UNIVERSIDADE DE MOGI DAS CRUZES
DAVID DA SILVA RODRIGUES
LUCAS DE PAULA VIEIRA
NICHOLAS LUCAS DE MATOS

PROJETO PARA TROCA DE BOMBAS CENTRÍFUGAS POR UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE EFLUENTES

Mogi das Cruzes, SP
2023

UNIVERSIDADE DE MOGI DAS CRUZES

DAVID DA SILVA RODRIGUES

LUCAS DE PAULA VIEIRA

NICHOLAS LUCAS DE MATOS

PROJETO PARA TROCA DE BOMBAS CENTRÍFUGAS POR UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE EFLUENTES

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Mogi das Cruzes como parte dos requisitos para obtenção de grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Prof. Orientador: Fausto Mori Viana

Co-orientador: Antônio Capistrano Alckmin

Mogi das Cruzes, SP

2023

UNIVERSIDADE DE MOGI DAS CRUZES

DAVID DA SILVA RODRIGUES

LUCAS DE PAULA VIEIRA

NICHOLAS LUCAS DE MATOS

PROJETO PARA TROCA DE BOMBAS CENTRÍFUGAS POR UM SISTEMA DE BOMBEAMENTO DE EFLUENTES

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Mogi das Cruzes como parte dos requisitos para obtenção de grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em:.....

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof.

Universidade de Mogi das Cruzes – UMC

_____

Prof.

Universidade de Mogi das Cruzes – UMC

_____

Prof.

Universidade de Mogi das Cruzes - UMC

Este trabalho é dedicado primeiramente a Deus, que nos deu a vida e permitiu que chegássemos até aqui, aos nossos orientadores, que foram fundamentais para o nosso crescimento acadêmico e profissional. Agradecemos também às nossas famílias, cujo apoio incondicional e encorajamento constante foram essenciais para que chegássemos até aqui.

Dedicamos também à nossa amizade, que prevaleceu mesmo após todo esse tempo.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Antônio Capistrano, que dedicou dias e noites e nos orientou da melhor forma possível com conselhos e direcionamentos valiosos.
Ao Prof. Fausto Mori, que com o seu conhecimento e paciência, nos deu ideias para melhorar o projeto.
À empresa Ahlstrom Industria de Papeis Especiais, em especial aos profissionais Valério Ribeiro, Francisco Rusilas, Antonio Matos, Wagno Carvalho, Jose Ferreira, Marcos Galetti e Taina Takahashi que nos permitiram realizar o projeto científico e forneceram os materiais para os experimentos necessários.
A todos os professores que de alguma forma, dedicaram uma parte de seu tempo para fortalecer o nosso trabalho.

“O trabalho em equipe é a habilidade de trabalhar juntos em direção a uma visão comum. É a capacidade de direcionar realizações individuais para objetivos organizacionais. É o combustível que permite às pessoas comuns alcançar resultados extraordinários.”

(Andrew Carnegie)

RESUMO

A proposta sugerida pelo projeto é o aumento da confiabilidade no sistema de bombeamento de efluentes da indústria multinacional Ahlstrom. O processo apresenta consideráveis números de falhas, as quais em sua maioria acabam gerando problemas ambientais e conflitos com a empresa Suzano Papel e Celulose (ambas as empresas situadas na mesma planta, localizada em Jacareí, estado de São Paulo).

O sistema de bombeamento tem apresentado vazamentos com frequência, que necessitam ser evitados, pois os resíduos industriais contêm uma enorme variedade de substâncias químicas, que podem prejudicar o meio ambiente (fauna e flora) além de nocivas à saúde humana.

Essa contaminação ocorre devido ao espaço de captação da água ter uma saída de drenagem para o rio. Os vazamentos das bombas centrífugas escoam para o dreno do rio, ocasionando uma contaminação da água devido ao contato com a substância.

Esse trabalho abordará de forma direta as possibilidades a serem analisadas para um melhor desempenho do bombeamento dos efluentes da fábrica. Com isso, não somente a troca das bombas será pautada, mas também um plano de ação para diminuir os atuais impactos relacionados ao processo.

Palavras-chave: Engenharia Mecânica, Confiabilidade, Bombeamento e Efluentes.

