

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

JÂNIO MARREIROS GOMES

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE CURVA CARACTERÍSTICA DE BOMBAS
CENTRÍFUGAS EM SISTEMA ABERTO

São Luís
2015

JÂNIO MARREIROS GOMES

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE CURVA CARACTERÍSTICA DE BOMBAS
CENTRÍFUGAS EM SISTEMA ABERTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Paulo Roberto Campos Flexa R. Filho.

São Luís
2015

Gomes, Jânio Marreiros

Determinação experimental de curva características de bombas centrifugas em sistema aberto /Jânio Marreiros Gomes– São Luís, 2015.

.... f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual do Maranhão, 2015.

Orientador: Prof.Me. Paulo Roberto Campos Flexa Filho

1.Bombas centrifugas. 2. Curvas características. 3. Arduino.I.Título

CDU: 621.671: 004.42

JÂNIO MARREIROS GOMES

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE CURVA CARACTERÍSTICA DE BOMBAS
EM SISTEMA ABERTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Paulo Roberto Campos Flexa R. Filho.

Aprovado em: / / 2015

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Paulo Roberto Campos Flexa R. Filho
(Orientador)
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Dr. Glauber Cruz
Centro Universitário do Maranhão (Ceuma).

Prof. Esp. Diego Rosa dos Santos
Centro Universitário do Maranhão (Ceuma)

À Deus, pois tudo que sou e que consegui até hoje foi graças à sua misericórdia e piedade. Aos meus pais, Arão Vilar Gomes, este que infelizmente já não está conosco, mas que me apoiou desde o princípio, até o fim para que isso se concretizasse, e a minha mãe Maria Delma, esta que sempre se fez presente comigo em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, por ter me sustentado até aqui, só Ele sabe o momento certo das coisas, e se aconteceu agora, foi porque eu deveria passar por tudo que passei para que estivesse preparado. Aos meus pais, familiares que de perto me acompanharam e souberam o quanto foi difícil para eu ter chegado aqui, ao meu orientador Paulo Flexa pelo total apoio e orientação para a execução deste projeto, ao amigo Ighor Caetano pelo apoio na montagem da bancada, e amigos de trabalho mais próximos que torceram pelo meu êxito.

RESUMO

Este trabalho visou realizar a análise de curvas características de bombas centrífugas a partir da elaboração de uma bancada experimental, a coleta de medidas de pressões de sucção, recalque e vazão na descarga final utilizando manômetros, vacuômetros e sensor de fluxo controlado por *arduino*. Constatou-se nesse trabalho que os parâmetros coletados experimentalmente não refletem os dados informados pelos fabricantes, onde as alturas manométricas variaram de 87,9% a 91,18% dos valores declarados pelos fabricantes e as vazões volumétricas não alcançaram nem 50% dos valores informados. Por fim, podemos dizer que o trabalho foi útil no que diz respeito à elaboração de projetos hidráulicos, nas quais se deseja evidenciar se de fato, os parâmetros fornecidos pelos fabricantes de bombas centrífugas atendem verdadeiramente às necessidades do projeto.

Palavras-chave: bombas centrífugas, curvas características, Arduino.

ABSTRACT

This study aims at the analysis of centrifugal pump characteristic curves from the development of an experimental bench, from collecting suction pressure measurements, discharge and final discharge flow using pressure gauges, vacuum gauges and flow sensor controlled by Arduino. It was found that the experimentally collected parameters do not reflect the data provided by the manufacturers, where pressure ranged of 87.9% to 91.18% of the values declared by manufacturers and volumetric flow rates did not reach even 50% of the reported values. Finally, we can say that the work is useful regarding the development of hydraulic projects in which one wants to show is in fact the parameters provided by the manufacturers of centrifugal pumps, can truly meet the project's needs.

Keywords: centrifugal pumps, characteristic curves, Arduino.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Escoamento laminar.....	13
Figura 02 – Classificação das bombas.....	16
Figura 03 – Bomba centrífuga em corte	17
Figura 04 – Principais componentes de bomba centrífugas	18
Figura 05 – Esquema de bombeamento	20
Figura 06 – Bombas em série.....	21
Figura 07 – Associação em série de duas bombas iguais.....	21
Figura 08 – Associação de duas bombas diferentes	22
Figura 09 – Associação paralela	22
Figura 10 – Associação de bombas em paralelo.....	23
Figura 11 – Grafico da associação de duas bombas iguais	23
Figura 12 – Associação em paralelo de duas bombas difetentes	24
Figura 13 – Grafico da associação em paralelo de bombas com curvas diferentes 1324	
Figura 14 – Esquemático da unidade experimental.....	26
Figura 15 – Configuração da unidade experimental	28
Figura 16 – Sensor de fluxo controlado com arduino	29
Figura 17 – Monometro de escala 0 a 7 kgf/cm ²	30
Figura 18 – Vacuometro de escala de 0 a 760 mmHg	30
Figura 19 – Ligação do sensor de fluxo arduino.....	31
Figura 20 – Curva característica Altura monometrica x Vazão - Bomba BBA1.....	35
Figura 21 – Curva característica Altura monometrica x Vazão – Bomba BBA2.....	35
Figura 22 – Grafico de disperção dos dados da bomba BBA1	36
Figura 23 – Grafico de disperção dos dados da bomba BBA2.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Listagem de materiais na construção da unidade experimental	27
Tabela 02 – Dados de pressão manométrica, de vácuo e diferença nível da BBA1.	33
Tabela 03 – Dados de pressão manométrica, de vácuo e diferença nível da BBA2.	33
Tabela 04 – Altura manométrica e vazão da bomba BBA1	34
Tabela 05 – Altura manométrica e vazão da bomba BBA2	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NPSH – Net Position Suction Head

BBa 1 – Bomba número 1

BBa 2 – Bomba número 2

m.c.a – Metros por columna d'agua

lpm – Litro por minuto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo Geral	14
2.2	Objetivos Específicos	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1	Conceitos fundamentais de mecânica dos fluidos	15
3.1.1	<i>Propriedade dos fluidos</i>	15
3.1.2	<i>Escoamento em tubulações</i>	16
3.1.3	<i>Teorema de Bernoulli</i>	17
3.2	Perdas de carga	17
3.3	Definição e classificação das bombas	18
3.4	Bombas centrífugas	19
3.5	Associação de bombas	21
3.5.1	<i>Associação em série de bombas</i>	22
3.5.2	<i>Associação de bombas em paralelo</i>	24
4	MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1	Desenvolvimento de uma unidade experimental	28
4.2	Coleta dos dados experimentais	29
4.3	Tratamentos dos dados coletados	33
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
6.	CONCLUSÃO	41
7.	REFERÊNCIAS	42
8.	APÊNDICE 1	44

1 INTRODUÇÃO

As bombas são máquinas operatrizes hidráulicas destinadas a fornecer energia ao líquido a ser bombeado, com a finalidade de transportá-lo de um ponto a outro. Isto só é possível, através da transformação de uma energia cinética que a bomba recebe, seja de um motor elétrico, motor a combustão ou vapor, entre outras fontes a qual é convertida em energia de pressão e transferida ao fluido através de um impelidor ou rotor (BIANCHI *et al*, 2013).

Na natureza, o fenômeno de transportar um de fluido para regiões elevadas só é possível por meio da ação de uma bomba. A operação de uma bomba consiste em pressurizar o líquido a fim de haver o escoamento. A associação destas máquinas hidráulicas pode aumentar a pressão interna ou a vazão em tubulações. A classificação dos variados tipos de bombas é feita através da forma como a energia é transferida ao fluido transportado. Nas turbobombas a força que é cedida ao fluido é produzida através da rotação de um rotor dotado de pás, especialmente perfiladas, de forma a orientar o fluxo do fluido e transferir a energia ao mesmo.

As bombas centrífugas são um dos tipos de turbobombas, que cede energia ao fluido através do seu elemento rotativo, chamado de rotor. Nelas o líquido penetra no rotor paralelamente ao eixo, sendo dirigido pelas pás do rotor para a periferia da bomba, fazendo com que o fluido saia em uma direção perpendicular ao eixo do rotor (SILVA, 2003).

As bombas centrífugas são as mais usuais no ambiente industrial em função de sua capacidade de vencerem grandes alturas e vazões altas com bom rendimento. A ferramenta utilizada para auxiliar o engenheiro na especificação destas máquinas de fluxo são as curvas características de bombas (MORAES Jr, 2011).

As curvas características são utilizadas para seleção de bombas através da relação entre altura manométrica e vazão, rendimento versus vazão e NPSH – Net Position Suction Head requerido versus vazão. Normalmente essas curvas são fornecidas pelos fabricantes e obtidas através de procedimento experimental. O desenvolvimento de uma metodologia para determinação destas curvas auxilia na indicação dos parâmetros de desempenho de bombas centrífugas, auxiliando na compreensão de seus conceitos elementares (BRUNETTI, 2008).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

➤ Determinar experimentalmente a curva (altura manométrica x vazão) de bombas centrífugas.

2.2 Objetivos Específicos

➤ Construir uma unidade experimental para obtenção de vazão, pressão de sucção e recalque;

➤ Definir uma equação que represente a curva característica dessas bombas;

➤ Avaliar como a vazão e as alturas manométricas são influenciadas pelas variações de área da seção transversal na tubulação de recalque.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Conceitos fundamentais de mecânica dos fluidos

3.1.1 *Propriedade dos fluidos*

1. A massa específica (ρ) de uma substância é definida como a quantidade de massa que ocupa uma unidade de volume. A unidade que será utilizada nesse trabalho para essa propriedade é kg/m^3 (FOX e McDonald, 2010).

2. A densidade relativa (d) é a razão entre a massa específica de uma determinada substância e a massa específica de uma substância em uma condição padrão. Para o cálculo da densidade relativa de líquidos e sólidos, a substância utilizada é a água (FOX, 2010).

A densidade relativa será calculada tendo como referência a água a 15°C (59°F). Nessas condições, sua massa específica é de $999,1026 \text{ kg/m}^3$ que, para fins de engenharia, pode ser aproximada para 1000 kg/m^3 (FOX e McDonald, 2010).

