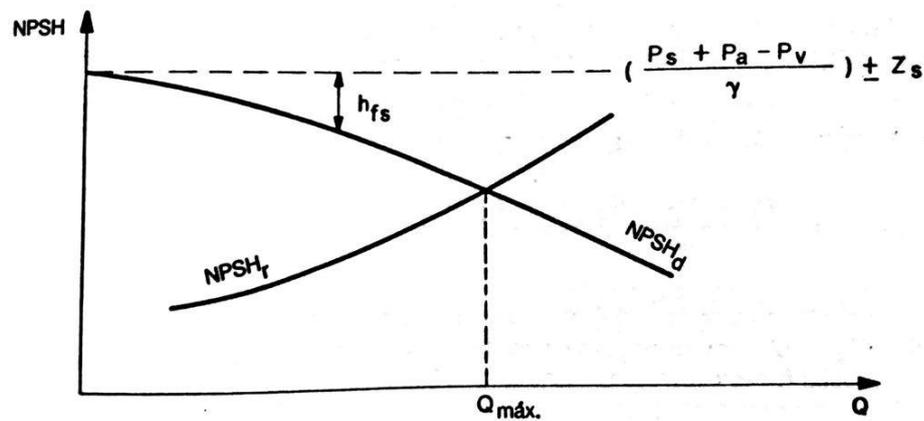
P_{atm} – Pressão atmosférica local

P_v – Pressão de vapor do fluido na temperatura de análise

h_{fs} – Perda de carga na linha de sucção

Para evitar a cavitação, os fabricantes informam o valor do $NPSH_{req}$ (Net Positive Suction Head) requerido pela bomba. Em tese, se o $NPSH_{disp}$ da instalação for maior que o $NPSH_{req}$ da bomba não haverá formação de bolhas ($NPSH_d > NPSH_r$). Logo é importante a análise conjunta entre esses dois dados (FILHO, 2015).

Figura 12 - Representação gráfica dos $NPSH_{disp}$ e $NPSH_{req}$.



Fonte: MATTOS; FALCO, 1998

2.4.1.3. Curva do sistema

Um sistema de escoamento é geralmente constituído de reservatório, tubos, conexões e uma bomba que é utilizada para transportar o fluido, logo a curva do sistema é uma representação da altura monométrica de instalação em função da vazão, a qual varia com o quadrado da vazão (HIBBELER, 2016).

$$z_{sucção} + \frac{V_{vác}^2}{2 * g} + \frac{P_{vác}}{\rho * g} + H_{sis} = z_{desc} + \frac{V_{desc}^2}{2 * g} + \frac{P_{desc}}{\rho * g} + h_f$$

$$H_{sis} = (z_{desc} - z_{sucção}) + h_f \quad (23)$$

$$h_f = f * \frac{L_{total}}{D} * \frac{V^2}{2 * g}$$

$$V = \frac{Q}{A}$$

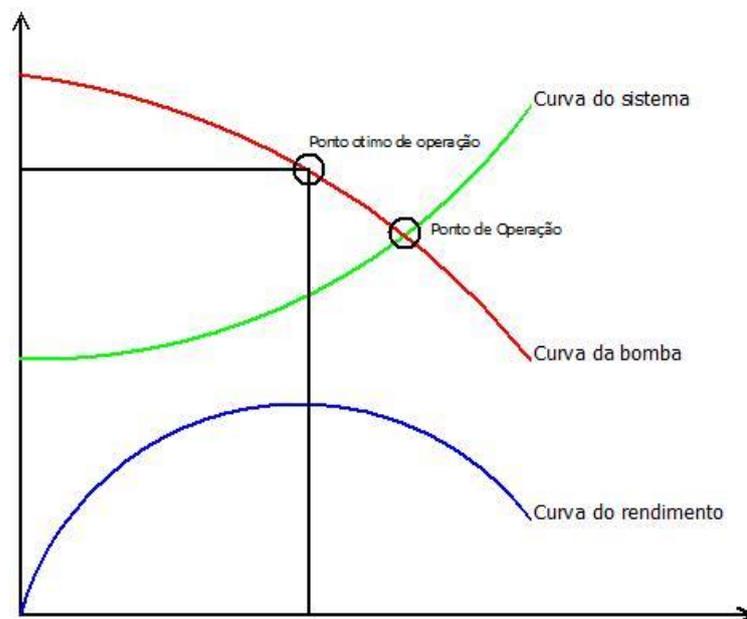
$$h_f = f * \frac{L_{total}}{D} * \frac{Q^2}{2 * g * A^2} \quad (24)$$

A equação (23) se torna,

$$H_{sis} = (z_{desc} - z_{sucção}) + f * \frac{L_{total}}{D} * \frac{Q^2}{2 * g * A^2} \quad (25)$$

O ponto de projeto da turbomáquina é aquele em que as perdas totais são mínimas, ou seja, o ponto em que o rendimento é máximo. Esse é o ponto ótimo de operação da máquina, também conhecido como BEP (best efficiency point) (FILHO, 2015). E o ponto de operação é o ponto em que a carga fornecida pela bomba é igual a carga necessária do sistema de tubulação, logo acontece na intersecção entre as duas curvas como na figura 13.

Figura 13 - Representação do ponto ótimo de operação e do ponto de operação de uma bomba



Fonte: própria do autor.

2.4.1.4. Associação de bombas

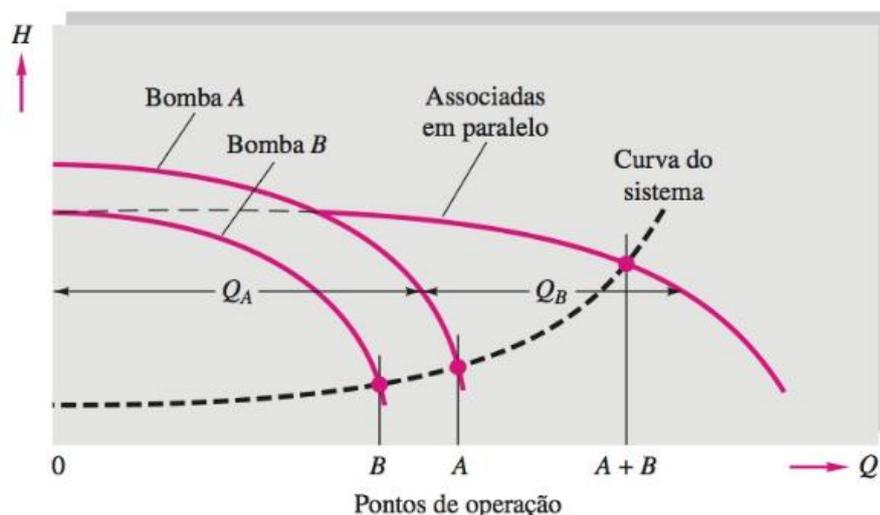
Dependendo da situação, instalações de bombeamento podem ter uma larga faixa de requisitos de carga e descarga, tais que uma simples bomba não possa satisfazer a faixa de

demanda requerida. Com isso as bombas podem ser colocadas em série ou em paralelo para prover a operação da maneira mais eficiente (POTTER; WIGGERT, 2009).

2.4.1.4.1. Bombas em paralelo

Se uma bomba fornece a altura de carga correta, mas uma vazão muito pequena, uma solução possível é associar duas bombas idênticas em paralelo, compartilhando das mesmas condições de sucção e de descarga (WHITE, 2011). Duas bombas em paralelo estão sujeitas à mesma altura de elevação, e as vazão iram se somar (FILHO, 2015)

Figura 14 - Representação do comportamento de bombas em paralelo

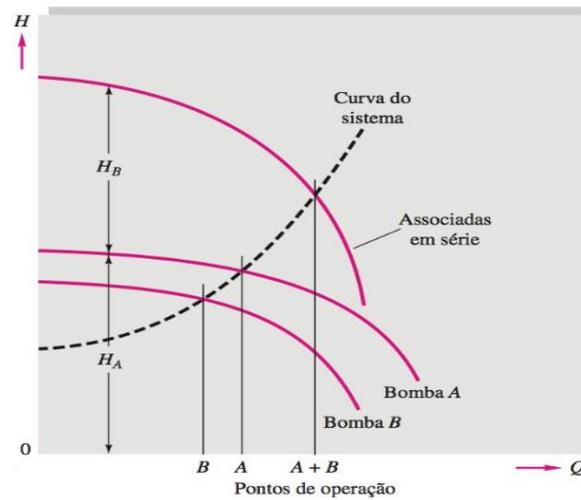


Fonte: WHITE, 2011.

2.4.1.4.2. Bombas em série

Se uma bomba fornece a vazão correta, mas sua altura de carga é muito pequena, utiliza-se a associação de bombas em série, neste caso as duas alturas de carga são somadas na mesma vazão para resultar a curva de desempenho da associação da figura 15. As duas bombas não precisam ser idênticas, pois simplesmente trabalham com a mesma vazão. A altura de carga do ponto de operação da associação será maior do que a de A ou a de B separadamente, mas não maior do que sua soma (WHITE, 2011).

Figura 15 - Representação da associação de bombas em série



Fonte: WHITE, 2011

3. MATERIAIS E MÉTODOS

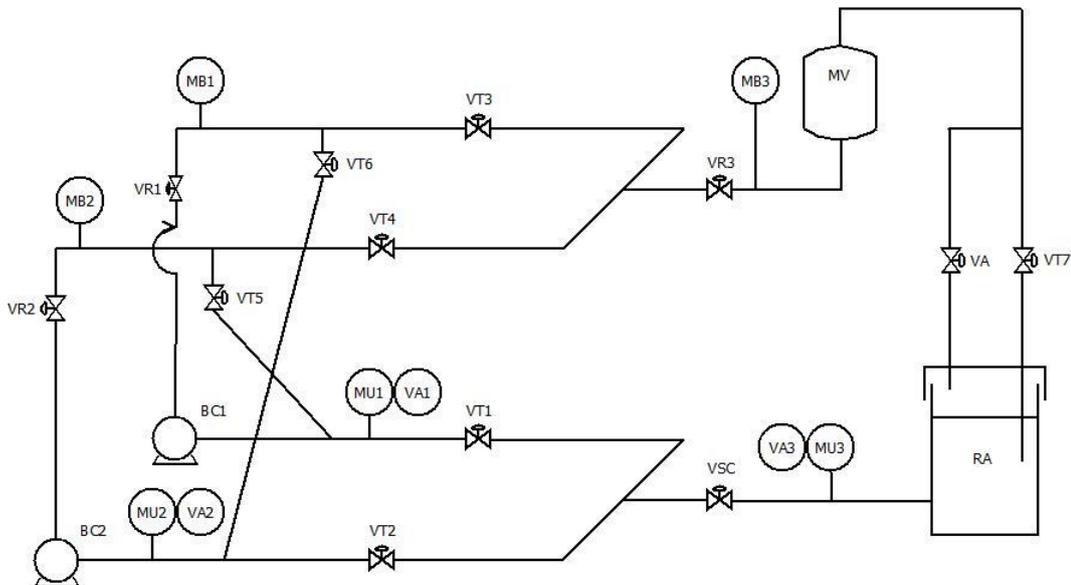
3.1. Equipamento

O equipamento utilizado, representado na Figura 15, é um circuito hidráulico fechado composto de:

