



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



Readequação da prática de Laboratório de Engenharia Química: Associação de Bombas

Autor: Felipe Segismundo Oliveira



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**



Readequação da prática de Laboratório de Engenharia Química: Associação de Bombas

Autor: Felipe Segismundo Oliveira

**Monografia de graduação apresentada à
Universidade Federal de Uberlândia
como parte dos requisitos necessários
para a aprovação na disciplina do
Projeto de Graduação do curso de
Engenharia Química.**

Uberlândia – MG
2017

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA MONOGRAFIA DA DISCIPLINA DE
GRADUAÇÃO DE FELIPE SEGISMUNDO OLIVEIRA, APRESENTADA À
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, EM 04 DE SETEMBRO DE 2017.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte
Orientador – FEQUI/UFU

MSc. Marcela V. Caixeta Machado
PPGEQ/UFU

MSc. Suellen Mendonça Nascimento
PPGEQ/UFU

Sumário

RESUMO	i
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo Geral	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Definição, Classificação e Aplicação Industrial de Bombas.....	2
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1 Funcionamento de Bombas Centrífugas.....	5
2.2 Sistemas de Bombeamento e Perdas de Carga	8
2.3 Curvas Características	10
2.4 NPSH e Cavitação.....	12
2.5 Associação de Bombas.....	15
CAPÍTULO 3 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	19
3.1 Materiais Utilizados	19
3.2 Montagem da Unidade e Adaptações Feitas	19
3.3 Teste Proposto	24
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
4.1 Teste Preliminar	26
4.2 Resultados Obtidos pelos Alunos.....	29
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES	33
5.1 Conclusões	33
5.2 Sugestões.....	34
ANEXOS.....	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

RESUMO

O presente trabalho foi proposto devido à percepção da necessidade de se readequar a prática de Laboratório de Engenharia Química destinada ao tema de associação de bombas centrífugas, dado sua relevância no ramo industrial. Primeiramente, apresentou-se uma breve contextualização sobre sistemas de bombeamento, no geral, e suas aplicações na indústria química, com destaque para a utilização de bombas centrífugas. Em seguida, são abordadas as teorias que regem o funcionamento destas máquinas, discutindo-se sobre como as energias mecânicas, de pressão e cinética se convertem no equipamento e passam para o fluido bombeado, além da perda de carga empregada pelas tubulações, o conceito de NPSH e o fenômeno da cavitação. Em seguida, apresenta-se a teoria e as particularidades acerca da associação destas bombas em série e em paralelo. Após estes apontamentos, começa-se a discutir os problemas de projetos avaliados na unidade original, e propõe-se a troca do sistema de leitura de carga manométrica de manômetros tubo em U por um sistema eletrônico com sensores de pressão e monitoramento via *LabVIEW*. Com a unidade readaptada, apresenta-se um novo teste para levantamento das curvas características das bombas operando individualmente e conectadas entre si, o qual apresentou resultados qualitativamente condizentes com a literatura. Por fim, levou-se esta prática às aulas de laboratório, a partir das quais avaliou-se os resultados obtidos por três grupos de alunos, mostrando também uma performance satisfatória da nova unidade experimental, porém com algumas oportunidades de melhoria, já que a reprodutibilidade do comportamento das bombas isoladas sofreu alguns desvios quantitativos.

Palavras-chave: *bombas centrífugas, associação, unidade experimental, curva característica.*

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Os alunos do curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia têm tido a oportunidade de estudar e projetar, durante sua graduação, sistemas que envolvem o deslocamento de fluidos, pois estes são muito importantes e presentes no dia-a-dia de diversos setores da indústria química (vide item 1.3). O primeiro contato se dá na disciplina Fenômenos de Transporte, na qual são apresentados a Equação de Bernoulli e métodos de se calcular a perda de carga devido ao atrito em trechos retos e em acidentes das tubulações. Já na disciplina Operações Unitárias 1, os alunos veem mais detalhadamente a seleção e dimensão de sistemas de bombeamento, incluindo bombas centrífugas, linhas de sucção e recalque e a associação dessas bombas. Após esta aprendizagem teórica, na disciplina Laboratório de Engenharia Química 1 (LEQ 1), os discentes deveriam ter a oportunidade de observar seus efeitos na prática, a fim de adquirirem maior domínio sobre o assunto. Entretanto, a unidade referente a esta operação unitária não estava adequada para uso devido a falhas técnicas.

A importância de um engenheiro químico estudar e entender os sistemas de bombeamento com maior propriedade é um reflexo da dependência que a sociedade humana sempre possuiu pela necessidade de se transportar e distribuir a água (elemento fundamental para a vida), desde a Antiguidade, principalmente para promover a agricultura e, após a Revolução Industrial, incluindo-se o intuito de viabilizar a transformação de matérias-primas em produtos industrializados. No século XIX, a geração de energia por motores térmicos e elétricos aliados ao crescimento acelerado da população urbana e desenvolvimento industrial só se tornaram possíveis devido ao uso de bombas, as quais foram adquirindo maior prestígio ao longo dos anos. Dessa forma, um processo contínuo de aprimoramento na fabricação e performance destes equipamentos se fez necessário, e seus fabricantes conseguiram torná-los itens confiáveis, eficientes e econômicos (YANNOPOULOS et al., 2015). Estudos indicam também que melhores condições de saúde e conforto da sociedade moderna foram frutos do desenvolvimento tecnológico das bombas hidráulicas, pois são os instrumentos que viabilizaram o tratamento de esgotos sanitários e água para consumo humano, a construção de dragagens e até mesmo o bombeamento de substâncias mais viscosas, voláteis e abrasivas (ELETROBRÁS et al., 2009).

Atualmente, bombas a pistão, centrífugas e a vácuo, inclusive, representam as opções mais avançadas e consolidadas existentes no que se refere à manipulação de líquidos e, apesar de todo o desenvolvimento técnico, essas bombas funcionam utilizando conceitos já existentes na Idade Antiga, que se baseiam simplesmente em encontrar formas de elevar a energia potencial ou cinética do líquido bombeado, sendo a maior diferença entre elas, a maneira de se aplicar a energia necessária (KYRIAKOPOULOS, 2015).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O presente trabalho visa promover uma maior familiaridade e entendimento sobre sistemas de bombeamento por parte dos alunos do curso de Engenharia Química, devido à sua ampla utilização nas indústrias químicas.

1.2.2 Objetivos Específicos

Identificar os problemas de projeto da unidade experimental, bem como listar e implementar possíveis soluções e propor um novo roteiro para a prática. Finalmente, objetivou-se colocar a unidade em uso nas aulas de Laboratório de Engenharia Química I.

1.3 Definição, Classificação e Aplicação Industrial de Bombas

Entende-se por bomba hidráulica, qualquer máquina que receba trabalho mecânico de uma fonte motora e ceda parte desta energia ao líquido bombeado, conferindo-lhe energia de pressão e /ou cinética, com o intuito de transportar este fluido por escoamento. Geralmente, é utilizada em circuitos hidráulicos, onde a ação mecânica cria um pequeno vácuo em sua entrada e, assim, a pressão atmosférica atuante impulsiona o líquido para o interior da bomba, através da tubulação de sucção. O líquido, então, preenche a bomba e é descarregado no bocal de descarga, conectado a outra tubulação, já com um ganho de pressão ou velocidade. Quanto ao fluxo empregado, as bombas podem ser classificadas como positivas, as quais realizam fluxo pulsante, ou não-positivas, com fluxo contínuo. Já quanto à maneira em que se transforma o trabalho mecânico em energia hidráulica, existem dois grupos mais abrangentes: as bombas de deslocamento positivo (hidrostáticas ou volumétricas) e as centrífugas (hidrodinâmicas ou turbobombas), que se enquadram na categoria de não-positivas (BRASIL, 2010). As

particularizações destes dois grupos são apresentadas a seguir, segundo informações do Hydraulic Institute:

a) Bombas de Deslocamento Positivo: o volume de líquido empregado relaciona-se diretamente com a velocidade do deslocamento do dispositivo mecânico de impulsão (êmbolo, pistão, parafuso, engrenagens, entre outros). São indicadas para bombeamento com altas pressões que requerem vazão praticamente constante e também para fluidos viscosos. Podem ser subdivididas em bombas alternativas e rotativas. Para as alternativas, a vazão do líquido é função do volume de líquido movimentado pelo pistão no cilindro e o número de golpes do pistão por unidade do tempo. As rotativas podem ser entendidas com uma série de bombas volumétricas, nos quais a taxa volumétrica relaciona-se com o preenchimento dos espaços entre o rotor e a carcaça, induzido pelo movimento rotativo do dispositivo de impulsão.

b) Bombas Centrífugas ou Turbobombas: a movimentação do líquido ocorre pela ação de forças que se desenvolvem na massa do líquido, devido à rotação de um rotor dotado de pás que recebe o líquido pelo centro e o expulsa pela periferia (movimento centrífugo). Podem ser subdivididas dependendo de como ocorre a movimentação do fluido dentro da bomba, podendo ser paralela ao eixo do rotor (axial), perpendicular ao eixo do rotor (radial) ou em diagonal em relação ao eixo (fluxo misto). São indicadas para bombeamento com altas vazões, pressões moderadas e baixa viscosidade (água limpa).

Com esta gama de variedades e suas diferentes características, é também esperado que elas sejam utilizadas em uma série de operações industriais, em diferentes ramos do mercado. A seguir são apresentadas apenas algumas de suas aplicações na indústria química, a fim de comprovar a importância de um futuro engenheiro químico poder conhecer na prática esta operação unitária. Os dados apresentados no Quadro 1.1 são resultados de um compilado de serviços oferecidos por três grandes fornecedores de bombas industriais: PH BOMBAS, SULZER e OMEL.

Quadro 1.1 - Lista de operações envolvendo a utilização de bombas hidráulicas, por áreas industriais.

Tipo de Indústria / Área de Atuação	Processos Envolvidos	Fabricante
Fertilizantes	Acidulação, granulação, concentração, transferência de ácidos e transferência de efluentes.	PH Bombas
Siderurgia e Metalurgia	Processos de tratamento de metais (decapagem, galvanização, anodização, cobreamento, bronzeamento, zincagem), transferência de ácidos e transferência de efluentes.	PH Bombas
Controle de Poluição	Lavadores de gases e tratamento de efluentes.	PH Bombas
Água e Esgoto	Transporte e produção a alturas elevadas, dessalinização de água do mar, coleta de águas residuais, drenagem, irrigação, controle de enchentes e tratamento de água e esgoto municipais.	Sulzer
Papel e Celulose	Bombeamento de polpa em suspensão e aditivos químicos.	Sulzer
Geração de Energia	Alimentação de caldeira, extração de condensado, hidroarmazenamento bombeado, bombeamento de segurança (em ilhas nucleares) e geração de energia hidroelétrica, solar e geotérmica.	Sulzer
Alimentos e Bebidas	Bombeamento de polpa de frutas, extratos, laticínios, molhos, óleos, margarinas, cerveja, refrigerante, xarope, água mineral, vinho, etc. Além da produção de açúcar, amido e adoçante.	Omel
Cosméticos	Bombeamento de sabonetes líquidos, shampoos, esfoliantes, pasta dental, cremes, desodorantes, perfumes, álcool gel, lubrificantes, etc.	Omel

CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste trabalho, foram avaliados o comportamento de uma linha de bombeamento operando com duas bombas centrífugas. Dessa forma, aborda-se neste capítulo as particularidades teóricas envolvendo este tipo de máquina hidráulica, passando pelas funções de seus principais componentes, as relações que a tubulação e o líquido bombeado (água) estabelecem para seu bom funcionamento, as curvas características que descrevem seu comportamento e, por fim, a teoria envolvendo o tema da prática de Laboratório de Engenharia Química, que é a avaliação de duas bombas centrífugas associadas.