A densidade relativa é calculada então pela seguinte relação:

$$d = \frac{\rho}{\rho_{\text{água } 15^\circ\text{C}}}$$

3. O peso específico (γ) do fluido é definido como a razão entre o peso de uma substância e a unidade de volume. Essa propriedade pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\gamma = \rho \cdot g$$

onde ρ é a massa específica e g a aceleração da gravidade (MATTOS, 1998).

4. O número de Reynolds (Re) é a relação entre força de inércia e a força devido à viscosidade do fluido. Esse número é adimensional e pode ser calculado pela fórmula,

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}$$

onde V é a velocidade de escoamento, D é o diâmetro da tubulação e μ é a viscosidade absoluta do fluido (MACINTYRE, 1997).

3.1.2 Escoamento em tubulações

Os dois principais tipos de escoamento em tubulações são o escoamento laminar e escoamento turbulento.

No escoamento laminar ou laminar as extremidades dos vetores velocidades das partículas numa dada seção do escoamento formam uma superfície parabólica e as linhas de fluido são paralelas à tubulação (Figura 1). Além disso, a velocidade máxima se verifica no centro do tubo, já junto às paredes, a velocidade das partículas é praticamente nula. Nesse tipo de escoamento, o número de Reynolds se comporta da seguinte forma: $Re < 2000$ – Regime laminar (FOX, 2010).

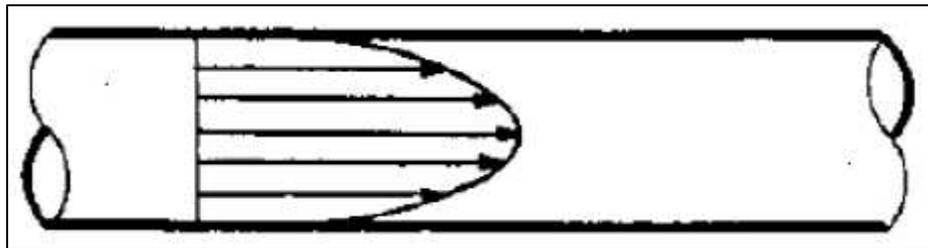


Figura 1 - Escoamento laminar – distribuição de velocidade na seção transversal de um tubo. (Fonte: MATTOS, 1998)

O escoamento turbulento é verificado quando há irregularidade no caminho, valor e orientação da velocidade das partículas. Esse escoamento promove uma distribuição mais uniforme de velocidades, conforme mostrado na Figura 3. Já o escoamento turbulento, é verificado em número de Reynolds maiores da ordem de $Re > 4000$ – Regime turbulento. Observação: Para $2000 < Re < 4000$, o regime tanto pode ser laminar quanto turbulento (faixa crítica) (FOX e McDonald, 2010).

3.1.3 Teorema de Bernoulli

O teorema de Bernoulli relaciona as variações de pressão com as de velocidade e elevação ao longo da linha de corrente. Esse teorema pode ser representado pela seguinte expressão

$$h + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = \text{constante}$$

que é a equação de Daniel Bernoulli, que exprime o teorema: “Em qualquer ponto que se considere de uma veia de um líquido perfeito em escoamento permanente, sem fornecer ou receber energia ou efetuar trabalho, a soma da cota, com a altura representativa da pressão e com altura representativa da velocidade, é constantes.”(MACINTYRE, 1997)

No entanto, para utilização dessas expressões devem ser respeitadas as seguintes condições (FOX e McDonald, 2010).

1. Escoamento em regime permanente
2. Escoamento incompressível
3. Escoamento sem atrito
4. Escoamento ao longo de uma linha de corrente

3.2 Perdas de carga

Quando o líquido escoar por uma tubulação, com o fluxo, ocorre atrito entre ele e as paredes da tubulação, entre os próprios filetes líquidos com a turbulência, esse atrito interno faz com que a pressão existente no interior vai diminuindo gradativamente, e essa queda de pressão com o deslocar do fluido, chama-se Perda de Carga.

Desta forma a perda de carga seria uma restrição à passagem do fluxo do fluido dentro da tubulação, esta resistência influenciará diretamente na altura manométrica de uma bomba e sua vazão volumétrica (GERNER, 2007).

3.3 Definição e classificação das bombas

As bombas são máquinas geratrizes cuja finalidade é realizar o deslocamento de um líquido por escoamento. Sendo uma máquina geratriz, ela transforma o trabalho mecânico que recebe para seu funcionamento em energia, que é comunicado ao líquido sob as formas de energias de pressão e cinética (MACINTYRE, 1997).

Segundo Macintyre (1997), as bombas podem ser classificadas em:

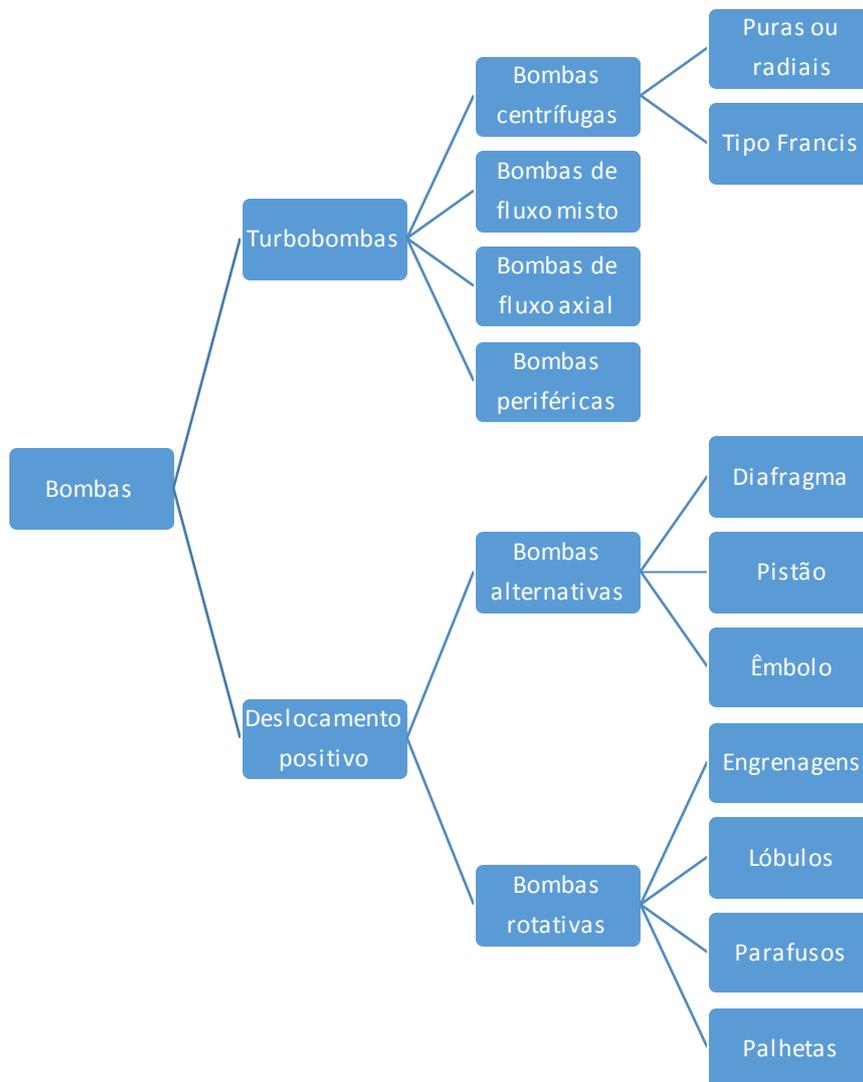


Figura 2 – Classificação das bombas. (Fonte: Adaptado de Macintyre, 1997).

3.4 Bombas centrífugas

Uma bomba centrífuga é um equipamento mecânico que usa o princípio da força centrífuga para transformar energia mecânica (do eixo) em energia cinética e em energia de pressão, posteriormente, a parcela cinética é transformada em pressão internamente na voluta (MACINTYRE, 1997).

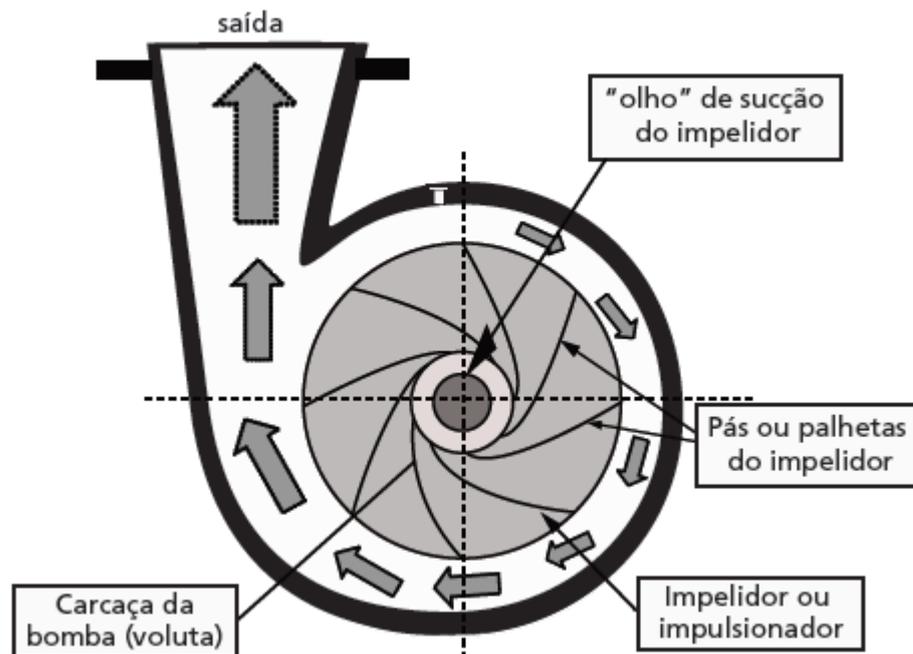


Figura 3 – Bomba centrífuga em corte (Fonte: adaptado de Macintyre, 1997).

