



Universidade Federal do Maranhão — UFMA
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas — CCET
Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica — CCEM

Mardiani da Silva de Alencar

**Avaliação e escolha de uma bomba centrífuga para um sistema de
bombeamento da lagoa de detenção, empregado na produção de alumina
(Al_2O_3)**

São Luís (MA)

2022

Mardiani da Silva de Alencar

Avaliação e escolha de uma bomba centrífuga para um sistema de bombeamento da lagoa de detenção, empregado na produção de alumina (Al_2O_3)

Orientador: Prof. Dr. Glauber Cruz

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Maranhão como pré-requisito para obtenção do título de Engenheira Mecânica.

São Luís (MA)

2022

Avaliação e escolha de uma bomba centrífuga para um sistema de bombeamento da lagoa de detenção, empregado na produção de alumina (Al₂O₃)

Prof. Dr. Glauber Cruz (CEM/UFMA)

Orientador

Prof. Dr. Elson César Moraes (CEM/UFMA)

Membro interno

Eng. Sênior Adriano Tinoco Pinheiro (ALUMAR)

Membro externo

São Luís (MA)

2022

Agradecimentos

Agradeço à Deus por tudo e por cuidar tão bem de mim.

A minha mãe Raimunda e minha irmã Mardistella por nunca deixar faltar nada para mim e por serem as pessoas que mais amo.

Ao meu pai, Antônio (*in memória*), pois certamente estaria orgulhoso e por ter me ensinado o caminho correto a seguir.

Ao meu primeiro chefe, Adriano Tinoco Pinheiro pelo suporte, conselhos e por ser minha maior inspiração profissional.

Ao meu orientador Glauber Cruz pela paciência e pelo apoio sempre.

A todos os meus professores da UFMA que foram para mim, grandes exemplos durante minha graduação e importantes bons motivos para eu concluir o curso.

Aos meus melhores amigos de faculdade: Otávio, Paulo Victor, Ana Paula e Anielly que foram importantes nessa trajetória através do apoio durante os estudos e por compartilhar das dificuldades e conquistas na vida acadêmica.

Aos meus amigos de estágio Adriane, Luma, Adriana, João, Guilherme e Vanessa pelos momentos divertidos e apoio na caminhada profissional.

A toda equipe de Engenharia que eu participei COE (Adriano Tinoco, Ayrton Abrantes, Mayko Silva, Laís Lobato, Alessandro Sousa, Álvaro Pires, Kely Oliveira) e COR (Largyla Mendes, André Lobato, Iverson Pontes, Ercy Sejane, Daysiane Oliveira, Elizeu Marques, Adriane Pinto) que se tornaram especiais e extremamente importantes na minha vida profissional e pessoal.

Resumo

Os sistemas de bombeamento são importantes para toda humanidade, seja no cotidiano ou em grandes processos industriais. Este estudo abordará a análise teórica e o estudo da seleção de uma bomba centrífuga posicionada na região das lagoas de detenção, as quais armazenam a água pluvial de uma refinaria de produção de alumínio, localizada na cidade São Luís (MA). Esta análise foi realizada a partir da necessidade de verificação da correta seleção de um sistema de bombeamento para a atividade de drenagem de uma lagoa de detenção. Para esta análise em específico foi feito o processo de seleção de uma bomba, dimensionamento e comparativo com a literatura. Por fim, a escolha de uma bomba, conforme os critérios adotados e confrontados com os dados do fornecedor, se faz necessária para selecionar de forma adequada do equipamento que atenda melhor as necessidades requeridas. Os resultados mostraram que a utilização do equacionamento embasado pela literatura, confirmou os dados obtidos ao utilizar o *software* AFM FANTHON 10, garantindo uma maior confiabilidade.

Palavras-chave: Alumínio, Bombas, Eficiência, Modelagem, Cavitação.

Abstract

Pumping systems are important for all humanity, whether in everyday life or in large industrial processes. This study will address the theoretical analysis and study of the selection of a centrifugal pump positioned in the region of detention ponds, which store rainwater from an aluminum production refinery, located in the city of São Luís (MA). This analysis was carried out based on the need to verify the correct selection of a pumping system for the activity of draining a detention pond. For this specific analysis, the process of selecting a pump, sizing and comparison with the literature was carried out. Finally, the choice of a pump, according to the criteria adopted and confronted with the supplier's data, is necessary to properly select the equipment that best meets the required needs. The results showed that the use of the equation based on the literature confirmed the data obtained when using the *software* AFM FANTHON 10, ensuring greater reliability.

Keywords: Aluminum, Pumps, Efficiency, Modeling, Cavitation.

Lista de Figuras

- Figura 1-** Bomba de deslocamento positivo do semelhante à engrenagem.
- Figura 2-** Rotor do tipo radial
- Figura 3-** Classificação de um rotor pelo tipo de sucção
- Figura 4-** Gaxetas utilizadas na vedação de bombas centrífugas
- Figura 5-** Principais tipos de impelidores: a) aberto, b) semiaberto e c) fechado.
- Figura 6-** Desenho esquemático dos principais componentes de uma bomba centrífuga
- Figura 7-** Representação esquemática de uma bomba submersa
- Figura 8-** Classificação dos fluidos
- Figura 9-** Curva característica de uma bomba centrífuga do tipo EHA 50-25 de rotação 1750 RPM
- Figura 10-** Curva carga (H) versus Vazão (Q)
- Figura 11-** Curva de potência absorvida (Pot_{abs}) versus vazão (Q)
- Figura 12-** Curva de Rendimento versus Vazão
- Figura 13-** Representação de um sistema de sucção de uma bomba
- Figura 14-** Representação esquemática do processo de cavitação em uma bomba centrífuga
- Figura 15-** Ábaco de cobertura de uma bomba centrífuga KSB 60Hz fornecido pelo fabricante KSB
- Figura 16-** Curva da bomba KSB Etanorm 2900 rpm
- Figura 17-** Tela inicial do software AFT FATHOM 10
- Figura 18-** Detalhe da área de localização de uma lagoa de detenção da refinaria
- Figura 19-** Área de Localização dos poços onde serão instaladas as bombas, os poços são denominados PZ/E-1, PZ/E-2, PZ/E-3 e PZ/E-4
- Figura 20-** Fluxograma da Metodologia APOLLO para determinação da Causa Raiz das falhas mecânicas
- Figura 21-** Evidência de que não há danos nas partes internas da bomba antiga.
- Figura 22-** Filtro peneira da bomba sem a presença de material sólido.
- Figura 23-** Variáveis passíveis de monitoramento no poço
- Figura 24-** Bomba submersa EBARA 60Hz, com bombeadores em aço inox e rotores em tecno polímero de vazão máxima de 27,6 m³/h.

Figura 25- - Percentual de perda de carga para tubulações de PVC

Figura 26- Fatores de perdas de carga para os diferentes acessórios utilizados no sistema de bombeamento

Figura 27- Ábaco do fabricante EBARA com a representação dos códigos das famílias de bombas fabricadas atualmente

Figura 28- Dados do modelo da bomba para a família de bombas 4BPS13 com 7 estágios

Figura 29- Curvas de desempenho das bombas modelo EBARA 60Hz

Figura 30- Modelo do motor elétrico selecionado para acionar a bomba.

Figura 31-Diagrama elaborado por meio do modelo FATHOM 10 utilizado na análise da área estudada

Figura 32- Tela com os dados obtidos por meio do *software* FATHOM 10

Figura 33- Curvas do sistema obtidas por meio do *software* FATHOM 10

Sumário

1. Introdução	11
1.1 Sistemas de bombeamento.....	11
1.2 Identificação da empresa a ser investigada	12
2. Justificativa.....	13
3. Objetivos	14
3.1 Objetivo Geral	14
3.2 Objetivos Específicos.....	14
4. Referencial Teórico	15
4.1 Classificação das máquinas hidráulicas.....	15
4.2 Principais componentes das bombas centrífugas	17
4.3 Princípios do escoamento de fluidos.....	21
4.4 Teorema de Bernoulli	23
4.5 Desempenho das bombas centrífugas.....	23
4.5.1 Curva carga (H) <i>versus</i> Vazão (Q)	25
4.5.2 Curva de potência absorvida (<i>Potabs</i>) <i>versus</i> Vazão (Q)	26
4.5.3 Curva de rendimento total (η) <i>versus</i> Vazão (Q)	26
4.6 Cavitação	27
4.6.1 Equacionamento da cavitação em bombas.....	28
4.7 Seleção e especificação de bombas	30
4.7.1 Seleção do tipo de uma bomba.....	30
4.7.2 Seleção do modelo de uma bomba	31
5. Metodologia.....	34
6. Avaliação do objeto de estudo	35
6.1 Prospecção do espaço a ser investigado.....	35
6.2 Os lagos de detenção	36
6.3 <i>Insights</i> de uma investigação preliminar	38
7. Resultados e Discursão.....	41
7.1 Investigação da Vazão mínima necessária.....	42
7.2 Determinação da perda de carga.....	43
7.3 Determinação da altura manométrica	45
7.4 Investigação da potência do motor elétrico	50
7.5 Seleção do modelo da bomba centrífuga.....	46

7.6 Análise utilizando o FATHOM 10	51
8. Conclusão	54
REFERÊNCIAS.....	55

1. Introdução

1.1 Sistemas de bombeamento

O principal motivo para que o ser humano desenvolvesse os sistemas de bombeamento, foi a necessidade de cultivar e ter alimentos para o próprio consumo (AQUINO, 2013). E desde então, houve o desenvolvimento dos equipamentos utilizados para capturar água de maneira manual ou auxiliadas pelo trabalho dos animais e também outras maneiras de obter água, como as provenientes do subsolo (TERASSAKA *et al.*, 2014). Por volta de 4000 a.C. na Mesopotâmia, surgiram as primeiras obras para o controle de fluxo, sendo estes os pioneiros sistemas de bombeamento que a humanidade tem conhecimento (TSUTIYA, 2006). Mas, somente alguns séculos depois, que de fato ocorreu o surgimento das máquinas de fluxo como são conhecidas atualmente (AQUINO, 2013). Nesse cenário, as bombas apresentam uma vasta diversidade e aplicações, sendo as atividades mais comuns para a utilização destas, por exemplo, abastecimento de água, sistema de drenagens, aplicações industriais, sistemas hidráulicos, serviços nucleares entre outros (MATTOS; FALCO, 2019).

De uma maneira mais específica e dentre as principais aplicações industriais para as bombas, este estudo destaca a produção de alumina (Al_2O_3) na região Nordeste do país, mas precisamente no Estado do Maranhão, onde a empresa em estudo tem entre os principais mecanismos, os sistemas de bombeamento que podem ser encontrados em todas as etapas de produção. Para o melhor desempenho, é necessária uma escolha mais adequada de bombas, de modo a garantir a realização do processo desejado pela indústria de alumina.

Nesse cenário, nota-se a importância dos sistemas de bombeamento durante todas as etapas do processo, onde determina-se a categoria da bomba a ser utilizada, bem como selecioná-la da maneira mais adequada e assim se obter o melhor desempenho da mesma (MATTOS; FALCO, 2019). O correto dimensionamento de sistemas de bombeamento é de extrema importância, para a obtenção do fluxo necessário para os escoamentos em diferentes aplicações, por exemplo, indústrias petroquímicas, alimentícias, mineração entre outras (ARC, 2021). Dessa forma, o presente estudo está relacionado ao sistema de bombeamento e realizará uma

abordagem geral dos principais conceitos referentes às bombas centrífugas e ao dimensionamento de sistemas de bombeamento, para que sirvam de base para uma melhor compreensão do tema a ser investigado neste projeto.

Além de garantir o bom funcionamento desses sistemas, há necessidade de determinar a categoria de uma bomba mais adequada para ser utilizada nesse processo, bem como selecioná-la da maneira correta de modo a obter um melhor desempenho desta (MATTOS; FALCO, 2019).

1.2 Identificação da empresa a ser investigada

Para a análise do presente trabalho, há a necessidade de estudar um sistema de bombeamento de uma empresa multinacional com enorme reconhecimento em todo o território nacional. A empresa analisada é do ramo de produção de alumina e possui mais de 40 anos de inserção no Estado do Maranhão, estando sempre em constante desenvolvimento e buscando melhoria contínua para o processo produtivo (ALCOA, 2022).

Atualmente, com a Refinaria e o Porto em execução e recentemente com a confirmação do retorno das atividades na Redução, o Polo Industrial no Maranhão é um cenário de constantes mudanças e associado a isso, há a necessidade de sanar alguns problemas que surgem e demandam grandes recursos e tempo (ALCOA, 2022). A referida empresa multinacional está localizada a 18 quilômetros do centro de São Luís (MA) e iniciou as funções no Estado do Maranhão por volta da década dos anos 80. Tal conglomerado está subdividido em uma grande refinaria, uma área de redução, porto, oficinas, prédios técnico-administrativos, parque ambiental e outros setores (ALCOA, 2022). A principal matéria-prima do processo produtivo é a bauxita e está chega até a refinaria pelo porto da Alumar, a qual é oriunda da mineração Rio Norte e de Juruti (PA). É interessante destacar que a empresa possui dentre importantes certificações, que lhe garante uma maior confiabilidade no cenário nacional e internacional, por exemplo, ISO 9001 (qualidade), OHSAS 18001 (segurança e saúde) e ISO 14001 (meio ambiente) (ALUMAR, 2018).

2. Justificativa

Ao observar a importância da região dos lagos de retenção para o processo de fabricação de uma empresa do ramo da produção de alumina, que apresenta um fluxo de produção sem paradas (*full time*), faz-se necessário garantir o bom funcionamento dos equipamentos que auxiliarão nas atividades dos lagos. É válido ressaltar a importância da manutenção dos locais que serão responsáveis pela recepção da água que será utilizada no processo, ou seja, a água pluvial, cujo processo é necessário para evitar problemas ambientais, bem como garantir a segurança para os colaboradores que trabalham naquela localidade. Ao realizar-se uma análise mais detalhada da região supramencionada, verificou-se a importância da estrutura civil dos poços localizados nas proximidades com os lagos de retenção e também a drenagem das áreas próximas, surgindo assim uma preocupação com o bom funcionamento das bombas utilizadas para a execução desse processo.

No cenário apresentado, esta pesquisa tem como premissa o aprofundamento dos conhecimentos acerca do dimensionamento de sistemas de bombeamento, onde será feita uma investigação do assunto, bem como uma análise detalhada dos resultados. Será utilizado como universo de estudo, um sistema de uma bomba da área dos lagos de retenção em uma empresa multinacional existente na cidade de São Luís (MA), a qual deseja evitar problemas no funcionamento da bomba e que por motivos de segurança, meio ambiente e bem-estar, é necessário redimensionar o sistema de bombeamento. É importante também certificar-se da correta seleção desse sistema para a finalidade de drenagem da área dos lagos, realizando um estudo para determinação da correta bomba centrífuga utilizada para atender essa atividade.