2.1 Funcionamento de Bombas Centrífugas

Antes de entender como as energias (mecânica, cinética e de pressão) se processam dentro de uma bomba centrífuga, é mais conveniente conhecer as principais peças que compõem esse tipo de equipamento e suas finalidades técnicas. De acordo com o material BOMBAS: GUIA BÁSICO (2009), define-se as seguintes características para cada componente base de uma turbobomba:

- a) Rotor ou Impelidor: é um componente giratório da bomba, dotado de pás (palhetas ou hélices) que quando acionado pela fonte externa de energia, gira em alta velocidade, aspirando o líquido devido à depressão criada em sua região central e recalçando-o na sua região periférica, efeito causado pela força centrífuga.
- b) Voluta, Difusor ou Coletor: o líquido expelido pelo rotor é encaminhado à voluta, que se constitui de um canal com seção crescente, direcionando o fluido à tubulação de recalque com menor velocidade e amenizando a perda de carga nesta conexão.
- c) Carcaça: é toda a parte externa da voluta, que dá forma à bomba e envolve as peças internas.
- d) Eixo: a função básica do eixo é transmitir o torque recebido do motor elétrico para o rotor, além de servir como suporte para o próprio rotor e outras partes rotativas da bomba.
- e) Luva protetora do eixo: protege o eixo contra corrosão, erosão e desgaste, causado pelo líquido bombeado e no contato com a região do engaxetamento.
- f) Gaxetas: sua principal função é evitar a passagem da água do interior da carcaça, onde se encontra o rotor, para os pontos mais externos e, ao mesmo tempo, evitar a entrada de ar na bomba. São feitas de material facilmente moldável e plástico, para que possam ser

ajustadas, geralmente construídas de fios trançados de fibras vegetais (juta, rami, algodão), minerais (amianto) ou sintéticas. Devido a esta natureza semiplástica, é possível controlar o gotejamento de uma bomba, por exemplo, apertando-se os anéis de gaxeta. É importante que resistam ao calor e ao atrito com o eixo ou com a luva protetora do eixo e são especificadas pelo fabricante de acordo com o fluido a ser bombeado, a temperatura e a pressão de operação. Para pressões muito grandes ou caso o líquido bombeado seja inflamável, corrosivo, explosivo, tóxico ou quando é proibido o seu vazamento por qualquer motivo, deve-se utilizar selos mecânicos ao invés de gaxetas.

g) Mancal: elemento cuja função é manter o correto posicionamento axial e alinhamento do conjunto rotativo em relação às partes estacionárias, que se encontram sob cargas radiais e axiais.

h) Anéis de desgaste: fazem a separação entre regiões onde predominam as pressões de descarga e sucção, impedindo um retorno excessivo de líquido da descarga para a sucção. Os anéis são itens de pequeno custo que evitam o desgaste e a necessidade de substituição e compra de peças mais onerosas como o rotor e a carcaça. Bombas menores para serviços leves, como as de bombeamento de líquidos não-abrasivos ou que requerem pouca carga, não possuem anéis de desgaste, pois a folga entre as superfícies da carcaça e do rotor já é suficientemente pequena. Em bombas de maior porte, como essa folga aumenta, os anéis de desgaste costumam ser fornecidos para a carcaça e o rotor. Devem ser trocados quando a folga diametral extrapola os limites definidos pelo fabricante.

i) Acoplamentos: os eixos das bombas são conectados aos eixos dos seus motores por meio de acoplamentos, exceto para bombas de pequeno porte, nas quais o rotor é montado na própria estrutura do eixo do motor. Para bombas mais robustas, o acionador transmite o torque ao conjunto rotativo da bomba através dos acoplamentos.

É importante ressaltar neste ponto que a energia cedida pela bomba ao líquido e a energia que foi recebida pela bomba do motor elétrico não são exatamente iguais, devido ao atrito causado por cada uma destas peças componentes da bomba ao entrar em contato com o fluido. Logo, a relação entre essas conversões de energia determina o rendimento da bomba, levando em consideração a energia dissipada em forma de calor para vencer os empecilhos mecânicos em seu interior. Em vista disto, o rendimento hidráulico das bombas pode variar de 20 a 90% em seu ponto ótimo de trabalho, dependendo do tipo de bomba, do revestimento interno e do fluido bombeado (BRASIL, 2010). Esse dado é muito importante para a seleção

de uma bomba, quando se trata da análise de gasto energético. Um esquema para ilustrar a montagem e o posicionamento destas peças é apresentado na Figura 2.1.

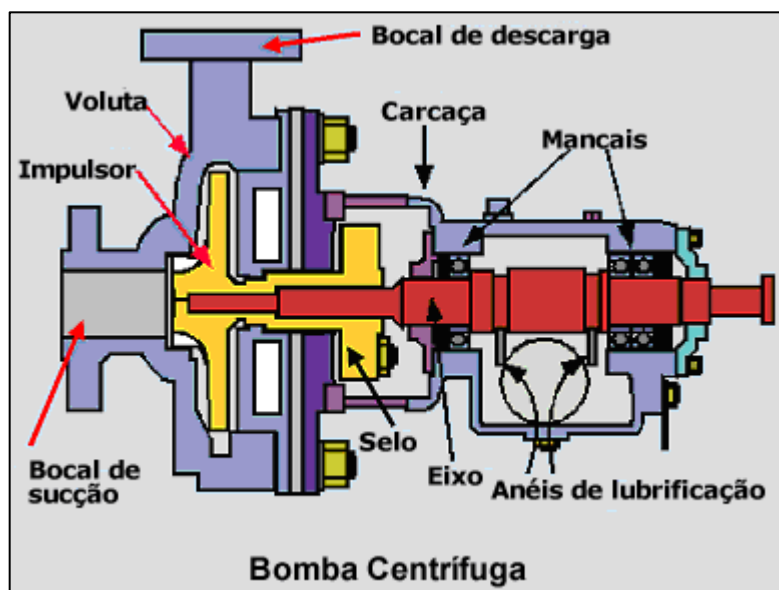


Figura 2.1 – Componentes Gerais de uma Bomba Centrífuga (LIMA, 2012).

A bomba centrífuga, então, funciona com base na criação de duas zonas de pressão, uma de baixa pressão, que acontece na sucção, e uma de alta pressão, que acontece no recalque (descarga de líquido). Para que isto ocorra, é preciso que exista a transformação de energia mecânica, ou de potência, fornecida pelo motor (máquina motriz), primeiramente em energia cinética, conferindo velocidade ao fluido. Na etapa posterior, a energia deve ser transformada em energia de pressão, de forma que o fluido consiga vencer as alturas de deslocamento. Além disso, as turbobombas devem estar totalmente preenchidas com líquido antes de serem acionados seus motores e, para este procedimento, dá-se o nome de escorva. Ao serem postos em movimento rotativo, o rotor e o líquido contido em suas pás, sob a ação da força centrífuga, criam uma zona de maior pressão na periferia do rotor e, conseqüentemente, uma de baixa pressão na sua entrada (ao centro), induzindo o deslocamento do líquido em direção à saída dos canais do rotor, passando pela voluta e, por fim, atingindo o bocal de recalque. Logo, cria-se um gradiente hidráulico entre a entrada e saída da bomba em função da diferença das pressões imperantes sobre ela (LENCASTRE, 2005).

Trazendo um exemplo simples em que se deseja bombear um fluido de um tanque A (alimentação) à pressão atmosférica, conectado ao bocal de sucção da bomba através de uma tubulação aspirante, até um outro tanque B (descarga) localizado a uma certa altura, conectado ao bocal de recalque através de uma tubulação de descarga. Devido a este gradiente hidráulico, a pressão no bocal de sucção acaba se tornando menor do que a pressão existente no tanque A,

o que incita o escoamento do líquido através do tubo aspirante e para dentro da bomba. Ao mesmo tempo, a pressão no bocal de recalque torna-se maior que a pressão estática na base da tubulação de descarga, forçando o escoamento do fluido para uma altura superior. Esse é o princípio de como uma bomba consegue transportar um líquido de um reservatório inferior para um superior.

Finalmente, resumindo-se as relações de energia envolvidas, pode-se concluir que na passagem pelo rotor converte-se energia mecânica (torque) em energia cinética para o fluido e, ao sair do rotor e invadir a voluta, parte da energia cinética adquirida é convertida em energia de pressão, seguindo para a tubulação de descarga.

2.2 Sistemas de Bombeamento e Perdas de Carga

Um sistema de bombeamento é basicamente composto por um acionador (o chamado conjunto motobomba, que nada mais é que a bomba acoplada a seu motor), reservatórios, tubulações de sucção e recalque e o fluido (neste trabalho foi utilizado apenas a água). Como já vimos no item anterior, a bomba é a responsável pelo fornecimento de energia para o transporte da água entre dois reservatórios, sendo capaz de vencer desníveis geométricos. Porém, o que ainda não foi citado e que será abordado neste item é a resistência que a tubulação impõe ao deslocamento do líquido. A tubulação tem a função de oferecer um caminho para o fluido se movimentar, podendo ser constituída de diferentes materiais, como PVC, ferro, aço inoxidável, entre outros, dependendo da aplicação que se deseja. A tubulação de sucção é aquela que se inicia no reservatório de alimentação e termina na entrada da bomba. Já a tubulação de recalque, se inicia na saída da bomba e termina no reservatório receptor (será visto no próximo item que, na prática proposta, utilizou-se um único tanque para alimentar e receber a água bombeada). As tubulações podem possuir várias conexões para interligar grandes trechos retos ou gerar curvas no circuito e também válvulas, com a função de controlar a vazão de água ou alterar o caminho percorrido por ela no circuito. Tais conexões e válvulas são responsáveis por grande parte das perdas do sistema. Logo, o dimensionamento da tubulação e a quantidade de acidentes empregados na sua extensão são de extrema importância no que diz respeito ao consumo de energia do sistema. O comprimento e diâmetro dos tubos utilizados devem ser escolhidos cuidadosamente para evitar desperdícios de energia através das perdas de pressão, o que afeta a vazão de projeto empregada e a potência da bomba necessária (FORTES, 2012). Todos estes fatores influenciam, por fim, o gasto energético da planta. Segundo GOMES et al.

(2008), em razão das perdas de cargas provocadas pelos elementos do sistema, como bombas, válvulas, curvas, cilindros, instrumentos de medição e a própria tubulação, o aproveitamento final da energia fornecida ao circuito hidráulico é de aproximadamente 75%.

As perdas de carga da linha de escoamento podem ser divididas em perda de carga distribuída, que é aquela causada pelo atrito com a tubulação de forma contínua e perda de carga localizada, causada pelos acidentes ou instrumentos adicionais do circuito. Na prática, as perdas de carga localizadas são razoavelmente maiores do que a perda de carga distribuída (FORTES, 2012). Das diversas fórmulas existentes para calcular a perda do primeiro tipo, uma das mais utilizadas e conhecidas é a fórmula de Darcy-Weisbach, principalmente por admitir seu uso para qualquer tipo de fluido incompressível (líquidos) e tubulações de qualquer diâmetro e material. Sua expressão é representada pela Equação 2.1, onde: h_d é a perda de carga distribuída (em unidade de comprimento); f é o coeficiente de atrito, relacionado à rugosidade das paredes internas e o tipo de escoamento (número de Reynolds); L é o comprimento do trecho percorrido; g é aceleração da gravidade; Q é a vazão do fluido e D é o diâmetro do tubo.

$$h_d = \frac{8fLQ^2}{\pi^2 g D^5} \quad (2.1)$$

Para as perdas locais, há duas maneiras bem aplicáveis de calculá-la. A primeira é dada pela Equação 2.2, onde: h_l é a perda de carga localizada (em unidade de comprimento); k é o coeficiente de perda de carga singular, onde cada tipo de peça tem seu valor tabelado (determinado experimentalmente) e é facilmente consultado nos livros e guias sobre hidráulica; e V_m é a velocidade média de escoamento do fluido na tubulação.

$$h_l = \frac{k \cdot V_m^2}{2g} \quad (2.2)$$

A segunda maneira, chamada de Método do Comprimento Equivalente, associa a perda de carga localizada de cada peça a um comprimento equivalente de trecho reto da tubulação, com o mesmo diâmetro de conexão. Seu cálculo pode ser feito de acordo com a Equação 2.3, onde L_{eq} é o comprimento equivalente do acidente e as outras variáveis são as mesmas descritas para a fórmula de Darcy-Weisbach. Estes valores de L_{eq} também são tabelados e de fácil acesso nos livros ou guias técnicos sobre este tópico.

$$h_l = \frac{8fL_{eq}Q^2}{\pi^2 g D^5} \quad (2.3)$$

Os quatro tipos de curvas que podem ser identificados na Figura 2.2 são relativas a um mesmo modelo (HS 65-50-242) e uma mesma frequência de rotação (50 Hz), porém para diferentes tamanhos (diâmetros) do rotor, o que também influencia as características de operação da bomba. A importância de se conhecer essas quatro relações foi muito bem destacada pelo grupo ELETROBRÁS et al. (2009), cujo guia técnico serviu como base para as seguintes considerações:

a) Curva da vazão (Q) *versus* altura manométrica (H): a partir dessa relação consegue-se definir qual o modelo de bomba melhor atende às necessidades do sistema, com maior eficiência no bombeamento e menor consumo de energia.

b) Curva da potência consumida (identificada como P_2 na Figura 2.2): o fabricante gera esta curva a partir de medidas efetuadas no motor elétrico que aciona a bomba em função da vazão. Tais medidas podem ser efetuadas por aparelhos como voltímetro, amperímetro, entre outros, indicando o gasto energético.

c) Curva de rendimento: mostra a relação entre a vazão (Q) e o rendimento da bomba, determinando qual a eficiência obtida para uma determinada vazão, para diferentes diâmetros do rotor. O rendimento é definido pela divisão entre a potência hidráulica da bomba (PH) pela potência consumida da bomba (P ou P_2 , no exemplo dado), expressa em porcentagem. A potência hidráulica é trabalho útil da bomba para deslocar a massa de líquido em uma unidade de tempo.

d) Curva de NPSH: representa a pressão mínima para evitar que pequenas porções do líquido se evaporem e depois condensem no interior da bomba, afetando o rotor. A má interpretação da curva de NPSH leva a um dimensionamento incorreto da tubulação de sucção, podendo originar o fenômeno da cavitação (vide item 2.4). Esta curva fornecida pelo fabricante é conhecida por NPSH requerido ($NPSH_R$), e também é função da vazão de bombeamento.