A bomba centrífuga ao ser ligada, cria uma rotação, inicialmente, uma zona de baixa pressão devido à centrifugação do líquido na região central do impelidor (figura 3). O líquido centrifugado deixa a sua posição "vazia". Imediatamente outra porção ocupa sua posição e é centrifugada. A sucessão desses eventos cria um fluxo contínuo pela bomba. O líquido centrifugado caminha para as extremidades do impelidor, ganhando energias de pressão e cinética. O líquido, após a saída do impelidor, entra na voluta onde há uma moderada transformação da parcela de energia cinética em energia de pressão. Por fim, na região difusora, o restante da energia cinética é quase totalmente transformada em energia de pressão. Na maioria das bombas a maior transformação é obtida nesta etapa (MACINTYRE, 1997).

Segundo Macintyre (1997), as bombas podem ser classificadas quanto:

- A direção do fluxo em relação ao eixo – axial, radial e misto;
- A posição de trabalho – horizontal ou vertical;
- Ao número de estágios – simples estágio ou múltiplos estágios;
- Ao tipo de sucção do primeiro estágio – simples ou dupla;
- A partição da carcaça – axialmente bipartida ou radialmente bipartida.

No mercado, existe uma grande diversidade de bombas centrífugas. Entretanto, alguns componentes são comuns à grande maioria de modelos de tipo. A figura 4 apresenta, uma vista em corte de uma bomba centrífuga de simples estágio (um único impelidor) e seus principais componentes.

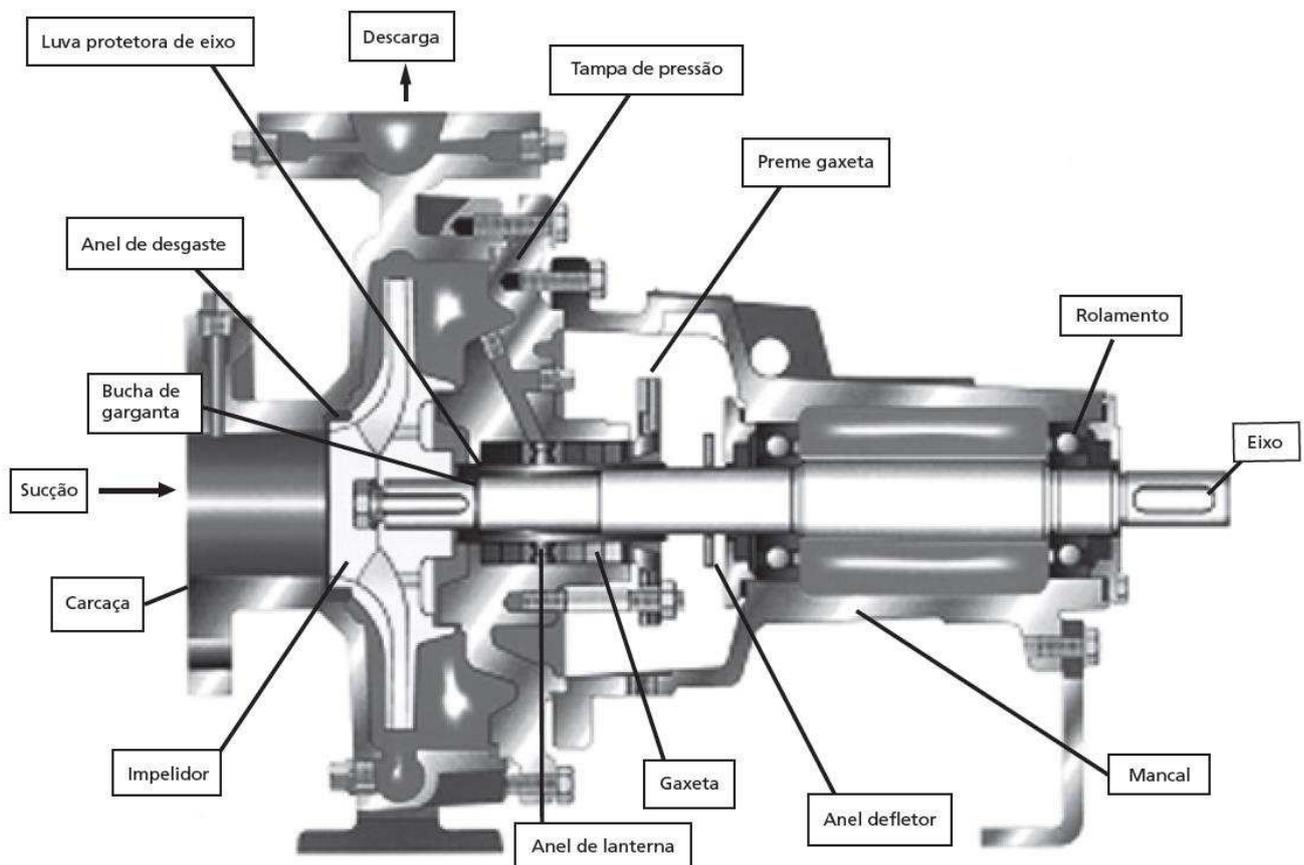


Figura 4 – Principais componentes de bombas centrífugas (Fonte: adaptado de Macintyre, 1997).

A *carcaça* é responsável pela contenção do volume crescente do líquido oriundo do impelidor e pela transformação de parte da energia cinética em energia de pressão durante a condução do líquido até o canal divergente da descarga

(difusor). Os *impelidores*, também chamados de rotores, são responsáveis por ceder energia ao líquido, seguindo padrões que estão relacionados com o perfil hidráulico construtivo (MACINTYRE, 1997).

O *eixo* é o elemento estrutural que sustenta o(s) impelidor (es). Este é responsável pela transmissão de potência do acionador para o(s) impelidor(es). Os *mancais* são os elementos que sustentam o eixo e o(s) impelidor(es), permitindo que a transmissão de torque se estabeleça em níveis mínimos de atrito. Podem ser de rolamentos ou de deslizamento (QUIRINO, 2009).

A *vedação* serve para manter os vazamentos em estado mínimos ou, em alguns casos, estanqueidade entre o líquido de processo e a atmosfera. A definição do tipo de vedação (gaxeta ou selo mecânico) e os materiais empregados dependem de uma análise da bomba, do líquido e da interação destes e do processo de bombeamento (QUIRINO, 2009).

Grande parte das bombas de simples estágio utiliza carcaça em voluta, principalmente devido a sua boa eficiência, baixo custo e simplicidade. Os difusores são responsáveis em receber o líquido na periferia do impelidor e através de um canal divergente (seção crescente) formado por pás difusoras fixadas na carcaça e converter parte da energia cinética em energia de pressão (QUIRINO, 2009).

Em bombas de múltiplos estágios, as pás difusoras exercem um papel secundário, porém não menos importante, que é o de separar os estágios (impelidores) e reorientar o fluxo da descarga de um impelidor para o “olho” do estágio seguinte (MACINTYRE, 1997).

3.5 Associação de bombas

Nas unidades operacionais é muito comum encontrarmos bombas centrífugas associadas em série e/ou em paralelo.

A associação de bombas em série é uma opção quando uma dada altura manométrica exigida pelo sistema é muito elevada, ficando acima dos limites alcançados por uma única bomba. A associação em paralelo é fundamentalmente utilizada quando a vazão desejada excede os limites de capacidade das bombas, quando estas são operadas sozinhas (QUIRINO, 2009).

3.5.1 Associação em série de bombas

Em algumas aplicações, por exemplo, em condições topográficas ou por qualquer outro motivo, um sistema poderá exigir grandes alturas manométricas, que em alguns casos, pode exceder às faixas de operação de bombas de simples estágio. Nestes casos, uma das soluções é a associação de bombas em série.

Um exemplo de uma provável necessidade da associação de série de bombas é mostrado na figura 5.

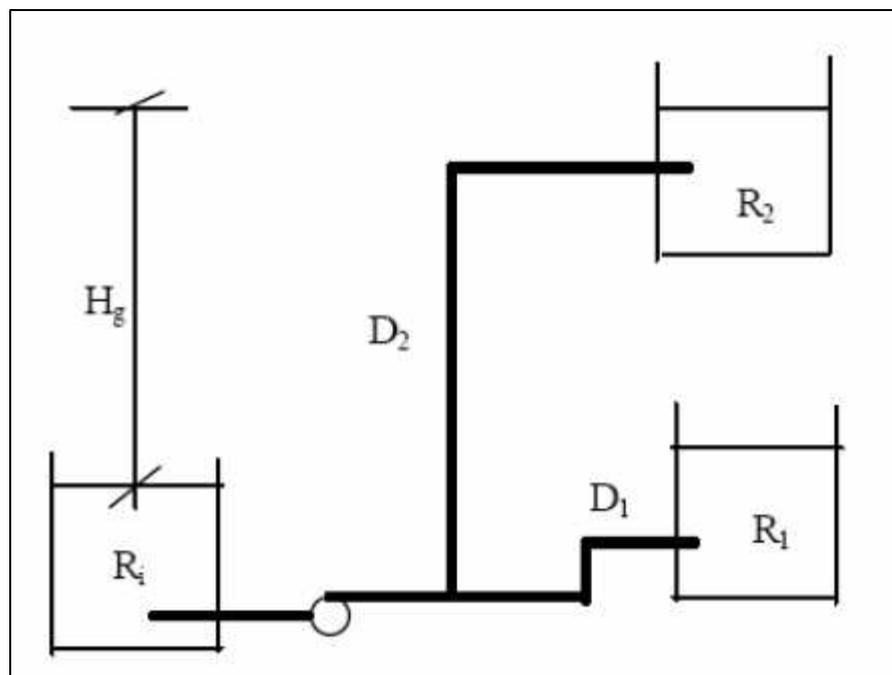


Figura 5 – Esquema de bombeamento (fonte: próprio autor).

Considerando o esquema apresentado na figura 6, é fácil observar que:

1. O líquido passará pela primeira bomba e receberá uma certa carga manométrica e ao entrar na segunda bomba, haverá um novo acréscimo de carga a fim de que o mesmo atinja as condições solicitadas.
2. A vazão que sai da primeira bomba é a mesma que entra na segunda.