- Reservatório de Água (**RA**);
- Bombas centrífugas (**BC1 e BC2**) ambas de $\frac{1}{2}$ CV (com Fator de potência 0,72 e Rendimento 0,66)
- Medidor de Vazão (tipo Rotâmetro) (**MV**);
- Manômetros de tubo de vidro em U contendo mercúrio metálico como fluido manométrico, ligados nos trechos de sucção das Bombas: (**MU1**) – sucção Bomba 1; (**MU2**) – sucção Bomba 2 e (**MU3**) - sucção da Associação;
- Manômetros tipo Bourdon (**MB**), ligados nas descargas e Vacuômetros (**VA**) ligados na sucção das Bombas, sendo: (**MB1**) e (**VA1**) – descarga e sucção, respectivamente, da Bomba 1; (**MU2**) e (**VA2**) – descarga e sucção, respectivamente, da Bomba 2 e (**MU3**) e (**VA3**) – descarga e sucção, respectivamente, da Associação;
- Válvulas de Regulagem de Vazão (**VR**): (**VR1**) – na descarga da Bomba 1; (**VR2**) - na descarga da Bomba 2 e (**VR3**) – na descarga da Associação;
- Válvulas de Travamento (bloqueio) de Vazão (**VT1; VT2; VT3; VT4; VT5 e VT6**) estrategicamente distribuídas no circuito para permitir operações das Bombas individualmente, ou paralelo ou em série;

- Válvula Simuladora de Cavitação (**VSC**);
- Válvulas de Travamento (**VT7**) e de Alívio (**VA**) posicionadas no final do circuito e
- Painel elétrico de comando com dois Amperímetros, (**A1**) e (**A2**), sendo um para cada Bomba respectivamente, e um Voltímetro, tendo em vista monitoramentos de potências elétricas das Bombas durante o experimento.

Figura 16 - Representação do módulo de bombas



Fonte: própria do autor.

3.2. Metodologia

3.2.1. Preparação do equipamento

Verificar e encher caso necessário o Reservatório (RA) com água até o nível máximo (50 mm do topo da caixa) e com todas as Válvulas do circuito abertas. Desta maneira garante-se que as duas Bombas e o circuito de sucção estejam selados hidráulicamente.

Para evitar erros nas medições, todos os manômetros não devem conter bolhas de ar nas mangueiras que ligam aos seus respectivos pontos de tomada de pressão, e nos manômetros de tubo em U devem ter o nível do fluido equilibrados.

3.2.2. Obtenção das curvas características para as bombas individuais

3.2.2.1. Bomba 1 (BC1)

Deixar as seguintes Válvulas totalmente abertas: (**VSC**); (**VT1**); (**VT3**); (**VR1**) e (**VT7**); e fechar todas as outras.

Ligar a Bomba (**BC1**) e fazer as seguintes leituras:

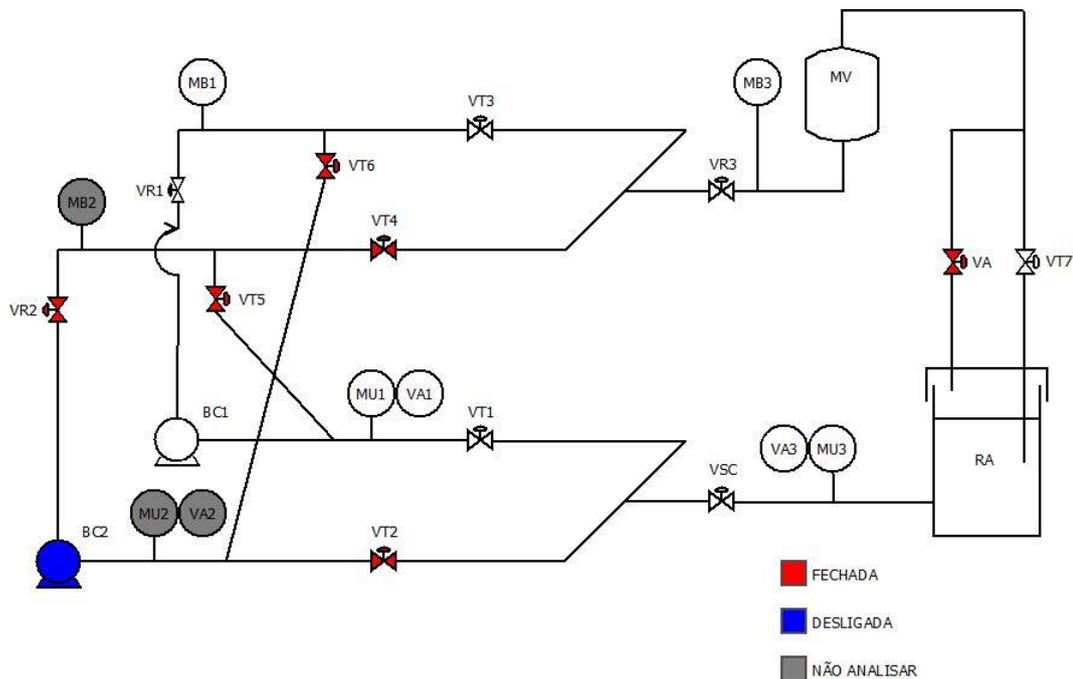
- De pressão (recalque e sucção) inicial nos respectivos: Manômetro (**MB1**), Vacuômetro (**Va1**) e Manômetro de tubo em U (**MU1**)
- Da Tensão (**U**) e a Corrente (**I**) elétrica no respectivo Voltímetro e Amperímetro.

Em seguida, através da Válvula (**VR3**), variar a vazão de água de 10 em 10 litros por minuto até o limite do sistema, anotando, para cada vazão:

- As pressões na sucção e na descarga desta Bomba no respectivo Manômetro (**MB1**), Vacuômetro (**Va1**) e Manômetro de tubo em U (**MU1**). Anotar, também, no Manômetro (**MB3**), Vacuômetro (**Va3**) e Manômetro de tubo em U (**MU3**).
- A Tensão (**U**) e a Corrente (**I**) elétrica no respectivo Voltímetro e Amperímetro.

Realizou-se as medidas de pressão com o aumento da vazão e, também, com a diminuição da vazão para verificar eventuais problemas de histerese, e utilizar-se de valores médios.

Figura 17 - Representação do módulo de bombas operando apenas a bomba 1



Fonte: própria do autor.

3.2.2.2. Bomba 2 (BC2)

Deixar as seguintes Válvulas totalmente abertas: (**VSC**); (**VT2**); (**VT4**); (**VR2**) e (**VT7**); e fechar todas as outras.

Ligar a Bomba (**BC2**) e fazer as seguintes leituras:

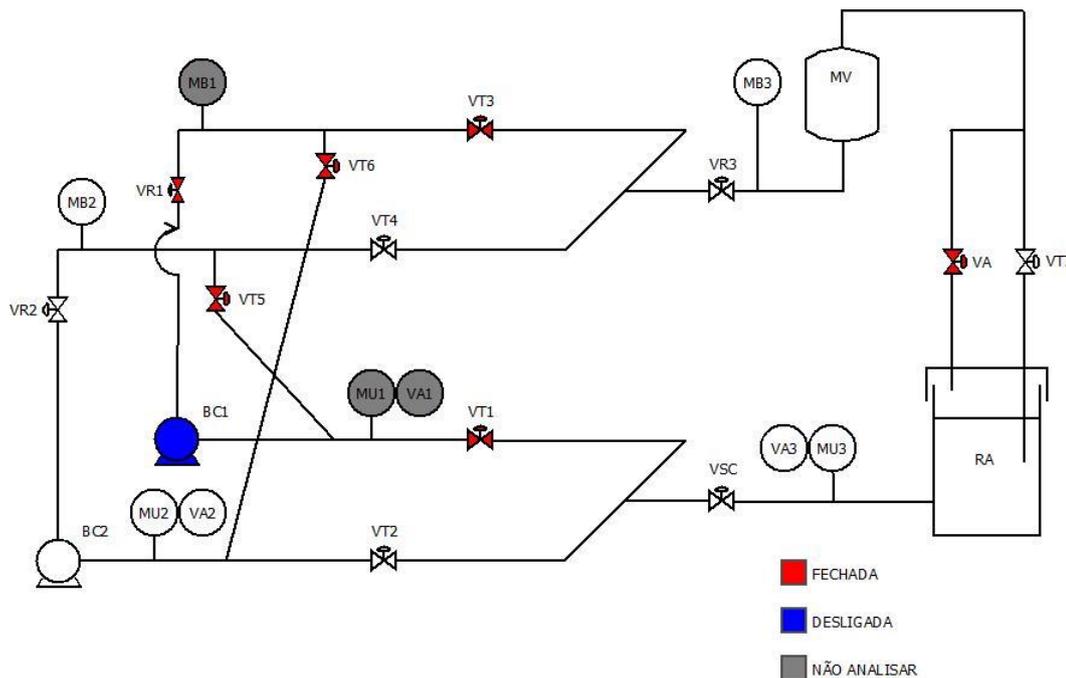
- De pressão (recalque e sucção) inicial nos respectivos: Manômetro (**MB2**), Vacuômetro (**VA2**) e Manômetro de tubo em U (**MU2**)
- Da Tensão (**U**) e a Corrente (**I**) elétrica no respectivo Voltímetro e Amperímetro.

Em seguida, através da Válvula (**VR3**), variar a vazão de água de 10 em 10 litros por minuto até o limite do sistema, anotando, para cada vazão:

- As pressões na sucção e na descarga desta Bomba no respectivo Manômetro (**MB2**), Vacuômetro (**VA2**) e Manômetro de tubo em U (**MU2**). Anotar, também, no Manômetro (**MB3**), Vacuômetro (**VA3**) e Manômetro de tubo em U (**MU3**).
- A Tensão (**U**) e a Corrente (**I**) elétrica no respectivo Voltímetro e Amperímetro.

Realizou-se as medidas de pressão com o aumento da vazão e, também, com a diminuição da vazão para verificar eventuais problemas de histerese, e utilizar-se de valores médios.

Figura 18 - Representação do módulo de bombas operando apenas a bomba 2



Fonte: própria do autor.