Com base nessas observações, tal atividade de funcionamento e dimensionamento das bombas tornou-se de alta criticidade, por isso, justifica a realização desta pesquisa. É importante ressaltar que, a utilização da bomba inadequada na área de drenagem de fundo da lagoa de retenção, além de gerar problemas, como de impossibilitar a passagem de veículos e pessoas pela área, inviabiliza a destinação da água proveniente dessas áreas para o processo, pois além da preocupação com o custo operacional, há também a relevância da questão socioambiental.

Por fim, é interessante retificar que esta análise será realizada para sanar um problema do setor de Engenharia recorrente, tendo em vista, que é inquestionável a possibilidade de operação com uma bomba inadequada.

3. Objetivos

3.1 Objetivo Geral

Estudar o sistema de bombeamento, fazendo uma análise detalhada dos parâmetros operacionais da produção de alumina, selecionando o uso correto de uma bomba centrífuga acionada por um motor elétrico.

3.2 Objetivos Específicos

- Definir os parâmetros ótimos para o dimensionamento do sistema de bombeamento;
- Calcular os parâmetros operacionais para o correto dimensionamento do sistema de bombeamento;
- Analisar as curvas características das bombas centrífugas;
- Aprofundar o conhecimento teórico sobre a aplicação de um sistema real de Engenharia;
- Determinar a melhor categoria de uma bomba para ser usada na área dos lagos de detenção para a produção de alumina;
- Realizar uma análise comparativa com a literatura consultada, os dados obtidos experimentalmente e os fornecidos pelo fabricante;

4. Referencial Teórico

Em estudos referentes aos diferentes sistemas de bombeamento, um importante parâmetro a ser observado e analisado deve ser o escoamento de fluidos, bem como o comportamento destes por meio da aplicação das leis governantes, as quais são baseadas na Mecânica dos Fluidos (ROMA, 2020). De acordo com o cenário apresentado, as turbomáquinas são equipamentos que permitirão a troca de energia com o fluido que passa pelo interior e são ótimos exemplos das análises de Mecânica dos Fluidos (CENGEL, CIMBALA 2007). Esses sistemas são largamente empregados na indústria e essenciais à vida humana. Dessa forma, faz-se necessário o entendimento teórico de modo a embasar as análises feitas posteriormente (DOMINGUEZ, 2012).

4.1 Classificação das máquinas hidráulicas

Segundo (Macintyre,1997), as máquinas hidráulicas podem ser classificadas como:

- Máquinas motrizes;
- Máquinas geratrizes;
- Máquinas mistas.

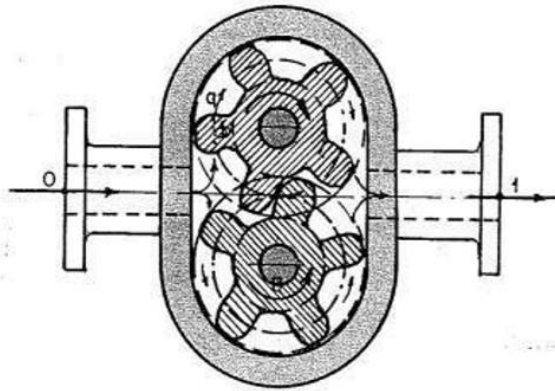
Na classificação definida por Macintyre (1997), tem-se as máquinas geratrizes ou simplesmente bombas, as quais são responsáveis pelo deslocamento de um fluido por escoamento. Estas máquinas transformam o trabalho mecânico em energia transferida ao fluido de trabalho. Este processo de transferência de energia, segundo (Macintyre,1997), é utilizado para classificar as máquinas geratrizes ou bombas em subcategorias como:

- Bombas de deslocamento positivo;
- Turbo bombas;
- Bombas especiais.

As bombas classificadas como de deslocamento positivo, são máquinas cuja energia de funcionamento é transferida ao líquido como força de pressão e este líquido é movimentado por meio da utilização de um mecanismo da própria bomba. As forças

transmitidas nesse movimento terão direção igual à direção do fluido de trabalho (MATTOS; FALCO, 2019). A Figura 1 representa uma categoria de bomba de deslocamento positivo, a qual é classificada como uma bomba rotativa de engrenagens, que consiste em utilizar duas rodas dentadas, as quais rotacionam e indicam o movimento do fluido:

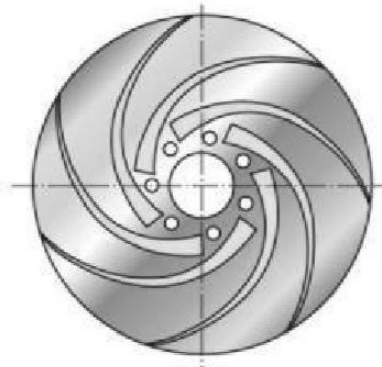
Figura 1 - Bomba de deslocamento positivo do tipo engrenagem.



Fonte: MACINTYRE (1997)

Destaca-se também as turbos bombas ou bombas roto-dinâmicas, que apresentam um sistema rotativo dotado de pás, o qual é denominado rotor e tem por principal função gerar uma força no fluido de trabalho, causando-lhe uma compressão (MACINTYRE, 1997). A Figura 2 ilustra um rotor do tipo radial. Conforme o formato deste mecanismo, as turbos bombas podem ser classificadas em: bombas centrífugas, fluxo axial, fluxo misto e periféricas (MATTOS; FALCO, 2019).

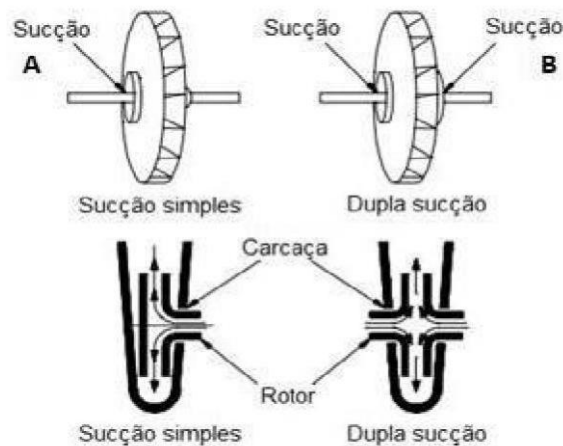
Figura 2 — Rotor do tipo radial.



Fonte: KSB (2021)

Existe outra classificação baseada no formato do impelidor, e esta depende do número de pontos por onde o fluido de trabalho entra no rotor, podendo ser de sucção simples ou de dupla sucção (ENTERPRISES, 1993). A Figura 3 ilustra esse tipo de classificação:

Figura 3 – Classificação de um rotor pelo tipo de sucção apresentado: a) sucção simples e b) dupla sucção.



Fonte: Adaptado de ENTERPRISES (1993).

4.2 Principais componentes das bombas centrífugas

Inicialmente, destaca-se a caixa de enchimento. É neste espaço com um formato cilíndrico, que se encontram os anéis de vedação e gaxetas, evitando ou controlando o vazamento de fluidos para o eixo e demais partes da bomba (MATTOS; FALCO, 2019). Com o ajuste dos parafusos da caixa, há o afastamento da sobreposta que comprime o material de selagem para dentro da caixa, tornando a vedação mais eficiente (ENTERPRISES, 1993). O eixo de uma bomba centrífuga é um elemento de transmissão de torque, o qual é aplicado em máquinas rotativas, sendo a principal função deste transferir o torque de um equipamento de comando, que pode ser um motor elétrico para a bomba (ENTERPRISES, 1993).

Para que o projetista realize uma adequada escolha do eixo utilizado, é necessário a análise de pontos, por exemplo, o material empregado para fabricação,

determinação da potência no eixo e as cargas envolvidas durante a aplicação do equipamento bem como as tensões (NORTON, 2013).

As gaxetas são responsáveis pela vedação e pela proteção da bomba contra possíveis vazamentos pelo eixo (MATTOS; FALCO, 2019). Como pode ser observado por meio da Figura 4:

Figura 4: Gaxetas utilizadas na vedação de bombas centrífugas



Fonte: JuntasBrasil (2022)

A voluta é uma parte importante para uma bomba, pois será responsável por receber o fluido de trabalho, proveniente do rotor de modo a conduzir o fluido até a descarga da bomba, preservando os parâmetros de velocidade e pressão constantes (UETA, 2018). O anel lanterna é uma peça que será usada para a passagem do líquido de selagem que fará a lubrificação das gaxetas e também auxiliará no resfriamento. O líquido de selagem é injetado por meio do anel lanterna, que direcionará o líquido para distribuí-lo pelos anéis de gaxeta (LOPES, 2017).

Outra peça bem característica das bombas centrífugas é o rotor ou impelidor (HENN, 2006), que possui uma variedade e fundamental importância para essa categoria de bombas, sendo estes os responsáveis por gerarem a força para acelerar o fluido de maneira a comprimi-lo (UETA, 2018).

As bombas dinâmicas podem ser caracterizadas por meio do modo de como se encontra o impelidor, seja na forma como este é feito, bem como a trajetória do

fluido ou pela quantidade de rotores (UETA, 2018). Na Figura 5 apresenta-se as três principais categorias de impelidores: aberto, semiaberto e fechado:

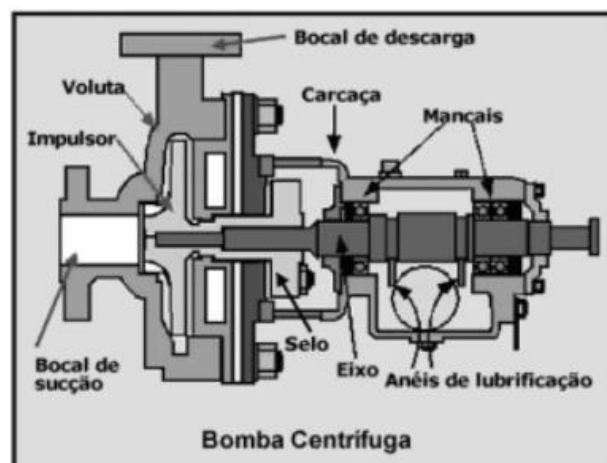
Figura 5 – Principais tipos de impelidores: a) aberto, b) semiaberto e c) fechado.



Fonte: UETA (2018)

Sendo estas bombas com subclassificação em dois tipos: puras ou radiais e do tipo Francis (MATTOS; FALCO, 2019). As bombas do tipo Francis apresentam um impelidor, palhetas que possuem uma curvatura em dois planos, a principal característica destas (MATTOS; FALCO, 2019). Quanto as bombas centrífugas radiais, estas conseguem obter energia por meio das forças centrífugas provenientes da rotação do impelidor especial para vazões baixas (MATTOS; FALCO, 2019). Convém ressaltar que a categoria de bomba que será objeto deste presente estudo, será a bomba do tipo centrífuga. Os principais componentes de uma bomba desse tipo são mostrados na Figura 6:

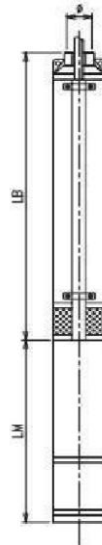
Figura 6 – Desenho esquemático dos principais componentes de uma bomba centrífuga.



Fonte: Adaptado de ENTERPRISES (1993).

Um tipo especial de uma bomba centrífuga são as bombas submersas. Estas recebem essa nomenclatura porque literalmente, trabalham submergidas no fluido de trabalho, que geralmente é a água (MACINTYRE, 1997). Nota-se por meio da Figura 7, o esquema de uma bomba submersa. Onde LB representa a localização da bomba e LM a localização do motor.

Figura 7– Representação esquemática de uma bomba submersa



Fonte: EBARA BOMBAS (2021)

Essas bombas submersas são geralmente utilizadas em espaços limitados, ou seja, com restrições de espaço (CLAUDINO *et al.*, 2020), como é o caso utilizado para drenagem da área próxima às lagoas de retenção localizadas na Multinacional em estudo. As bombas submersas apresentam um eixo vertical, sendo essa configuração projetada de modo a evitar que o ambiente onde estas bombas estejam inseridas, danifique a parte interna das mesmas (HENN, 2006). Este tipo específico de bombas é projetado para trabalhar na água, com objetivo de pressionar o fluido de trabalho (CLAUDINO *et al.*, 2020). Para melhor instalação e utilização dessa categoria de bomba, é necessário a realização de um estudo hidrológico, pois o bombeamento excessivo ou pouco eficiente pode ocasionar problemas para o solo e região ao entorno (MACINTYRE, 1997).

Algumas recomendações quanto ao uso das bombas submersas são necessárias, por exemplo, não trabalhar com bomba a seco, ou seja, é necessária uma coluna mínima de água, podendo ocasionar danos no mancal, evitar o

bombeamento de partículas sólidas em suspensão, evitando gerar lixamentos e danificar as partes metálicas da bomba (HENN, 2006).

Há também uma grande preocupação quanto o sistema de partida da bomba, pois o rotor deve estar submerso para o melhor funcionamento da mesma (CLAUDINO *et al.*, 2020).

4.3 Princípios do escoamento de fluidos

A análise dos fluidos e a caracterização destes é aplicada considerando alguns pressupostos necessários. Algumas principais propriedades dos fluidos são densidade, viscosidade, peso específico e pressão de vapor (MATTOS; FALCO, 2019). Por exemplo, a viscosidade é um ponto crucial nessa análise, tendo em vista que por meio desta se pode classificar as diferentes categorias de fluidos. Com isso, as forças viscosas e inercias em qualquer instante durante um escoamento podem ser determinadas por meio da equação de Reynolds mostrada na Equação 1, fornecendo uma informação de desprezar ou não as forças viscosas (FOX *et al.*, 2010):

$$Re = \rho \frac{VL}{\mu} \quad (1)$$

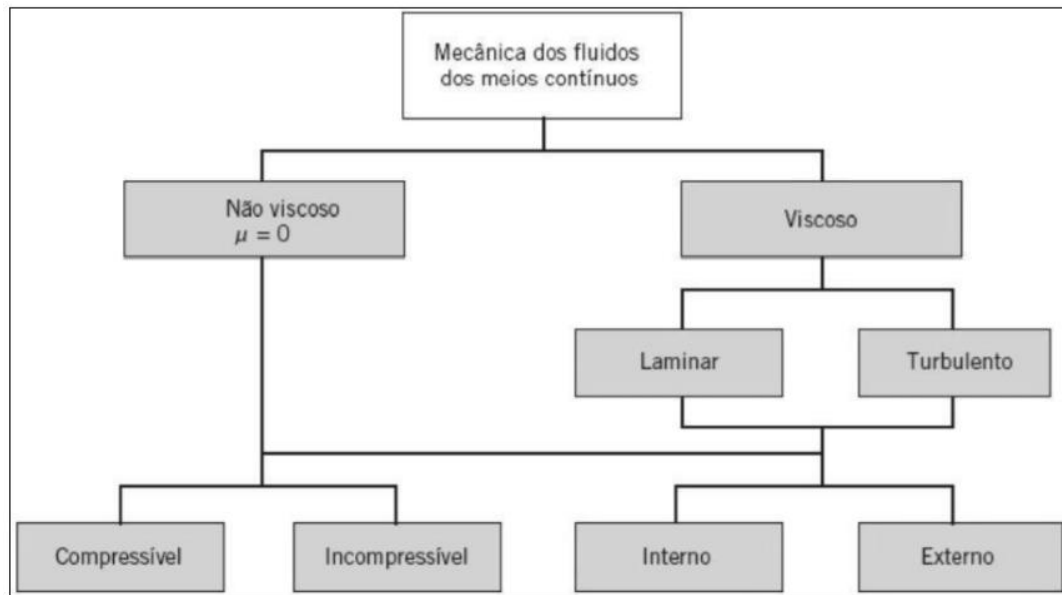
Onde:

ρ é massa específica (kg/m³), V e L são velocidade (m/s) e comprimento (m), respectivamente, e μ é a viscosidade dinâmica do fluido (cP).