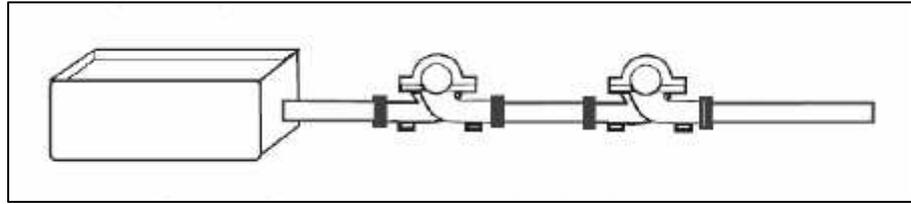


Figura. 6 – Bombas em série – reservatório, bomba 1 e bomba 2, respectivamente (Fonte: adaptado de ANDRADE, 2013).

Quando associamos duas ou mais bombas em série, para uma mesma vazão, a carga manométrica será a soma da carga manométrica fornecida por cada bomba.

Portanto, para se obter a curva característica resultante de duas bombas em série, iguais ou diferentes, é necessário somar as alturas manométricas totais, correspondentes aos mesmos valores de vazão, em cada bomba. A figura 7 mostra o gráfico da associação de duas bombas que possuem uma altura manométrica com o valor H . Quando ambas estão em série, a pressão final é igual a $2H$.

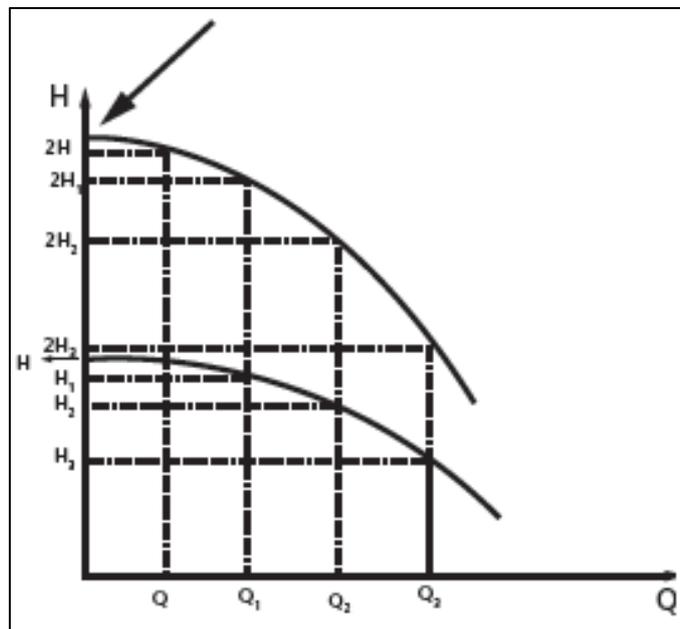


Figura 7 – Associação em série de duas bombas iguais (Fonte: adaptado de NASCIMENTO, 2012).

A associação de duas bombas em série que possuem uma altura manométrica com valores H e H' , respectivamente, a pressão final é igual a $H + H'$ e gráfico resulta no mostrado na figura 8.

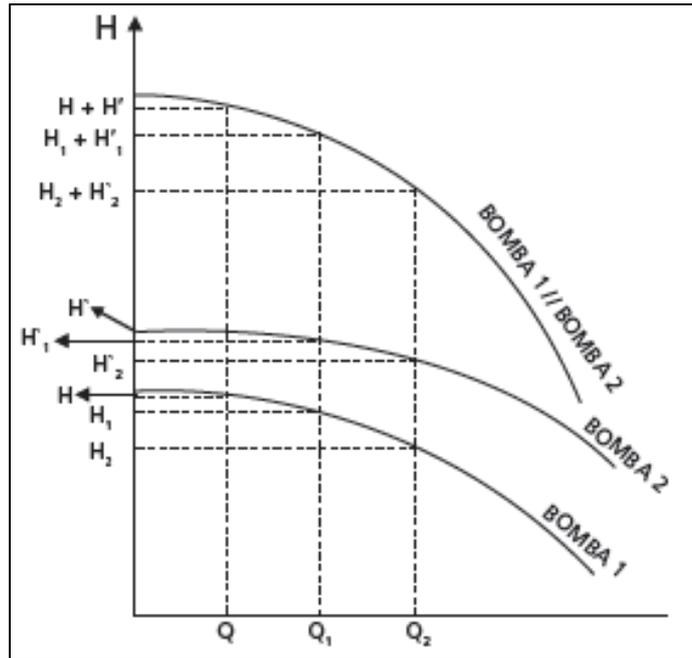


Figura. 8 – Associação em série de duas bombas diferentes. (Fonte: Adaptado de NASCIMENTO, 2012)

3.5.2 Associação de bombas em paralelo.

Na associação em paralelo (Figura 9), para cada altura manométrica total, o valor da vazão total do sistema será a soma da vazão correspondente de cada tubulação. Assim, inicialmente, procede-se o levantamento da curva de cada sistema individualmente, como se não existisse outros. Em seguida, para cada altura manométrica, somam-se as vazões correspondentes em cada sistema, obtendo-se a curva do sistema resultante. (ANDRADE, 2013).

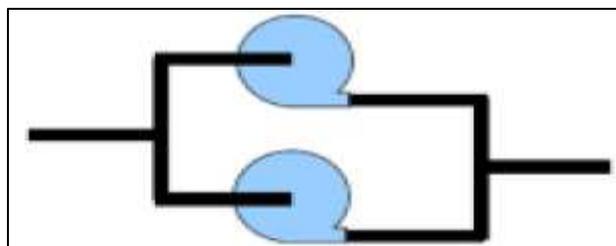


Figura 9 – associação em paralelo. (ANDRADE, 2013)

Considerando duas bombas iguais que opera em paralelo, descarregando para uma única linha, levando o líquido do reservatório de sucção para o reservatório de descarga (figura 10).

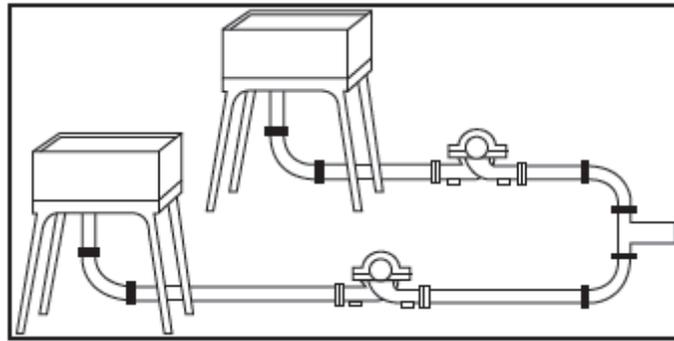


Figura 10 – associação de bombas em paralelo. (Fonte: Adaptado de MATTOS, 1998)

Considerando o esquema da figura 11, quando apenas uma só bomba opera, a altura manométrica total diminui, passando para H_1' ($H_1' < H_1$) e para uma vazão Q_1' , de tal forma que $Q_1 < Q_1' < Q_2$. Quando as duas bombas estão operando, a vazão do sistema é Q_2 e cada bomba recalca uma vazão Q_1 , de tal forma que $Q_2 = 2Q_1$. Podemos notar ainda que as duas bombas operarão com a mesma altura manométrica total H_1 (figura 12).

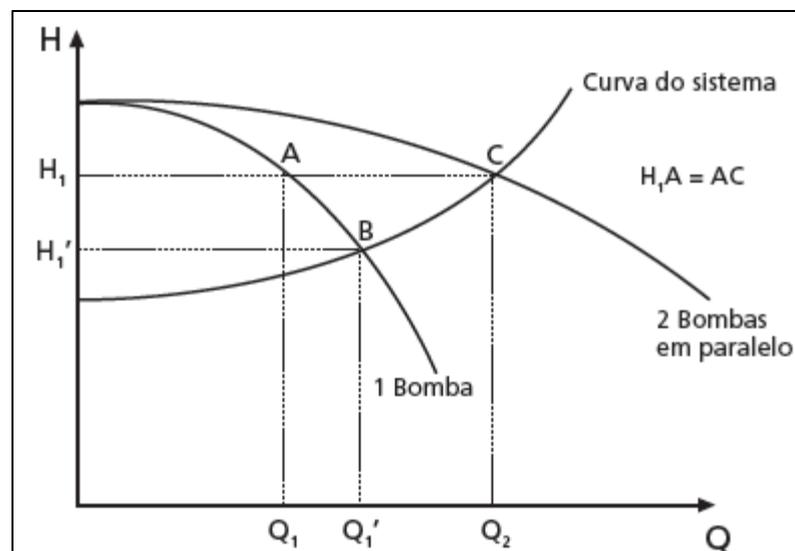


Figura 11 – gráfico da associação em paralelo de duas bombas iguais. (adaptado de NASCIMENTO, 2012).

Observando o exemplo mostrado nas figuras 10 e 11, podemos concluir que a vazão total do sistema é menor que a soma das vazões das bombas, operando isoladamente. Quando as bombas estão operando em paralelo, há um deslocamento do ponto de operação de cada bomba para a esquerda da curva (ponto A). Isso se acentua à medida que aumentamos o número de bombas

associadas. Se uma bomba de uma associação em paralelo sair de operação, a unidade que continuar em funcionamento passará do ponto A para o ponto B (NASCIMENTO, 2012).

Se duas ou mais bombas com curvas diferentes puderem trabalhar em paralelo (figura 12). Esta diferença pode ter sido prevista durante o projeto e mais comumente em decorrência do desgaste diferenciado de bombas com curvas iguais operando em paralelo (MACYNTIRE, 1997).