Outro fator importante a ser considerado é a curva de carga do sistema, que leva em conta o desnível entre os reservatórios de abastecimento e descarga (valor constante se considerado que o nível de água no reservatório de abastecimento praticamente não se altera) e a soma das perdas de carga distribuída (h_d) e localizadas (h_l), as quais são funções da vazão. O ponto de intersecção resultante da união das curvas da bomba e do sistema é o ponto de operação para esta situação específica. No entanto, para efetuar o controle de vazão é preciso que este ponto varie e este efeito pode ser observado de duas formas distintas. A primeira é alterando a curva do sistema através da abertura ou fechamento de uma válvula ou registro. Isto é comprovado pelas tabelas de comprimento equivalente, as quais indicam que uma válvula

gaveta de 2 ½ polegadas, tem comprimento equivalente de 0,5 m de tubulação quando está totalmente aberta e de 15 m de tubulação quando está 50% fechada (MACINTYRE, 2010). Outra forma é alterar a curva da bomba usando um inversor de frequência que, ao mudar a velocidade de rotação do motor, faz com que a bomba se comporte com características diferentes (FORTES, 2012). A Figura 2.3 ilustra a comparação entre estes dois métodos.

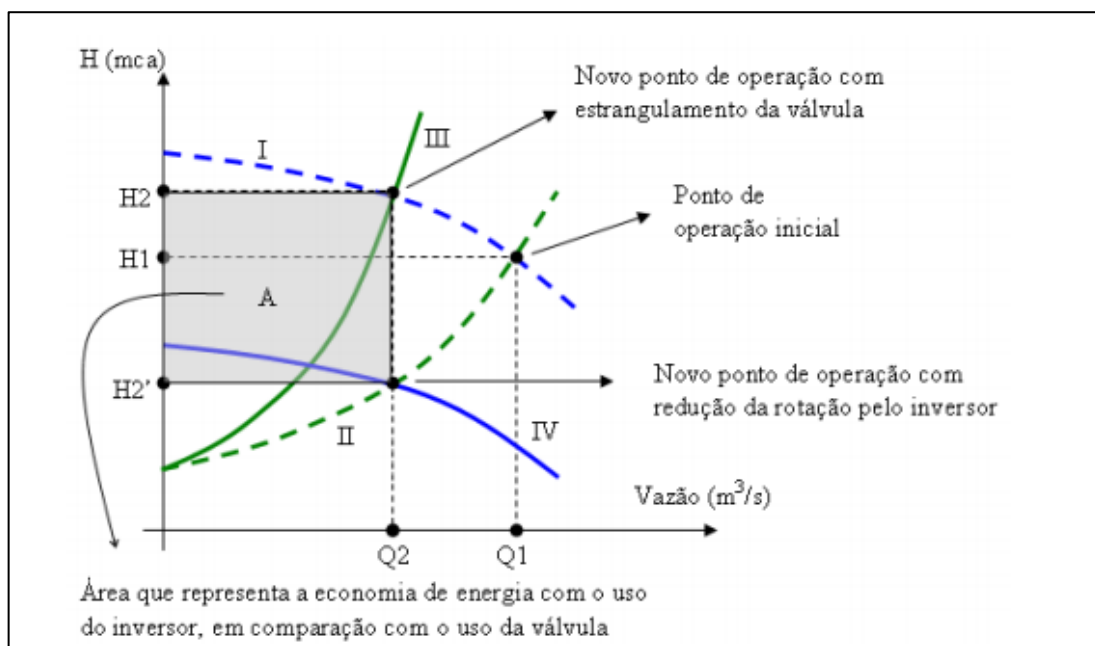


Figura 2.3 – Comparação entre os efeitos da aplicação dos métodos de controle de vazão (JUNIOR, 2006).

O ponto III mostra o novo ponto de operação obtido com a alteração da curva do sistema, devido a um estrangulamento de válvula, mantendo-se a curva da bomba inalterada. O ponto II, entretanto, representa o novo ponto de operação verificado com a alteração da curva da bomba após a redução da frequência de rotação do motor utilizando um inversor de frequência, mantendo a curva do sistema intacta (FORTES, 2012). Na prática analisada neste trabalho, utilizou-se o método do estrangulamento da válvula para controle de vazão.

2.4 NPSH e Cavitação

NPSH é uma sigla em inglês para *Net Positive Suction Head* e representa a energia disponível com que o líquido entra no bocal de sucção da bomba, permitindo que ele tenha força suficiente para atingir a superfície da pá do rotor. Logo, para que o NPSH estabeleça uma

sucção satisfatória, é necessário que a pressão nunca abaixe até atingir o valor da pressão de vapor do líquido em nenhum ponto da tubulação, evitando sua evaporação. A fim de entender a relação do NPSH com o fenômeno da cavitação, deve-se definir dois tipos conceituais dessa grandeza física: o NPSH requerido ($NPSH_R$) e o NPSH disponível ($NPSH_D$). O primeiro, como visto no item 2.3, deve ser obrigatoriamente fornecido pelo fabricante em função da vazão da bomba, na sua curva características do catálogo. Dessa forma, $NPSH_R$ é uma propriedade inerente à bomba, determinada em seu projeto de fabricação, por meio de testes experimentais. Na teoria, é a energia necessária para vencer as perdas de carga entre o bocal de sucção da bomba e as pás do rotor, e gerar a velocidade esperada no líquido. Já o $NPSH_D$, se refere à energia disponível ao líquido, excedente à sua pressão de vapor, em um ponto imediatamente antes do flange de sucção da bomba, a qual depende de como a tubulação de sucção foi projetada (incluindo seu diâmetro, material, rugosidade e acidentes anexos) e da diferença de cotas entre o reservatório de alimentação e a entrada da bomba. Logo, é um parâmetro calculado por quem dimensiona o sistema. A Equação 2.4 representa o cálculo desta variável, onde: H_{atm} é a carga referente à pressão atmosférica local; H_{geo} é a altura geométrica na sucção (positiva quando a bomba estiver afogada, isto é, abaixo do nível do reservatório, e negativa quando estiver acima); H_v é a carga referente à pressão de vapor do fluido (função da temperatura); ΔP_s é a perda de carga total na linha de sucção; e P_{res} é a carga referente à pressão do reservatório de captação (ELETROBRÁS et al., 2009). É válido lembrar aqui que, para se converter o valor de uma pressão à sua carga manométrica (em unidade de comprimento), divide-se seu valor pela gravidade específica do fluido (γ), obtida pela multiplicação entre o peso específico do fluido (ρ) e a aceleração da gravidade (g).

$$NPSH_D = H_{atm} + H_{geo} - H_v - \Delta P_s + P_{res} \quad (2.4)$$

De acordo com GOMES et al. (2008), a cavitação ocorre quando, por algum erro de dimensionamento ou falta de manutenção preventiva, gera-se uma zona de pressão negativa no sistema ou, em outros termos, quando o $NPSH_D$ é menor que o $NPSH_R$. A bomba, ao sugar a água, provoca uma pressão que é chamada de pressão de sucção, a qual deve ser menor que a pressão na superfície do reservatório de captação, a fim de que o perfeito funcionamento da bomba aconteça. Quando isto não ocorre, inicia-se uma intensa formação de bolhas de vapor de água na entrada da bomba, que são levadas pelo fluxo do líquido até alcançarem a região do rotor, onde há um súbito aumento da pressão. Nessas condições, as bolhas se condensam rapidamente, resultando em pequenas implosões sobre a superfície do rotor, o que, com o tempo, acaba causando a erosão e formação de cavidades sobre ele. Essas cavidades podem

ocupar uma área de mais de 20 mm^2 (ELETROBRÁS et al., 2009). As erosões causam o desbalanceamento do rotor e do eixo, causando uma vibração que afeta os mancais da bomba e até mesmo sua carcaça. Deve-se destacar que essas erosões são provocadas mesmo ao bombear água sem nenhum conteúdo abrasivo. Logo, alguns sinais de que uma bomba está cavitando são: sua queda de rendimento, marcha irregular no bombeamento, vibração (devido ao desbalanceamento) e o ruído causado pela implosão das bolhas. Na Figura 2.4 verifica-se uma foto das pás do rotor erodidas pelo efeito da cavitação.



Figura 2.4 – Impulsor danificado pela ação da cavitação (MMTEC, 2017).

Tal fenômeno deve ser evitado por prejudicar o desempenho da bomba e demandar a substituição ou reparo de suas peças com maior frequência. Uma maneira de fazer isso é garantindo que o NPSH_D , referente à linha de sucção seja sempre maior que o NPSH_R da bomba. Pela análise da Equação 2.4, pode-se listar alguns fatores que modificam o NPSH_D , com o objetivo de torná-lo o maior possível e impedir qualquer chance de cavitação. Variar a altura estática de sucção (H_{geo}) parece uma boa alternativa, já que existe um valor máximo possível para o bombeamento se o nível do reservatório estiver abaixo da entrada da bomba e, além disso, se for viável o aumento da altura deste reservatório, obtém-se valores de NPSH_D maiores. A altitude da área de instalação também afeta diretamente esta variável pois, quanto maior a altitude, menor a pressão atmosférica local, o que diminui o NPSH_D . Quanto maior a temperatura do fluido, menor o NPSH_D , pois há um aumento da pressão de vapor da água, uma vez que o líquido fica mais propenso a entrar em ebulição. Qualquer alteração física da tubulação de sucção que aumente sua perda de carga (ΔP_s), como o acréscimo de novos acidentes irá diminuir o NPSH_D . Quando o reservatório de captação for pressurizado, quanto maior o valor desta pressão (manométrica) maior o valor do NPSH_D . Quando a vazão do fluido

sofre um aumento para uma mesma tubulação, isso também eleva a perda de carga e diminui o $NPSH_D$ (LENCASTRE, 2005). O efeito do aumento da vazão na cavitação está ilustrado pela Figura 2.5, na qual pode se observar que o ponto de intersecção entre o NPSH disponível e requerido corresponde à vazão máxima admitida pelo sistema para que a cavitação não aconteça.