Para este estudo em específico será dado ênfase ao regime de escoamento viscoso, interno e turbulento. Por escoamento turbulento, entende-se que em um fluido há uma grande movimentação das partículas de uma forma mais acelerada, devido ao aumento da velocidade dessa categoria de escoamento, sendo que para este padrão de escoamento, o número de Reynolds (Re) deverá ser maior ou igual do que 4000 (Re > 4000) (MATTOS; FALCO, 2019).

A ciência da Mecânica dos Fluidos classifica os fluidos conforme o esquema apresentado na Figura 8:

Figura 8 – Fluxograma da principal classificação dos fluidos



Fonte: FOX *et al.* (2010)

Os fluidos de trabalho podem ser classificados como compressíveis ou incompressíveis de acordo com a variação da densidade durante o escoamento (CENGEL, CIMBALA 2007). São chamados de fluidos incompressíveis, aqueles cuja variação da massa específica não é tão significativa. Porém, em situações que é necessário acompanhar essa variação e a mesma é relevante, pode-se classificar o fluido como compressível, por exemplo, os gases (FOX *et al.*, 2010).

Os gases possuem a característica de que, com a mudança de pressão de apenas 0,01 atm, há uma variação de 1% de densidade no ar atmosférico (CENGEL; CIMBALA, 2007). Para escoamentos internos ou externos, leva-se em consideração o meio físico em que o fluido esco, sendo fácil visualizar ambas as situações. Os fluidos envolvidos por superfície sólidas e/ou confinados são classificados como escoamentos internos, entretanto, quando existe escoamento ou interação sobre superfícies de corpos imersos, estes são chamados de escoamentos externos (FOX *et al.*, 2010). Para as análises dos fluidos incompressíveis, considerando a relação existente entre pressão, velocidade e elevação pode-se utilizar a relação conhecida como Equação de Bernoulli (CENGEL, CIMBALA 2007).

4.4 Teorema de Bernoulli

O teorema de Bernoulli é utilizado para descrever o comportamento de um fluido em movimento ao longo de uma linha de corrente, fornecendo para os fluidos a conservação da energia (GOMES, 2012). A equação de Bernoulli é originada da Equação de Euler, a qual é aplicada em casos de escoamento em regime permanente (GOMES, 2012), considerado como uma particularidade do princípio de conservação da energia (MATTOS; FALCO, 2019). Dessa forma, esta pode ser deduzida, considerando algumas hipóteses de propriedades uniformes no volume de controle (GOMES, 2012). Sendo assim é possível obter a equação na versão atual (Equação 2), para as condições de estado estacionário como proposta por Johann (1732), onde ao longo do escoamento, a soma das parcelas finais é igual à constante C (GONZALEZ; MEDEL; GONZALEZ, 2007; GOMES, 2012):

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = C \quad (2)$$

Tem-se a forma clássica da equação de Bernoulli, onde:

- p é a pressão (Pa);
- ρ massa específica (kg/m³);
- V velocidade do fluido (m³/s);
- g aceleração da gravidade (m/s²);
- z altura manométrica (m).

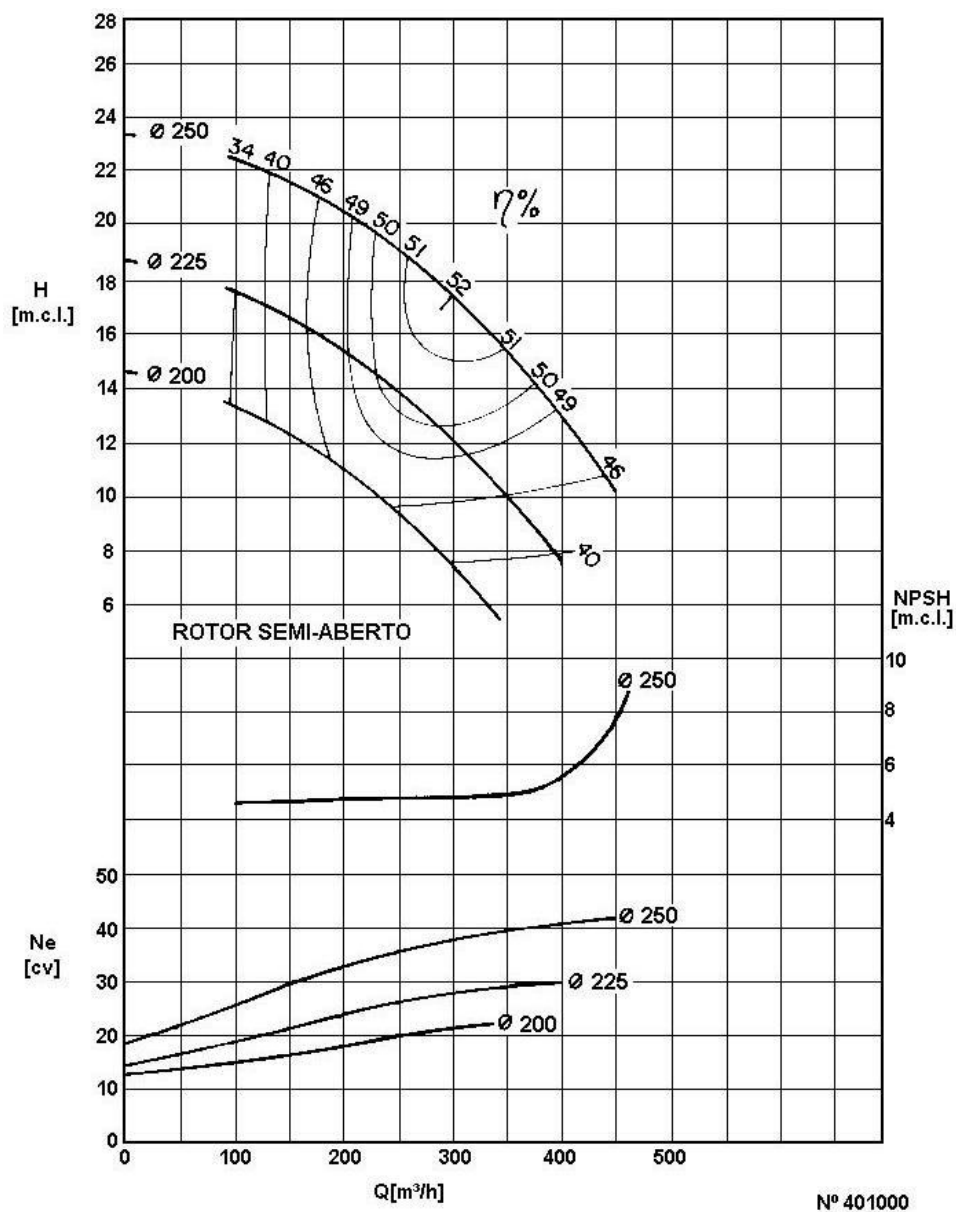
4.5 Desempenho das bombas centrífugas

Para que uma bomba centrífuga opere com uma melhor eficiência, é importante uma análise da curva característica desta (MATTOS; FALCO, 2019). Geralmente, estas curvas são fornecidas pelos fabricantes, sendo obtidas por meio de testes realizados com certificação pelo fornecedor, onde é possível obter uma relação da altura de elevação, potência e eficiência em função da vazão de água (OFUCHI, 2015). Uma característica importante da bomba é o BEP (*Better Efficiency Point*), que é definido como o melhor ponto de eficiência (CONNOR, 2011) e é uma característica particular de cada bomba centrífuga. Parte da energia cinética que não é convertida

em energia de pressão, é perdida e todos os pontos que ficam à esquerda ou a direita do BEP possuem menor eficiência, sendo assim o ideal é dimensioná-la para que fiquem o mais próximo do ponto de eficiência, ou seja, que fiquem dentro do range do BEP da bomba, melhorando também a confiabilidade desta (MATTOS; FALCO, 2019).

Na Figura 9 pode-se observar uma curva característica de uma bomba centrífuga cedida pelo fabricante.

Figura 9 – Curva característica de uma bomba centrífuga do tipo EHA 50-25 de rotação 1750 RPM



Fonte: EH Bombas (2010)

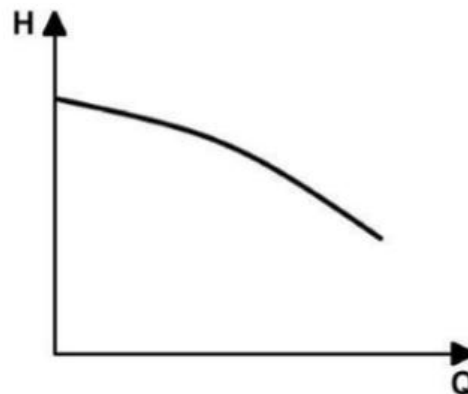
As curvas características das bombas centrífugas são divididas em três:

- Curva carga (H) *versus* Vazão (Q)
- Curva de potência absorvida (Pot_{abs}) *versus* Vazão (Q)
- Curva de rendimento total (η) *versus* Vazão (Q)

4.5.1 Curva carga (H) versus Vazão (Q)

Quanto à carga nos estudos de bombas, refere-se diretamente a altura total da bomba ou *head*. Tal característica é definida como a energia por unidade de massa, que será fornecida ao líquido de trabalho pela bomba (ZOLINI, 2021). Considerada a principal curva na seleção de uma bomba, esta curva é mostrada na Figura 10:

Figura 10 – Curva carga (H) *versus* Vazão (Q)



Fonte: Autora (2021)

A equação da vazão volumétrica é dada pela Equação 3:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3)$$

Onde Q (m³/s) é a vazão, V o volume do fluido (m³) e t o tempo decorrido (s). A carga (H_m) será dada pela medida manométrica convertida em metros de coluna de água e é dada pela Equação 4:

$$H_m = H_g + \Delta h \quad (4)$$

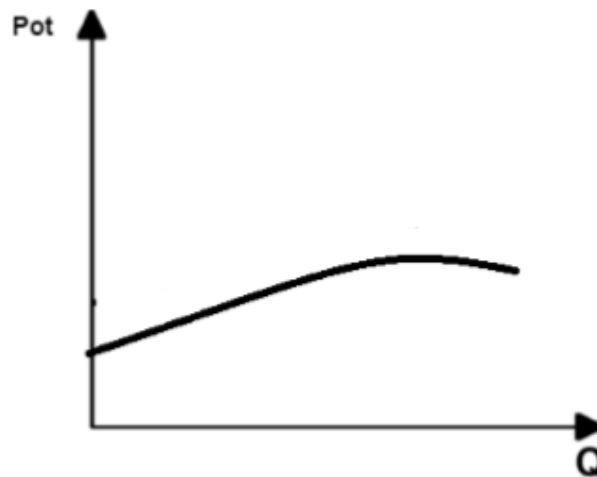
Onde H_g é altura estática de elevação e Δh é o somatório das perdas de carga da tubulação.

4.5.2 Curva de potência absorvida (Pot_{abs}) versus Vazão (Q)

Com essa curva pode-se analisar a potência absorvida pela bomba, que segundo MATTOS; FALCO (2019) é o principal aspecto utilizado para determinar a potência requerida que acionará a bomba que será usada.

Na indústria, nota-se que temporalmente, ocorre a perda da eficiência do sistema de bombeamento. Dessa forma, pode-se inferir que uma parte dessa potência será perdida durante o processo, ou seja, não será totalmente cedida ao fluido de trabalho (ZOLINI, 2021). A Figura 11 mostra o comportamento da Potência absorvida *versus* Vazão do fluido:

Figura 11 – Curva de potência absorvida (Pot_{abs}) *versus* vazão (Q)



Fonte: (Autora 2021)

4.5.3 Curva de rendimento total (η) versus Vazão (Q)

Para definir o rendimento total (η), realiza-se o produto dos rendimentos hidráulico (η_h), volumétrico (η_V) e mecânico (η_M) como notado pela Equação 5 (ZOLINI, 2021):

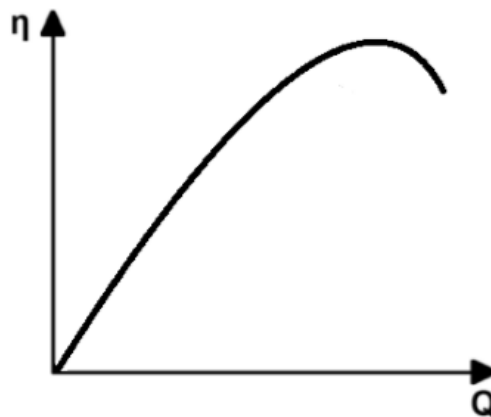
$$\eta = \eta_h \times \eta_V \times \eta_M \quad (5)$$

Também pode-se definir o rendimento total por meio da relação mostrada na Equação 6 (MATTOS; FALCO, 2019).

$$\eta = \frac{\text{Potência útil cedida ao fluido}}{\text{Potência absorvida pela bomba}} = \frac{Pot_c}{Pot_{abs}} \quad (6)$$

A curva de Rendimento *versus* Vazão, a qual deve ser fornecida pelo fabricante é apresentada na Figura 12 e tem a seguinte representação (ZOLINI, 2021):

Figura 12 – Curva de Rendimento *versus* Vazão



Fonte: Autora (2021)

4.6 Cavitação

Os fluidos apresentam um comportamento interessante, que se caracteriza na mudança de fase líquido-vapor e pode ocorrer pelo aquecimento ou pela variação da pressão. Quando se refere à mudança de estado líquido-vapor por meio da diminuição da pressão, esse fenômeno é chamado de cavitação (OLIVEIRA, 2019).

No momento que se tem uma pressão absoluta, atingindo o mesmo valor da pressão de vapor dos líquidos na temperatura em que este se encontra, ocorre de forma instantânea, a vaporização do mesmo, caracterizando-se pela formação de pequenas bolsas de vapor, bolhas ou cavidades. Além de danificar o material da bomba, estas podem causar o possível aparecimento de pequenas trincas, ocasionando prejuízos e baixo rendimento da bomba (JUNIOR; MORAIS; DIAS, 2019).