3.2.3. Obtenção das curvas características para a associação das bombas

Nessas duas configurações não serão utilizadas as leituras dos manômetros de tubo em U, para preservar os medidores pois as pressões nesta etapa são maiores.

3.2.3.1. Em Paralelo

Fechar as válvulas: (**VR3**); (**VT5**); (**VT6**) e (**VA**) e deixar todas as outras abertas.

Ligar simultaneamente as bombas **(BC1)** e **(BC2)** e fazer as seguintes leituras:

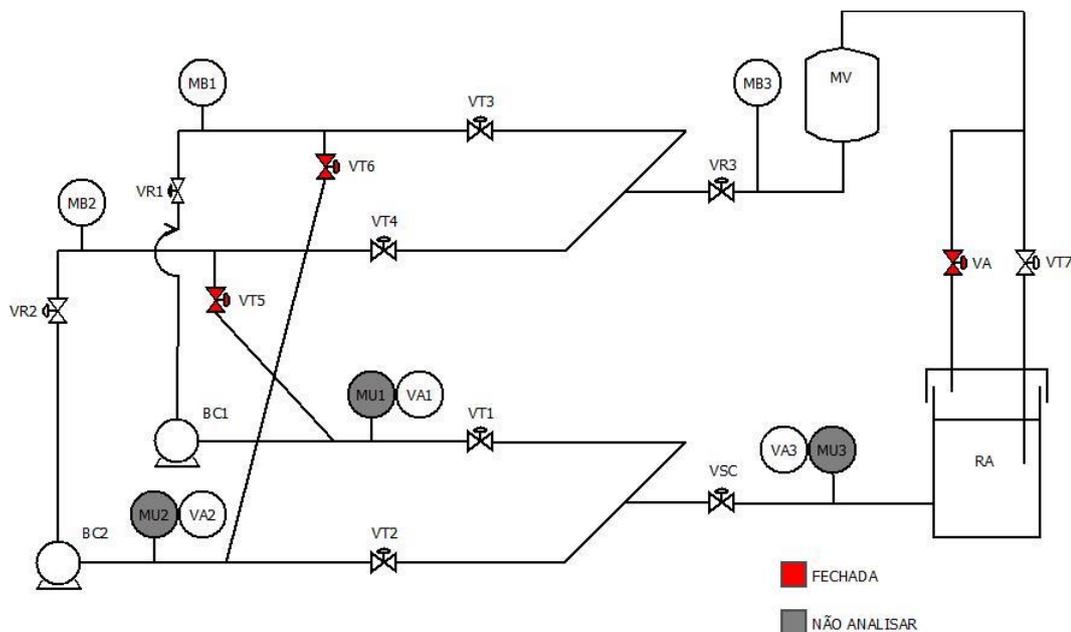
- De pressão (recalque e sucção) inicial em todos Manômetros e Vacuômetros;
- Da Tensão (**U**) e a Corrente (**I**) elétrica no respectivo Voltímetro e Amperímetro.

Em seguida, através da Válvula **(VR3)**, variar a vazão de água de 10 em 10 litros por minuto até o limite do sistema, anotando, para cada vazão:

- As pressão (recalque e sucção) em todos Manômetros e Vacuômetros;
- A Tensão (**U**) e a Corrente (**I**) elétrica no respectivo Voltímetro e Amperímetro.

Realizou-se as medidas de pressão com o aumento da vazão e, também, com a diminuição da vazão para verificar eventuais problemas de histerese, e utilizar-se de valores médios.

Figura 19 - Representação do módulo de bombas operando em paralelo



Fonte: própria do autor.

3.2.3.2. Em Série

Fechar as válvulas: **(VR3)**; **(VT2)**; **(VT3)**; **(VT5)** e **(VA)** e deixar todas as outras abertas.

Ligar simultaneamente as bombas **(BC1)** e **(BC2)** e fazer as seguintes leituras:

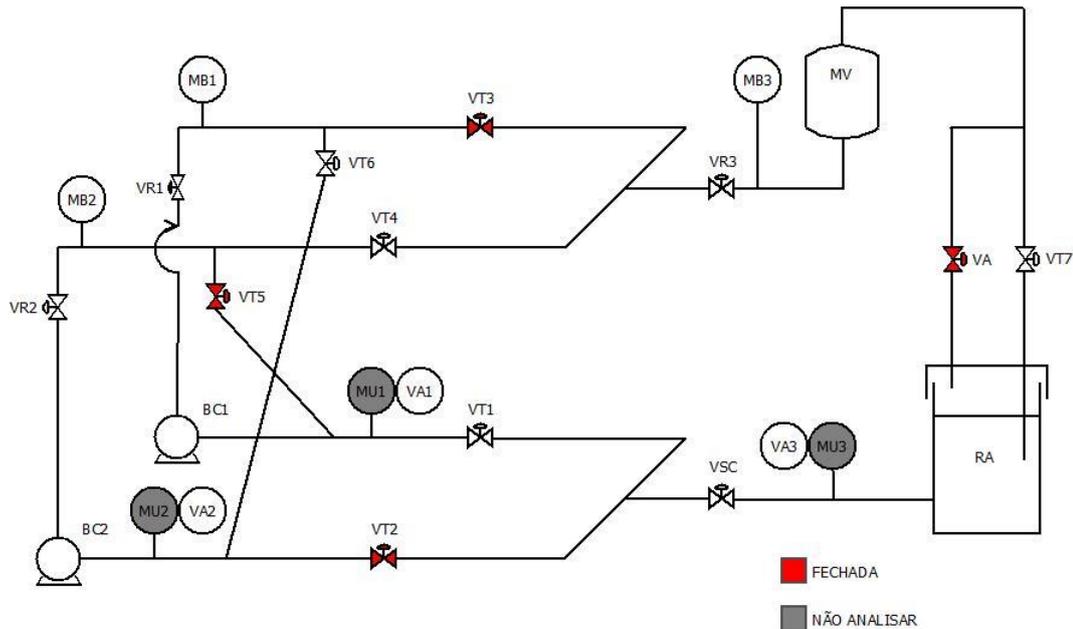
- De pressão (recalque e sucção) inicial em todos Manômetros e Vacuômetros;
- Da Tensão (**U**) e a Corrente (**I**) elétrica no respectivo Voltímetro e Amperímetro.

Em seguida, através da Válvula **(VR3)**, variar a vazão de água de 10 em 10 litros por minuto até o limite do sistema, anotando, para cada vazão:

- As pressões (recalque e sucção) em todos Manômetros e Vacuômetros;
- A Tensão (**U**) e a Corrente (**I**) elétrica no respectivo Voltímetro e Amperímetro.

Realizou-se as medidas de pressão com o aumento da vazão e, também, com a diminuição da vazão para verificar eventuais problemas de histerese, e utilizar-se de valores médios.

Figura 20 - Representação do módulo de bombas operando em série



Fonte: própria do autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Dados experimentais

Foram feitos experimentos seguindo as condições e arranjos descritos na metodologia, para obter as curvas características. Na tabela 2 e 3 estão os dados da BC1 e BC2, respectivamente, na tabela 4 as bombas em série e por fim na tabela 5 as bombas em paralelo.

Tabela 2 – Dados experimentais da bomba 1 – BC1

Ponto	Q (L/min)	$P_{sucção\ MU1}$ (kPa)	$P_{desc\ MB1}$ (kPa)	$P_{sucção\ MU3}$ (kPa)	$P_{desc\ MB3}$ (kPa)	Amperagem (A)
1	0	0,00	181,42	0,00	181,42	2
2	20	-1,07	152,00	-0,53	152,00	2,2
3	30	-2,13	142,19	-0,80	142,19	2,4
4	40	-3,47	132,39	-1,07	132,39	2,6
5	50	-5,47	122,58	-2,13	122,58	2,6
6	60	-7,60	112,77	-3,20	112,77	2,8
7	70	-10,00	107,87	-4,27	102,97	3

8	80	-12,67	93,16	-5,87	88,26	3
9	90	-16,00	83,35	-7,47	78,45	3,2
10	100	-19,47	68,64	-9,60	58,84	3,4
11	110	-23,20	53,94	-11,20	44,13	3,6
12	120	-29,33	39,23	-13,33	24,52	3,8
13	110	-23,20	53,94	-11,73	39,23	3,6
14	100	-20,00	63,74	-10,13	53,94	3,4
15	90	-16,00	83,35	-8,00	78,45	3,2
16	80	-12,80	98,06	-6,67	88,26	3
17	70	-10,13	107,87	-5,07	102,97	3
18	60	-7,73	112,77	-4,00	112,77	2,8
19	50	-5,73	122,58	-2,93	122,58	2,6
20	40	-4,13	132,39	-2,13	132,39	2,6
21	30	-2,53	142,19	-1,33	142,19	2,4
22	20	-1,20	147,10	-0,80	152,00	2,2
23	0	0,00	176,51	0,00	181,42	2

Tabela 3 - Dados experimentais da bomba 2 - BC2

Ponto	Q (L/min)	$P_{sucção\ MU2}$ (kPa)	$P_{desc\ MB2}$ (kPa)	$P_{sucção\ MU3}$ (kPa)	$P_{desc\ MB3}$ (kPa)	Amperagem (A)
1	0	0,00	201,03	0,00	186,32	2
2	20	-0,40	171,61	-0,27	156,90	2,2
3	30	-1,60	156,90	-0,53	147,10	2,4
4	40	-3,20	152,00	-1,33	137,29	2,6
5	50	-5,20	142,19	-2,13	127,48	2,6
6	60	-7,60	132,39	-3,20	117,68	2,8
7	70	-10,13	122,58	-4,53	102,97	3
8	80	-12,93	107,87	-6,13	88,26	3,1
9	90	-15,87	93,16	-7,73	73,55	3,3
10	100	-19,60	73,55	-9,60	49,03	3,5
11	110	-23,20	53,94	-11,47	34,32	3,6
12	115	-24,93	44,13	-12,27	24,52	3,8
13	110	-23,60	53,94	-11,73	29,42	3,6
14	100	-20,13	68,64	-9,87	49,03	3,5
15	90	-16,13	88,26	-8,27	68,64	3,3
16	80	-13,20	102,97	-6,67	88,26	3
17	70	-10,27	117,68	-5,07	102,97	3
18	60	-8,00	132,39	-4,00	117,68	2,8
19	50	-6,00	142,19	-2,93	127,48	2,6
20	40	-4,13	152,00	-2,13	137,29	2,6

21	30	-2,53	161,81	-1,33	147,10	2,4
22	20	-1,47	166,71	-0,80	156,90	2,2
23	0	0,00	201,03	0,00	186,32	2