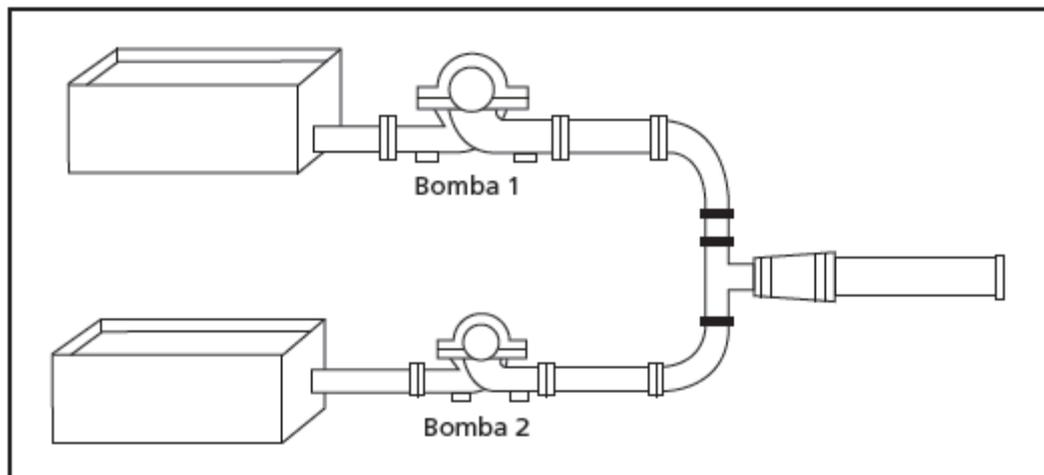


Figura 12 – associação em paralelo de bombas diferentes. (Fonte: Adaptado de ANDRADE, 2013)

Tendo como curva resultante o gráfico da figura 13:

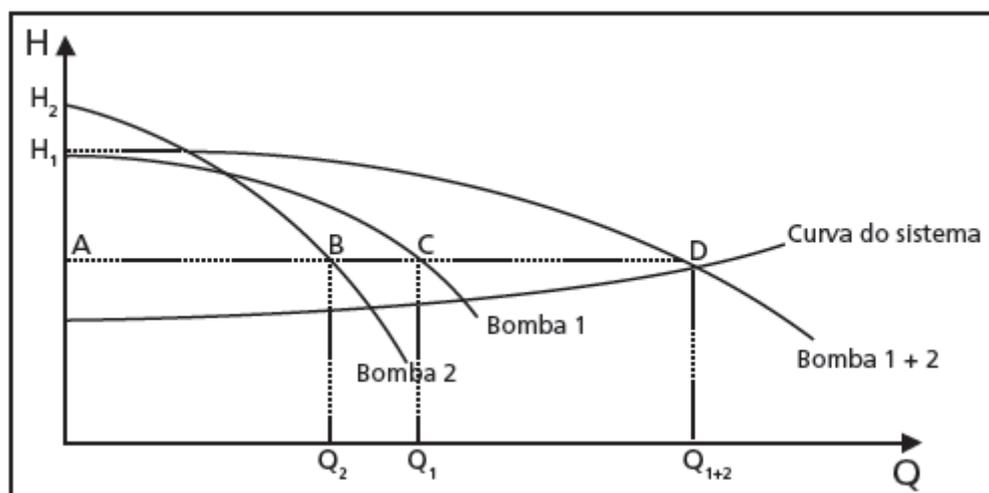


Figura 13 – gráfico da associação em paralelo de bombas com curvas diferentes. (Fonte: Adaptado de ANDRADE, 2013)

Caso haja a retirada de uma bomba de operação, a bomba que permanecer em operação irá operar a direita do ponto de projeto, isto é, com vazão excessiva. Neste caso a bomba estará sujeita às seguintes situações (MATTOS, 1998):

- O NPSH disponível pode ser insuficiente (NPSH disponível menor do que NPSH requerido) podendo levar a bomba a uma cavitação;
- Queda da eficiência da bomba;
- Esforços radiais elevados sobre o eixo;
- Aumento da potência consumida e, conseqüentemente aumento da corrente do motor elétrico.

A vazão excessiva poderá ser controlada pela válvula de descarga, restringindo-a ou quando possível reduzindo a rotação da bomba.

Por outro lado, o número excessivo de bombas associadas em paralelo, leva cada uma delas a operar à esquerda do seu ponto de projeto, como vimos, isto é, com a vazão reduzida pode acarretar problemas tais como (MATTOS, 1998):

- Queda da eficiência da bomba;
- Esforços radiais excessivos;
- Aquecimento do líquido bombeado. Se a operação for contínua, a bomba estará submetida a condições desfavoráveis a vida útil dos selos e dos mancais;
- Aumento dos esforços axiais para bombas que possuem dispositivos de balanceamento do empuxo hidráulico;
- Problemas de recirculação;
- Nas bombas axiais, a operação em vazões reduzidas demanda uma potência consumida elevada;
- Ruído excessivo;
- Vibração excessiva.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Desenvolvimento de uma unidade experimental

A unidade experimental utilizada para determinação da curva característica das bombas foi desenvolvida através do modelo esquemático mostrado na figura 14. O sistema é formado por duas bombas centrífugas instaladas esquematicamente para associação em série e paralelo. Os materiais utilizados para a confecção do experimento seguem listados na tabela 1. O ensaio consiste da medição de vazão através de sensor de fluxo para arduino e medidores de pressão (manômetros e vacuômetros) a partir da restrição da válvula de descarga. As válvulas 2 e 3 são de controle das associações das bombas em série e em paralelo. Os motores das bombas são monofásicos com alimentação de 220 volts, acionados por disjuntores dimensionados para atender as correntes nominais dos motores.

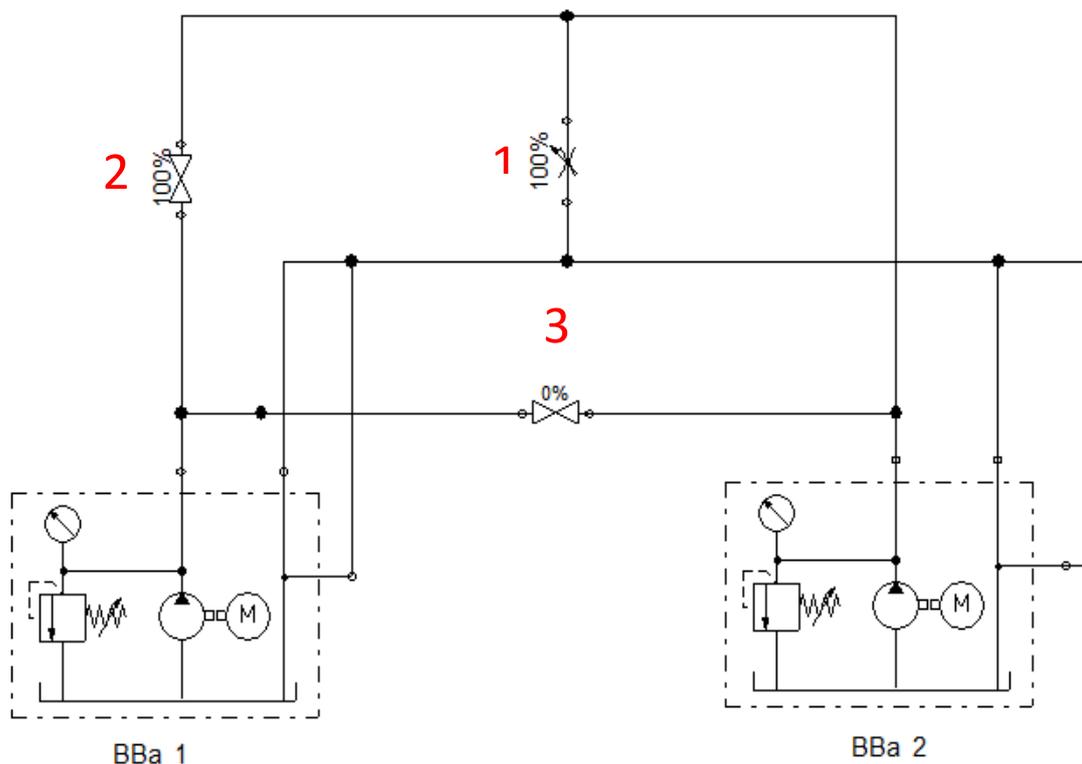


Figura 14 – Representação esquemático da unidade experimental- BBa 1 - Bomba centrífuga periférica de 1/2 CV; BBa 2 -Bomba centrífuga auto-escorvante de 1 HP; 1- Válvula de descarga; 2 e 3- Válvulas de controle das associações.

Por se tratar de bombas diferentes, não foi possível a obtenção da curva da associação em série, em função de que não se conseguiu controlar as pressões de sucção a fim de manter a mesma intensidade de vácuo e nem garantir se em cada bomba a jusante tem capacidade de suporte das pressões de montante na entrada e de jusante no interior da sua própria carcaça. Nem foi possível controlar as pressões manométricas, a fim de garantir mesmas pressões na tubulação de recalque com o objetivo de obtenção de soma das vazões na associação em paralelo.

Tabela 1 – Listagem de material utilizado na construção da unidade experimental

Quantidade	Material
1	Bomba centrífuga auto-escorvante de 1 HP;
1	Bomba centrífuga periférica de 1/2 CV;
4	Conectores L/R de 32 mm;
2	Manômetros de fundo de escala de 7kgf/cm ² ;
2	Vacuômetros de escala de 0 a 760 mmHg
6	Curvas de 32 mm
2	Tê de 32 mm
3	Válvulas de esfera
1	Válvula de gaveta
1	Sensor de fluxo máx. de 60 l/min
2	Disjuntores elétricos (2A e 4A);
1	Tubo de PVC 32 mm (5 metros);
1	Caixa d'água de 100 l

4.2 Coleta dos dados experimentais

Através da variação da abertura da válvula de descarga alterou-se a vazão registrada pelo sensor de fluxo controlado pelo arduino (figura 16) e as pressões no tubo de sucção medidas pelo vacuômetro (figura 18) e recalque pelo manômetro (figura 17). Foram coletados cinco valores de vazão e pressões positivas e negativas para elaboração das curvas individuais (altura manométrica x vazão) das bombas. A altura manométrica foi obtida utilizando o balanço de energia mecânica proposto por Bernoulli apresentado na equação 1. As variações de energia cinéticas foram desprezadas em função de que o tubo de sucção e recalque tem o mesmo diâmetro interno de 25,4 mm. A perda de carga também foi desprezada por ter-se utilizado tubos em PVC que apresentam perda de cargas

muito pequenas por apresentarem pequena rugosidade, além de ter-se utilizado pequenos comprimentos de tubulações.

$$H_{\text{man}} = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + (H_2 - H_1) + J \quad (1)$$

onde:

$\frac{P_2 - P_1}{\gamma}$.: Variação da carga de pressão entre o recalque e a sucção;

$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}$.: Variação da carga cinética entre o recalque e a sucção;

$(H_2 - H_1)$.: Variação das cotas entre o recalque a sucção;

J: Perda de carga no duto de sucção e recalque.