Quanto às bombas centrífugas, a região crítica para análise do fenômeno é na entrada do impelidor (ZOLINI, 2021), sendo este ponto de pressão mínima que não deve ser menor que a pressão de vapor do fluido (POTTER; WIGGERT, 2004), pois

o fluido de trabalho ainda não adquiriu a energia proveniente do impelidor, o que pode ter ocorrido foi que o fluido tiver a energia subtraída pelas perdas de carga na tubulação de sucção e entrada da bomba (PINHEIRO, 2008). Para análise do fenômeno da cavitação, a variação de pressão é obtida pela Equação 7:

$$\Delta p = p_l + p_v \quad (7)$$

Onde p_l é a pressão na corrente líquida e p_v é a pressão de vapor do líquido. Tendo em vista essas variáveis e os parâmetros ρ e V , obtém-se o número ou índice de cavitação (Ca), conforme mostrado pela Equação 8 (FOX *et al.*, 2010):

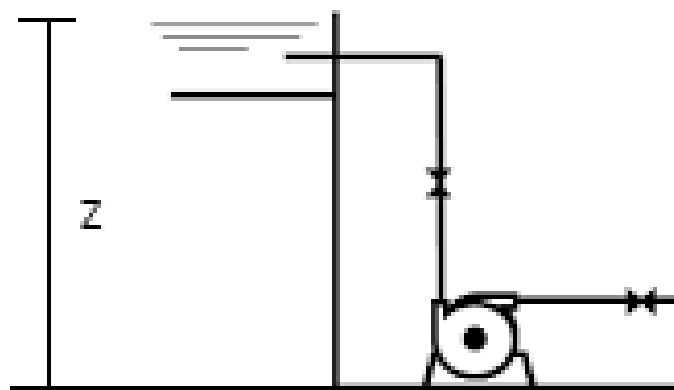
$$Ca = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2}\rho v^2} \quad (8)$$

Os principais problemas ocasionados pela cavitação são barulho, danificação do material do sistema de bombeamento, vibração elevada e alteração das curvas características da bomba (PINHEIRO, 2008).

4.6.1 Equacionamento da cavitação em bombas

Considerando-se o sistema de bombeamento, mostrado na Figura 13:

Figura 13 – Representação de um sistema de sucção de uma bomba



Fonte: Adapto de PINHEIRO (2008)

Para analisar a cavitação em bombas, deve-se definir dois importantes parâmetros: o $NPSH_d$ (disponível) e $NPSH_r$ (requerido) pela bomba (PINHEIRO,

2008). O NPSH (*Net Positive Suction Head*) significa em tradução livre, Carga de Sucção Positiva Líquida.

O NPSH_d (disponível) representa o quanto de energia absoluta por unidade de peso existe no flange de sucção da bomba, depende das características do fluido, bem como de todo o sistema, o equacionamento é dado pela Equação 9:

$$NPSH_d = \frac{P_{fs}}{\gamma} + \frac{V_{fs}^2}{2g} + \frac{P_{atm} - P_v}{\gamma} \quad (9)$$

Onde:

- P_{fs} é a pressão na sucção (Pa);
- V_{fs} velocidade do escoamento (m/s);
- γ peso específico do fluido (N/m³);
- g aceleração gravitacional (m/s²);
- P_{atm} pressão atmosférica (Pa);
- P_v pressão de vapor do fluido (Pa).

O NPSH_r (requerido) é a menor quantidade de energia por unidade de peso, acima da pressão de vapor, que deve existir no flange de sucção, de modo a evitar cavitação e dependerá das características da bomba e do fluido de trabalho (ZOLINI, 2021). O NPSH_r (requerido) é obtido por meio da Equação 10 (PINHEIRO, 2008):

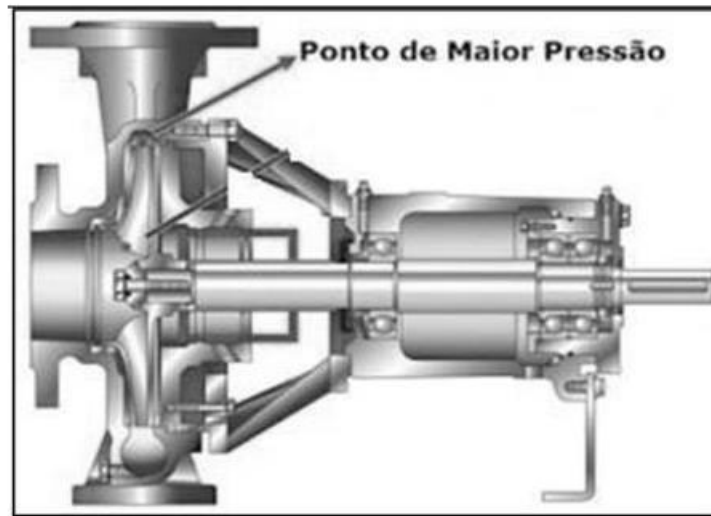
$$NPSH_r = H_{fi} \frac{V_1^2}{2g} + \frac{\lambda V_{r1}^2}{2g} \quad (10)$$

Onde tem-se:

- H_{fi} perda de carga no flange de sucção do impelidor (m);
- λ fator experimental do equipamento, controlado apenas pelo fabricante;
- V_{fs} Velocidade absoluta na sucção (m/s²);
- V_{r1} Velocidade relativa na sucção (m/s²);

A Figura 14 ilustra o ponto de maior pressão na entrada de um impelidor.

Figura 14: Representação esquemática do processo de cavitação em uma bomba centrífuga.



Fonte: Adaptado de JUNIOR; MORAIS; DIAS (2019)

4.7 Seleção e especificação de bombas

Para seleção de uma bomba são realizados alguns procedimentos e critérios para selecionar o modelo mais adequado para um sistema (SOUZA, 2014). Segundo MATTOS; FALCO (2019), para selecionar e especificar uma bomba, alguns passos devem ser seguidos:

- Seleção do tipo de uma bomba;
- Seleção do modelo de uma bomba;
- Escolha dos materiais de construção da bomba;
- Determinar os detalhes construtivos da bomba.

4.7.1 Seleção do tipo de uma bomba

Para selecionar uma bomba adequada para uma determinada função, alguns fatores são determinantes para uma escolha eficiente. Características como velocidade específica, vazão, carga e categoria de fluido de trabalho (MATTOS; FALCO, 2019). Para as bombas centrífugas ou turbobombas que são os modelos mais utilizados, têm-se por principais pontos positivos (MATTOS; FALCO, 2019):

- O acionamento destas é feito diretamente por um motor elétrico;
- Funcionam em regime permanente;
- Flexibilidade de trabalho;
- Menos custos de manutenção;
- Atendem a variadas vazões;
- Considerável custo-benefício.

Algumas normas são utilizadas durante a confecção do projeto ou das bombas, por exemplo, as normas API 610 (ANSI,2010) e ANSI B73.1 (ASME, 2018) utilizadas em bombas da indústria química e de processo (MATTOS; FALCO, 2019).

4.7.2 Seleção do modelo de uma bomba

Na construção de um conjunto de bombeamento eficiente, é necessário escolher o modelo de bomba que melhor se adéqua as características do sistema (SOUZA, 2014).

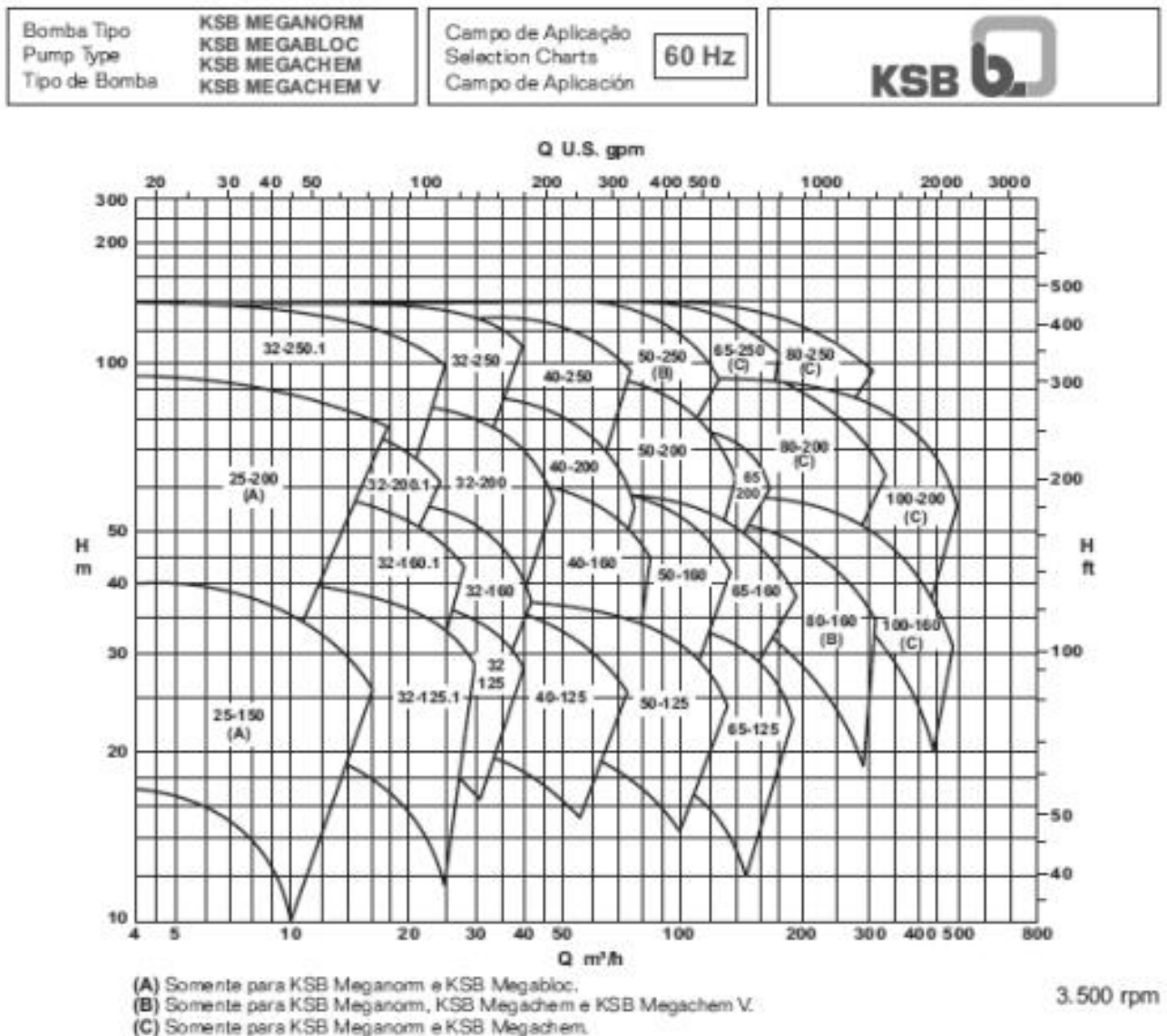
Após selecionar o tipo e bomba para a determinada aplicação, deve-se escolher o modelo e será nesta etapa que também há a definição de todas as propriedades técnicas como rotação, diâmetro do rotor, vazão, NPSH e potência (MATTOS; FALCO, 2019).

Para escolha, há necessidade de utilizar como apoio, o ábaco do fabricante, que é um documento que reúne diversos modelos de bomba do fabricante onde, definindo-o pode-se escolher a bomba dentre as opções existentes. É interessante a escolha de um fabricante confiável e que este seja de renome e com uma boa aplicação na área, bem como o fluido de trabalho (SOUZA, 2015).

Com o ábaco de cobertura mostrado na Figura 15, bem como a curva da bomba da Figura 16, será possível obter os dados necessários para prosseguir com o projeto (MATTOS; FALCO, 2019). A partir destes, pode-se determinar a "família" ideal de diferentes bombas (TAGLIAFERRO, 2011).

Outro ponto importante e que merece total atenção, é a seleção do material da bomba. Essa escolha está associada como uma função do fluido de trabalho.

Figura 15 – Ábaco de cobertura de uma bomba centrífuga KSB 60Hz fornecido pelo fabricante KSB

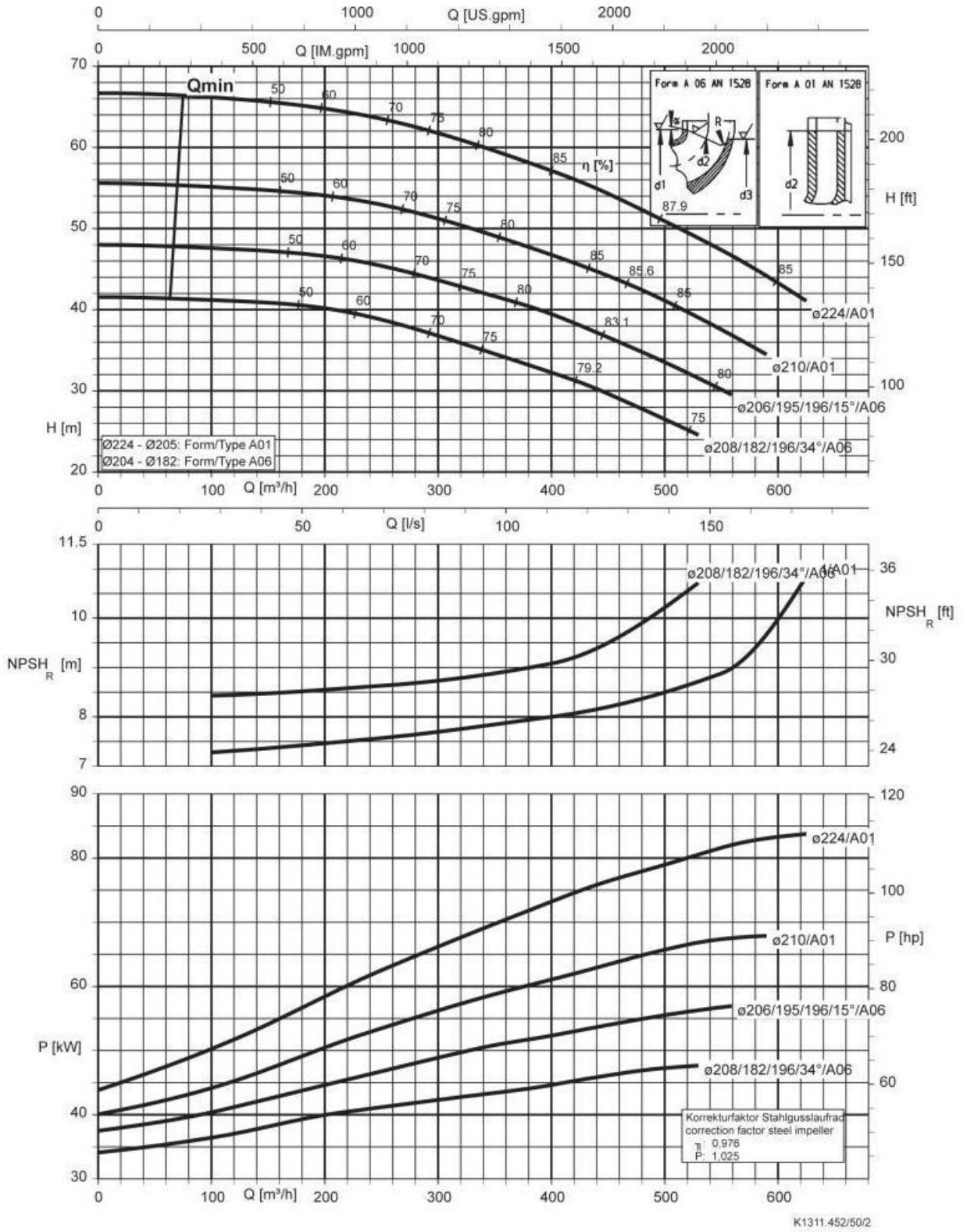


Fonte: Retirada do catálogo de bombas do fabricante (KSB 2012)

Considerando-se sempre algumas experiências anteriores de aplicações iguais ou semelhantes, atentar-se ao fato de que é importante a solicitação prévia junto ao fabricante de todas as informações pertinentes (MATTOS; FALCO, 2019).