ABSTRACT

The proposal suggested by the project is to increase reliability in the effluent pumping system of the multinational industry Ahlstrom. The process presents a considerable number of failures, most of which end up generating environmental problems and conflicts with the company Suzano Papel e Celulose (both companies located in the same plant, located in Jacareí, state of São Paulo).

The pumping system has frequently presented leaks, which need to be avoided, as industrial waste contains a huge variety of chemical substances, which can harm the environment (fauna and flora) in addition to being harmful to human health.

This contamination occurs due to the water collection space having a drainage outlet into the river. Leaks from centrifugal pumps flow into the river drain, causing water contamination due to contact with the substance.

This work will directly address the possibilities to be analyzed for better pumping performance of factory effluents. With this, not only the replacement of pumps will be planned, but also an action plan to reduce the current impacts related to the process.

Keywords: Mechanical Engineering, Reliability, Pumping e Effluent.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1 - Lançamento de Efluentes de maneira incorreta 17
Figura 2 - Bomba de Lóbulos e Bomba Diafragma.....19
Figura 3 – Bomba Centrífuga Radial 20
Figura 4 - Bomba de Lóbulos Rotativos TORNADO® - NETZSCH do Brasil .23
Figura 5 - Gráfico head x vazão de uma bomba.....27
Figura 6 - Curvas de uma família de bomba com diferentes diâmetros de rotor 27
Figura 7 - Gráfico potência consumida x vazão.....28
Figura 8 - Gráfico eficiência x vazão.....29
Figura 9 - Escoamento Laminar.....30
Figura 10 - Escoamento Turbulento 31
Figura 11 - Rugosidade da Parede dos Tubos 32
Figura 12 - Diagrama de Moody-Rouse.....33
Figura 13 - Comprimentos Equivalentes para perdas Localizadas em Acessórios.....36
Figura 14 - Altura manométrica de um sistema 37
Figura 15 - CCI parte dinâmica e estática.....39
Figura 16 - Construção da CCI 40
Figura 17 - Construção da CCI 41
Figura 18 – Vazão do Sistema.....43
Figura 19 – Diâmetro da Tubulação 45
Figura 20 – Propriedades da Água 46
Figura 21 - Bomba TORNADO Desmontada para Manutenção 50
Figura 22 - Planta baixa do sistema 53
Figura 23 - Poço com agitador.....54
Figura 24 - Bomba de Captação de Água.....55
Figura 25 - Drenagem para o Rio 55
Figura 26 – Vazamento na Bomba Centrifuga da linha de Efluentes 56
Figura 27 - Bombas dos Efluentes Montadas em Paralelo.....57

Figura 28 - Acessórios da Linha 58
Figura 29 - Acessórios da Linha 59
Figura 30 - Acessórios da Linha 60
Figura 31 - Acessórios da Linha 61
Figura 32 – Curva Característica para do Sistema 63
Figura 33 – Curva Característica da Bomba TORNADO 66
Figura 34 – Eficiência da Bomba TORNADO 67
Figura 35 – Eficiência da Bomba Existente 68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comprimento Equivalente dos Acessórios 48
Tabela 2 – Perdas de Carga Totais 48
Tabela 3 – Custos de Implantação do Novo Projeto.....69
Tabela 4 – Comparativo de Custos 69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NR	Norma Regulamentadora
kPa	Quilopascal
Mpa	Megapascal
Kgf	Quilogramas força
Cm	Centímetros
cP	Centipoise
SAP	Sistemas, Aplicativos e Produtos para Processamento de Dados
H2O	Água
g	Gramas
ppm	Parte por milhão
mL	Mililitro
L/min	Litro por Minuto
g/L	Gramas por Litro
g/mL	Gramas por Mililitro
g/cm^3	Gramas por Centímetros Cúbicos
Kg	Quilograma
d	Densidade
m	Massa
V	Volume
L/ano	Litros por Ano
We	Trabalho Elétrico
P	Potência
Δt	Variação de Tempo
W	Watt
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt/hora