Figura 15 - Sensor de fluxo controlado por *arduino* (Fonte: Próprio autor).



Figura 16 – Manômetro de escala de 0 a 7 kgf/cm² (Fonte: Próprio autor).



Figura 17 - Vacuômetro de escala de 0 a 760 mmHg (Fonte: Próprio autor).

Para o monitoramento da vazão foi utilizada uma plataforma de prototipagem eletrônica “open source”, composta essencialmente de “hardware” e “software” denominada ARDUINO (figura 19). Este dispositivo é formado por um microcontrolador (microprocessador) que possui estrutura básica de um computador completo com memória RAM, memória ROM, unidade de processamento de aritmética e os dispositivos de entradas e saídas, ou seja, toda infraestrutura necessária para obtenção de dados externos, processamento e emissão do resultado. O hardware do ARDUINO e a ligação eletrônica funcionam com as seguintes especificações: a fonte de alimentação pode receber tensões de 7 Vdc à 35 Vdc. Internamente a placa do ARDUINO disponibiliza, através de regulador interno, uma voltagem estabilizada de 5 volts, utilizada para alimentação dos componentes eletrônicos utilizados neste projeto.

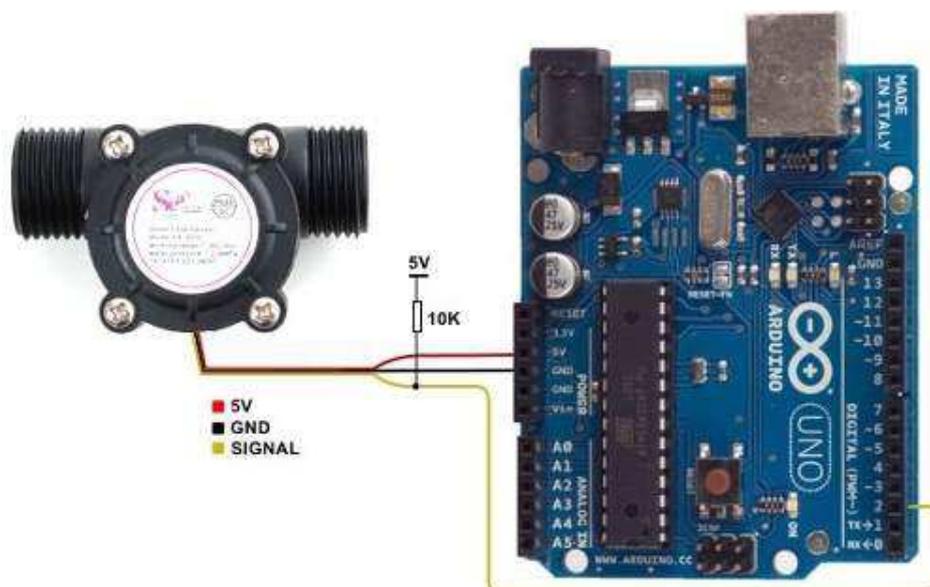


Figura 18 – Ligação do sensor de fluxo no *arduino* (Fonte: Próprio autor).

O ARDUINO possui 14 pinos que podem ser programados como entradas ou sinais digitais, além de 6 pinos de entradas analógicas ou entradas/saídas digitais (programáveis). Todos os pinos digitais e analógicos do ARDUINO possuem mais de uma função, ou seja, podem ser de entrada ou saída, servem para leituras analógicas e também como entradas digitais. As funções dos pinos foram definidas durante a programação escrita no código da placa (RIBEIRO FILHO, 2014).

Neste trabalho foi utilizado uma entrada analógica, cujo pinos são representados por A2. A estrutura de software necessária para o processamento dos dados enviados à entrada analógica A2, foi elaborada no ambiente de desenvolvimento integrado (IDE), sendo a interface gráfica em linguagem de programação JAVA. O “software” elaborado para controle das entradas A2 foi produzido em linguagem de programação C e C++ (APÊNDICE 1). Após a compilação realizada na interface de desenvolvimento, o programa foi enviado para o “hardware” para execução.

O programa desenvolvido para o ARDUINO na IDE é formado por duas partes bem distintas: “Setup” e “Loop”. A função “Setup” é responsável pela inicialização da placa e do programa que foi desenvolvido. Esta etapa é executada apenas uma vez quando a placa é ligada, a fim de informar ao “hardware” o que será executado. A entrada analógica A2, foi conectado o sensor de fluxo.

O programa escrito dentro da função “Loop” é executado indefinidamente linha por linha, ou seja, após a execução da sua última linha, o programa inicia novamente a partir da primeira linha da função “Loop” e continua sua execução até que a placa seja desligada ou o botão de “reset” seja pressionado.

Após o completo desenvolvimento do programa realizou-se a compilação (transformar o código escrito em linguagem de máquina). Nesta etapa é verificado se não há erro no código escrito, após esta verificação é que se torna possível o envio do programa para a placa através do comando “upload”. Em seguida, o ARDUINO começa a executar o programa.

4.3 Tratamentos dos dados coletados

A lógica de programação do *arduino* foi desenvolvida para coletar uma medida de vazão por segundo durante um minuto a fim de determinação de vazão média para cada ponto. Em paralelo foi registrado as pressões positivas na tubulação de recalque e negativas na tubulação de sucção para cada ponto. Os dados foram apresentados em tabelas.

A partir dos dados tabelados plotou-se as curvas típicas das bombas centrifugas de 1 e 2 utilizando o software gráfico O'origin. Os valores de altura manométrica serão apresentados na unidade metros de coluna d'agua (m.c.a) e a vazão em litros por minuto (lpm).

A partir dos dados coletados de pressão e vazão se elaborou gráfico de dispersão para determinação da equação característica da distribuição e o coeficiente de determinação, R^2 .

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A bancada apresentou a configuração final conforme figura 18 ilustrada abaixo.

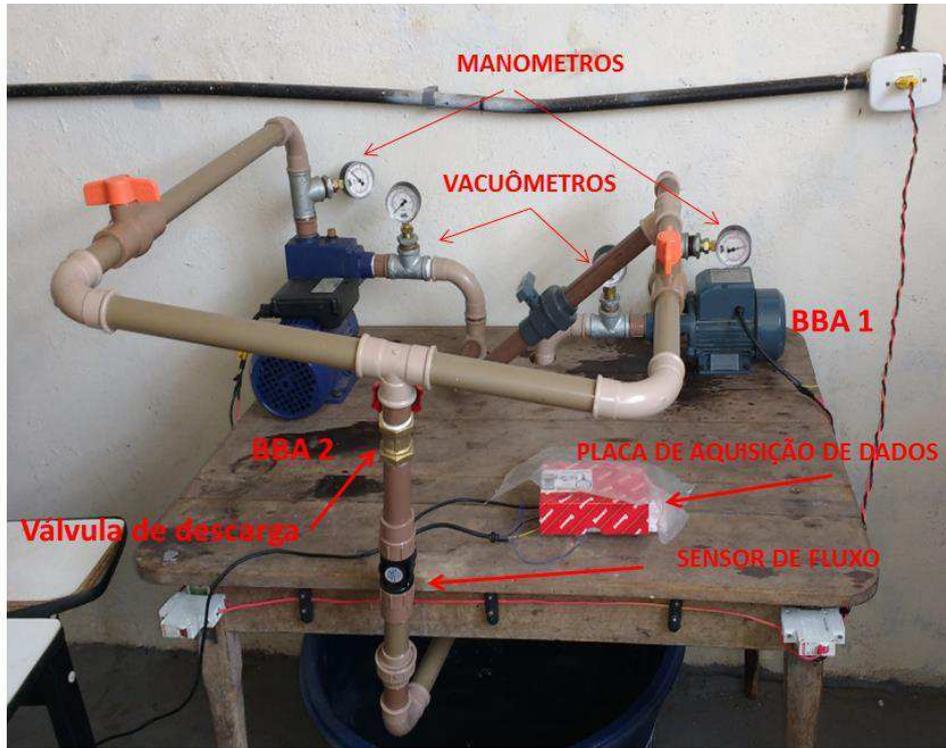


Figura 18 - Configuração final da unidade experimental (Fonte: Próprio autor).

Os dados coletados para definição das curvas características da BBA 1 e BBA 2 seguem listados a seguir:

Tabela 2 – Dados de pressão manométrica, de vácuo e diferença nível da BBA 1

	Pressão de Vácuo (mmHg)	Pressão Manométrica (kgf/cm ²)	ΔH (m)
Ponto 1	100	0,20	0,05
Ponto 2	85	0,70	0,05
Ponto 3	75	1,00	0,05
Ponto 4	65	1,25	0,05
Ponto 5	0	1,75	0,05

Tabela 3 – Dados de pressão manométrica, de vácuo e diferença nível da BBA 2

	Pressão de Vácuo (mmHg)	Pressão Manométrica (kgf/cm ²)	ΔH (m)
Ponto 1	50	0,3	0,05
Ponto 2	35	0,6	0,05
Ponto 3	25	1,2	0,05
Ponto 4	15	2,8	0,05
Ponto 5	0	5,0	0,05

A partir dos dados coletados foi possível determinar a altura manométrica total utilizando o balanço global de energia mecânica proposto por Bernoulli das bombas BBA-1 e BBA-2. Os resultados são apresentados na tabela 4 e 5 a seguir:

Tabela 4 – Altura manométrica e vazão da bomba BBA 1

	Altura manométrica (m.c.a)	Vazão (L/min)
Ponto 1	3,41	15,91
Ponto 2	8,22	11,36
Ponto 3	11,09	5,55
Ponto 4	13,46	2,37
Ponto 5	17,59	0

Tabela 5 – Altura manométrica e vazão da bomba BBA 2

	Altura manométrica (m.c.a)	Vazão (L/min)
Ponto 1	3,73	22,38
Ponto 2	6,53	20,34
Ponto 3	12,41	16,44
Ponto 4	28,30	8,08
Ponto 5	50,15	0

A partir da determinação da altura manométrica e vazão de cada ponto foi possível definir a curva característica para as bombas BBA 1 (0,5 CV) e BBA 2 (1 HP) conforme ilustrado nas figuras abaixo.