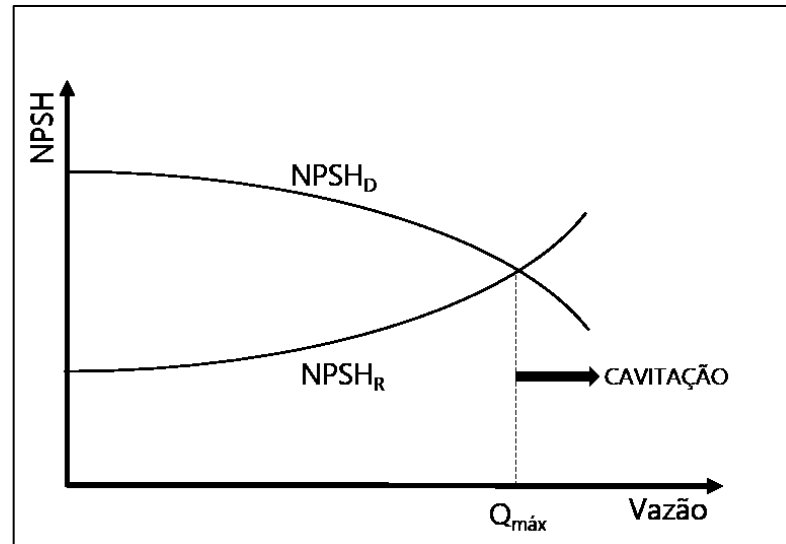


Figura 2.5 – Esquema da variação do NPSH disponível e requerido com a vazão.

2.5 Associação de Bombas

Em unidades de bombeamento e inúmeras aplicações industriais, a demanda de variação de vazão (Q) e de altura manométrica (H) pode ser demasiada alta para que uma única bomba consiga efetuar o trabalho, ainda que se aumente a velocidade do rotor. Para solucionar este problema, é comum associar-se duas ou mais bombas em série ou paralelo. Associadas em série, o sistema ganha em altura manométrica (e não altera sua vazão) enquanto em paralelo, ele opera com vazões mais altas (sem modificar a carga manométrica). As configurações de duas bombas associadas, das duas formas possíveis, são mostradas pelas Figuras 2.6 e 2.7.

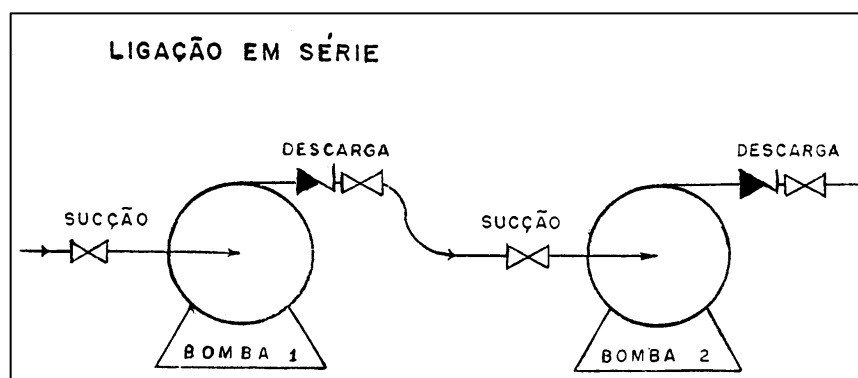


Figura 2.6 – Configuração de duas bombas conectadas em série (PINTO, 2013).

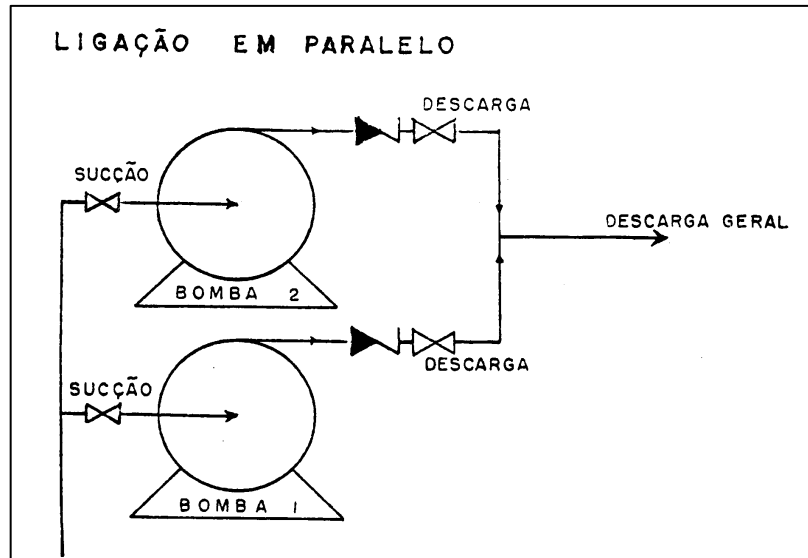


Figura 2.7 – Configuração de duas bombas conectadas em paralelo (PINTO, 2013).

Como muitas vezes não é viável encontrar as equações de altura manométrica em função da vazão, a curva da associação é desenvolvida por método gráfico, utilizando-se as curvas ofertadas nos catálogos dos fabricantes. Dessa forma, há estudos que se dedicam a metodologias implementadas computacionalmente para gerar equações que descrevam da maneira mais fiel possível as curvas características de bombas centrífugas associadas, visto que o procedimento gráfico é bastante trabalhoso e, muitas vezes, impreciso (SANTOS, 2001). Aqui, será exemplificado o método gráfico para que se possa compreender melhor a teoria por trás da obtenção do novo ponto de operação, que é a temática proposta pelo experimento laboratorial analisado neste trabalho. As Figuras 2.8 e 2.9 exemplificam, respectivamente, a obtenção gráfica da curva de bombas conectadas em série e em paralelo.

Na ligação em série, verifica-se o valor das alturas manométricas das duas bombas (H_A e H_B), para um valor de vazão fixo (Q). O valor da altura manométrica da associação (H), para esta vazão fixada, corresponde à soma das alturas encontradas na curva individual de cada bomba ($H=H_A+H_B$). Repete-se este processo para n pontos com diferentes vazões e, finalmente, traça-se uma curva passando por estes pontos, que é a curva da associação em série.

Na ligação em paralelo, verifica-se o valor das vazões das duas bombas (Q_A e Q_B), para um valor de altura manométrica fixa (H). O valor da vazão da associação (Q), para esta altura manométrica fixada, corresponde à soma das vazões obtidas na curva individual de cada bomba ($Q = Q_A + Q_B$). Repete-se este procedimento para n pontos com diferentes alturas manométricas e, finalmente, traça-se uma curva passando por estes pontos, que é a curva da associação em paralelo.

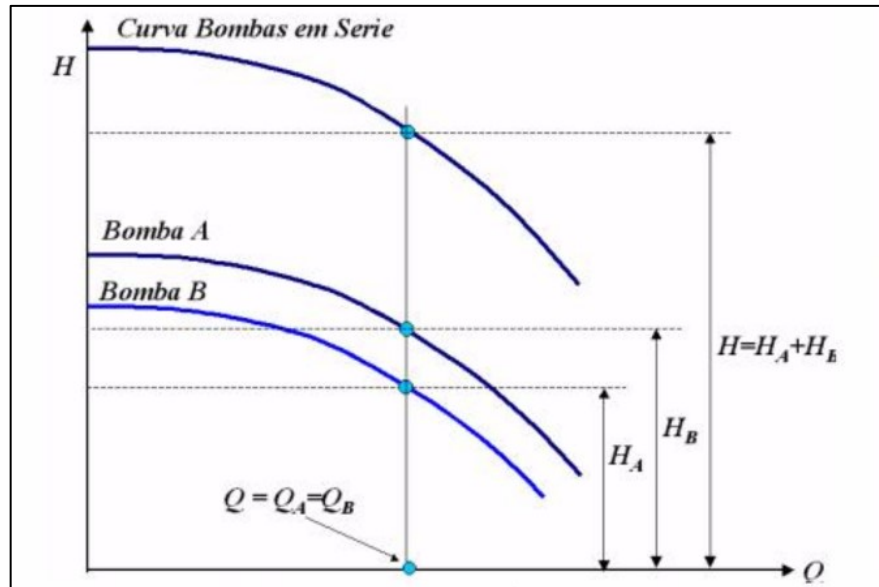


Figura 2.8 – Obtenção gráfica da curva característica de duas bombas associadas em série (ALÉ, 2011).

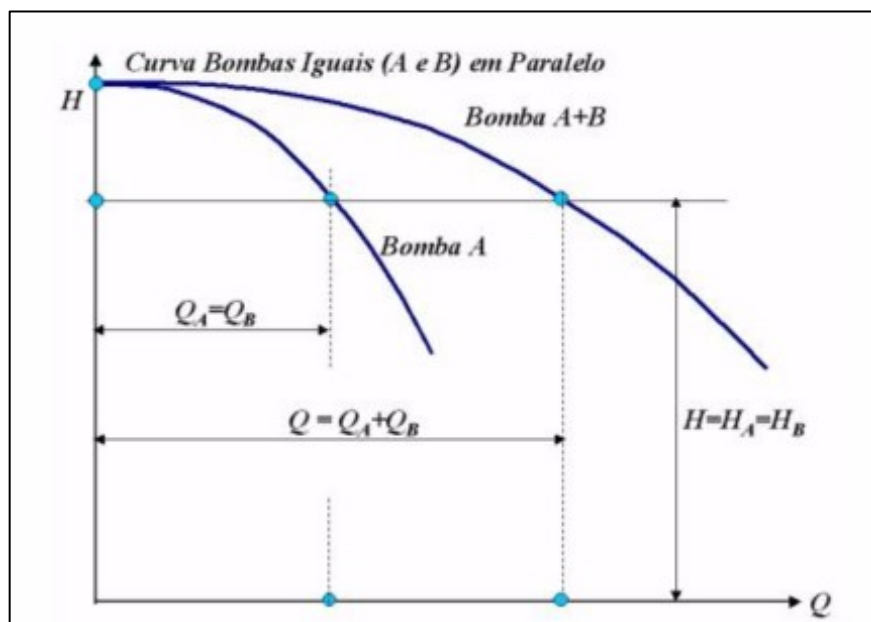


Figura 2.9 – Obtenção gráfica da curva característica de duas bombas iguais associadas em paralelo (ALÉ, 2011).

Nos dois casos devem ser levadas em consideração algumas peculiaridades para que se evite erros comumente cometidos quando se avalia este tipo de situação. Similar ao que acontece para uma bomba, o ponto de operação de uma associação pode ser especificado na intersecção da curva característica desta associação com a curva característica do sistema. A confusão existe porque a análise destas curvas revela que a associação de duas bombas

idênticas, em série, não gera o dobro da altura manométrica gerada por apenas uma. Na verdade, a altura manométrica da associação é um pouco menor do que duas vezes a de uma bomba isolada. Analogamente, duas bombas iguais conectadas em paralelo bombeiam um pouco menos do que o dobro da vazão de uma única bomba. Isto acontece porque o acréscimo de vazão ou altura manométrica, obtido pela associação, está atrelado ao ponto de operação, isto é, depende também da curva da tubulação, cujo comportamento nunca é linear.

Em seus estudos, SANTOS (2001) concluiu que não há grandes dificuldades para se obter a curva principal da associação em série, pois basta que se some as equações representativas das curvas de cada bomba trabalhando isoladamente. Porém, acredita-se que haja certa diferença entre a curva real e a curva teórica obtida, pois pode ser que algumas bombas operem com maior eficiência por existir uma pressão proveniente da primeira bomba, o que facilitaria a sucção da segunda. Logo, não é ilógico supor também que a curva real de duas bombas operando em paralelo também seja um tanto quanto distante da curva obtida pela teoria. Neste caso, o que se pode supor é que aconteça uma competição entre as bombas na sucção do líquido, proveniente de uma mesma fonte de alimentação, o que poderia diminuir o rendimento de uma delas.

CAPÍTULO 3 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Materiais Utilizados

Todos os itens utilizados na realização da prática experimental após sua readequação foram listados a seguir:

- Água limpa;
- Duas (2) bombas centrífugas utilizadas em máquinas de lavar;
- Tubulações de poliuretano (*TPU* 12x2 mm);
- Tubulações de polietileno (*Poly-flo* ¼");
- Joelhos 90° e conexões em T para montagem do circuito;
- Reservatório de água (capacidade de armazenamento de 50 L) com registro na base;
- Nove (9) válvulas do tipo esfera;
- Duas (2) válvulas do tipo gaveta;
- Rotâmetro *Wasser* (com faixa de leitura de 70-650 L/h);
- Dois (2) sensores de diferença de pressão *Huba Control 692*;
- Placa Arduino;
- Placa de aquisição de dados da *National Instruments*;
- *Software* LabVIEW.