Tabela 4 - Dados experimentais para as bombas em série

Ponto	Q (L/min)	$P_{sucç}$	P_{desc}	$P_{sucç}$	P_{desc}	$P_{sucç}$	P_{desc}	Amperagem da BC1 (A)	Amperagem da BC2 (A)
		VA1 (kPa)	MB1 (kPa)	VA2 (kPa)	MB2 (kPa)	VA3 (kPa)	MB3 (kPa)		
1	0	-4,00	181,42	0	392,26	-9,33	372,64	2	1,9
2	20	-5,33	152,00	0	338,32	-10,00	313,80	2,2	2,2
3	30	-6,67	142,19	0	318,71	-10,67	299,09	2,4	2,4
4	40	-8,67	132,39	0	299,09	-11,33	279,48	2,6	2,5
5	50	-10,00	122,58	0	284,39	-12,00	259,87	2,6	2,6
6	60	-12,00	117,68	0	264,77	-12,67	240,26	2,8	2,8
7	70	-13,33	107,87	0	245,16	-14,00	215,74	3	2,9
8	80	-16,00	98,06	0	220,64	-15,33	196,13	3,1	3,1
9	90	-19,33	88,26	0	191,22	-16,67	166,71	3,3	3,3
10	100	-23,33	73,55	0	156,90	-19,33	132,39	3,5	3,5
11	110	-26,00	58,84	0	127,48	-20,66	98,06	3,6	3,6
12	120	-30,66	44,13	0	93,16	-22,66	63,74	3,8	3,8
13	110	-26,66	53,94	0	122,58	-21,33	98,06	3,6	3,6
14	100	-22,66	68,64	0	156,90	-19,33	127,48	3,4	3,4
15	90	-20,00	83,35	0	186,32	-17,33	161,81	3,2	3,2
16	80	-17,33	98,06	0	215,74	-15,33	191,22	3	3
17	70	-14,00	107,87	0	240,26	-14,00	215,74	2,9	2,9
18	60	-12,00	112,77	0	259,87	-12,67	235,35	2,8	2,8
19	50	-9,33	122,58	0	279,48	-12,00	254,97	2,6	2,6
20	40	-8,00	132,39	0	294,19	-11,33	274,58	2,6	2,5
21	30	-6,67	142,19	0	313,80	-10,67	294,19	2,4	2,4
22	20	-5,33	147,10	0	333,42	-10,00	313,80	2,2	2,2
23	0	-4,00	176,51	0	392,26	-9,33	372,64	1,9	1,8

Tabela 5 - Dados experimentais das bombas em paralelo

Ponto	Q (L/min)	$P_{sucç}$	P_{desc}	$P_{sucç}$	P_{desc}	$P_{sucç}$	P_{desc}	Amperagem da BC1 (A)	Amperagem da BC2 (A)
		VA1 (kPa)	MB1 (kPa)	VA2 (kPa)	MB2 (kPa)	VA3 (kPa)	MB3 (kPa)		
1	0	0,00	176,51	-4,67	196,13	-0,93	181,42	2	1,9
2	20	-4,67	166,71	-5,33	176,51	-10,00	166,71	2	2,2
3	30	-5,33	156,90	-6,00	171,61	-10,00	161,81	2,1	2,2
4	40	-6,00	152,00	-6,67	166,71	-10,67	152,00	2,2	2,2
5	50	-6,67	152,00	-7,33	161,81	-12,00	147,10	2,2	2,4

6	60	-7,33	147,10	-8,67	156,90	-12,67	142,19	2,3	2,4
7	70	-8,67	137,29	-9,33	152,00	-14,00	137,29	2,4	2,4
8	80	-10,67	137,29	-10,67	147,10	-15,33	132,39	2,4	2,5
9	90	-12,00	132,39	-12,67	142,19	-17,33	127,48	2,5	2,6
10	100	-13,33	127,48	-14,00	137,29	-19,33	117,68	2,6	2,6
11	110	-15,33	117,68	-16,00	132,39	-20,66	107,87	2,6	2,7
12	120	-16,67	112,77	-18,00	127,48	-22,66	102,97	2,8	2,8
13	130	-18,67	107,87	-20,66	117,68	-24,66	93,16	2,8	2,8
14	140	-22,66	98,06	-23,33	112,77	-27,33	83,35	2,9	3
15	150	-25,33	93,16	-25,33	102,97	-30,00	73,55	3	3
16	160	-27,33	83,35	-27,33	98,06	-33,33	63,74	3,1	3,1
17	150	-24,66	93,16	-25,33	102,97	-30,00	73,55	3	3
18	140	-22,66	98,06	-23,33	107,87	-28,00	83,35	2,9	3
19	130	-20,00	107,87	-21,33	117,68	-25,33	93,16	2,8	2,8
20	120	-17,33	112,77	-18,67	122,58	-22,66	102,97	2,7	2,8
21	110	-15,33	117,68	-16,00	132,39	-20,66	107,87	2,6	2,7
22	100	-13,33	127,48	-14,00	137,29	-18,67	117,68	2,6	2,6
23	90	-12,00	132,39	-12,67	142,19	-17,33	122,58	2,4	2,6
24	80	-10,00	137,29	-10,67	147,10	-15,33	132,39	2,4	2,5
25	70	-8,67	142,19	-9,33	152,00	-14,00	137,29	2,4	2,4
26	60	-7,33	147,10	-8,67	156,90	-12,67	142,19	2,2	2,4
27	50	-6,67	152,00	-7,33	161,81	-12,00	147,10	2,2	2,3
28	40	-6,00	152,00	-6,67	166,71	-11,33	152,00	2,2	2,2
29	30	-4,67	156,90	-6,00	171,61	-10,00	156,90	2,1	2,2
30	20	-4,67	161,81	-5,33	176,51	-10,00	166,71	2	2,1
31	0	-4,00	181,42	-4,67	196,13	-9,33	181,42	1,9	1,8

Para a realização dos cálculos foi usado os valores médios entre as medições, com o objetivo de melhorar a precisão dos resultados. Os valores médios estão apresentados na tabela 6, 7, 8 e 9, respectivamente para a BC1, BC2, em série e em paralelo.

Tabela 6 - Valores médios dos dados da BC1

Ponto	Q (L/min)	$P_{sucção\ MU1}$ (kPa)	$P_{desc\ MB1}$ (kPa)	$P_{sucção\ MU3}$ (kPa)	$P_{desc\ MB3}$ (kPa)	Amperagem (A)
1	0	0,00	178,97	0,00	181,42	2
2	20	-1,13	149,55	-0,67	152,00	2,2
3	30	-2,33	142,19	-1,07	142,19	2,4
4	40	-3,80	132,39	-1,60	132,39	2,6
5	50	-5,60	122,58	-2,53	122,58	2,6
6	60	-7,67	112,77	-3,60	112,77	2,8

7	70	-10,07	107,87	-4,67	102,97	3
8	80	-12,73	95,61	-6,27	88,26	3
9	90	-16,00	83,35	-7,73	78,45	3,2
10	100	-19,73	66,19	-9,87	56,39	3,4
11	110	-23,20	53,94	-11,47	41,68	3,6
12	120	-29,33	39,23	-13,33	24,52	3,8

Tabela 7 - Valores médios dos dados da BC2

Ponto	Q (L/min)	$P_{sucção\ MU2}$ (kPa)	$P_{desc\ MB2}$ (kPa)	$P_{sucção\ MU3}$ (kPa)	$P_{desc\ MB3}$ (kPa)	Amperagem (A)
1	0	0,00	201,03	0,00	186,32	2
2	20	-0,93	169,16	-0,53	156,90	2,2
3	30	-2,07	159,35	-0,93	147,10	2,4
4	40	-3,67	152,00	-1,73	137,29	2,6
5	50	-5,60	142,19	-2,53	127,48	2,6
6	60	-7,80	132,39	-3,60	117,68	2,8
7	70	-10,20	120,13	-4,80	102,97	3
8	80	-13,07	105,42	-6,40	88,26	3,05
9	90	-16,00	90,71	-8,00	71,10	3,3
10	100	-19,87	71,10	-9,73	49,03	3,5
11	110	-23,40	53,94	-11,60	31,87	3,6
12	115	-24,93	44,13	-12,27	24,52	3,8

Tabela 8 - Média dos dados experimentais para as bombas em série

Ponto	Q (L/min)	$P_{sucção\ MU1}$ (kPa)	$P_{desc\ MB2}$ (kPa)	$P_{sucção\ MU3}$ (kPa)	$P_{desc\ MB3}$ (kPa)	Amperagem 1 (A)	Amperagem 2 (A)
1	0	-4,00	392,26	-9,33	372,64	1,95	1,95
2	20	-5,33	335,87	-10,00	313,80	2,2	2,2
3	30	-6,67	316,26	-10,67	296,64	2,4	2,4
4	40	-8,33	296,64	-11,33	277,03	2,6	2,6
5	50	-9,67	281,93	-12,00	257,42	2,6	2,6
6	60	-12,00	262,32	-12,67	237,80	2,8	2,8
7	70	-13,67	242,71	-14,00	215,74	2,95	2,95
8	80	-16,67	218,19	-15,33	193,68	3,05	3,05
9	90	-19,67	188,77	-17,00	164,26	3,25	3,25
10	100	-23,00	156,90	-19,33	129,93	3,45	3,45
11	110	-26,33	125,03	-21,00	98,06	3,6	3,6
12	115	-30,66	93,16	-22,66	63,74	3,8	3,8

Tabela 9 - Média dos dados experimentais para as bombas em paralelo

Ponto	Q (L/min)	$P_{sucç}$	P_{desc}	$P_{sucç}$	P_{desc}	$P_{sucç}$	P_{desc}	Amperagem da BC1 (A)	Amperagem da BC2 (A)
		VA1 (kPa)	MB1 (kPa)	VA2 (kPa)	MB2 (kPa)	VA3 (kPa)	MB3 (kPa)		
1	0	-2,00	196,13	-4,67	196,13	-5,13	181,42	1,95	1,85
2	20	-4,67	176,51	-5,33	176,51	-10,00	166,71	2	2,15
3	30	-5,00	171,61	-6,00	171,61	-10,00	159,35	2,1	2,2
4	40	-6,00	166,71	-6,67	166,71	-11,00	152,00	2,2	2,2
5	50	-6,67	161,81	-7,33	161,81	-12,00	147,10	2,2	2,35
6	60	-7,33	156,90	-8,67	156,90	-12,67	142,19	2,25	2,4
7	70	-8,67	152,00	-9,33	152,00	-14,00	137,29	2,4	2,4
8	80	-10,33	147,10	-10,67	147,10	-15,33	132,39	2,4	2,5
9	90	-12,00	142,19	-12,67	142,19	-17,33	125,03	2,45	2,6
10	100	-13,33	137,29	-14,00	137,29	-19,00	117,68	2,6	2,6
11	110	-15,33	132,39	-16,00	132,39	-20,66	107,87	2,6	2,7
12	120	-17,00	125,03	-18,33	125,03	-22,66	102,97	2,75	2,8
13	130	-19,33	117,68	-21,00	117,68	-25,00	93,16	2,8	2,8
14	140	-22,66	110,32	-23,33	110,32	-27,66	83,35	2,9	3
15	150	-25,00	102,97	-25,33	102,97	-30,00	73,55	3	3
16	160	-27,33	98,06	-27,33	98,06	-33,33	63,74	3,1	3,1

Na tabela 10 está apresentado alguns dados necessários para os cálculos desse trabalho, obtidos em tabelas de propriedades físicas, do fabricante da bomba e medidos durante a realização dos experimentos.