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
1.1 OBJETIVO GERAL 15
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO 16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17
2.1 GERAÇÃO DE EFLUENTES EM PROCESSOS INDUSTRIAIS 17
2.2 SOBRE A LEGISLAÇÃO AMBIENTAL 18
2.3 TIPOS DE BOMBAS 19
2.3.1. Volumétricas 19
2.3.2. Dinâmicas 20
2.4 DEFINIÇÃO E FUNÇÃO DAS BOMBAS 21
2.4.1. Bombas Centrífugas em processos industriais 21
2.4.2. Funcionamento das Bombas Centrífugas 21
2.4.3. Bombas TORNADO em processos industriais 22
2.4.4. Funcionamento das Bombas TORNADO 22
2.4.5. Bomba Centrífuga Radial x Bomba de Lóbulos TORNADO 23
2.5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 24
2.5.1. Conceitos de Mecânica dos fluidos 24
2.5.2. Aplicabilidade da Bomba 25
2.5.3. Vazão do Sistema 25
2.5.4. Carga e curva característica da bomba (CCB) 26
2.5.5. Outras curvas características das bombas 27
2.5.6. Perda de carga no sistema 29
2.5.7. Número de Reynolds 31
2.5.8. Fator de Atrito 32
2.5.9. Perda de Carga Distribuída no Escoamento Laminar 33
2.5.10. Perda de Carga Distribuída no Escoamento Turbulento 34

2.5.11. Perda de Carga Localizada 34
2.5.12. Altura manométrica da linha 36
2.5.13. Teorema de Bernoulli 37
2.5.14. Curva característica da instalação (CCI) 39
2.5.15. NPSH Disponível x NPSH Requerido 40
3 MÉTODOS E MATERIAIS 43
3.1 VAZÃO NO SISTEMA 43
3.2 CÁLCULOS PARA CARGA/PRESSÃO DA BOMBA 44
3.2.1. Altura manométrica (H) 44
3.2.2. Diâmetro da Tubulação 44
3.2.3. Perda de Carga no Sistema 45
3.3 SELEÇÃO DA BOMBA 49
3.3.1. Seleção do Tipo de Bomba 49
3.3.2. Bomba TORNADO 49
3.3.3. Detalhes construtivos 50
3.3.4. Tipo de Bomba x Fluido Bombeado 51
3.3.5. Tipo de Bomba x Vazão 51
3.3.6. Tipo de Bomba x Carga 52
3.3.7. Tipo de Bomba x Experiências Anteriores 52
4 SISTEMA ATUAL X SISTEMA PROPOSTO 53
4.1 SISTEMA ATUAL 53
4.1.1. Poço Coletor 53
4.1.2. Área da Captação de Água 54
4.1.3. Vazamento de Efluentes 56
4.1.4. Características das Bombas 57
4.1.5. Características das Tubulações 57
4.2 PROBLEMA DO SISTEMA 58

4.3 SOLUÇÃO PROPOSTA 60
4.3.1. Cobertura no Poço Coletor 60
4.3.2. Instalação do Triturador 61
4.3.3. Instalação de Barreira de Contenção 61
4.3.4. Substituição das Bombas Centrífugas por Bombas TORNADO 62
5 RESULTADO 62
5.1 CONSTRUÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA 63
5.2 CÁLCULO DO NPSH DISPONÍVEL 64
5.3 CÁLCULO DA POTÊNCIA NECESSÁRIA DO MOTOR 64
5.4 MODELO DA BOMBA 65
5.4.1. Comparativo com a bomba existente 67
6 CUSTOS E DEMAIS VALORES 68
6.1 INSTALAÇÃO 69
6.2 VALORES TOTAIS DO PROJETO 69
7 DISCUSSÃO 70
8 CONCLUSÃO 71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 72
APÊNDICE A – Desenho do Sistema de Tubulações 74
APÊNDICE B – Fluxograma Efluente e Pluviais. 74
ANEXO A – Planilha com histórico de ocorrências 75
ANEXO B – Resolução N° 357 CETESB 75
ANEXOS C – Dados Técnicos e Orçamento do Triturador 75

1 INTRODUÇÃO

A empresa Ahlstrom utiliza duas bombas do tipo centrífugas, para realizar o processo de bombeamento dos efluentes oriundos de seu processo fabril, a fim de serem tratados na Estação de Tratamento de Efluente (ETE) em sua fornecedora/coletora de Utilidades (Suzano).