A Figura 16 apresenta um modelo de uma curva da bomba do fabricante KSB e utilizam-se as curvas mostradas nessa figura para análise do melhor desempenho:

Figura 16 – Curva da bomba KSB Etanorm 2900 rpm



Fonte: Retirada do catálogo do fabricante KSB (2012)

5. Metodologia

Esta seção descreve a metodologia empregada neste estudo para alcançar os objetivos propostos. Considerando-se todas as etapas envolvidas neste projeto, será realizada uma verificação dos problemas onde poderá ser possível a realização de modificações, levando em consideração que o sistema de bombeamento apresentou problemas durante o seu funcionamento.

De acordo com Ferro (2011) e Souza (2014), as principais etapas para uma correta seleção de uma bomba centrífuga são:

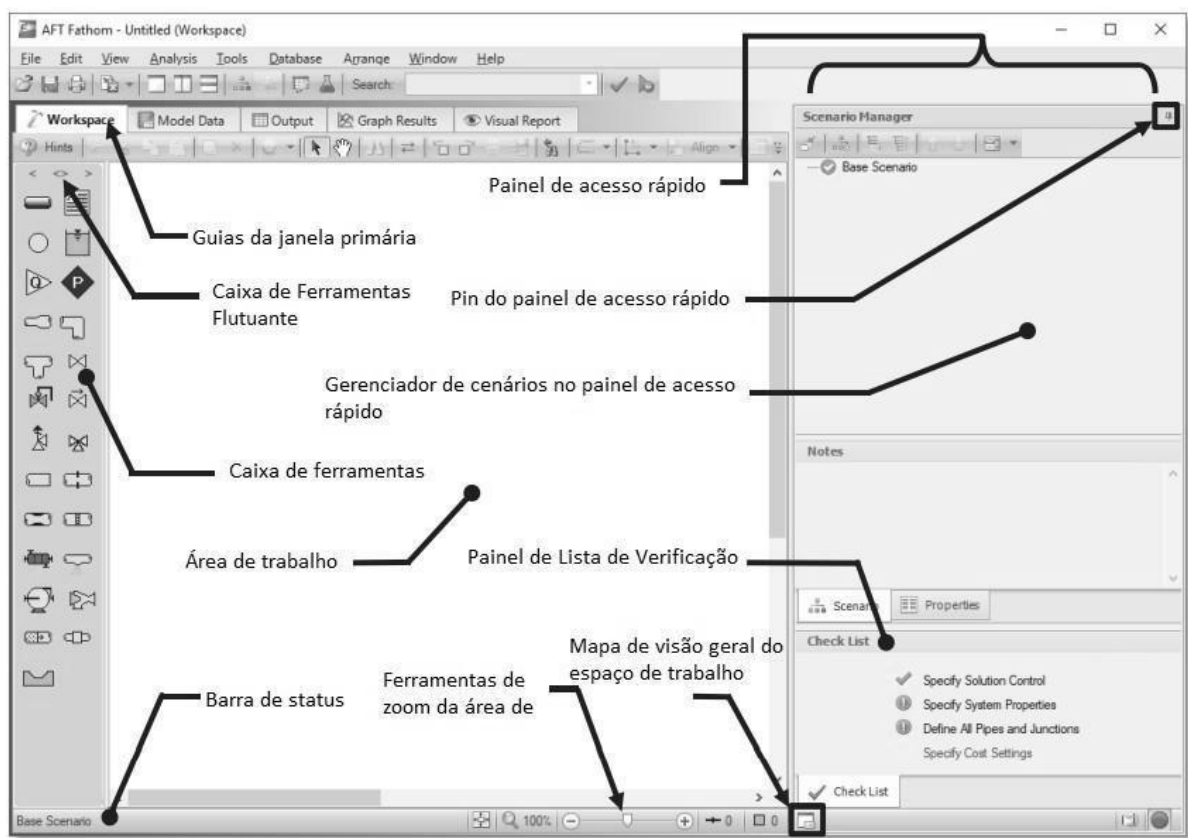
- Estimar a vazão volumétrica necessária para atender a demanda da área;
- Determinar as perdas de carga do sistema;
- A altura manométrica total da bomba;
- Determinar o modelo da bomba por meio do ábaco do fabricante;
- Calcular a potência estimada do motor elétrico;
- Analisar as condições de cavitação;
- Verificar o ponto ótimo de funcionamento da bomba.

Baseado nas análises de rendimento, NPSH, potência e custo, pode-se, então, selecionar uma correta bomba centrífuga (HENN, 2006). Os dados junto ao fabricante serão obtidos como as curvas características das bombas, mostrada na Figura 29 e modelo das mesmas. Para a melhor escolha do modelo da bomba, serão utilizados como referência modelos que atualmente estão em funcionamento na fábrica.

Para uma análise das falhas, será utilizado um sistema de investigação utilizado pela NASA, que determina todos os possíveis motivos que levam às falhas e auxilia na determinação da causa raiz do problema, também conhecido como a Metodologia APOLLO (LAMB, 2015). Essa metodologia busca compreender detalhadamente o problema em análise. Contudo, é necessária uma equipe multidisciplinar para julgar os itens críticos e que possam ocasionar os problemas encontrados, saber de fato qual é o problema em questão para poder direcionar as ações corretas para cada resolução, além de obter todas as possíveis soluções baseadas em relações de causas e efeitos conhecidos.

Para a análise do modelo hidráulico será utilizado o programa AFT FATHOM. O FATHOM é um sofisticado programa de análises de fluxos em tubulações e sistemas hidráulicos, muito utilizado para auxiliar o engenheiro durante as atividades rotineiras de trabalho. A versão utilizada neste estudo foi a 10.0 (FATHOM, 2018), o qual será empregado na construção de sistemas de bombeamento, bem como na melhoria do desempenho da bomba. A interface de trabalho desse referido sistema operacional (FATHOM) é mostrada na Figura 17:

Figura 17: Tela inicial do software AFT FATHOM 10



Fonte: Adaptado de AFT FATHOM 10 (2018)

6. Avaliação do objeto de estudo

6.1 Prospecção do espaço a ser investigado

A refinaria possui lagos responsáveis pela captação da água pluvial. De maneira geral, esses rejeitos passam por um tratamento específico da empresa. O objetivo principal dos lagos é que após o tratamento, seja possível a reutilização dessa

água novamente no processo de produção de alumina, de forma a minimizar os possíveis impactos causados ao meio ambiente (ALCOA, 2022). Nesse conglomerado existem também as lagoas de detenção, as quais são responsáveis por armazenar água pluvial, com um pH controlado e que será conduzida ao ambiente sem que haja maiores danos ao meio ambiente, sendo esta usada como escopo para este estudo. A Figura 18 apresenta a localização da lagoa de detenção:

Figura 18 – Detalhe da área de localização de uma lagoa de detenção da refinaria



Fonte: Google Maps (2022)

Os lagos de detenção são importantes para o processo de produção de alumina, pois são locais onde a água será armazenada para ser reutilizada, evitando desperdícios e/ou contaminação (ALUMAR 2018). Estes reservatórios são áreas com uma vasta extensão territorial e possuem uma grande importância para o processo, pois evitam gastos excessivos com água, tendo significativa relevância do ponto de vista ambiental, visto que a fábrica possui um sistema contínuo de produção.

6.2 Os lagos de detenção

Os lagos de detenção são locais, que preservam a água pluvial ótima para retorno ao meio ambiente, estes estão localizados em áreas de grande extensão e possuem um elevado grau de criticidade, pois tratam de uma região com grandes volumes de água e em algumas regiões existe a presença de pessoas, podendo ser um risco para a saúde e integridade das mesmas (ALUMAR, 2018). Para garantir uns

dos principais valores da empresa (ALCOA, 2022), que é o de cuidar de pessoas e agir com segurança, faz-se necessário uma maior atenção nessas localidades. Dessa forma, é imprescindível garantir todos os fatores para que estes tornem seguros a funcionalidade desses sistemas.

De posse de tais informações, são necessárias bombas para realizarem a drenagem de fundo dos lagos de detenção. Essas bombas de drenagem que ficam localizadas próximo à lagoa de detenção, são importantes pois auxiliam na diminuição de umidade nas encostas da lagoa, bem como para bombear a água do subsolo para o córrego que fica próximo aos lagos. Tal atividade evita excesso de água no solo, podendo ocasionar erosão, abaixamento e deslizamentos de terra, tornando inviável o tráfego de automóveis e pessoas naquele local, além de sérios problemas ambientais (ALUMAR, 2018). A Figura 19 apresenta uma vista de topo do projeto de localização das bombas, as quais são empregadas para a finalidade de drenagem.

Figura 19 - Área de localização dos poços onde serão instaladas as bombas, os quais são denominados PZ/E-1, PZ/E-2, PZ/E-3 e PZ/E-4



Fonte: HIDROSONDA (2019)

O processo de drenagem é realizado por quatro bombas iguais, que estão localizadas próximo ao lado de detenção e está em destaque na Figura 19. No

presente trabalho, analisou-se uma única bomba denominada como BA-01, para o estudo necessário de determinação do modelo de bomba.

6.3 Compreensão de uma investigação preliminar

Com as frequentes falhas das bombas existentes, fez-se necessário um novo estudo para avaliar quais falhas foram identificadas e assim, possivelmente, sanar a causa raiz do problema, além de determinar a melhor bomba para a aplicação. Tendo em vista que, o projeto visava mitigar a erosão no talude do lago. Para identificar quais os possíveis vilões de forma que, o problema não se tornasse recorrente.

Para a análise da causa raiz ou principal, utilizou-se a Metodologia APOLLO, onde para cada uma das possíveis causas encontradas, foi necessário um estudo de Engenharia para determinar a possibilidade se há ou não um problema a ser considerado nos estudos. A metodologia APOLLO é uma ferramenta muito útil e versátil para analisar um problema de engenharia, consiste em um método simples e ao mesmo tempo, poderoso que faz uma completa verificação do sistema falho e nos dá os melhores meios para seguir e propor melhorias.

Considerando-se todas as possíveis falhas mecânicas encontradas, que possam evidenciar os problemas ocorridos, ainda assim houve a necessidade de verificação de todas as possíveis causas, de modo que o setor de Engenharia chegasse à resolução adequada.

No presente trabalho, foi realizada a análise e escolha de uma nova bomba para utilização na drenagem do fundo da lagoa de retenção de água pluvial, para isso, é necessário avaliar os parâmetros de modo a obter um resultado eficaz (SOUZA, 2014). Por meio desta, pode-se obter uma visão ampliada do problema, considerando as possíveis causas mecânicas encontradas, embasados pelo método APOLLO explanado anteriormente, conforme mostrado no fluxograma apresentado na Figura 20.

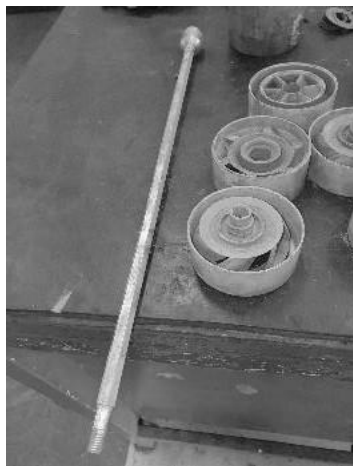
Figura 20 – Fluxograma da Metodologia APOLLO para determinação da Causa Raiz das falhas mecânicas



Fonte: Autora (2022)

Como um exemplo, pode-se citar que não houve o travamento da antiga bomba, pois não há acúmulo de material sólido sedimentado na região interna da bomba, contaminando os rotores, eixo (Figura 21) que pode ser evidenciado na Figura 21:

Figura 21: Evidência de que não há danos nas partes internas da bomba antiga.



Fonte: Autora (2022)

Considerando-se também outro problema apresentado por meio da Metodologia de APOLLO, observou-se a possibilidade de “trabalho em vazio”, o que significou dizer que, não havia altura de coluna de líquido mínima para que a bomba

pudesse realizar a sucção do líquido (CENGEL; CIMBALA, 2007) e em consequência disso, ocasionou danos aos mancais. Porém, conforme os registros e acompanhamentos hidrológicos mediante monitoramento exclusivo da Engenharia Civil da região dos lagos pôde-se confirmar que não houve consideráveis paradas por alegação de falta de água para o bombeamento. O monitoramento hidrológico do nível de água na bomba BA-01 mostrou-se sempre acima do nível mínimo exigido para o funcionamento da bomba, ou seja, de 3,9 m.

Outro ponto crítico identificado como uma possível falha para as bombas seriam a obstrução dos filtros tipo peneiras pela presença de partículas abrasivas, ocasionando a obstrução da peneira e podendo gerar uma cavitação, levando também, ao desgaste acelerado da bomba e causar a possível falha desta (JARDIM, 2015) porém não há evidências de obstrução como se pode observar na Figura 22

Figura 22 – Filtro peneira da bomba sem a presença de material sólido.



Fonte: Autora (2022)

A presença de material acumulado sobre as partes metálicas das bombas poderia ser um dos principais problemas na deterioração destas, porém foi ercebido que não houve uma crescente aceleração no estado de degradação destas, ocasionando um desgaste por abrasão (RIJEZA, 2022).

7. Resultados e Discussão

Ao deparar-se com condições ambientais de grandes riscos envolvidos, faz-se necessário uma análise mais cuidadosa do sistema de bombeamento. No caso do presente estudo, os poços que serão beneficiados com bombas para realizar o bombeamento do nível da água a um valor considerável de 50 m, estes sofrerão com o rebaixamento, ou seja, uma diminuição do nível de água submersa (HIDROSONDA, 2021).