Tabela 10 - Dados adicionais

Massa Específica (Kg/m ³)	Temperatura da Água (°C)	Diâmetro da Tubulação (cm)	Gravidade (m/s ²)	Cos ϕ	Pressão de Vapor da Água (Pa)	Pressão atmosférica (Pa)	Tensão (V)
997,296	24	3	9,807	0,65	3020	101325	220

Com todos os dados, foram feitos os cálculos para todas as etapas posteriores, como a altura monométrica total, potência útil, potência absorvida e rendimento.

4.2. Curvas Características

4.2.1. Carga versus vazão

A partir dos dados presentes nas tabelas 6, 7, 8, 9 e 10, aplicou-se os valores obtidos na equação (18), para determinar as alturas monométricas totais, carga, em cada uma das configurações, os quais estão apresentados na tabela 11.

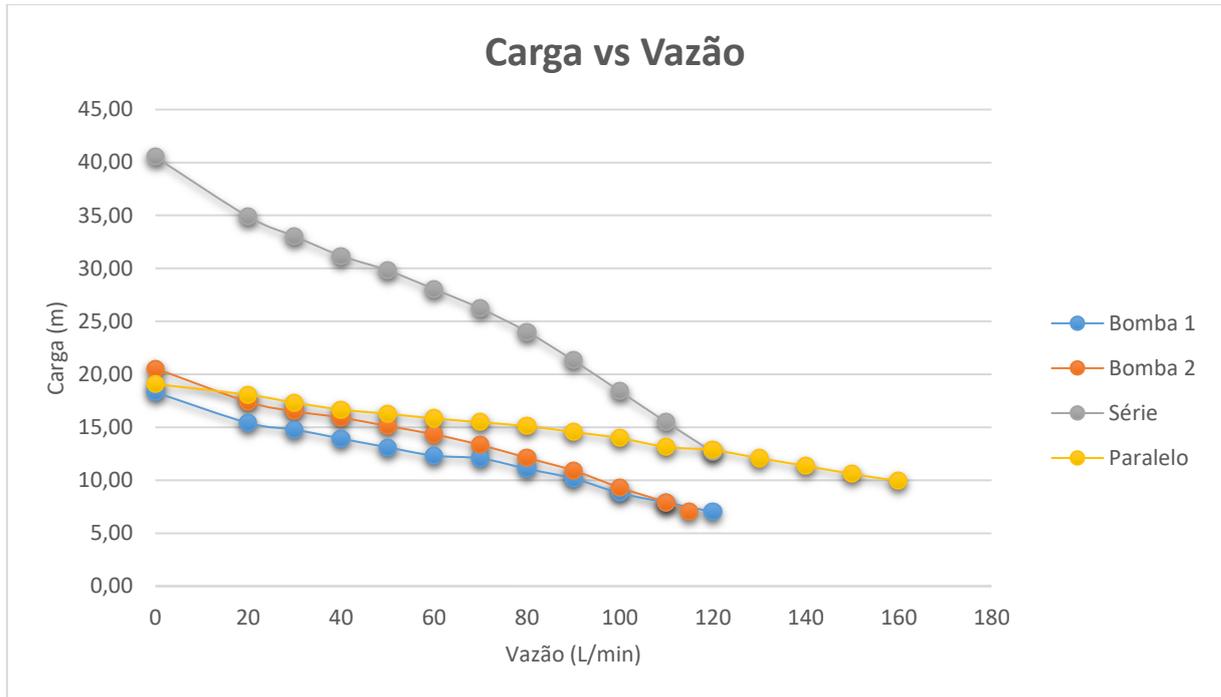
Tabela 11 - Carga da bomba em função das vazões

Vazão – L/min	$H_b - BC1$ (m)	$H_b - BC2$ (m)	$H_b - Série$ (m)	$H_b - Paralelo$ (m)
0	18,30	20,55	40,51	19,07
20	15,41	17,39	34,89	18,07
30	14,78	16,50	33,02	17,32
40	13,92	15,92	31,18	16,67
50	13,11	15,11	29,81	16,27
60	12,31	14,33	28,05	15,83
70	12,06	13,33	26,21	15,47
80	11,08	12,11	24,01	15,10
90	10,16	10,91	21,31	14,56
100	8,79	9,30	18,39	13,97
110	7,89	7,91	15,48	13,14
115	-	7,06	-	-
120	7,01	-	12,66	12,85
130	-	-	-	12,08
140	-	-	-	11,35
150	-	-	-	10,59
160	-	-	-	9,93

Apenas no arranjo em paralelo utilizou-se as pressões dos manômetros MB3 e VA3, pois como a vazão foi feita como vazão total, e não uma variação individual de cada bomba, não era possível encontrar os valores individuais de vazão para cada bomba e assim se calcular a carga.

Em posse desses dados foi plotado a curva de carga versus vazão, que é uma das ferramentas fundamentais para a determinação do ponto de operação.

Figura 21 - Curva da carga em função da vazão para todas as configurações



Fonte: própria do autor

4.2.2. Potências versus vazão

Utilizando os dados presentes nas tabelas 6, 7, 8, 9, 10 e 11, aplicou-se os valores obtidos nas equações (19) e (20), para determinar a potência útil e potência absorvida pela bomba, em cada uma das configurações, os quais estão apresentados nas tabelas 12 e 13.

Tabela 12 - Potência útil fornecida pela bomba para o fluido em função das vazão para todas as configurações

Vazão – L/min	$P_{\text{útil}} - BC1$ (W)	$P_{\text{útil}} - BC2$ (W)	$P_{\text{útil}} - Série$ (W)	$P_{\text{útil}} - Paralelo$ (W)
0	0,00	0,00	0,00	0,00
20	50,23	56,70	113,73	58,90
30	72,26	80,71	161,46	84,68
40	90,79	103,78	203,32	108,67
50	106,82	123,16	243,00	132,58
60	120,44	140,19	274,32	154,86
70	137,59	152,05	299,10	176,50
80	144,46	157,98	313,14	196,96
90	149,03	160,06	312,66	213,54
100	143,21	151,60	299,83	227,79
110	141,41	141,78	277,50	235,65
115	-	132,36	-	-
120	137,11	-	247,65	251,26

130	-	-	-	256,01
140	-	-	-	259,04
150	-	-	-	258,86
160	-	-	-	258,86

Tabela 13 - Potência absorvida pela bomba em função das vazão para todas as configurações

Vazão – L/min	$P_{absor-BC1}$ (W)	$P_{absor-BC2}$ (W)	$P_{absor-Série}$ (W)	$P_{absor-Paralelo}$ (W)
0	286,00	286,00	543,40	543,40
20	314,60	314,60	629,20	593,45
30	343,20	343,20	686,40	614,90
40	371,80	371,80	729,30	629,20
50	371,80	371,80	743,60	650,65
60	400,40	400,40	800,80	664,95
70	429,00	429,00	843,70	686,40
80	429,00	443,30	886,60	700,70
90	457,60	471,90	943,80	722,15
100	486,20	500,50	1001,00	743,60
110	514,80	514,80	1029,60	757,90
115	-	543,40	-	-
120	543,40	-	1086,80	793,65
130	-	-	-	800,80
140	-	-	-	843,70
150	-	-	-	858,00
160	-	-	-	886,60

Utilizou-se os dados das duas tabelas para gerar as curvas de potência útil e absorvida em função da vazão.

Figura 22 - Curvas das potências útil e absorvida para a bomba 1 em função da vazão

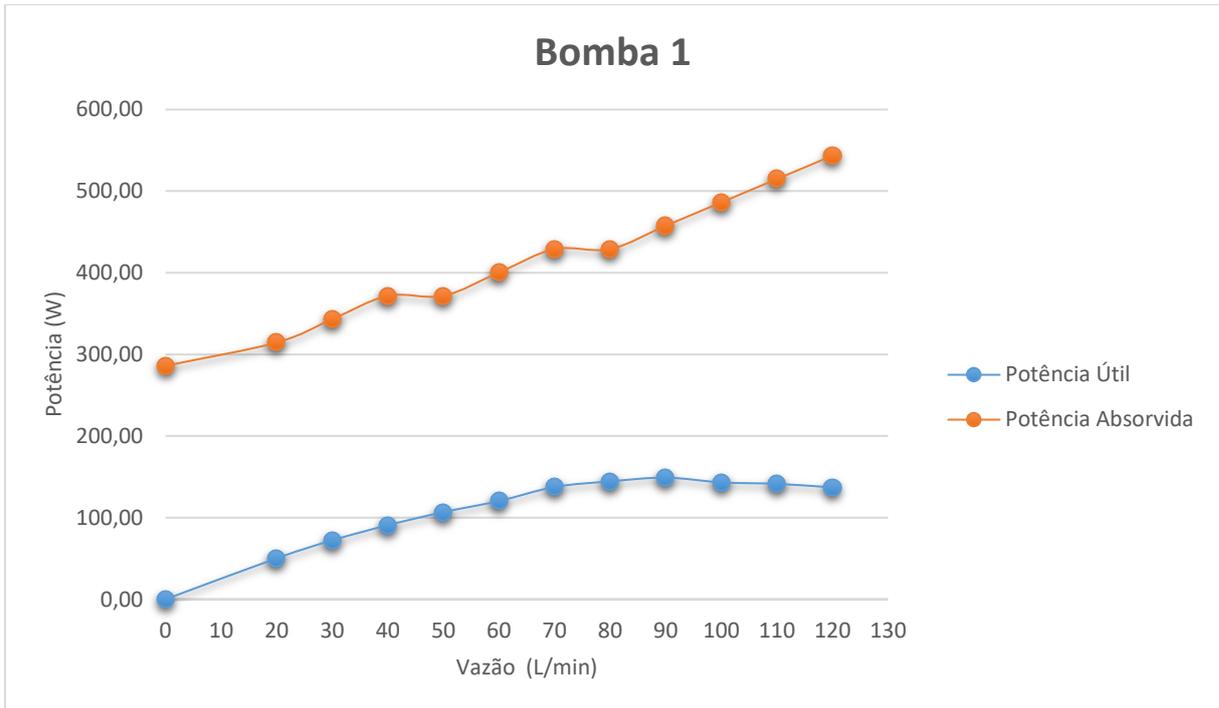


Figura 23 - Curvas das potências útil e absorvida para a bomba 2 em função da vazão