Curva Característica - Altura Manométrica x Vazão - Bomba BBA 1 (0,5 CV)

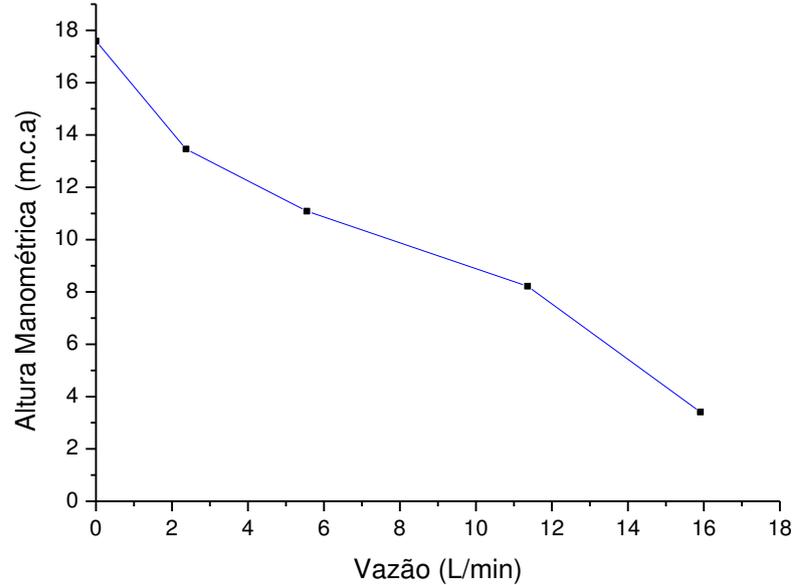


Figura 20 - Curva Característica – Altura Manométrica x Vazão – Bomba BBA 1 (0,5 CV). Fonte: (Fonte: Próprio autor).

Curva Característica - Altura Manométrica x Vazão - Bomba BBA 2 (1 HP)

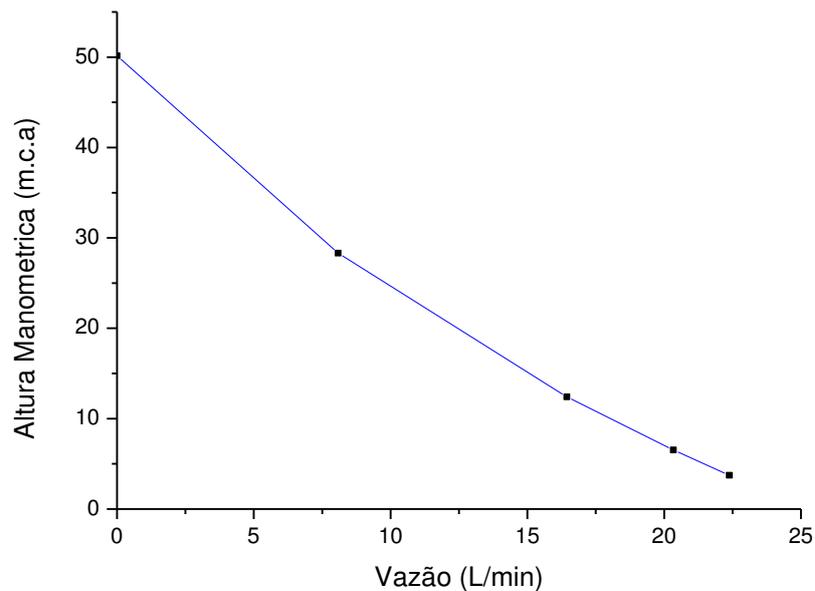


Figura 21 - Curva Característica – Altura Manométrica x Vazão – Bomba BBA 2 (1 HP). Fonte: (Fonte: Próprio autor).

As curvas tanto da BBA-1, quanto BBA – 2 apresentaram comportamento polinomial de 2º ordem com concavidade para cima.

As alturas manométricas fornecidas pelos fabricantes de 20 m.c.a para a BBA-1 não foram observadas experimentalmente, onde a altura manométrica máxima alcançada foi de 17,58 m.c.a, o que corresponde a 87,9%. Enquanto que para a bomba BBA-2, o fabricante informa que a altura manométrica máxima seria de 55 m.c.a, porém experimentalmente foi observado 50,15 m.c.a, valor que representa 91,18%.

Enquanto que a vazão máxima registrada para BBA-1 foi de 15,91 L/min valor este que representa apenas 49,71 % da vazão informada pelo fabricante, enquanto que para a BBA-2 a vazão máxima registrada foi de 22,38 L/min que representa 49,7% da vazão máxima informada pelo fabricante.

A equação polinomial que representa a relação de vazão e altura manométrica da bomba BBA 1 é expressa pela equação 2. O coeficiente de determinação, R^2 , obtido para a equação foi de 0,9672, que indica que a variável independente (vazão) explica 96,72% da variável dependente (altura manométrica).

$$H_{\text{man}} = 0,0114Q^2 - 0,9861Q + 16,738 \quad (2)$$

Onde H_{man} : altura manométrica em m.c.a e Q = vazão volumétrica em L/min.

O gráfico de dispersão utilizado para obtenção da equação e do coeficiente de determinação, R^2 , pode ser visto na figura 22.

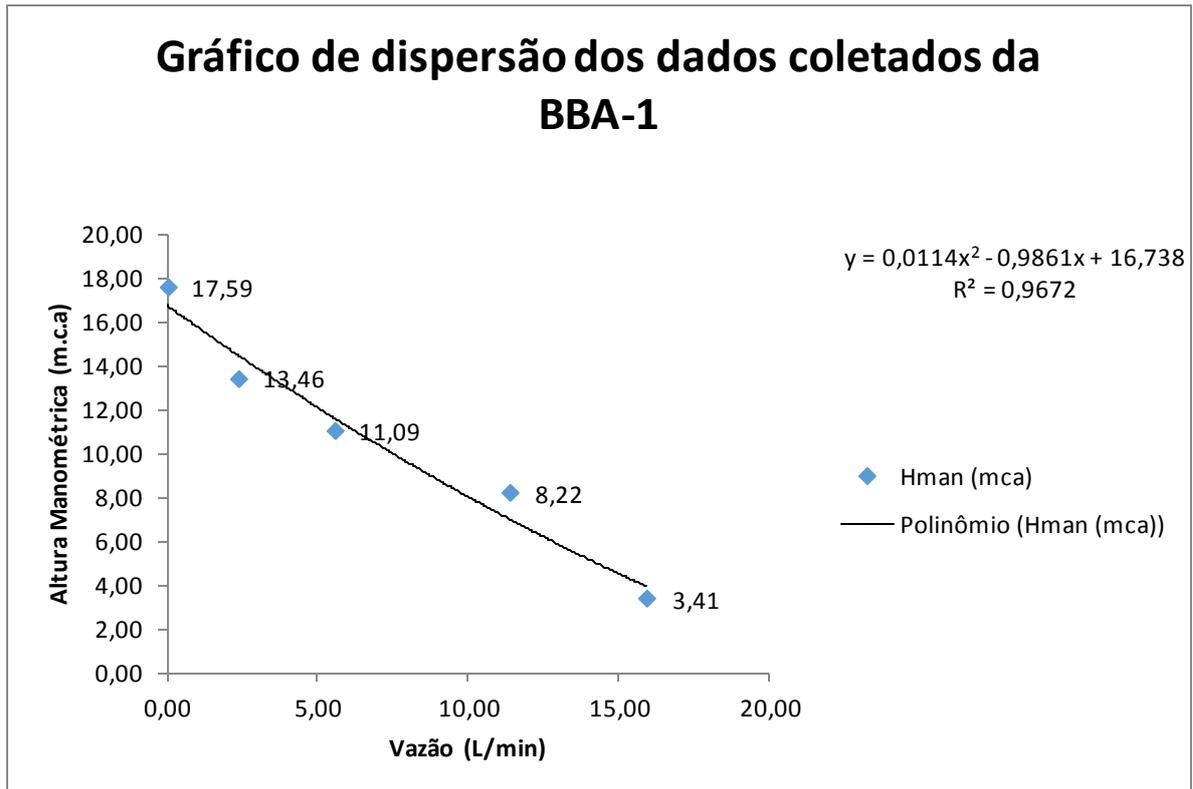


Figura 22 – Gráfico de dispersão dos dados coletados da BBA -1. Fonte: Próprio autor.

A equação polinomial que representa a relação de vazão e altura manométrica da bomba BBA 2 é expressa pela equação 2. O coeficiente de determinação, R^2 , obtido para a equação foi de 0,9998, que indica que a variável independente (vazão) explica 99,98% da variável dependente (altura manométrica).

$$H_{man} = 0,0416Q^2 - 2,9916Q + 50,053 \quad (3)$$

Onde H_{man} : altura manométrica em m.c.a e Q = vazão volumétrica em L/min.

O gráfico de dispersão utilizado para obtenção da equação e do coeficiente de determinação, R^2 , pode ser visto na figura 23.