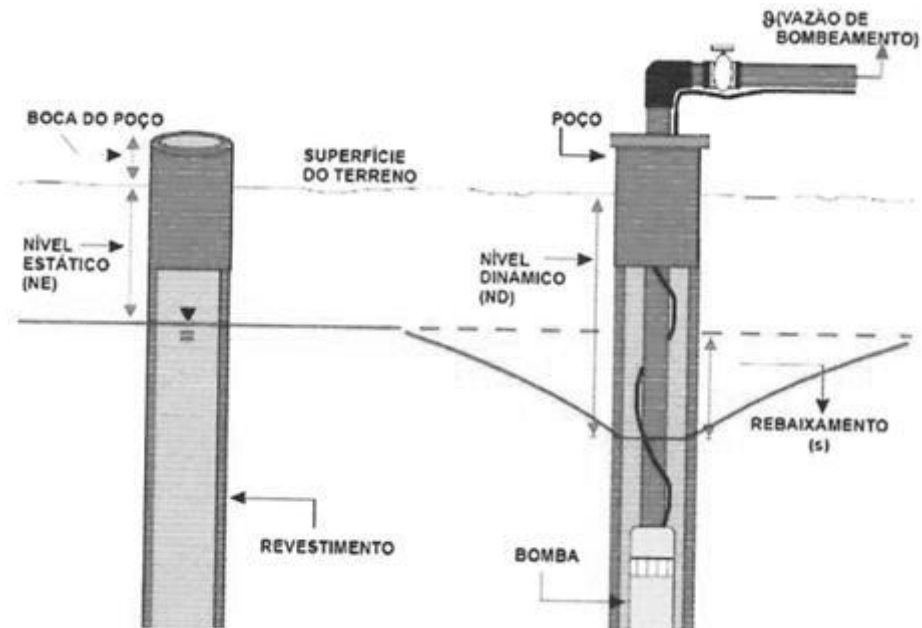
Por outro lado, uma situação inversa pode também ocorrer, cuja água retornará ao nível original (estático), ou seja, isso ocorre quando há desligamento da bomba ou falha mecânica desta. Essa atividade executada denomina-se de recuperação (HIDROSONDA, 2021).

Para o caso em análise, há algumas variantes que necessitam de monitoramento:

- Vazão a ser bombeada;
- Rebaixamento do nível da água do poço;
- Nível estático;
- Nível dinâmico, o qual é definido como o intervalo entre o terreno onde será construído o poço e o nível da água no poço após o início das atividades de bombeamento;
- Tempo.

É importante ressaltar que a vazão a ser bombeada deve atender a demanda mínima exigida pela área, o rebaixamento do nível da água do poço, nível estativo e nível dinâmico são controlados de modo a evitar qualquer dano ao solo, ocasionando problemas ainda maiores como interdição da área. Outro fator necessário e inquestionável, é a saúde do meio ambiente do entorno, evitar que qualquer atividade venha a degradar a fauna e flora local é essencial para a Empresa. A Figura 23 ilustra as variáveis que poderão ser testadas e monitoradas após a definição da bomba empregada, essas variáveis são necessárias para entender o comportamento do poço antes e durante o trabalho da bomba.

Figura 23 - Variáveis passíveis de monitoramento no poço.



Fonte: HIDROSONDA (2021)

7.1 Investigação da Vazão mínima necessária

Para a melhor escolha da bomba, primeiro, fez-se necessário a determinação da vazão empregada no sistema a ser avaliado. Para aplicação de drenagem dos lagos de detenção, foi necessária uma vazão de aproximadamente $14 \text{ m}^3/\text{h}$. Os dados construtivos do poço estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados construtivos do poço na área dos lagos de detenção.

Medidas necessárias para construção do poço	Dados coletados
Profundidade perfurada	21,0 m
Profundidade revestida	20,0 m
Diâmetro da perfuração	0,254 m
Diâmetro do revestimento	0,102 m
Nível estático	3,9 m
Nível dinâmico	9,7 m
Comprimento da tubulação	30,0 m

Fonte: Autora (2022)

Considerando-se as informações de projeto, foi necessário escolher uma bomba submersa que melhor se adequasse ao sistema pretendido. A Figura 24

mostra um modelo de uma bomba submersa EBARA 60Hz, modelo 4BPS e possui rotores fabricados em um avançado tipo de polímero. Tecno Polímeros ou Polímeros avançados são materiais que alinham qualidade, responsabilidade ambiental e eficiência, permitindo que os equipamentos desenvolvidos a partir dessa nova linha de material seja menos tóxico, boas propriedades e melhor performance (GONZALÉZ, 2018):

Figura 24 – Bomba submersa EBARA 60Hz, com bombeadores em aço inoxidável e rotores em tecno polímero de vazão máxima de 27,6 m³/h.



Fonte: EBARA (2021)

7.2 Determinação da perda de carga

Para o cálculo de perda de carga, deve-se considerar a equação 11:

$$PC = C_T \times F_{pc} \quad (11)$$

Onde C_T é o comprimento da tubulação e F_{pc} é o fator de perda de carga da tubulação. Dessa forma, utilizou-se da Figura 25 para auxiliar na determinação do fator de perda de carga. Considerando-se o caso particular deste estudo, onde se tem uma vazão mínima necessária de 14 m³/h e uma tubulação de PVC com 4" de diâmetro, foi possível por meio da Figura 25, obter para $F_{pc} = 0,2$.

De posse desse valor foi possível definir o valor ótimo para a perda de carga, o qual apresentou um valor de aproximadamente 10 m.

$$PC = 50 \times 0,2 = 10 \text{ m}$$

Figura 25 - Percentual perda de carga de tubulações PVC com variadas vazões e diâmetros

















Vazão m ³ /h	PVC		PVC		PVC		PVC		PVC		PVC		PVC		PVC		Vazão m ³ /h
	3/4"	1"	1 1/4"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"	4"	5"								
0,5	1,5	1,3	0,5	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1									0,5
1,0	4,9	4,8	1,6	1,6	0,4	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1							1,0
1,5	10,0	10,1	3,3	3,4	0,9	0,9	0,5	0,4	0,1	0,1							1,5
2,0	16,5	17,2	5,4	5,8	1,4	1,5	0,8	0,7	0,2	0,2	0,1	0,1					2,0
2,5	24,4	26,1	8,0	8,8	2,1	2,3	1,2	1,1	0,4	0,3	0,1	0,1					2,5
3,0	33,6	36,5	11,0	12,3	2,9	3,2	1,6	1,5	0,5	0,5	0,1	0,1	0,1	0,1			3,0
3,5	44,0	48,6	14,4	16,4	3,8	4,2	2,1	2,0	0,6	0,6	0,2	0,2	0,1	0,1			3,5
4,0	55,6	62,2	18,2	21,0	4,8	5,4	2,7	2,6	0,8	0,8	0,2	0,2	0,1	0,1			4,0
4,5	68,3	77,3	22,3	26,1	6,0	6,7	3,3	3,2	1,0	1,0	0,3	0,3	0,1	0,1			4,5
5,0	82,2	94,0	26,8	31,7	7,2	8,1	4,0	3,9	1,2	1,2	0,3	0,3	0,1	0,2			5,0
5,5	97,1		31,7	37,8	8,5	9,7	4,7	4,6	1,4	1,4	0,4	0,4	0,2	0,2	0,1	0,1	5,5
6,0			36,9	44,4	9,9	11,4	5,4	5,4	1,6	1,7	0,5	0,5	0,2	0,2	0,1	0,1	6,0
6,5			42,6	51,5	11,3	13,2	6,3	6,3	1,9	2,0	0,5	0,5	0,2	0,2	0,1	0,1	6,5
7,0			48,4	59,1	12,9	15,2	7,1	7,2	2,1	2,3	0,6	0,6	0,3	0,3	0,1	0,1	7,0
7,5			54,6	67,1	14,6	17,2	8,0	8,2	2,4	2,6	0,7	0,7	0,3	0,3	0,1	0,1	7,5
8,0			61,1	75,6	16,3	19,4	9,0	9,2	2,7	2,9	0,8	0,8	0,3	0,4	0,1	0,1	8,0
8,5			67,9	84,6	18,1	21,7	10,0	10,3	3,0	3,2	0,8	0,9	0,4	0,4	0,1	0,1	8,5
9,0			75,1	94,0	20,0	24,1	11,1	11,5	3,3	3,6	0,9	1,0	0,4	0,5	0,1	0,1	9,0
9,5			82,5		22,0	26,7	12,2	12,7	3,6	4,0	1,0	1,1	0,4	0,5	0,1	0,1	9,5
10			90,3		24,1	29,3	13,3	13,9	4,0	4,4	1,1	1,2	0,5	0,5	0,1	0,2	10
12					33,1	41,1	18,3	19,5	5,4	6,1	1,5	1,7	0,7	0,8	0,2	0,2	12
14					43,4	54,6	24,0	25,9	7,1	8,1	2,0	2,3	0,9	1,0	0,2	0,3	14
16					54,8	69,9	30,3	33,2	9,0	10,4	2,5	2,9	1,1	1,3	0,3	0,4	16
18					67,4	87,0	37,2	41,3	11,1	12,9	3,1	3,6	1,4	1,6	0,4	0,1	18
20					81,0		44,8	50,2	13,3	15,7	3,7	4,4	1,6	2,0	0,5	0,5	20
25							66,2	75,8	19,7	23,7	5,5	6,6	2,4	3,0	0,7	0,8	25
30							91,1		27,1	33,3	7,6	9,3	3,3	4,2	0,9	1,2	30
35									35,5	44,3	10,0	12,4	4,4	5,6	1,2	1,5	35
40									44,8	56,7	12,6	15,8	5,5	7,1	1,5	2,0	40
45									55,1	70,4	15,5	19,7	6,8	8,9	1,9	2,4	45
50									66,2	85,6	18,6	23,9	8,1	10,8	2,3	3,0	50
55									78,2		22,0	28,5	9,6	12,9	2,7	3,5	55
60									91,1		25,6	33,5	11,2	15,1	3,1	4,2	60
65											29,5	38,9	12,9	17,5	3,6	4,8	65
70											33,5	44,6	14,6	20,1	4,1	5,5	70
75											37,8	50,7	16,5	22,8	4,6	6,3	75
80											42,4	57,1	18,5	25,7	5,1	7,1	80
85											47,1	63,8	20,6	28,8	5,7	7,9	85
90											52,1	71,0	22,7	32,0	6,3	8,8	90
95											57,2	78,4	25,0	35,3	6,9	9,7	95
100											62,6	86,2	27,3	38,9	7,6	10,7	100
120												86,1	37,6	54,5	10,4	15,0	120
150													55,6	82,3	15,4	22,7	150
200													91,9		25,5	38,6	200
250															37,7	58,3	250
300															51,8	81,7	300
350															67,9		350
400															85,7		400

Fonte: SCHNEIDER (2021)

Portanto, a Figura 26 apresenta os valores de para algumas curvas, válvulas e os respectivos valores da perda de carga localizada, que são a presença de acessórios ao longo da tubulação (AMARAL; AMARAL, 2016).

Os acessórios utilizados no sistema de bombeamento estudado, foi um joelho de 90° e um registro de gaveta aberto, conforme pode-se observar suas respectivas perdas da carga na Figura 26:

Figura 26 – Fatores de perdas de carga para os diferentes acessórios utilizados no sistema de bombeamento.

Diâmetro nominal		Joelho 90°	Joelho 45°	Curva 90°	Curva 45°	Tê 90° passag. direta	Tê 90° saída de lado	Tê 90° saída bilat.	Entrada normal	Entrada de borda	Saída de Canaliz.	Válvula de pé e crivo	Válv. de retenção		Registro de globo aberto	Registro de gaveta aberto	Registro de ângulo aberto
DN	(Ref.)																
	(-)																
15	(1/2)	1,1	0,4	0,4	0,2	0,7	2,3	2,3	0,3	0,9	0,8	8,1	2,5	3,6	11,1	0,1	5,9
20	(3/4)	1,2	0,5	0,5	0,3	0,8	2,4	2,4	0,4	1,0	0,9	9,5	2,7	4,1	11,4	0,2	6,1
25	(1)	1,5	0,7	0,6	0,4	0,9	3,1	3,1	0,5	1,2	1,3	13,3	3,8	5,8	15,0	0,3	8,4
32	(1,1/4)	2,0	1,0	0,7	0,5	1,5	4,6	4,5	0,6	1,8	1,4	15,5	4,9	7,4	22,0	0,4	10,5
40	(1,1/2)	3,2	1,3	1,2	0,6	2,2	7,3	7,3	1,0	2,3	3,2	18,3	6,8	9,1	35,8	0,7	17,0
50	(2)	3,4	1,5	1,3	0,7	2,3	7,6	7,6	1,5	2,8	3,3	23,7	7,1	10,8	37,9	0,8	18,5
60	(2,1/2)	3,7	1,7	1,4	0,8	2,4	7,8	7,8	1,6	3,3	3,5	25,0	8,2	12,5	38,0	0,9	19,0
75	(3)	3,9	1,8	1,5	0,9	2,5	8,0	8,0	2,0	3,7	3,7	26,8	9,3	14,2	40,0	0,9	20,0
100	(4)	4,3	1,9	1,6	1,0	2,6	8,3	8,3	2,2	4,0	3,9	28,6	10,4	16,0	42,3	1,0	22,1
125	(5)	4,9	2,4	1,9	1,1	3,3	10,0	10,0	2,5	5,0	4,9	37,4	12,5	19,2	50,9	1,1	26,2
150	(6)	5,4	2,6	2,1	1,2	3,8	11,1	11,1	2,8	5,6	5,5	43,4	13,9	21,4	56,7	1,2	28,9

Fonte: UFG (2007)

7.3 Determinação da altura manométrica

Para determinar a altura manométrica total (H_t), foi necessário a utilização da equação (12):

$$H_t = (ND + Ar_{ext} + PC) \quad (12)$$

Onde ND é o nível dinâmico, Ar_{ext} é a altura de recalque externo, ou seja, a altura máxima que a tubulação deve alcançar e para o caso em estudo foi estimada para ser de 2 m e PC se refere às perdas de carga da tubulação. Dessa forma, com base na equação 12, encontrou-se que a altura manométrica total foi de aproximadamente 27,1 m. Um estudo de caso realizado pela empresa AGROSOLARES (2022), utilizou um procedimento semelhante para determinação de altura manométrica de uma motobomba solar para aplicações agrícolas. Outro estudo que se destaca é o realizado por LEITE (2009) onde o mesmo realizou o dimensionamento de uma bomba submersa e obteve uma altura manométrica de 24% superior ao encontrado nesta pesquisa, tendo em vista que o sistema robusto analisado por LEITE (2009) possui um nível dinâmico cerca de 80% superior ao analisado no presente trabalho, a diferença obtida é permissível além de servir como orientação para embasamento do resultado encontrado:

$$H_t = (9,7 + 2,0 + 15,3) \cong 27 \text{ m}$$

7.4 Seleção do modelo da bomba centrífuga

Para a seleção da bomba centrífuga, foi necessário utilizar-se do ábaco de cobertura do fabricante EBARA, com as informações obtidas no projeto, bem como as informações baseadas na análise do sistema de bombeamento.