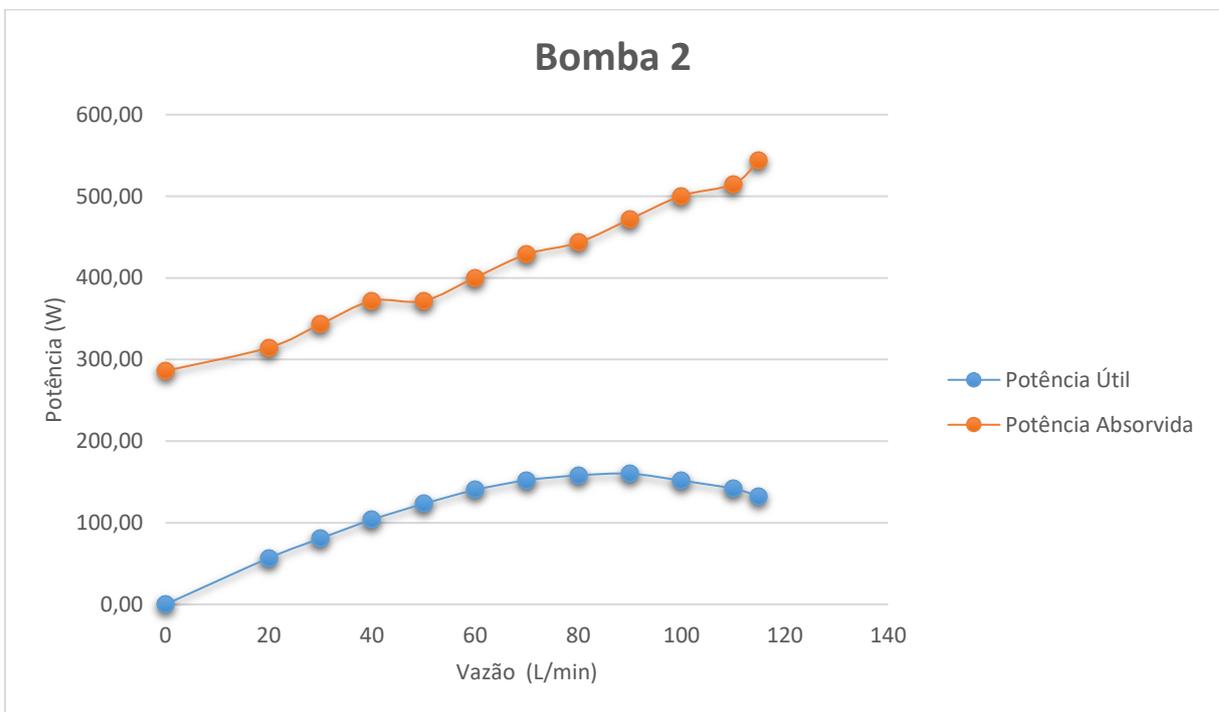


Figura 24 - Curvas das potências útil e absorvida para as bombas em série em função da vazão

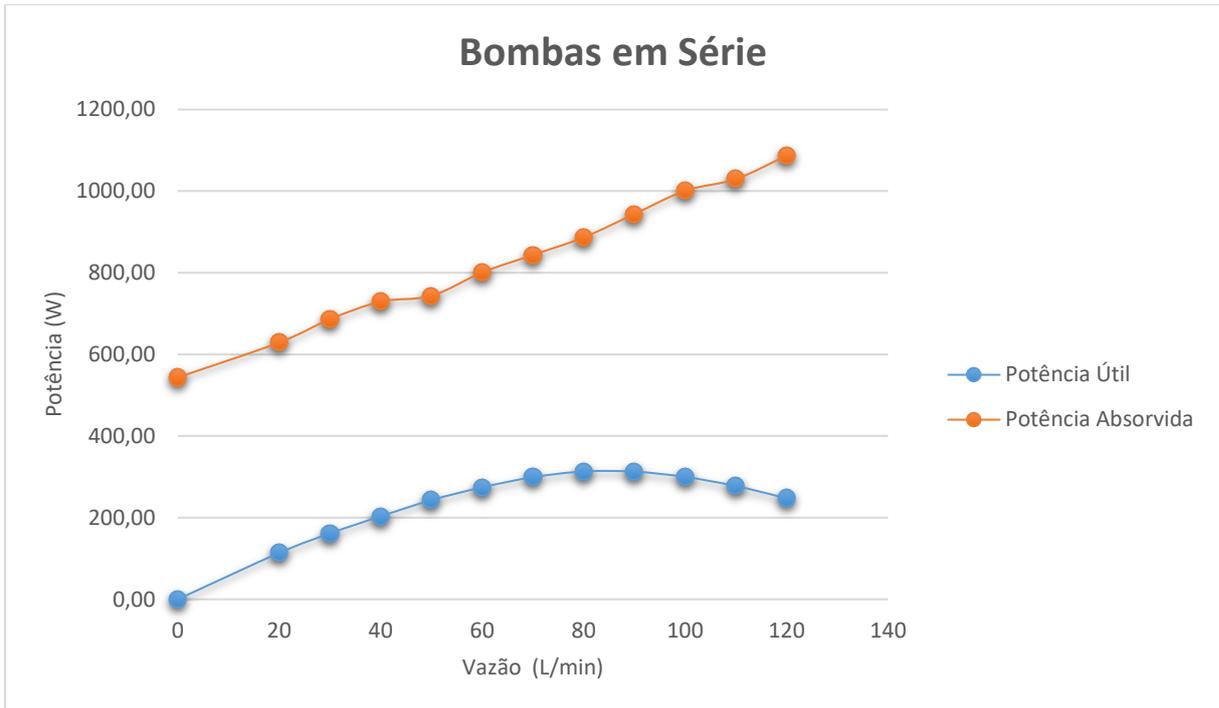
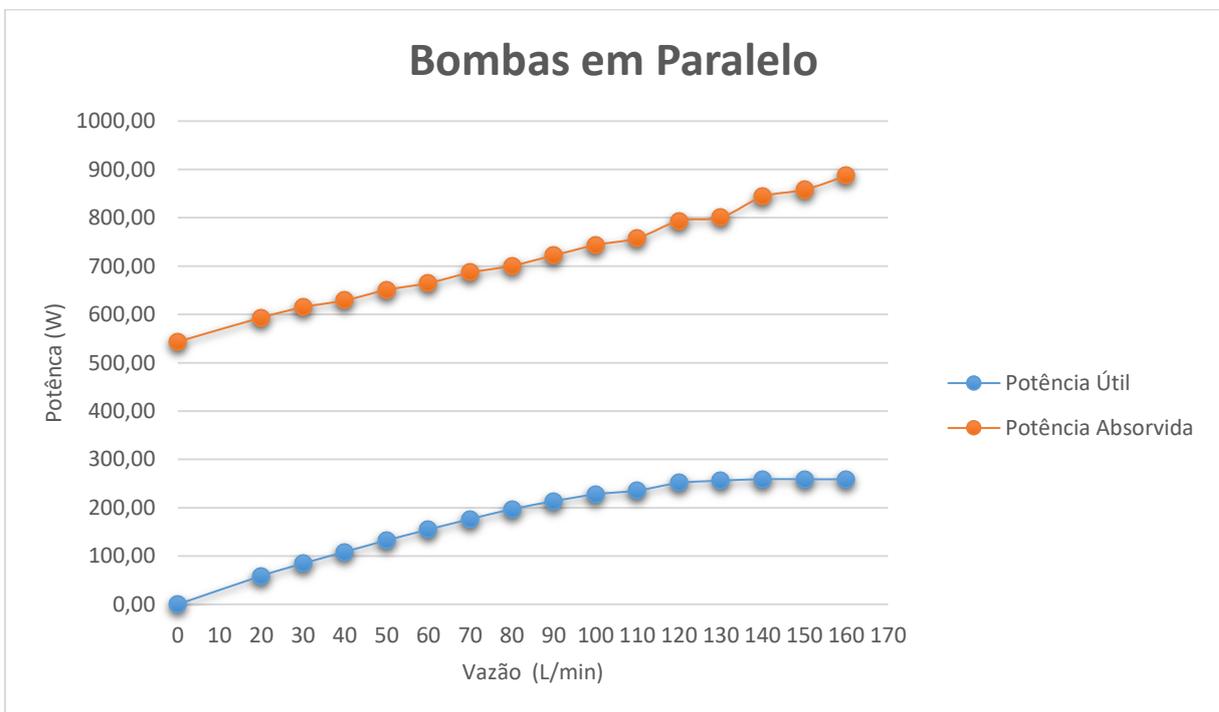


Figura 25 - Curva da potência útil e potência absorvida para as bombas em paralelo em função da vazão



É possível ver que se tem uma grande folga em relação a potência que a bomba absorve para a que ela transfere para o fluido para realizar o transporte, logo temos dados coerentes com a literatura.