O local não permite alterações significativas em seu layout civil devido ao setor ter um espaço restrito, às margens do rio, e estas bombas centrífugas de efluentes estarem locadas na proximidade de outras bombas, que fazem a captação da água do rio para ser tratada na Estação de Tratamento de Água (ETA). Sendo assim exigem-se cuidados para evitar vazamentos, pois neste espaço há uma saída de drenagem para o rio. Além de acarretar uma contaminação da água do rio, devido ao possível contato com o fluido proveniente de vazamentos das bombas, há também a possibilidade de conflitos internos entre as empresas Ahlstrom e Suzano, devido a todas essas situações supracitadas.

Hoje na localidade da instalação das bombas existem muitos relatos de vazamentos, que acabam acontecendo por causa de objetos que, ao se misturar com o líquido bombeado, adentram o interior das bombas danificando-as.

A prevenção de vazamentos como resposta rápida a eventos de poluição são fundamentais, para mitigar os impactos negativos na qualidade da água e nos ecossistemas aquáticos.

Também foram sugeridas melhorias complementares ao projeto para aumentar o nível de confiabilidade e eficiência do sistema como um todo devido ao histórico de ocorrências informadas (conforme **ANEXO A** ao final do trabalho), pois o sistema atual sofre com interferências externas que interrompem o fluxo de bombeamento de efluentes, por exemplo, corpos estranhos que possam travar o equipamento, como já ocorrido anteriormente.

1.1 OBJETIVO GERAL

Solucionar e aprimorar o processo de bombeamento dos efluentes, extinguindo quaisquer impactos no âmbito ecológico que possam existir atualmente, devido ao derramamento de produtos químicos provenientes do malejamento das

bombas de efluentes.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Pretende-se chegar a uma solução através de análises com diferentes tipos e modelos de bombas, juntamente com um estudo de todo o processo, para averiguar melhorias na eficiência do bombeamento:

a) A partir de um modelo teórico aplicado no curso de engenharia pretende-se estabelecer os resultados, utilizando como base a Curva Característica da Instalação – CCI;

b) Evitar a grande incidência de manutenções;

c) Eliminar possíveis detritos ou resíduos que possam danificar os equipamentos (bombas), aumentando sua vida útil, eficiência e evitando vazamentos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 GERAÇÃO DE EFLUENTES EM PROCESSOS INDUSTRIAIS

É notável o aumento da demanda referente aos recursos hídricos, visto que, nos últimos anos há uma crescente utilização de água nos processos industriais devido ao aumento da população e necessidades da sociedade. Com isso conclui-se que, quanto mais água for utilizada maior a quantidade de água residuária devolvida aos mananciais de superfície (rios, lagos, lençóis freáticos, dentre outros).

Sabe-se que os efluentes industriais, advindos de diferentes processos de fabricação, tem sido um grande fator histórico de degradação ambiental. Portanto o despejo desse tipo de fluido, tanto nos mananciais quanto na rede de, sem o devido tratamento prévio, causa sérios problemas sanitários e ambientais.

Acredita-se que deve ser dada uma atenção especial ao tratamento de resíduos sólidos, líquidos e atmosféricos, pois são considerados subprodutos e podem ser reaproveitados. As empresas devem focar nas causas da geração de resíduos, visar a produção limpa e minimizar o desperdício, sabendo que os principais poluentes de origem industrial são compostos orgânicos e inorgânicos, principalmente os metais pesados (ARCHELA *et al*, 2003).

Figura 1 - Lançamento de Efluentes de maneira incorreta



Fonte: https://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/bid/350779/conheca-os-danos-causados-pelos-efluentes-nao-tratados

2.2 SOBRE A LEGISLAÇÃO AMBIENTAL

A resolução do CONAMA diz o seguinte referente a impactos ambientais:

> Para efeito desta Resolução, considera-se impacto ambiental qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam:
> I - a saúde, a segurança e o bem-estar da população;
> II - as atividades sociais e econômicas;
> III - a biota;
> IV - as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
> V - a qualidade dos recursos ambientais.
> (CONAMA Nº001, 1986, Artigo 1º).