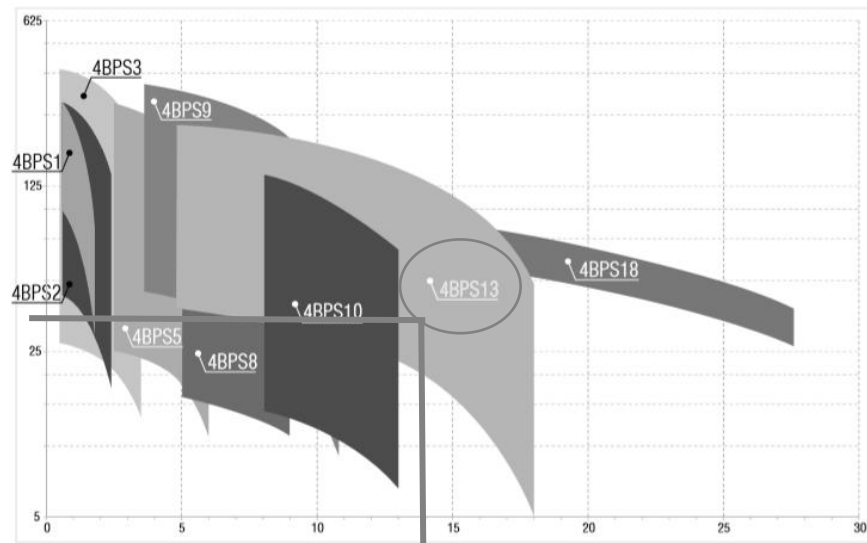
O ábaco de cobertura é um documento fornecido pelo fabricante que possui informações de modelos e especificações técnicas dos modelos de bombas que são fabricadas, é muito importante na determinação do melhor modelo para uma aplicação eficiente (SOUZA, 2014).

No catálogo do fabricante mostrado na Figura 27, tem-se uma representação dos modelos e as respectivas faixas de operação. Cada fabricante possui um código para representar os modelos, a denominação 4BPS representa todas as motobombas com vazões até 27,6 m³/h, potência máxima de 10 hp, pressão de até 386 mca, com bombeadores em aço Inox e rotores em tecno polímero. A numeração seguinte que varia de: 1, 2, 3, 5, 8, 9, 10, 13 ou 18 representa o material utilizado no corpo da válvula (EBARA, 2021).

Desse modo, com base em todos os parâmetros avaliados, o modelo da bomba que melhor se adequou ao sistema de bombeamento foi o *4BPS13*, conforme pode-se verificar pelo Ábaco de cobertura do fabricante, que mostra diversos possíveis modelos de bombas e que, variando os parâmetros de altura manométrica (eixo vertical) e vazão (eixo horizontal) temos a seleção da bomba mais adequada para a aplicação necessária.

Considerando que, a altura manométrica foi de aproximadamente 37 m e que a vazão ideal foi de 14 m³/h, foi possível ser realizada a seleção do modelo da bomba mais apropriada ao sistema de bombeamento por meio do catálogo do fabricante, conforme mostrado na Figura 27:

Figura 27 - Ábaco do fabricante EBARA com a representação dos códigos das famílias de bombas fabricadas atualmente.



Fonte: EBARA (2021)

Os dados de vazão e altura manométrica para a bomba selecionada, estão na Figura 28:

Figura 28 - Dados do modelo da bomba para a família de bombas 4BPS13 com 7 estágios.

BOMBA MODELO	Nº EST.	MOTOR MODELO	POTÊNCIA		VAZÃO E ALTURA MANOMÉTRICA														
			HP	KW	0,0	4,8	5,4	6,0	7,2	8,4	9,6	10,8	12,0	13,2	14,4	15,6	16,8	18,0	m³/h
4BPS13-05	05	M4P2	2,00	1,49	42,0	36,0	0,7	36,0	34,0	32,0	30,0	26,0	25,0	22,0	18,0	14,0	9,0	5,0	m
		OM4A	1,50	1,12															
		OM4A 2F	1,50	1,12															
		4WP	1,50	1,12															
4BPS13-07	07	M4P2	2,50	1,86	59,0	52,0	51,0	50,0	48,0	46,0	43,0	40,0	36,0	31,0	26,0	21,0	15,0	8,0	m
		OM4A	2,00	1,49															
		4WP	2,00	1,49															
4BPS13-09	09	M4P7	3,50	2,61	76,0	67,0	66,0	64,0	62,0	59,0	56,0	52,0	47,0	42,0	35,0	28,0	19,0	11,0	m
		OM4A	3,00	2,24															
		4WP	3,00	2,24															

Fonte: EBARA (2021)

Para determinar se a bomba selecionada para a vazão requerida estava no ponto ótimo de eficiência, foi necessário analisar as curvas da bomba, de eficiência e do sistema para verificação do ponto ótimo de trabalho (BEP) que pode ser visto na

Figura 29. Os dados obtidos na Figura 29 para a nova bomba selecionada são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Dados obtidos para a bomba *4BPS13i-07*

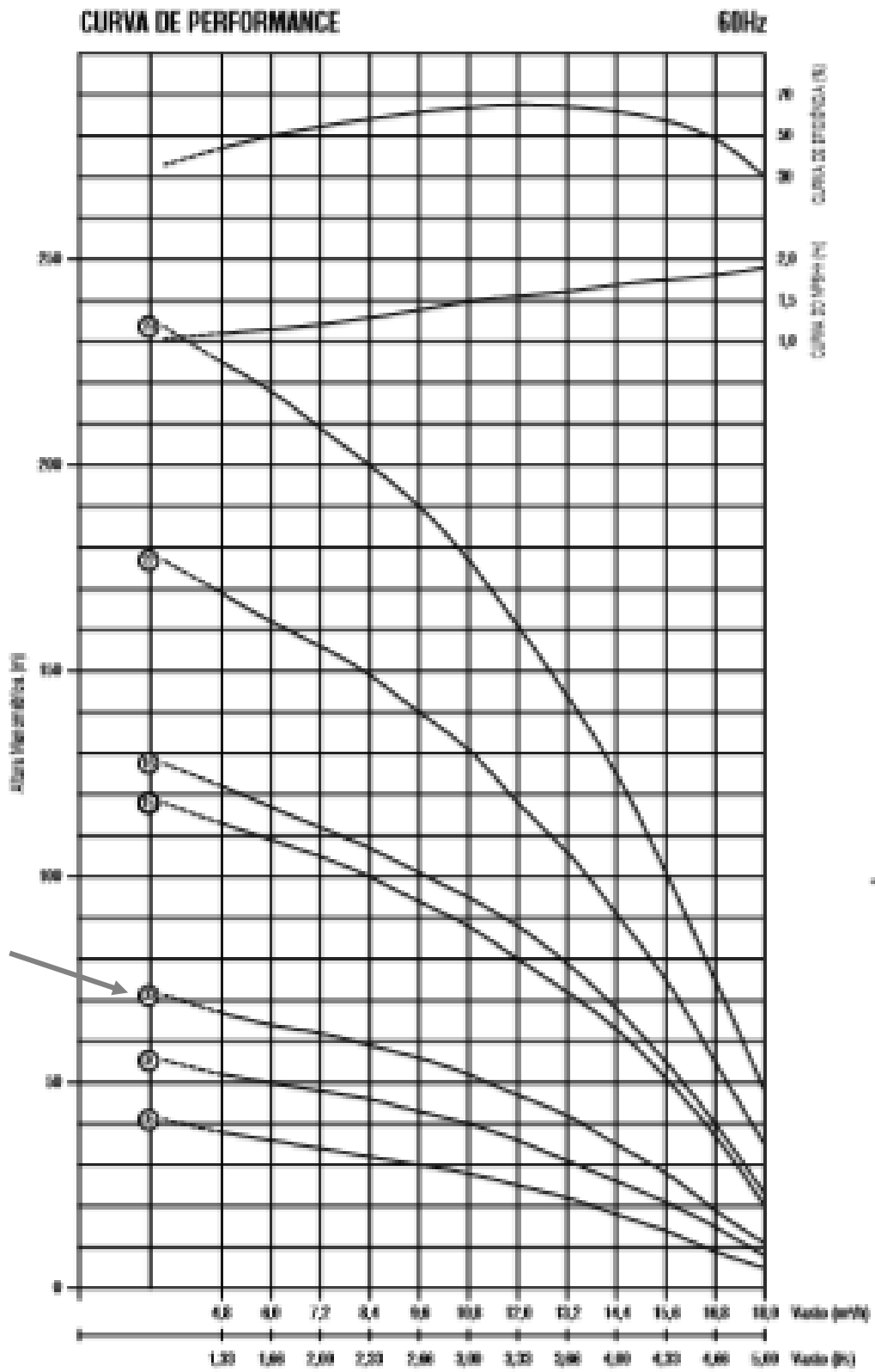
Vazão (m ³ /h)	H _m (m)	Curva sistema (m)	Eficiência (%)
0	59,00	0	0
4,80	52,00	1,10	42,00
6,00	50,00	1,18	50,00
7,20	48,00	1,20	51,00
8,40	46,00	1,30	53,00
9,60	43,00	1,41	58,00
10,80	40,00	1,50	60,00
12,00	36,00	1,52	61,00
13,20	31,00	1,60	63,00
14,40	26,00	1,65	63,50
15,60	21,00	1,70	61,00
16,80	15,00	1,80	50,00
18,00	8,00	1,89	30,00

Fonte: Autora (2022)

As curvas da bomba fornecidas pelos fabricantes são mostradas na Figura 29. A seta em vermelho na Figura 29, indica a curva da bomba utilizada neste estudo, que é uma bomba de 7 estágios, apropriada para aplicação de drenagem e que há necessidade de garantir um maior custo benefício e alta performance, requisitos mínimos e que são essenciais em aplicações industriais críticas e sendo esta selecionada devido atender as necessidades de altura manométrica e de vazão mínima necessária (SCHNEIDER, 2022).

É interessante destacar que as bombas multiestágios são aplicadas em ambientes submersos por fluidos (muitas vezes, água), muito aplicadas em poços com diâmetro maior que 4" (WORKER, 2017). Conforme a aplicação da bomba, a escolha foi feita por uma bomba multiestágios de modo a dar uma maior vazão ao sistema de bombeamento, sendo que estes modelos são mais aplicáveis em situações de sucção de águas pluviais para destinação aos reservatórios de água (HENN, 2006).

Figura 29 — Curvas de desempenho das bombas modelo EBARA 60Hz



Fonte: EBARA (2021)

7.5 Investigação da potência do motor elétrico

Um motor elétrico é uma máquina que realiza a transformação de energia, convertendo a energia elétrica em energia mecânica (WEG, 2021), sendo esta transformação energética primordial para as máquinas modernas, considerando a simplicidade de construção e vida útil desses motores elétricos, a aplicação desse tipo de motor é vasta em todos os setores industriais (MAMEDE, 2017), Considerando uma eficiência de 63,5% da bomba (SOUZA,2014), para obtenção da potência ideal do motor elétrico, que teoricamente, é a potência requerida pela bomba, utilizou-se a equação 13 (SOUZA,2014) :

$$Pot_{cons} = \frac{\gamma QH}{75 \eta} \quad (13)$$

Onde:

- γ é o peso específico do fluido (kg/m³);
- η é a eficiência (%);
- Q a vazão (m³/s);
- H altura geométrica (m).

Dessa forma, a potência total calculada obteve um valor de aproximadamente 2,2cv. Procedimento semelhante foi adotado por SOUZA (2014), onde pode-se concluir que há consistência nos resultados mostrados, com um aumento de aproximadamente 18% justificável pois no presente trabalho, é feito a análise com uma altura manométrica 41% superior ao utilizada por SOUZA (2014). Fez-se necessário para o cálculo com a Equação 13, transformar a unidade de vazão para m³/s, portanto, temos:

$$Pot_{cons} = \frac{998 \cdot 0,004 \cdot 27}{75 \cdot 0,635} = 2,2 \text{ cv} \approx 2,1 \text{ hp}$$

Dessa forma, será necessário um motor de aproximadamente 2,5 cv. A potência de um motor é definida como o trabalho realizado por unidade de tempo, sendo a rapidez que a energia é aplicada para movimentar uma carga MAMEDE (2017).

Considerando a potência necessária (2,2 cv), a melhor especificação do fornecedor para o modelo do motor da bomba desejada é o M4P2 conforme Figura 30:

Figura 30 — Modelo do motor elétrico selecionado para acionar a bomba.

BOMBA MODELO	Nº EST.	MOTOR MODELO	POTÊNCIA	
			HP	KW
4BPS13-05	05	M4P2	2,00	1,49
		OM4A	1,50	1,12
		OM4A 2F	1,50	1,12
		4WP	1,50	1,12
4BPS13-07	07	M4P2	2,50	1,86
		OM4A	2,00	1,49
		4WP	2,00	1,49
4BPS13-09	09	M4P7	3,50	2,61
		OM4A	3,00	2,24
		4WP	3,00	2,24

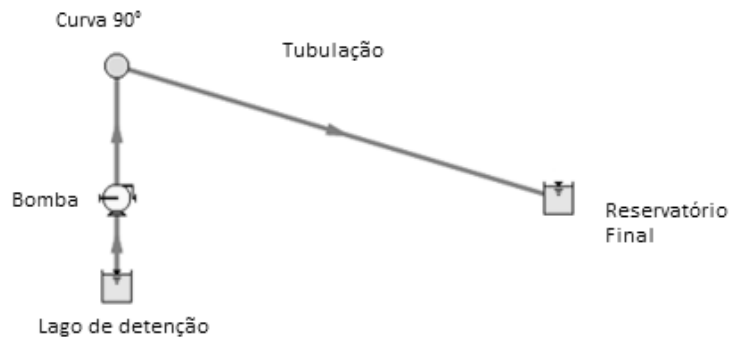
Fonte: EBARA (2021)

7.6 Análise utilizando o software FATHOM 10

O FATHOM 10 é uma ferramenta computacional muito utilizada na indústria, para análise de sistemas de bombeamento dos mais simples aos mais complexos AFT FATHOM 10 (2018). Tal ferramenta trata de uma maneira dinâmica para obter resultados otimizados que permitam ao engenheiro desenvolver melhorias para os diferentes projetos e também a realização de testes de maneira prévia para garantir uma maior segurança nas tomadas de decisões, evitando que haja falhas humanas que possam ser ignoradas e permitindo identificar algum comportamento incomum no sistema (BERNARDO; KON, 2008).

A Figura 31 representa o sistema de bombeamento analisado no presente trabalho, onde foi possível visualizar uma bomba submersa, a qual foi utilizada para diminuir o nível da água do subsolo e garantir o destino desta ao córrego mais próximo. É interessante ressaltar que, está água bombeada é livre de quaisquer contaminantes, visto que o projeto realizado contempla os pilares de eficiência, lucro, segurança e meio ambiente (ALCOA, 2022).

Figura 31 – Diagrama elaborado por meio do modelo FATHOM 10 utilizado na análise da área estudada.



Fonte: Autora (2021)

No projeto realizado com o programa computacional FATHOM 10 e após a ótima seleção do modelo da bomba, foi necessário adicionar ao *software* os dados dessa bomba, por exemplo, a curva de desempenho da bomba, as perdas de cargas ao longo da linha, e restrições/acessórios se houverem, além de toda a caracterização dos reservatórios, tais como: volume, líquido bombeado, viscosidade e densidade AFT FATHOM 10 (2018).