4.2.3. Rendimento total *versus* vazão

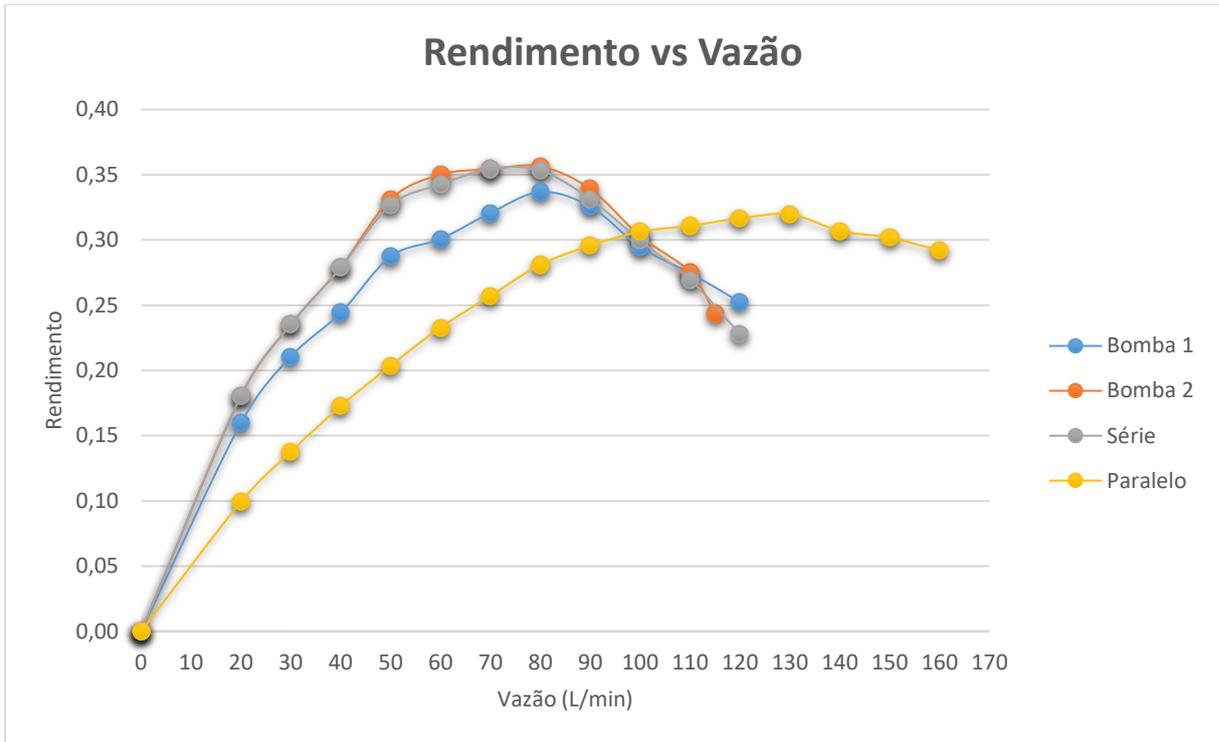
Utilizando os dados presentes nas tabelas 12 e 13, aplicou-se os valores obtidos na equação (21), para determinar a o rendimento total, em cada uma das configurações, os quais estão apresentados na tabela 14.

Tabela 14 - Rendimento total da bomba em função das vazão para todas as configurações

Vazão – L/min	η –BC1 (W)	η –BC2 (W)	η –Série (W)	η –Paralelo (W)
0	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,16	0,18	0,18	0,10
30	0,21	0,24	0,24	0,14
40	0,24	0,28	0,28	0,17
50	0,29	0,33	0,33	0,20
60	0,30	0,35	0,34	0,23
70	0,32	0,35	0,35	0,26
80	0,34	0,36	0,35	0,28
90	0,33	0,34	0,33	0,30
100	0,29	0,30	0,30	0,31
110	0,27	0,28	0,27	0,31
115	-	0,24	-	-
120	0,25	-	0,23	0,32
130	-	-	-	0,32
140	-	-	-	0,31
150	-	-	-	0,30
160	-	-	-	0,29

Plotando-se os dados da tabela 14, obtemos o seguinte gráfico.

Figura 26 - Curvas do rendimento versus a vazão para todas as configurações



4.2.4. Curva do sistema

Para a curva do sistema, foi necessário encontrar a perda de carga de todas as configurações, para isso utilizou-se o método do comprimento equivalente e comprimento total, e com os dados obtidos na tabela 15, aplicou-se os valores na equação (17).

Tabela 15 - Fator de atrito médio e comprimento total para cada uma das configurações

	<i>Bomba 1</i>	<i>Bomba 2</i>	<i>Série</i>	<i>Paralelo</i>
<i>Fator de atrito médio – $f_{méd}$</i>	0,005825	0,005925	0,005825	0,005830
<i>Comprimento total (m)</i>	43,7	43,7	66,0	61,7

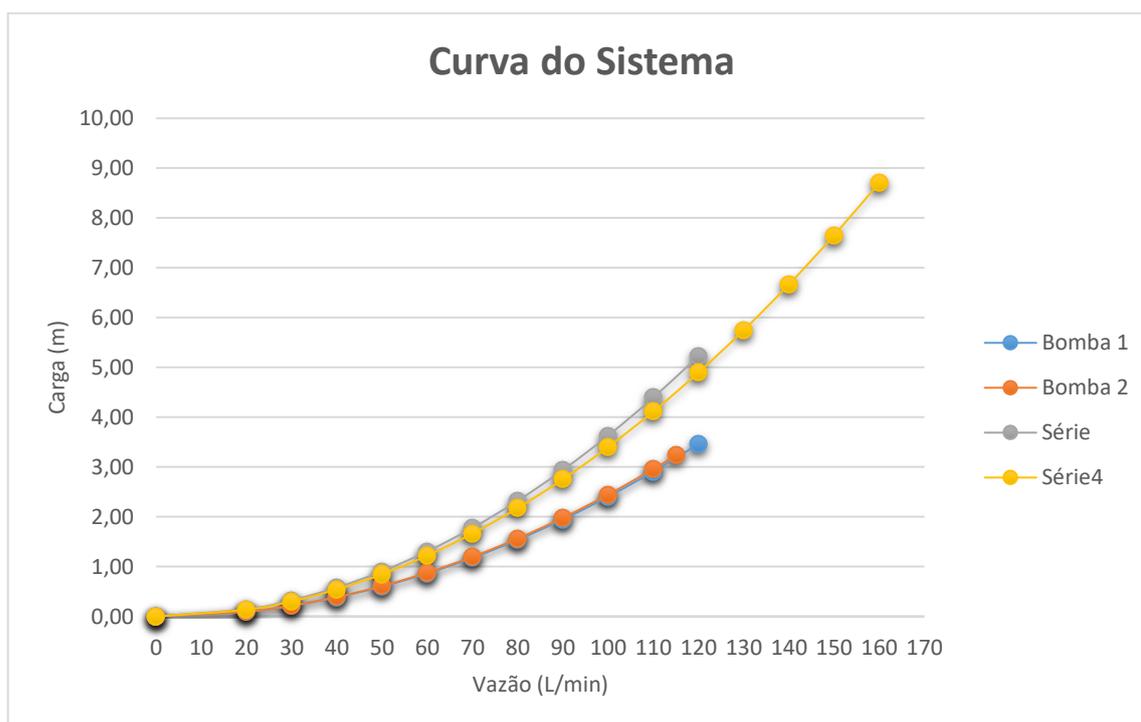
Com esses dados determinados, utiliza-se a equação (25), desprezando-se a primeira parcela da equação pois a diferença de altura entre a descarga e a sucção é muito pequena em relação parcela da perda de carga, com isso encontra-se a carga do sistema, apresentado na tabela 16.

Tabela 16 - Carga do sistema em função da vazão

Vazão – L/min	$H_{sis-BC1}$ (m)	$H_{sis-BC2}$ (m)	$H_{sis-Série}$ (m)	$H_{sis-Paralelo}$ (m)
0	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,10	0,10	0,15	0,14
30	0,22	0,22	0,33	0,31
40	0,38	0,39	0,58	0,54
50	0,60	0,61	0,91	0,85
60	0,87	0,88	1,31	1,22
70	1,18	1,20	1,78	1,67
80	1,54	1,57	2,32	2,18
90	1,95	1,98	2,94	2,75
100	2,40	2,45	3,63	3,40
110	2,91	2,96	4,39	4,12
115	-	3,23	-	-
120	3,46	-	5,23	4,90
130	-	-	-	5,75
140	-	-	-	6,67
150	-	-	-	7,65
160	-	-	-	8,71

Com os dados de carga do sistema obtidos na tabela 16, foi possível plotar um gráfico em função da vazão para cada uma das bombas individuais e para as bombas em série e em paralelo.

Figura 27 - Curva do sistema de tubulações para todas as configurações



Para uma análise mais completa dos foi plotado em conjunto a curva da bomba e a curva do sistema para cada uma das configurações feitas.