No estado de São Paulo (SP) quem regulamenta e fiscaliza tais práticas é a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). A empresa atua como agência ambiental do Estado sendo responsável por controlar, fiscalizar, monitorar e licenciar as atividades geradoras de poluição, com a preocupação de preservar e recuperar a qualidade das águas, do ar e do solo.

O local de estudo desse projeto possui um rio muito importante para a população e para o Vale do Paraíba, o Rio Paraíba Do Sul, sendo um dos maiores do estado de São Paulo (além de banhar ainda os estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro).

A estatal realiza o monitoramento da qualidade das águas em 449 pontos de amostragem, nos principais rios e reservatórios por todo estado (incluindo o Rio Paraíba do Sul) avaliando, assim, as propriedades microbiológicas e físico-químicas da água. Portanto o órgão é capaz de identificar tais irregularidades através de amostras indicadoras de qualidade dos mananciais como, por exemplo, o Índice de Qualidade das Águas (IQA).

O ideal é que não existam vazamentos de efluentes industriais para o rio, visto que o mesmo pode ser rastreado, trazendo um enorme prejuízo para a empresa através de multas ou até mesmo, no pior dos casos, o fechamento do estabelecimento industrial até que sejam regularizados os problemas.

A Resolução N° 357, de 17 de março de 2005 (**ANEXO B**) da CETESB diz a respeito sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, devendo ser seguida para que não hajam problemas com a legislação ambiental vigente.

2.3 TIPOS DE BOMBAS

2.3.1. Volumétricas

Bombas volumétricas, também conhecidas como bombas de deslocamento positivo, são aquelas em que a energia transferida para o fluido já está presente na forma de pressão e é diretamente fornecida pelo movimento de um componente mecânico da bomba. Esse movimento força o líquido (que é praticamente incompressível) a seguir o mesmo movimento ao qual ele está sendo impulsionado.

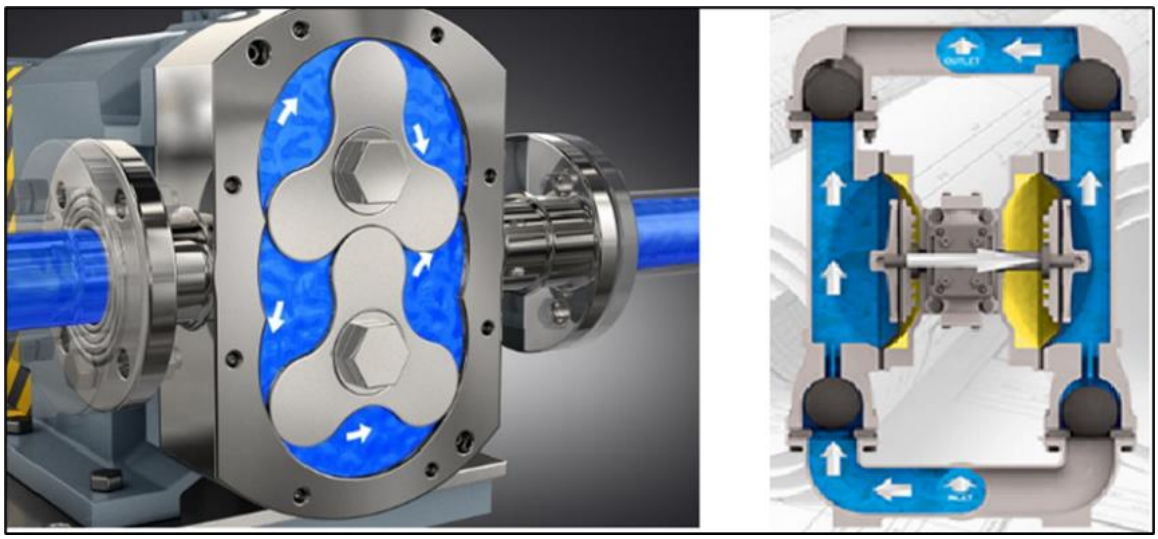
Esse tipo geralmente é utilizado em circuitos hidráulicos, podendo acionar atuadores lineares ou rotativos para realizar a movimentação de carga.

Nessas bombas existe um sistema de vedação mecânica, que separa a entrada e saída o que acaba impedindo ou dificultando o “vazamento interno”, que é a possibilidade de recirculação interna do fluido (SANTOS, 2007).