3.2 Montagem da Unidade e Adaptações Feitas

A montagem da unidade experimental consiste em um tanque de 50 L com abertura no topo e registro para saída de água na base. Com o registro aberto, este tanque alimenta um circuito montado com tubos de poliuretano (de cor azul) conectados por joelhos de 90° e conexões em T. Neste circuito, há duas bombas centrífugas instaladas (Bomba 1 e Bomba 2), as quais aspiram a água alimentada pelo tanque, bombeando-a de volta para o mesmo (pelo topo), mas passando primeiro por um rotâmetro, onde pode-se aferir a vazão empregada. Foram também instaladas algumas válvulas do tipo globo em posições estratégicas para que, dependendo da combinação de abertura ou fechamento delas, seja possível operar cada uma das bombas isoladamente ou associadas em série ou paralelo. Além disso, foram incluídas tomadas de pressão imediatamente antes e após cada uma das bombas, através de tubos de polietileno

(de cor branca), os quais são conectados a um sistema para medir esta diferença de pressão. Esta configuração pode ser melhor visualizada na Figura 3.1, onde é destacado cada item descrito anteriormente e o sentido em que a água escoa.

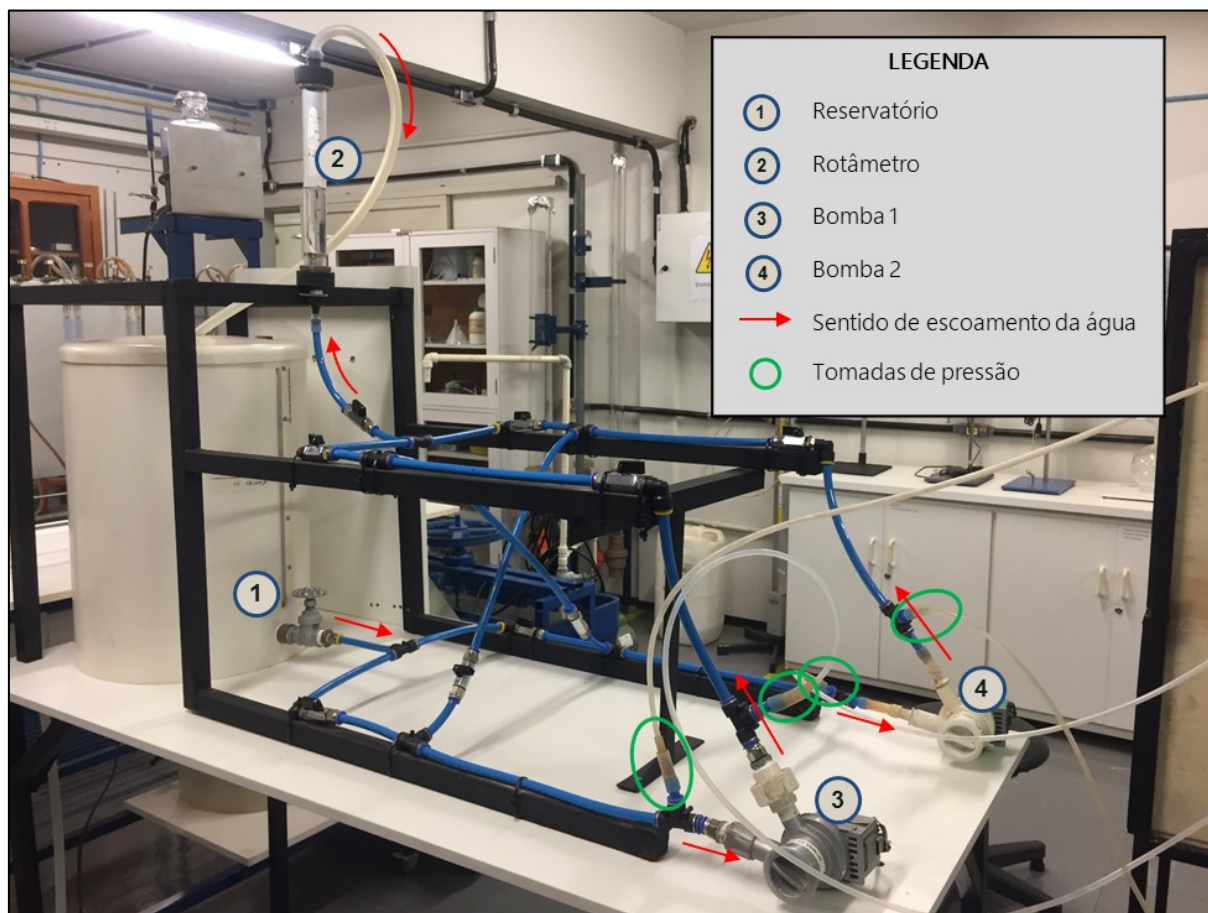


Figura 3.1 - Unidade experimental utilizada para a prática de associação de bombas.

Na unidade original, as tomadas de pressão se ligavam a manômetros do tipo tubo em U, como mostrado na Figura 3.2, onde lia-se a diferença de altura do fluido manométrico, utilizando o auxílio de papel milimetrado e convertia-se este valor em queda de pressão (ou carga manométrica) das bombas. Entretanto, tal aparelhagem foi identificada como a principal causa do mal funcionamento da linha e da impossibilidade de se levantar a curva característica das bombas e, conseqüentemente, inviabilizando sua utilização nas aulas de Laboratório de Engenharia Química. Um dos problemas encontrados foi que suas conexões, por não serem bem vedadas, permitiam o vazamento de água do sistema e, ao mesmo tempo, eram um local propício a entrada de ar na linha. Essas bolhas de ar, além de atrapalharem o funcionamento das bombas centrífugas, causavam oscilações muito grandes durante a leitura de vazão no rotâmetro. Outra falha presente eram as grandes incertezas na avaliação visual da diferença de

altura do fluido manométrico em papel milimetrado, além da presença de bolhas de ar que ficavam presas ao tubo em U.



Figura 3.2 – Sistema de leitura de diferença de pressão nas bombas utilizando manômetros do tipo tubo em U.

Diante destes fatos, o intuito deste trabalho foi promover e avaliar a substituição do sistema com manômetros em tubo por um que utilizasse sensores de pressão, com monitoramento eletrônico. Para isso, as tomadas de pressão da sucção e recalque das duas bombas foram conectadas a seus respectivos sensores, da marca *Huba Control*, modelo 692. Tais sensores foram, então, conectados a uma placa *Arduino* e a uma placa de aquisição de dados da *National Instruments*, que por sua vez conecta-se a um computador via USB. Esta disposição é mostrada na Figura 3.3.

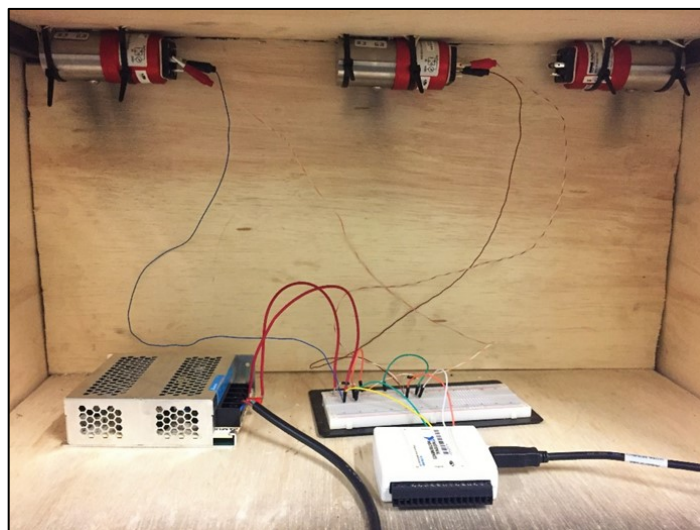


Figura 3.3 - Sistema de aquisição de dados para monitoramento da diferença de pressão nas bombas.

Dessa forma, o sinal gerado pelo sensor, correspondente a uma certa diferença de pressão pôde ser tratado e convertido a diferença de pressão (ou carga manométrica) pelo diagrama de blocos desenvolvido no *software* LabVIEW, conforme Figura 3.4 (a), através de uma calibração baseada nos limites máximos de leitura dos sensores. A leitura dos dados também é feita com o LabVIEW, através de sua janela de interface, apresentada na Figura 3.4 (b), onde os valores medidos são atualizados com a frequência escolhida pelo usuário.

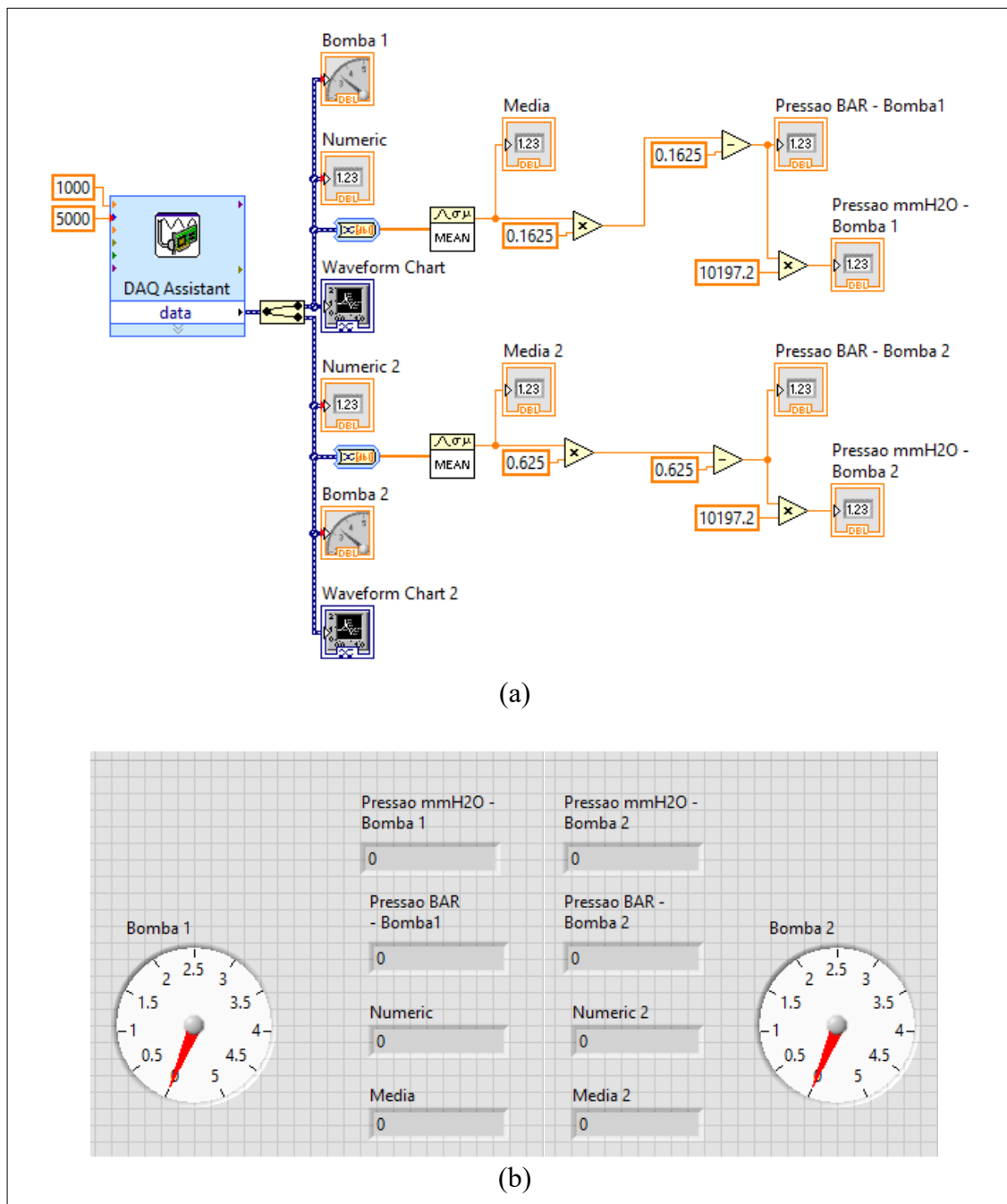


Figura 3.4 – (a) Diagrama de blocos desenvolvido para a aquisição dos dados. (b) Interface do software *LabVIEW* para leitura das medidas de queda de pressão.