Figura 28 - Comparação curva do sistema e curva da bomba 1

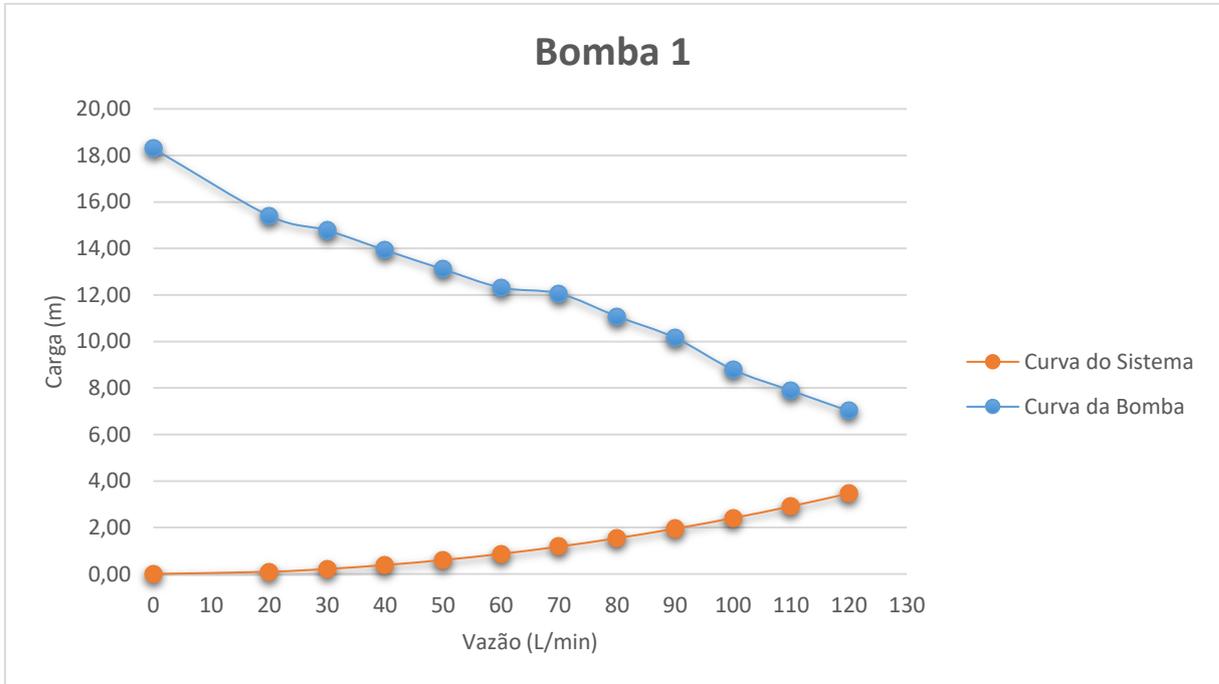


Figura 29 - Comparação curva do sistema e curva da bomba 2

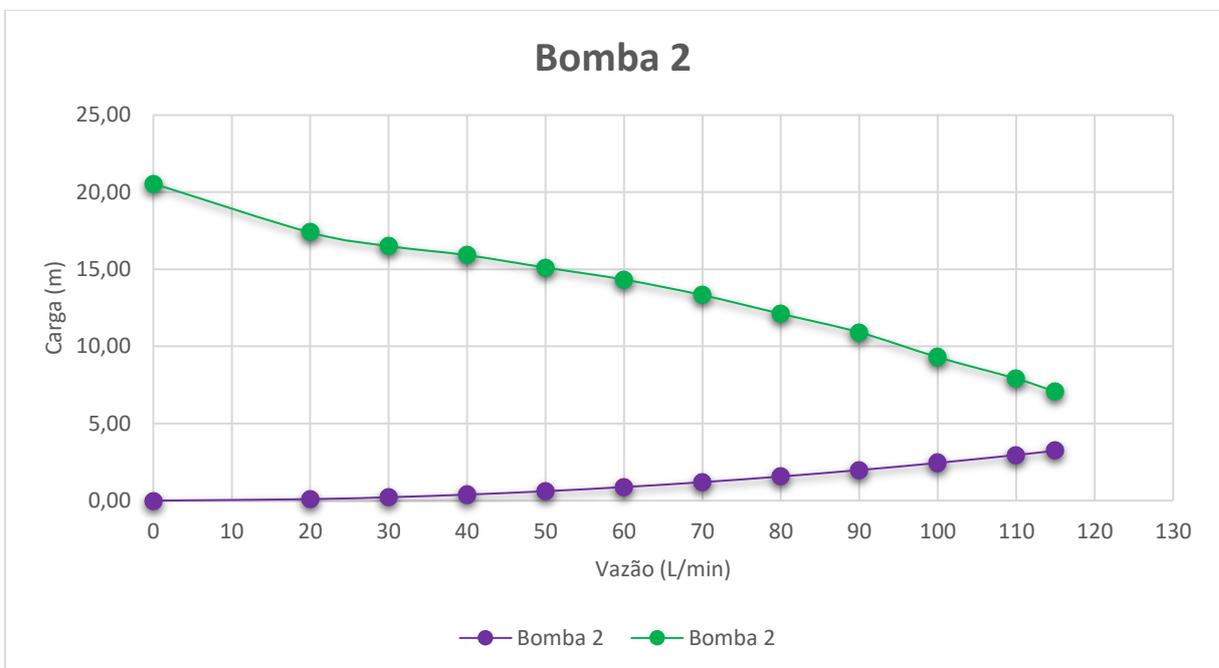


Figura 30 - Comparação curva do sistema e curva das bombas em série

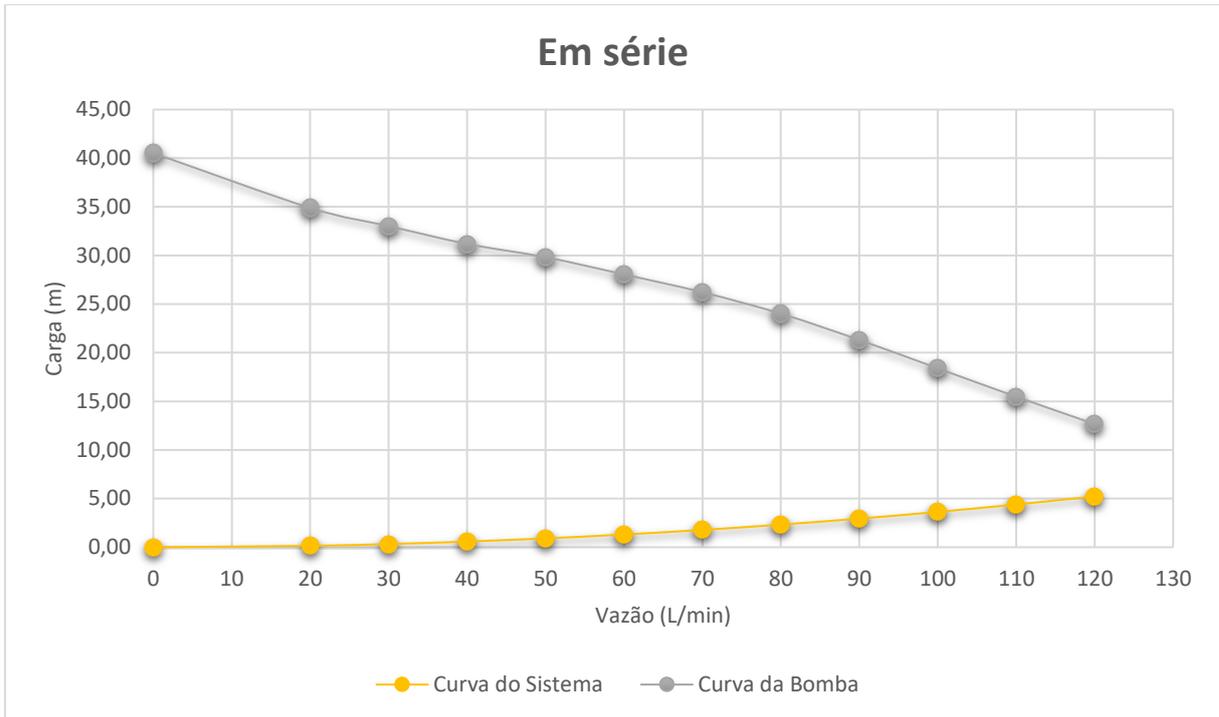
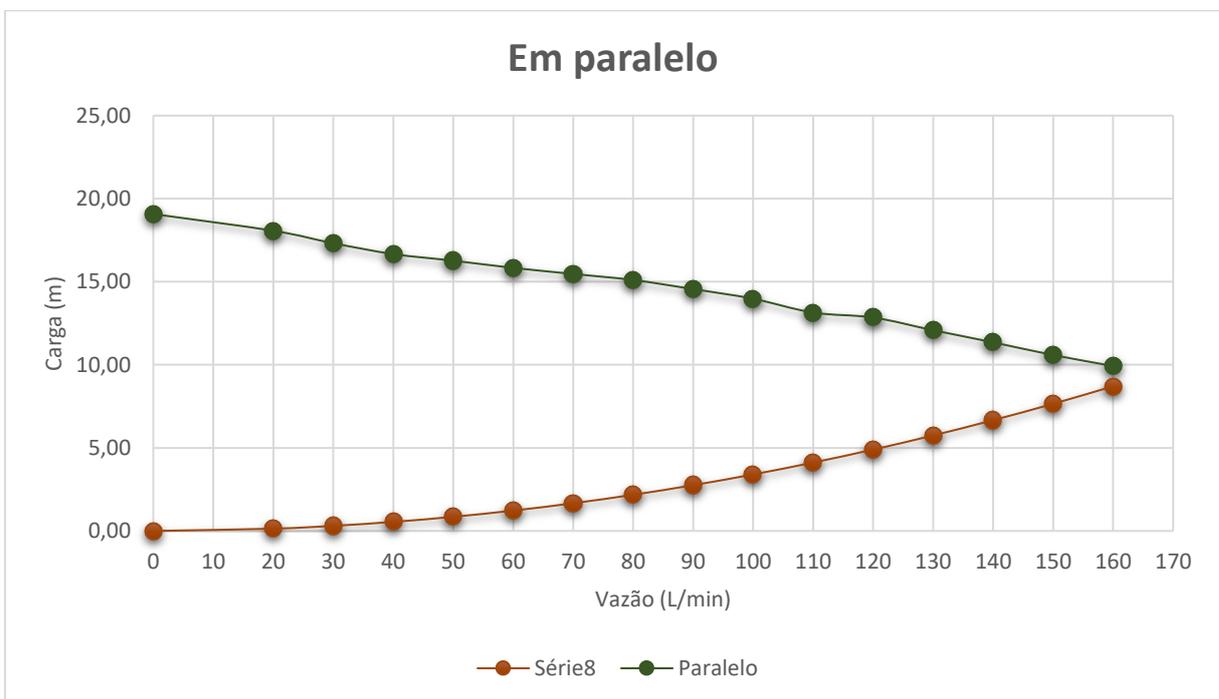


Figura 31 - Comparação curva do sistema e curva das bombas em paralelo



Como é possível observar nas quatro imagens as bombas não conseguem atingir o ponto de operação, mesmo operando juntas, sendo a mais a mais próxima quando estão em paralelo, mas o BEP das bombas 1 e 2 ocorrem com a vazão de 80 L/min, em série com a vazão de 70 L/min e em paralelo com a vazão de 130 L/min.

Durante a realização do tratamento dos dados também foi feito o cálculo do NPSH disponível e verificou-se que não existia cavitação pois o $NPSH_{disp}$ para todos os arranjos sempre foi maior do que a carga da bomba.

4.3. Ferramenta computacional

Uma planilha feita no programa Microsoft Excel, foi feita para o auxílio dos alunos na etapa de tratamento de dados, para as práticas de bombas no laboratório de operações unitárias do departamento de engenharia química da universidade federal da paraíba. A planilha contém todas as equações que devem ser usadas de forma explicada, e possui referencias para um maior entendimento do assunto relativo a bombas.

Sendo uma planilha de obtenção de dados para todas as configurações que o módulo de bombas permite. Todos os cálculos necessários para as curvas características são feitos de forma automática, e plotando automaticamente as curvas características.

5. CONCLUSÃO

Pela observação dos dados analisados é possível ver a aplicação dos conceitos teóricos aprendido, levando a uma observação prática que é de extrema importância para o entendimento de um assunto, sendo um dos objetivos desse trabalho ajudar ainda mais nesse processo de ensino. A ferramenta matemática tem o objetivo de estimular o aluno a interpretar os dados, que é de grande valia na vida profissional de um engenheiro químico.

O presente trabalho mostrou que todos os resultados são coerentes com o que diz a literatura, tornando-o válido para todos os experimentos forem realizados no módulo de bombas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. 3. ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.

FILHO, G. E. F. F. **Bombas, ventiladores e compressores: fundamentos**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2015.

GOUVEA, M. M. R. **Estudo de confiabilidade em bombas centrífugas**. Campinas: Universidade São Francisco, 2008.

HIBBELER, R. C. **Mecânica dos fluidos**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

LIVI, C. P. **Fundamentos de fenômenos de transporte: um texto para cursos básicos**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

MATTOS, E. E.; FALCO, R. **Bombas industriais**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

PEREIRA, R. G.; OLIVEIRA, J. L. de; ROMEIRO, G. A. et al. **Aproveitamento energético e caracterização de óleo de casca de coco obtido por processo de Conversão a Baixa Temperatura**. ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas.

POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C. et al. **Mecânica dos fluidos**. Tradução de Antonio Pacini. 3ª. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2009.

ROMA, W. N. L. **Fenômenos de transporte para engenharia**. 2. ed. São Carlos: RiMa, 2006.

WHITE, F. M. **Mecânica dos fluidos**. Tradução de Mario Moro Fecchio e Nelson Manzaneres Filho. 6ª. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.