Caso haja algum interesse em determinar se a vazão escolhida atendia as necessidades de projeto, ou seja, se a bomba selecionada conseguiria retirar a água de modo a evitar que o solo ficasse alagado, tornando-o inviável a travessia das vias por parte dos funcionários da refinaria envolvidos e inviabilizando a destinação de insumos para o lago estudado. Por meio dos dados levantados pelo *software* FANTHOM 10 foi possível verificar que a vazão para a nova bomba selecionada atendeu satisfatoriamente ao requisito principal, conforme pode ser observado na Figura 32.

Figura 32 — Tela com os dados obtidos por meio do *software* FATHOM 10

Results Diagram	Name	Vol. Flow (m3/hr)	Mass Flow (kg/sec)	dP (psid)	dH (meters)	Overall Efficiency (Percent)	Speed (Percent)	Overall Power (hp)	BEP (gal/min)	% of BEP (Percent)	NPSHA (feet)	NPSHR (feet)
Show ...	Pump	14,24	3,948	37,56	26,46	57,98	100,0	2,369	49,95	125,5	N/A	5,617

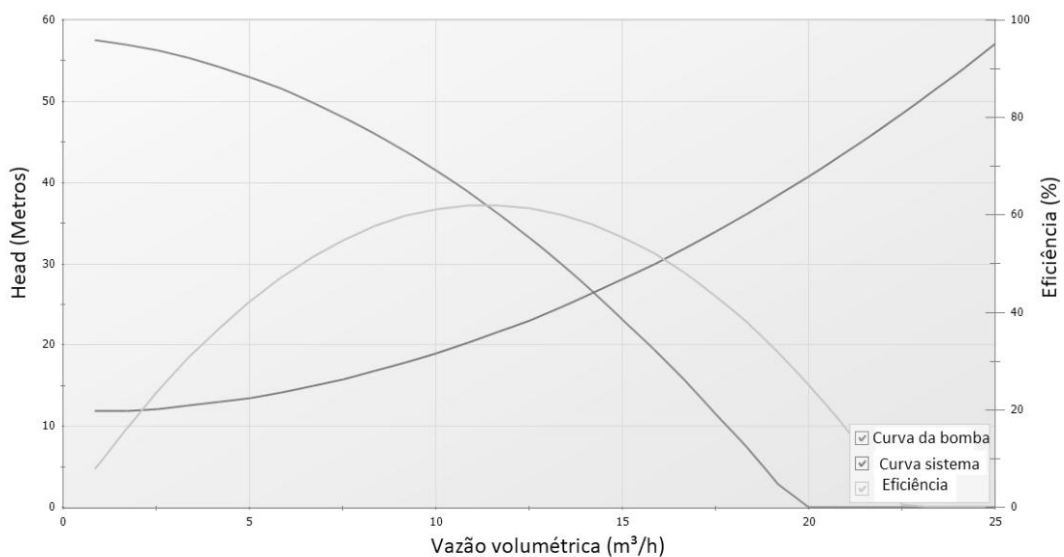
Fonte: Autora (2022)

Devido à bomba ter uma vazão volumétrica cerca de 22,8% superior ao valor esperado, ou seja, 14 m³/h, pode-se afirmar que a mesma atendeu satisfatoriamente

as necessidades de bombeamento da área dos lagos, a qual mostrou-se como uma bomba eficiente em geração de um volume ótimo, pois é essencial conhecer a confiabilidade de um equipamento, que produzirá com o máximo de eficiência considerando alguns aspectos de segurança e meio ambiente (SANTOS, 2011).

A curva característica da bomba também foi outro parâmetro de projeto, que mostrou que a referida bomba foi dimensionada corretamente, pois, esta trabalha próximo ao ponto ótimo da curva da bomba (BEP). Por meio da Figura 33, pode-se observar as três curvas representadas. A curva do sistema foi obtida pela relação de variação de fluxo com a carga do sistema, a qual apresenta o formato parabólico, conforme pode ser visto pela Figura 33 (OMEL, 2022). A curva da bomba e a curva de potência foram obtidas junto ao fabricante, pois tais dados são feitos em ambiente controlado (EBARA, 2021). Foi possível também verificar o ponto de máxima eficiência, com um valor alcançado da ordem de 60%, a qual é mostrada na curva em amarelo, sendo que a mesma se encontrou próximo à vazão ideal de 16 m³/h e conforme mostrada pela curva da bomba em vermelho, a qual representa a curva da bomba analisada junto ao fabricante. Como uma informação adicional, tem-se a curva do sistema em azul que traz alguns detalhes sobre a curva do sistema que considera todas as perdas de carga ao longo do sistema de bombeamento (OMEL, 2022).

Figura 33 – Curvas do sistema obtidas por meio do *software* FATHOM 10



Fonte: Autora (2022)

Após o perfeito levantamento de todas as informações necessárias durante este estudo, pode-se afirmar que a bomba centrífuga utilizada nos serviços de drenagens dos lagos da refinaria de produção de alumina, atendeu satisfatoriamente as exigências de projeto, uma vez que esta garantiu a correta drenagem dos lagos, conforme foi solicitado pela empresa multinacional investigada. A porcentagem de aumento de fluxo com relação ao fluxo exigido de projeto, foi de 1,7% sendo um valor considerável e próximo ao exigido pela área.

8. Conclusão

Considerando as análises realizadas, a bomba selecionada foi a do fabricante EBARA, o modelo mais adequado foi o 4BPS13i, que possui uma capacidade de bombeamento necessário ao que foi sugerido no referido projeto, ou seja, uma motobombas com vazão máxima de 27,6 m³/h, com motor modelo M4P2 de 2,2 hp, com bombeadores em aço inoxidável e rotores em tecno polímero e material utilizado no corpo da válvula também em aço inoxidável, conforme nomenclatura dada pelo fabricante.

Outro ponto importante que merece ser destacado foi a análise auxiliada pelo *software* FATHOM, facilitando a entrega dos resultados de maneira mais confiável e eficiente. Com base na análise teórica fez-se o comparativo de modo que não houvesse grandes variações no que foi mostrado pelo *software*, garantindo uma maior confiabilidade no resultado obtido. Ao analisar a correta seleção da melhor bomba, fizeram-se necessários os conhecimentos básicos advindos da disciplina de Mecânica dos Fluidos, garantindo que a mesma estivesse apta a realizar as principais atividades sem intervenções.

Por fim, a elaboração desse projeto de final de curso foi enriquecedora, pois contribuiu para sanar um problema real de Engenharia que existia na refinaria da empresa multinacional de produção de alumina, e também poder aplicar os conhecimentos teóricos desenvolvidos ao longo do curso de graduação em Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

REFERÊNCIAS

AQUINO, V. de. Bomba Hidráulica: Dos Egípcios Até Os Equipamentos De Última Geração. 2013. Disponível em: <<https://www.revistatae.com.br/Artigo/526/bombahidraulica-dos-egipcios-ate-os-equipamentos-de-ultima-geracao>>.

AGROSOLARES; Motobomba Solar e Altura Manométrica Total – Saiba como calcular. São Paulo, 2022. Disponível em: <http://agrosoles.com/bomba-solar-e-altura-manometrica/>

AMARAL, E, R; AMARAL T. R.; Análise dos fatores que influenciam nas perdas de carga em tubulações e acessórios hidráulicos. SIC: Seminário de Inovação IFNMG Científica. Faculdade Pitágoras. Montes Claros, 2016

ALCOA, Fact Sheet: ALUMAR. 2022 Disponível em: <https://www.alcoa.com/brasil/pt/pdf/brasil-alumar-fact-sheet.pdf>,

ARC. Importância do dimensionamento correto da bomba pneumática na indústria. Minas Gerais, 2021. Disponível em: <<https://arcomprimido.com.br/dimensionamentocorreto-da-bomba/>>.

ASME B73.1 Process Pump. 2018 Disponível em: PWI_PWA_Gen_2.pdf (pumpworks.com)

ANSI/API Standard 610 Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries Organização: ANSI, 2010. Disponível em: Microsoft Word - C036350e first-101.doc (wordpress.com)

BERNARDO, P. C.; KON, F.; A importância de testes automatizados. Engenharia de Software Magazine 1(3), pp. 54-57. São Paulo, 2008.

CENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M.; Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e aplicações. AMGH Editora LTDA, São Paulo, 2007

CLAUDINO, C. M. de A. *et al.* Bombas Hidráulicas: uma abordagem quanto as grandezas características, classificação e problemas. BRASIL, 2020.

CONNOR, N. Qual é o melhor ponto de eficiência – BEP – Definição. Thermal Engineering. Disponível em: <https://www.thermal-engineering.org/pt-br/qual-e-o-melhor-ponto-de-eficiencia-bep-definicao/> , 2011.

DOMINGUÉZ, U.S.; Máquinas Hidráulicas. Editora: Clube Universitário. San Vicente, 2019.

ENTERPRISES, E. Fundamentals of Pumps. United States of America, 1993. Disponível em: ME910-Fundamentals-of-pumps.pdf (d6s74no67skb0.cloudfront.net).

FERNANDES, M. O que é MCA; São Paulo, 2020. Disponível em: <https://www.promobit.com.br/forum/o-que-e-mca-metros-de-coluna-dagua-4944/>

FERRO, T. Apostila de Bombas. São Paulo, 2011.

FOX, R. W. *et al.* Introdução à Mecânica dos Fluidos. Oitava edição. Estados Unidos, 2010.

GOMES, M. H. R. Apostila de Mecânica dos Fluidos. Juíz de Fora, 2012.

GONZÁLEZ, E. P.; MEDEL, J. O.; GONZÁLEZ, F. M. Historia del Teorema de Bernoulli. Acta Universitaria, vol. 17, núm. 1, enero-abril, pp. 39-45. México, 2007.

GONZALÉS, S; Entenda por que materiais avançados são importantes para a indústria. Agência CNI de notícias. Disponível em: <https://noticias.portaldaindustria.com.br/entrevistas/entenda-por-que-materiais-avancados-sao-importantes-para-a-industria/> São Paulo, 2018

HENN Érico A. L. Máquinas de Fluido. 2. ed. Santa Maria: UFSM, 2006.

HIDROSONDA LTDA. Relatório Técnico: Perfuração de 4 piezômetros especiais. São Luís, 2021

JARDIM J. V.A., Análise de Modos de falhas e efeitos: FMEA de produto para manutenção de bomba centrífuga. Universidade Federal de Sergipe. Sergipe, 2017. Disponível em: https://energia.ufs.br/uploads/content_attach/path/11200/anexo_i_formulario_da_fmea.pdf

JUNIOR, E. A. P.; MORAIS, T. G.; DIAS, J. F. Maintenance Of Centrifugal Pumps In Mining Area. Minas Gerais, 2019.

JUNTASBRASIL, Gaxetas para vedação e selagem Stampflex. 2022, Disponível em: <http://www.juntasbrasil.com.br/capa-gaxetas.php>

KSB. Impeller. 2021. Disponível em: <<https://www.ksb.com/centrifugal-pump-lexicon/impeller/191094>>.

LEITE, C. E. S.; Dimensionamento de bombas de poço: Bombas submersas; CESOL HP Hidrogeologia. Disponível em: <http://www.geocities.ws/cesol999/DimensionamentoDeBombasSubmersa.htm>

Rio de Janeiro, 2009

LOPES, R. M. Bomba Centrífuga - Anel Cadeado. São Paulo, 2017.

MACINTYRE, A. J. Bombas e Instalações de Bombeamento. 2. ed. Rio de Janeiro: UFRJ, 1997.

MAMEDE, J.F.; Instalações Elétricas Industriais. 7ª edição. LTC Editora, Rio de Janeiro, 2017.

MATTOS, E. E. de; FALCO, R. de. Bombas Industriais. 2. ed. Rio de Janeiro, 2019.

NORTON, R. L. Projeto de Máquinas. 4. ed. Porto Alegre, 2013.

OFUCHI, E. M. Desenvolvimento de um método para correção de curvas de desempenho em bombas centrífugas submersas operando com fluidos viscosos. Curitiba, 2015.

OLIVEIRA, M. A. R. de. Estudo Numérico para verificação de um adimensional desenvolvido para caracterização do início da cavitação. Minas Gerais, 2019.

OMEL; Curvas de Desempenho; São Paulo, 2022. Disponível em: <https://www.omel.com.br/artigos-tecnicos/escola-de-bombas/centrifugas/curvas-de-desempenho/>

PINHEIRO, A. T. Teste de performance em bombas centrífugas: um estudo de caso. São Luís, 2008.

POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C.; Mecânica dos Fluidos; Pioneira Thomson Learning. 3ª Edição. São Paulo, 2004

RIJEZA; Bombas Centrífugas e Desgastes: Estudo de caso. Porto Alegre, 2022. Disponível em: <https://rijeza.com.br/blog/como-aumentar-a-durabilidade-de-bombas-centrifugas-estudo-de-caso/>

ROMA, W.N.L.; Introdução às Máquinas Hidráulicas. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2020.

SANTOS, J. C.; Análise de confiabilidade de uma bomba centrífuga: aplicação na injeção de água para recuperação de petróleo; Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011. Artigo disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/15648>

SCHNEIDER. Motobombas Centrífugas Multiestágios. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://diafer.vteximg.com.br/arquivos/manual-bomba-schneider-me-1-1630-centrifuga-multiestagio-3-cv.pdf>

SOUZA, P. H. A. I. de. Apresentação dos cálculos para seleção de bombas para sistema de reaproveitamento de água de poços artesianos. Rio de Janeiro, 2014.

SOUZA, R. P. A. de. Cálculos de perda de carga para seleção de uma bomba de alimentação de água de um gerador de vapor em uma unidade FPSO. Rio de Janeiro, 2015.

TERASSAKA, C., VIGNOLI, I.S., LOPES, J., FATTORI, P. Sistemas de Abastecimento de Água. Universidade Paulista, Araçatuba, 2014

TSUTIYA, M. T. Abastecimento de água. São Paulo, 2006.

UETA, A. S. N. Projeto de impelidor e voluta para uma bomba centrífuga. Tese. Rio de Janeiro, 2018.

WEG; Guia especificação motores elétricos, Duluth, 2021. Disponível em: <https://www.weg.net/institucional/US/pt/>

WORKER; Bomba Multiestágio 4". São Paulo, 2017. Disponível em: <https://www.worker.com.br/loja/images/arquivos/BombaMultiestgio4.pdf>

ZOLINI, G. P. Cálculos de teste de performance e seleção do sistema de vedação de bombas centrífugas. Rio de Janeiro, 2021.

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Alencar, Mardiani.

Avaliação e escolha de uma bomba centrífuga para um sistema de bombeamento da lagoa de detenção, empregado na produção de alumina Al_2O_3 / Mardiani Alencar. - 2022.
58 f.

Orientador(a): Glauber Cruz.

Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Maranhão, UFMA, 2022.

1. Bombas. 2. Eficiência. 3. Modelagem. I. Cruz, Glauber. II. Título.