Com essas adaptações, foi possível evitar os vazamentos e entrada excessiva de ar no sistema, além de melhorar a confiabilidade no monitoramento da variação de carga manométrica (H) nas bombas. Porém, ainda é possível que haja a entrada de pequenas bolhas de ar na linha por alguma conexão, o que pode comprometer a precisão e estabilidade dos sensores caso estas bolhas fiquem alojadas nas tubulações provenientes da tomada de pressão no recalque das bombas. Para evitar este problema, adaptou-se um sistema de expulsão de ar nestes pontos, que consiste em uma conexão em T acoplada a uma válvula gaveta. Na parte superior do conector instala-se a válvula, pois o ar, por ser menos denso que a água, tende a escoar para cima. Logo, deve-se manter a extremidade de saída da válvula aberta para o ambiente (exaustão). Assim, mantendo-se a válvula aberta, força-se a saída do ar e, após sua retirada, isola-se a tomada de pressão novamente, sem dificuldade, através do fechamento da válvula. Um detalhe importante é que as tubulações relativas à tomada de pressão da sucção das bombas devem ser previamente completadas com água. Este sistema ajustado pode ser visto na Figura 3.5.



Figura 3.5 - Sistema de expulsão de ar da linha.

Com estas alterações conseguiu-se operar a unidade de forma mais consistente e os resultados encontrados pareciam satisfatórios para descrever o funcionamento de bombas centrífugas. Assim, foi possível elaborar um novo roteiro e avaliar seus resultados, tomando como base os conhecimentos expostos no Capítulo 2 deste projeto.

3.3 Teste Proposto

Para que esta prática aconteça da melhor maneira possível, recomenda-se seguir os seguintes passos, divididos em três fases: preparação, execução e tratamento de dados.

a) **Preparação:** primeiramente, enche-se o reservatório com água limpa até sua capacidade máxima, para que haja líquido suficiente para preencher toda a linha de escoamento. Abre-se completamente todas as válvulas presentes na unidade (inclusive o registro da saída de água na base do reservatório). Em seguida, liga-se as duas bombas para que toda a tubulação se encha de água e espera alguns segundos até que o sistema fique estabilizado, isto é, com escoamento uniforme e livre de bolhas que, em sua maioria, são expulsas ao retornarem ao tanque de alimentação. Caso pequenas bolhas fiquem presas à tubulação de tomada de pressão da sucção das bombas, utiliza-se o sistema de expulsão de ar apresentado na Figura 3.5.

b) **Execução:** desliga-se a bomba 2 e, em seguida, fecha-se as válvulas correspondentes à sua linha de escoamento, de forma que a bomba 1 fique operando isoladamente. Anota-se a leitura da altura manométrica (em mm H₂O) da bomba 1, indicada na janela de interface do LabVIEW, correspondente a vazão máxima possível, indicada pelo rotâmetro (em L/h). O próximo passo é fechar cuidadosamente a válvula mais próxima à entrada do rotâmetro (ou outra válvula que esteja no circuito da bomba 1), anotando para cada nova vazão, a altura manométrica correspondente, até que se atinja a vazão mínima lida pelo rotâmetro (70 L/h). Desliga-se a bomba 1 e fecha-se as válvulas do seu circuito. Finalmente, abre-se o circuito para a bomba 2 isolada e, logo após, liga-se a bomba para que se repita o mesmo procedimento. É importante ressaltar que se deve analisar os mesmos valores de vazão para as duas bombas.

c) **Tratamento de Dados:** plota-se em um gráfico os dados obtidos de altura manométrica (H), em mm H₂O, *versus* vazão (Q), em L/h, para cada uma das bombas. Ajusta-se uma curva de tendência aos pontos, cuja equação será correspondente à curva característica individual da bomba. Para isto, recomenda-se um ajuste polinomial de 2ª ordem. Assim, a partir dos dados individuais, para uma mesma vazão, a teoria diz que se somam as alturas manométricas das duas bombas para obter os pontos da curva característica da associação em série ($H_{\text{série}} = H_{\text{bomba1}} + H_{\text{bomba2}}$). Logo, é possível plotar os dados de altura manométrica da associação ($H_{\text{série}}$) *versus* vazão (Q) e ajustar um polinômio de segunda ordem para prever seu comportamento que, obviamente, será a soma das duas equações individuais. Já para a obtenção da curva característica da associação em paralelo, a partir dos dados de desempenho individual, fixa-se valores de altura manométrica (H) que estejam dentro da faixa de alturas avaliadas para

ambas as bombas. Substitui-se estes valores de H nas equações individuais de cada bomba e, ao resolver a equação de segundo grau, tem-se uma raiz positiva, que é a vazão individual daquela bomba para o valor de H estabelecido. Dessa forma, a teoria diz que se somam as vazões das duas bombas para obter os pontos da curva característica da associação em paralelo ($Q_{\text{paralelo}} = Q_{\text{bomba1}} + Q_{\text{bomba2}}$). Por fim, é possível plotar os dados de altura manométrica (H) *versus* vazão da associação (Q_{paralelo}) e ajustar um polinômio de segunda ordem para prever seu comportamento que, por sua vez, apresentará coeficiente de determinação (r^2) igual a 1, uma vez que os dados foram obtidos de duas outras equações polinomiais de segundo grau (ajustes para a curva característica das bombas 1 e 2).

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo foi dividido em dois itens, pois em uma primeira etapa, realizou-se um teste preliminar após as adequações feitas na unidade. Neste teste, fez-se a análise para todas as etapas descritas no roteiro proposto (item 3.3). Em seguida, em sua primeira utilização em aulas de Laboratório de Engenharia Química 1 aos alunos do 4º ano, foi proposto aos grupos o levantamento das curvas características para as bombas isoladas, e a partir destas obter a curva teórica apenas da associação em série.

4.1 Teste Preliminar

Neste teste, os dados de altura manométrica obtidos para as bombas 1 e 2, em mm de H₂O, são apresentados na Tabela 4.1, juntamente com os valores da associação em série, encontrados conforme a Equação 4.1.

$$H_{série} = H_{bomba1} + H_{bomba2} \quad (4.1)$$

Tabela 4.1 – Dados experimentais para as bombas 1 e 2 operando isoladamente e em série durante teste preliminar.

Q (L/h)	H _{Bomba1} (mm H ₂ O)	H _{Bomba2} (mm H ₂ O)	H _{série} (mm H ₂ O)
70	2087,37	2230,13	4317,49
80	2080,23	2217,89	4298,12
90	2072,07	2175,06	4247,13
100	2058,81	2156,71	4215,52
110	2051,68	2093,49	4145,16
120	2041,48	2058,81	4100,29
130	2020,07	2031,28	4051,35
140	2003,75	1991,51	3995,26
150	1982,34	1919,11	3901,45
160	1965,00	1878,32	3843,32
170	1947,67	1826,32	3773,98
180	1926,25	1784,51	3710,76
190	1909,94	1764,12	3674,05
200	1889,54	1733,52	3623,07
205	1881,38	1713,13	3594,51

Fazendo-se um ajuste polinomial de 2ª ordem, utilizando a ferramenta de gráficos do *Excel*, para representar as curvas características de cada bomba operando isoladamente, obteve-se os perfis apresentados na Figura 4.1, que podem ser descritos pelas Equações 4.2 e 4.3, para

a bomba 1 e 2, respectivamente. Os coeficientes de determinação (r^2) obtidos foram de 0,9974 para a bomba 1 e 0,9929 para a bomba 2.

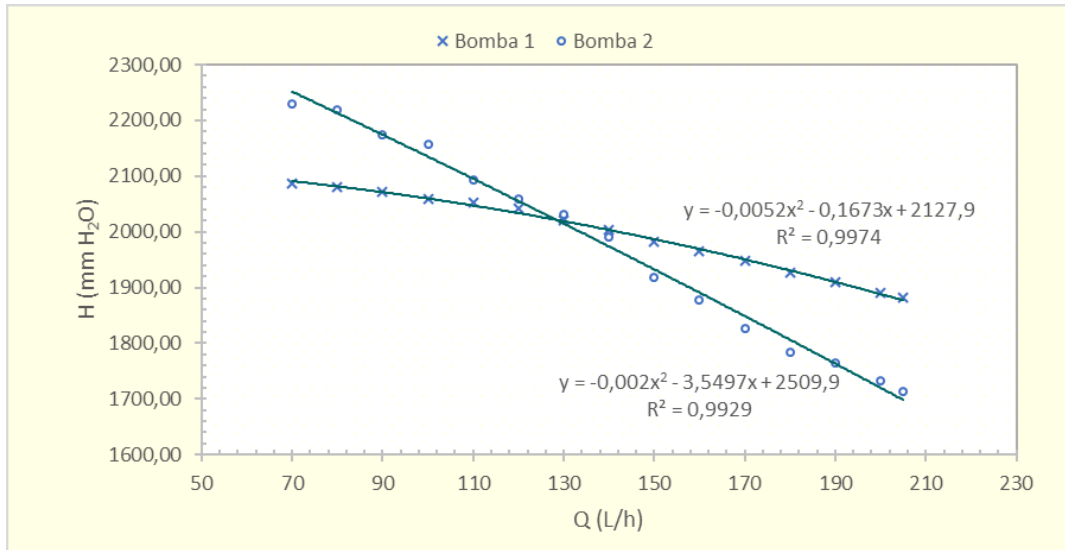


Figura 4.1 - Curvas características das bombas operando isoladamente em teste preliminar.

$$H_{bomba1} = -0,0052 \times Q_{bomba1}^2 - 0,1673 \times Q_{bomba1} + 2127,9 \quad (4.2)$$

$$H_{bomba2} = -0,0020 \times Q_{bomba2}^2 - 3,5497 \times Q_{bomba2} + 2509,9 \quad (4.3)$$

Agora, para o comportamento esperado para a associação em paralelo, resolveu-se as equações de segundo grau para valores fixados de altura manométrica (H), que estivessem compreendidos, simultaneamente, nas faixas de H das bombas isoladas observadas na Tabela 4.1. Para isto, colocou-se as duas equações no formato geral de uma equação do segundo grau, ($ax^2 + bx + c = 0$), e encontrou-se a raiz positiva em cada caso (Q_{bomba1} e Q_{bomba2}) aplicando-se a fórmula de Bhaskara. Os valores de 'c' para cada bomba foram especificados de acordo com as Equações 4.4 e 4.5. Já a vazão das bombas associadas em paralelo ($Q_{paralelo}$) foi encontrada somando-se as duas vazões individuais encontradas, conforme Equação 4.6.

$$c_1 = 2127,9 - H_i \quad (4.4)$$

$$c_2 = 2509,9 - H_i \quad (4.5)$$

$$Q_{paralelo} = Q_{bomba1} + Q_{bomba2} \quad (4.6)$$

Os valores escolhidos de H_i , e os pontos obtidos para a curva característica das bombas ligadas em paralelo são apontados pela Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Dados experimentais para as bombas 1 e 2 operando em paralelo durante teste preliminar.

H_i (mm H_2O)	c_1	c_2	Q_{Bomba1} (L/h)	Q_{Bomba2} (L/h)	$Q_{paralelo}$ (L/h)
1890,00	237,9	619,9	198,4	160,2	358,6
1920,00	207,9	589,9	184,5	153,0	337,5
1950,00	177,9	559,9	169,6	145,8	315,3
1980,00	147,9	529,9	153,3	138,5	291,8
2010,00	117,9	499,9	135,3	131,1	266,5
2040,00	87,9	469,9	114,9	123,7	238,7
2070,00	57,9	439,9	90,7	116,3	207,0

Finalmente, a Figura 4.2 traz o perfil encontrado para as quatro curvas características previstas neste teste. As equações que descrevem seus comportamentos, juntamente com os respectivos coeficientes de determinação são indicados na Tabela 4.3.