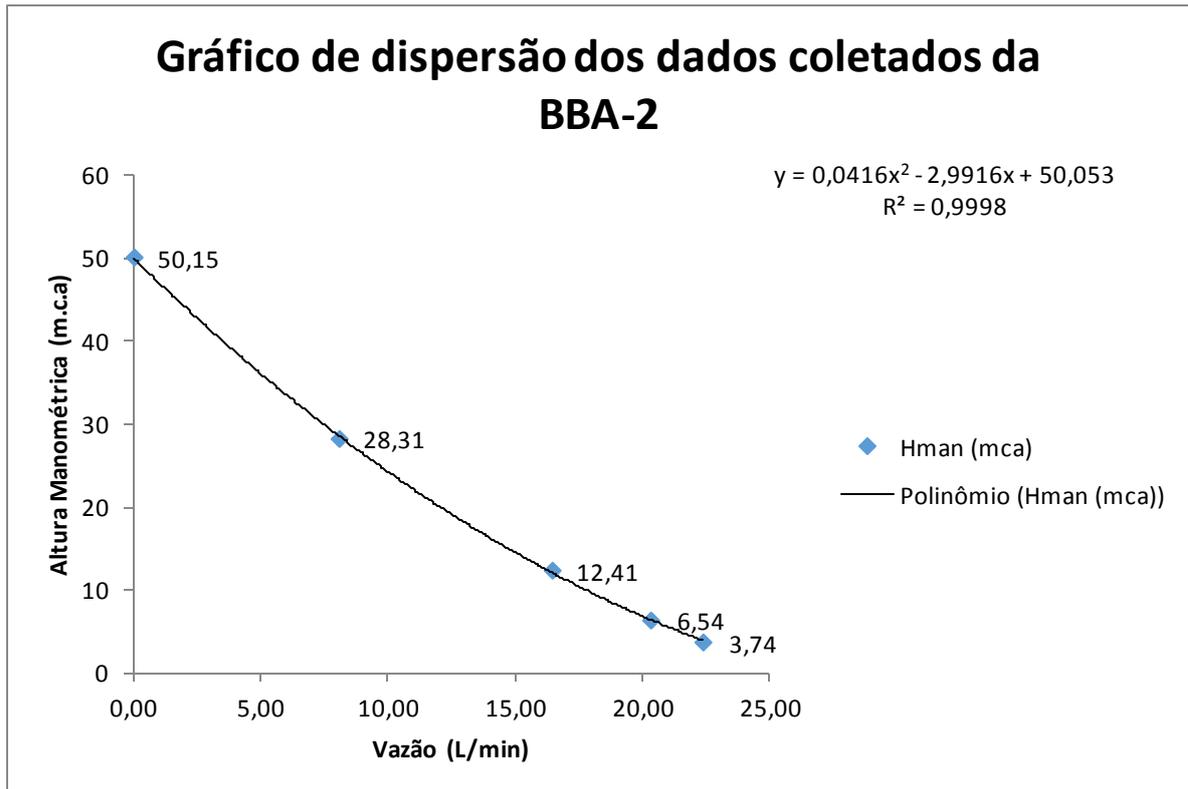


Figura 23 – Gráfico de dispersão dos dados coletados da BBA -2. Fonte: Próprio autor.

A partir dos dados levantados, foi possível perceber que a variação da área através da restrição controlada pelo fechamento da válvula de descarga tem uma relação inversamente proporcional com a pressão manométrica, ou seja, a medida que a área de seção transversal foi reduzida se percebia aumento da pressão positiva, está que variou de 0,2 kgf/cm², com válvula de descarga totalmente aberta, à 1,75 kgf/cm², com válvula de descarga totalmente fechada (pressão de *shut off*), para a bomba BBA – 1, e de 0,3 kgf/cm² à 5 kgf/cm² para a bomba BBA-2. A pressão de vácuo, medida na tubulação de sucção, apresentou relação diretamente proporcional com a restrição da válvula de descarga, enquanto se diminui a área da secção transversal da tubulação de recalque, reduzia-se a pressão negativa, variando de 100 mmHg, com válvula totalmente aberta, à 0 mmHg, com válvula totalmente fechada para a BBA-1. Já na BBA-2 a pressão de vácuo variou de 50 mmHg a 0 mmHg.

Em relação à vazão, verificou que a mesma tem relação diretamente proporcional a variação da área, ou seja, à medida que a área aumenta a vazão também aumenta, em função de que a velocidade foi mantida constante,

comprovando o que estabelece a lei da conservação da massa através da equação da continuidade na forma reduzida ou simplificada (equação 4), quando se tem massa específica constante, desprezando as variações de temperatura, altura e velocidade (FOX e McDonald, 2010).

$$Q = V.A \quad (4);$$

Onde Q é a Vazão volumétrica; V a velocidade do escoamento e A área de secção transversal.

6. CONCLUSÃO

A proposta deste trabalho foi a construção de uma unidade experimental, para a execução de testes com bombas centrífugas, com a possibilidade de alterar os valores das variáveis, altura manométrica e vazão, como também de realizar a manobra do funcionamento do circuito tanto para operação em série, quanto em paralelo.

Observou-se, através dos experimentos a aplicação prática da teoria de Bernoulli e conservação da massa.

A metodologia de utilização do sensor de fluxo controlado pela lógica desenvolvida no arduino revelou-se eficiente por apresentar margem de erro de 0 a 2% e ter um custo de 18,25% de um instrumento convencional de medição de vazão como por exemplo, o rotâmetro.

Com a execução dos testes ficou evidenciado que os dados fornecidos pelos fabricantes de bombas centrífugas, não atendem em sua totalidade. Isto se torna um inconveniente, quando em alguns casos em que, consumidores adquiram estes produtos e não atendam projetos, caso estejam dimensionados em igual aos dados de placa da bomba, podendo não atender em vazão requerida ou em altura manométrica total.

Das bombas ensaiadas, a BBA-1 apresentou apenas 87,9% da capacidade de altura manométrica informada pelo fabricante, enquanto a BBA-2 91,18%. A diferença entre valores informados pelo fabricante e os coletados experimentalmente é maior para a vazão volumétrica, onde os valores não chegaram nem a 50%.

Desta forma, o desenvolvimento das equações polinomiais relacionadas aos valores de vazão volumétrica e alturas manométricas mostraram-se mais fiéis aos valores coletados experimentalmente, apresentando um coeficiente de determinação de 96,72% para BBA-1 e 99,98% para BBA-2, demonstrando ser uma ferramenta essencial para auxiliar a atividade do projetista de bombas centrífugas.

7. REFERÊNCIAS

ANDRADE, A. S. Máquinas Hidráulicas AT – 087. Paraná. Curso de Engenharia industrial de madeira. 2012. Disponível em: Acesso em: 01 jun. 2013.

BIANCHI, A. R. Z.; OLIVEIRA, B. C.; ANJOS, D. S.; RAIZ, F. P.; FERREIRA, G.; MARQUES, L. Bancada para teste de filtro. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. São Caetano do Sul – SP. 2013.

BRUNETTI, Franco, Mecânica dos Fluidos / 2ª Ed., São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2008.

FOX, Robert W. Introdução à mecânica dos fluidos. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

GERNER, V. R. Bombas. 1 ed. Brasília. Instituto Evaldo Lodi Do Distrito Federal. 2007. Disponível em: <<http://migre.me/fE91l>> Acesso em: 01 jun. 2013.

MACINTYRE, A. J. “Bombas e Instalações de Bombeamento” - Editora Guanabara Koogan S.A. 1997; RJ

MATTOS, E. E. de; DE FALCO, R. Bombas industriais. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998, 474p.

MORAES Jr., D., SILVA, E. L., MORAES, M. S. Aplicações Industriais de Estática e Dinâmica dos Fluidos I. São Paulo – SP, 2011.

NASCIMENTO, E; Construção de uma bancada didática de ensaios de bombas em série e bombas em paralelo. Universidade Federal do Pará, Campus de Tucuruí, Faculdade de Engenharia Mecânica, Trabalho de Conclusão de Curso, 2012. 63p, il.

QUIRINO, J. L. C. Bombas: guia básico/ Eletrobrás [et. al]. Brasília: IEL/NC, 2009. 239p.

RIBEIRO FILHO, P. R. C. F. Desenvolvimento de uma unidade experimental para estudo tribológico de desgaste de contato lubrificado por gotejamento de óleos vegetais. 2014. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Santa Cecília, Santos, São Paulo. 2015.

SILVA, M. A. Seleção e aplicação de bombas centrífugas. KSB. São Paulo – SP, 2003.

8. APÊNDICE

APÊNDICE 1 - Lógica para controle do sensor de fluxo para *Arduino*

```
float vazao; //Variável para armazenar o valor em L/min
float media=0; //Variável para tirar a média a cada 1 minuto

int contaPulso; //Variável para a quantidade de pulsos

int i=0; //Variável para contagem

void setup()
{
  Serial.begin(9600); //Inicia a serial com um baud rate de 9600

  pinMode(2, INPUT);

  attachInterrupt(0, incpulso, RISING); //Configura o pino 2 (Interrupção 0) para
trabalhar como interrupção

  Serial.println("\n\nInicio\n\n"); //Imprime Inicio na serial
}

void loop ()
{
  contaPulso = 0; //Zera a variável para contar os giros por segundos

  sei(); //Habilita interrupção

  delay (1000); //Aguarda 1 segundo
```

```
cli(); //Desabilita interrupção

vazao = contaPulso / 7.5; //Converte para L/min

media=media+vazao; //Soma a vazão para o calculo da media
i++;

Serial.print(vazao); //Imprime na serial o valor da vazão

Serial.print(" L/min - "); //Imprime L/min

Serial.print(i); //Imprime a contagem i (segundos)

Serial.println("s"); //Imprime s indicando que está em segundos

if(i==60)
{
  media = media/60; //Tira a media dividindo por 60

  Serial.print("\nMedia por minuto = "); //Imprime a frase Media por minuto =

  Serial.print(media); //Imprime o valor da media

  Serial.println(" L/min - "); //Imprime L/min

  media = 0; //Zera a variável media para uma nova contagem

  i=0; //Zera a variável i para uma nova contagem

  Serial.println("\n\nInicio\n\n"); //Imprime Inicio indicando que a contagem iniciou
}
```

```
}
```

```
void incpulso ()  
{  
    contaPulso++; //Incrementa a variável de contagem dos pulsos  
}
```