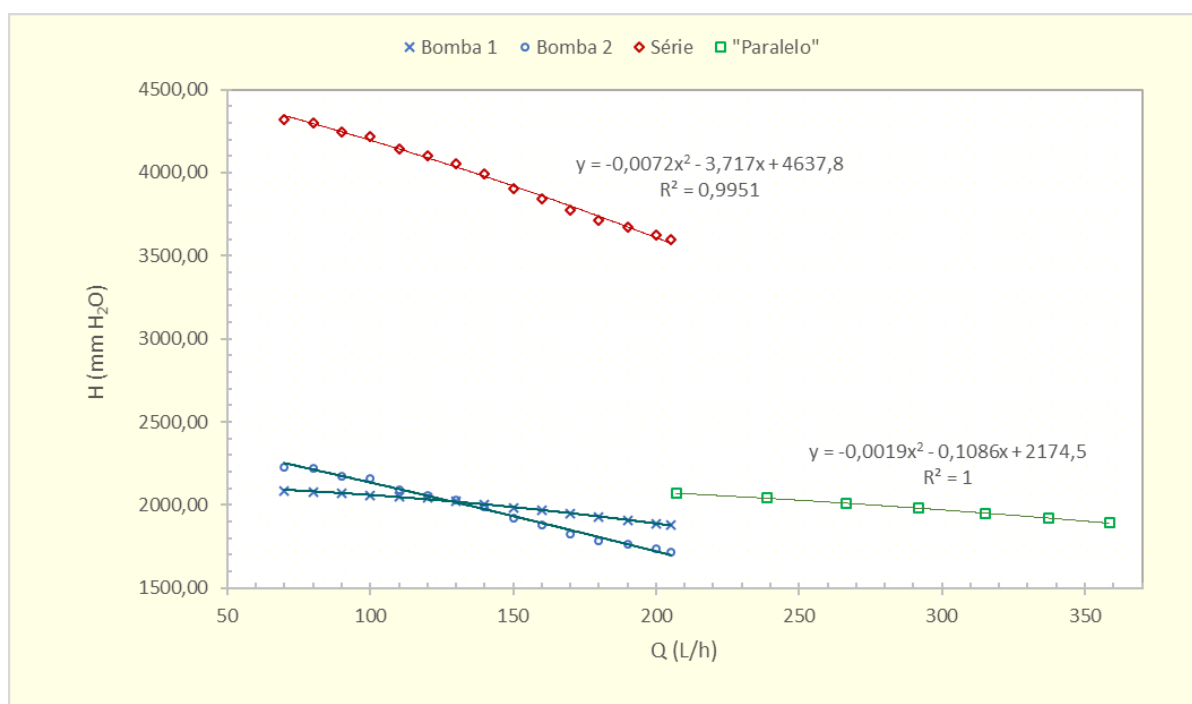


Figura 4.2 - Curvas características obtidas para a associação em série e paralelo, durante o teste preliminar.

Tabela 4.3 – Equações polinomiais ajustadas para as curvas características obtidas experimentalmente durante teste preliminar.

Configuração	Equação da curva pelo ajuste polinomial	r^2
Bomba 1	$H_{bomba1} = -0,0052 \times Q^2 - 0,1673 \times Q + 2127,9$	0,9974
Bomba 2	$H_{bomba2} = -0,0020 \times Q^2 - 3,5497 \times Q + 2509,9$	0,9929
Série	$H = -0,0072 \times Q^2 - 3,7170 \times Q + 4637,8$	0,9951
Paralelo	$H = -0,0019 \times Q^2 - 0,1086 \times Q + 2174,5$	1,0000

Os coeficientes de determinação das curvas das bombas independentes indicaram o ajuste polinomial de 2ª ordem como um bom método para descrever seus comportamentos hidráulicos e, dessa forma, pôde-se utilizá-las para gerar os comportamentos previstos para as bombas associadas. Como mencionado no roteiro, a equação da associação em série é exatamente a soma das duas equações individuais. Além disso, o coeficiente de determinação da curva ajustada para a associação em paralelo é igual a 1. Isso se deve ao fato de os pontos de vazão individuais (Q) terem sido calculados a partir dos ajustes feitos para as duas bombas, ou seja, as vazões encontradas eram pontos pertencentes à própria curva estimada.

Além disso, a Figura 4.2 é bastante representativa da teoria de associação de bombas especificada pelo item 2.5 deste trabalho, pois consegue-se visualizar um deslocamento no sentido do eixo das ordenadas no gráfico da curva da conexão em série, em relação às curvas individuais, o que indica o aumento da altura manométrica do sistema. Enquanto isso, a curva da conexão em paralelo sofreu um deslocamento no sentido do eixo das abscissas, indicando o aumento da vazão total do sistema quando comparado aos desempenhos individuais.

4.2 Resultados Obtidos pelos Alunos

A prática foi posta em operação para três grupos de alunos, aqui identificados como Grupos 1, 2 e 3. Os dados coletados ponto a ponto por cada um deles podem ser verificados no Anexo A. Então, conforme procedimento proposto, os alunos utilizaram o ajuste polinomial de 2ª ordem para descrever o comportamento das bombas. As curvas obtidas por cada grupo podem ser conferidas nas Figuras 4.3 a 4.5 e as equações geradas, juntamente com seus coeficientes de determinação, estão indicadas na Tabela 4.4.

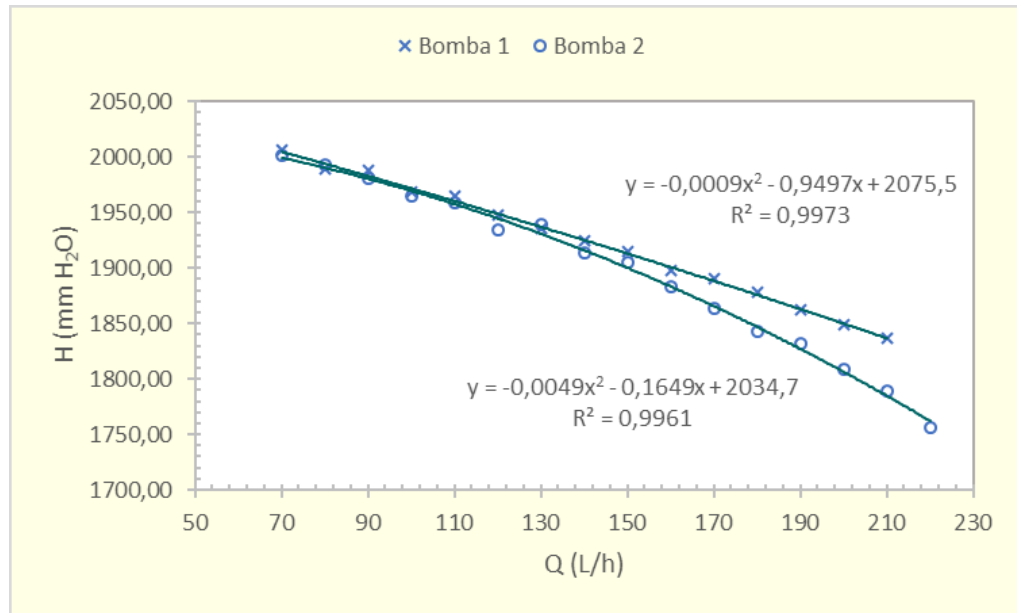


Figura 4.3 - Curvas características das bombas operando isoladamente obtidas pelo Grupo 1.

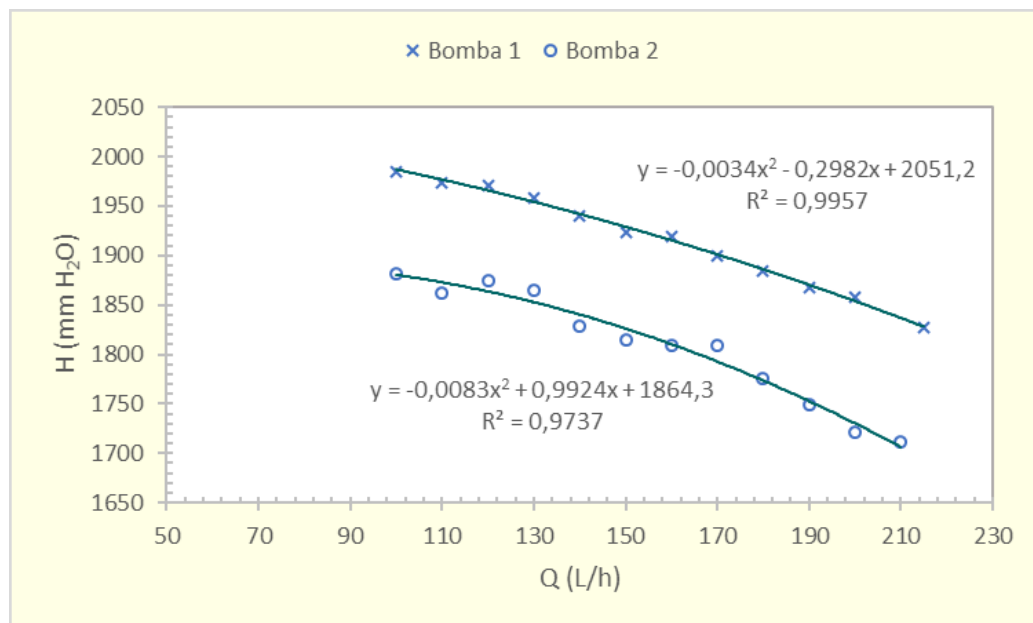


Figura 4.4 - Curvas características das bombas operando isoladamente obtidas pelo Grupo 2.

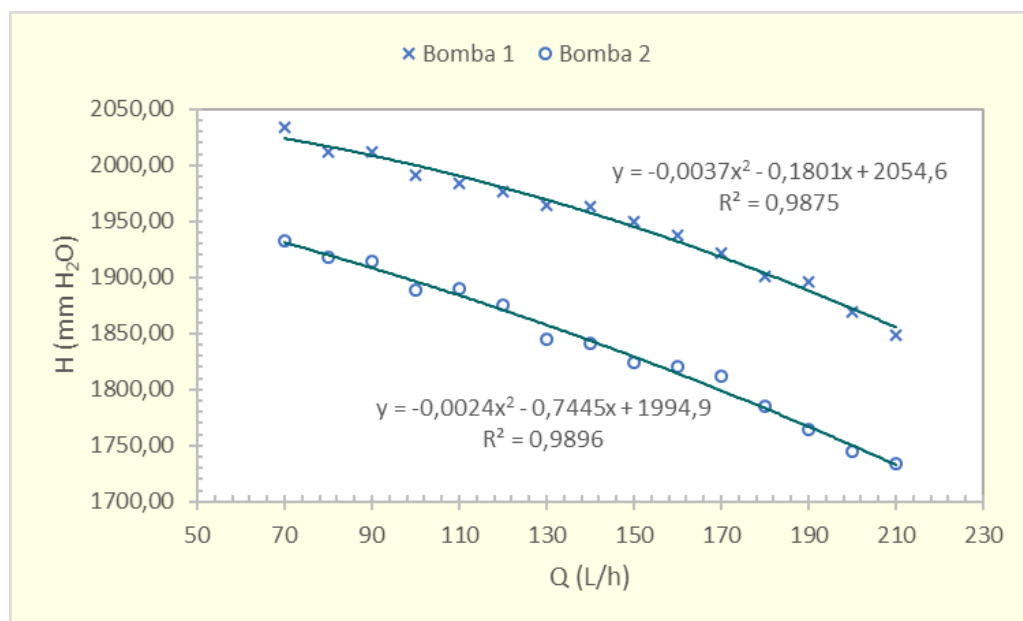


Figura 4.5 - Curvas características das bombas operando isoladamente obtidas pelo Grupo 3.

Tabela 4.4 - Equações polinomiais ajustadas para as curvas características obtidas experimentalmente pelos grupos de LEQ1.

	Grupo	Equação da curva pelo ajuste polinomial	r^2
Bomba 1	1	$H_{bomba1} = -0,0009 \times Q^2 - 0,9497 \times Q + 2075,5$	0,9973
	2	$H_{bomba1} = -0,0034 \times Q^2 - 0,2982 \times Q + 2051,2$	0,9957
	3	$H_{bomba1} = -0,0037 \times Q^2 - 0,1801 \times Q + 2054,6$	0,9875
Bomba 2	1	$H_{bomba2} = -0,0049 \times Q^2 - 0,1649 \times Q + 2034,7$	0,9961
	2	$H_{bomba2} = -0,0083 \times Q^2 - 0,9924 \times Q + 1864,3$	0,9737
	3	$H_{bomba2} = -0,0024 \times Q^2 - 0,7455 \times Q + 1994,9$	0,9896

Analisando os dados obtidos, verifica-se que o Grupo 1 obteve melhores ajustes e um comportamento mais próximo ao verificado no teste preliminar. Já os grupos 1 e 2 apresentaram coeficientes de determinação um pouco mais baixos, principalmente para a bomba 2. O comportamento desta bomba apresentou uma certa diferença em relação ao teste preliminar e ao grupo 1, cujos resultados mostraram uma maior carga manométrica especialmente ao operar com vazões menores. Entretanto, os perfis encontrados em todos os casos ilustram adequadamente a curva característica de uma bomba centrífuga.

Seguindo o roteiro, os três grupos plotaram as curvas características da associação em série das bombas, somando-se as alturas manométricas individuais para uma mesma vazão. Na Figura 4.5 consegue-se comparar os resultados encontrados pelos grupos.

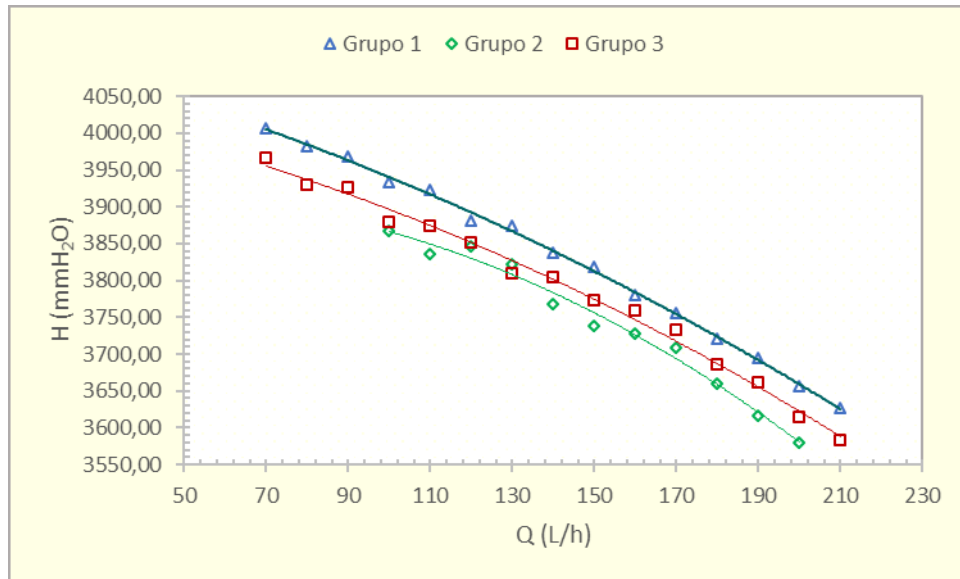


Figura 4.5 - Curvas características teóricas, obtidas para a associação em série, durante aula de LEQ 1.

Pode-se verificar que apesar das diferenças encontradas em alguns casos, os perfis de curva característica das bombas associadas foram bem similares. A grandeza dos valores de altura manométrica na faixa de vazão avaliada permaneceu em torno de 3600,00 a 4000,00 mm H₂O para os três grupos, ficando um pouco abaixo da carga obtida no teste preliminar, que chegou a atingir a casa dos 4300,00 mm H₂O.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

O presente trabalho conseguiu abranger todos os objetivos propostos. Primeiramente, foi possível a identificação dos problemas de projeto da unidade experimental original, cujo principal foco era a utilização e má vedação do sistema de manômetros do tipo tubo em U, promovendo sua substituição por sensores de pressão. Tal alteração trouxe mais confiabilidade na apuração das medidas de carga manométrica, agora feitas eletronicamente, e evitou o vazamento de água e a entrada exacerbada de ar na linha de escoamento. Outra solução implementada com sucesso foi o sistema de expulsão de ar das tubulações de tomada de pressão na sucção das bombas, o que afetava o valor da diferença de pressão indicada.

Feitas as adaptações necessárias, foi proposto um novo roteiro para a prática e sua metodologia foi analisada por um teste preliminar, apresentando resultados condizentes com o que era previsto pela literatura e apresentando ajustes polinomiais para descrever as curvas características das bombas com alto nível de adequação, com coeficientes de determinação maiores que 0,99. Dessa forma, pôde-se levantar as curvas de associação em série e em paralelo das bombas utilizando estas equações individuais como base.

Logo, acreditou-se que a unidade estava em condições apropriadas para ser usada como prática na aula de Laboratório de Engenharia Química 1, onde verificou-se os resultados obtidos por três grupos diferentes de alunos, os quais conseguiram seguir o roteiro proposto sem muita dificuldade. Os resultados encontrados pelos grupos foram qualitativamente representativos da teoria de bombas centrífugas, apresentando alguns desvios quantitativos entre si e quando comparados ao teste preliminar. Tais diferenças foram observadas principalmente para a Bomba 2 operando a vazões mais baixas, o que indica que houve algum problema de reprodutibilidade entre os experimentos. Tal fato deve ser melhor investigado, pois pode ter ocorrido alguma queda de rendimento mecânico da bomba ou até mesmo pequenas entradas de ar pelas conexões do circuito.

Por fim, acredita-se que o objetivo geral deste trabalho também tenha sido alcançado, ao ter oferecido uma oportunidade aos alunos do curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia de revisar, na prática, conteúdos explorados nos anos anteriores de sua graduação e que possuem grande relevância por sua ampla utilização em vários setores da indústria química.

5.2 Sugestões

Para continuidade deste projeto, e na tentativa de tornar esta prática de laboratório ainda mais completa com relação a sistemas de bombeamento utilizando bombas centrífugas, algumas sugestões de implementação serão aqui apontadas:

Primeiramente, para evitar que haja zonas de pressão negativa ou vazios devido à bifurcação do circuito logo após a saída do tanque, sugere-se a troca do bocal de saída do registro do tanque para um com diâmetro maior. Dessa forma, garante-se que a alimentação de água no circuito é suficiente para preencher igualmente ambos os caminhos da bifurcação. Outra sugestão possível seria a colocação de dois reservatórios de água, alimentando separadamente cada uma das bombas.

Recomenda-se a utilização de bombas mais potentes para que a faixa de vazão permitida pelo rotâmetro seja melhor aproveitada e, assim, seria possível a obtenção de mais pontos experimentais.

A última recomendação e, talvez, a mais interessante em termos de projetos, seria a instalação de inversores de frequência nas bombas. Com essa melhoria seria possível plotar a curva característica do sistema, ao variar a frequência de rotação das bombas, mantendo-se o sistema inalterado (deixando todas as válvulas em posições fixas). Finalmente, seria viável determinar o ponto de operação do sistema ao determinar-se a intersecção entre as curvas características das bombas com a da tubulação.

ANEXOS

Anexo A - Dados obtidos experimentalmente pelos três grupos durante a aula de LEQ1.

Tabela 1 – Dados coletados pelo Grupo 1.

Q (L/h)	H_{Bomba1} (mm H₂O)	H_{Bomba2} (mm H₂O)	H_{série} (mm H₂O)
220	...	1755,74	...
210	1836,78	1789,65	3626,43
200	1848,41	1808,14	3656,55
190	1862,62	1831,78	3694,40
180	1878,03	1842,63	3720,66
170	1890,95	1864,05	3755,00
160	1897,37	1883,49	3780,86
150	1914,53	1904,56	3819,09
140	1924,06	1914,06	3838,12
130	1935,10	1938,69	3873,79
120	1947,13	1934,32	3881,45
110	1964,64	1959,26	3923,90
100	1968,56	1964,43	3932,99
90	1987,56	1980,16	3967,72
80	1989,40	1992,76	3982,16
70	2006,04	2001,04	4007,08

Tabela 2 – Dados coletados pelo Grupo 2.

Q (L/h)	H_{Bomba1} (mm H₂O)	H_{Bomba2} (mm H₂O)	H_{série} (mm H₂O)
215	1827,25	...	...
210	...	1711,35	...
200	1857,96	1721,70	3579,66
190	1867,84	1748,89	3616,73
180	1884,87	1775,46	3660,33
170	1900,01	1808,44	3708,45
160	1919,05	1809,08	3728,13
150	1924,06	1814,95	3739,01
140	1939,74	1828,41	3768,15
130	1957,93	1864,19	3822,12
120	1971,39	1874,85	3846,24
110	1974,18	1862,51	3836,69
100	1985,43	1881,84	3867,27

Tabela 3 – Dados coletados pelo Grupo 3.

Q (L/h)	H_{Bomba1} (mm H₂O)	H_{Bomba2} (mm H₂O)	H_{série} (mm H₂O)
210	1849,01	1733,59	3582,60
200	1869,54	1744,51	3614,05
190	1896,59	1764,22	3660,81
180	1901,28	1784,63	3685,91
170	1921,27	1811,93	3733,20
160	1937,97	1821,02	3758,99
150	1949,34	1824,48	3773,82
140	1963,45	1840,91	3804,36
130	1964,61	1845,03	3809,64
120	1976,86	1874,85	3851,71
110	1983,75	1889,96	3873,71
100	1990,98	1888,48	3879,46
90	2012,43	1914,48	3926,91
80	2012,01	1918,28	3930,29
70	2034,41	1932,42	3966,83

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALÉ, J. Sistemas de Bombeamento. Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), 2011. p. 3-19 - 3-24
- BOMBAS GRUNDFOS ESPAÑA S.A. Catálogo Grundfos. 5. ed. Madri:, [s.d.]. p. 38-40
- BRASIL, A. Máquinas Termohidráulicas de Fluxo. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2010. p. 62-91
- ELETROBRÁS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A [et al.]. Bombas: Guia Básico. Brasília: Instituto Euvaldo Lodi - IEL/Núcleo Central-NC, 2009. p. 15-158.
- FORTES, M. Z., TAVARES, G.M., RIGUEIRA, A.S., ANTUNES, V.S.F, PEREIRA, L.F. Eficientização energética com ajuste do ponto de operação de bombas centrífugas. 27º Congresso Brasileiro de Manutenção. Anais...Rio de Janeiro: 2012.
- GOMES, M.; ANDRADE, M.; FERRAZ, F. APOSTILA DE HIDRÁULICA. Santo Amaro - BA: Centro Federal de Educação Tecnológica da Bahia, 2008. p. 11-28
- HYDRAULIC INSTITUTE. Pump Fundamentals. Disponível em: <http://pumps.org/Pump_Fundamentals.aspx>. Acesso em: 11 jul. 2017.
- JUNIOR, C.R.S. Operação do conjunto de bomba centrífuga, motor de indução trifásico e conversor de frequência visando à eficiência no uso da energia elétrica, Universidade Federal do Ceará, 2006.
- KYRIAKOPOULOS, G. Water Pumping Mechanisms in Ancient World. Master's Thesis. National Technological University of Athens, Atenas, Grécia, 2015.
- LENCASTRE, A. Hidráulica Geral, Ed. FCT, Lisboa, 2005.
- LIMA, E. Bombas centrífugas - CURSO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAATt4AE/bombas-centrifugas>>. Acesso em: 12 jul. 2017.
- MACINTYRE, A. Bombas e Instalações de Bombeamento, Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2010.
- MMTEC. Cavitação - MMTec. Disponível em: <<http://www.mmttec.com.br/cavitacao/>>. Acesso em: 14 jul. 2017.
- OMEL. Omel – Aplicações e Mercados. Disponível em: <<http://www.omel.com.br/aplicacoes-e-mercados/>>. Acesso em: 10 ago. 2017.
- PH BOMBAS. PH Bombas - Atuação. Disponível em: <<http://phbombas.com.br/area-de-atuacao/>>. Acesso em: 10 ago. 2017.
- PINTO, M. Bombas centrífugas - MATERIAL SOBRE CENTRIFUGAS DO CEFET-BA. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAA7-MAJ/bombas-centrifugas?part=8>>. Acesso em: 14 jul. 2017.
- SANTOS, W. L. Desenvolvimento de uma Metodologia para Representação Analítica de Curvas Características de Bombas Hidráulicas, visando sua Seleção, seu Dimensionamento e a Simulação de sua Operação. Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, 2001. p. 38-56
- SULZER LTD. Indústrias - Sulzer. Disponível em: <<http://www.sulzer.com/pt/Industries>>. Acesso em: 10 ago. 2017.

YANNOPOULOS, S., LYBERATOS, G., THEODOSSIOU, N., Li, W., VALIPOUR, M.,
TAMBURRINO, A. and ANGELAKIS, A. Evolution of Water Lifting Devices (Pumps)
over the Centuries Worldwide. *Water*, 7(9), 2015. p. 5031-5060.