As bombas volumétricas são classificadas em dois grandes grupos, podendo ser alternativas ou rotativas. As bombas rotativas são as mais utilizadas, e existem diferentes tipos, como por exemplo, de engrenagens, lóbulos rotativos, palhetas e pistões radiais ou axiais. No caso das bombas alternativas os tipos mais comuns são as de êmbolo, pistões ou diafragma.

Abaixo se pode observar uma bomba rotativa de lóbulos (esquerda da imagem) e uma bomba alternativa de diafragma (direita da imagem).

Figura 2 - Bomba de Lóbulos e Bomba Diafragma



Fonte: https://pt.bonvepumps.com/rotary-lobe-pumps-for-fiber-chemicals_p76.html

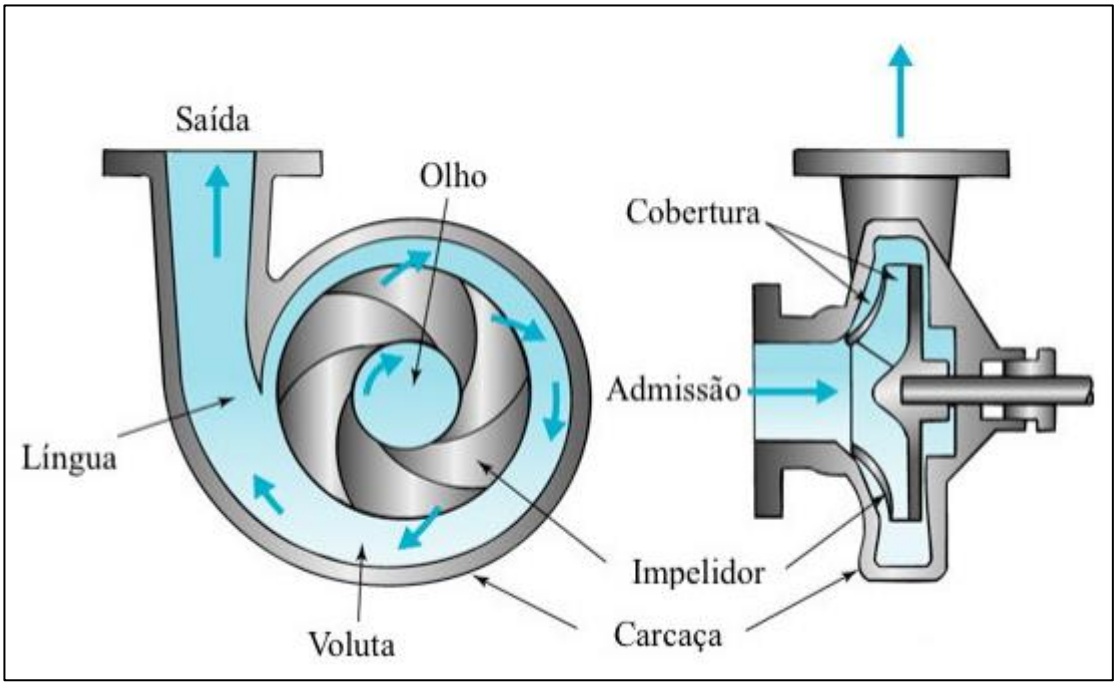
2.3.2. Dinâmicas

Normalmente mais utilizadas em instalações hidráulicas para o transporte de fluido, visto que a importância da vazão aumenta e reduz a pressão, em relação às bombas de deslocamento positivo. As bombas dinâmicas são um tipo de dispositivo que transfere a energia cinética do impulsor (ou rotor) para o fluido que está sendo bombeado. Elas funcionam com base nos princípios da dinâmica dos fluidos e têm como objetivo aumentar a velocidade do fluido, transformando essa energia cinética em pressão.

O fluido bombeado passa pelo flange de entrada, atravessa o bocal da entrada e chega ao rotor. Já no rotor existem canais formados por pás, onde obrigatoriamente acontece a passagem do fluido, recebendo a energia da bomba (geralmente fornecida por um motor elétrico) lançando-a na periferia. A bomba tem a sua voluta construída de maneira que esse fluido espalhado nas partes periféricas da bomba é todo direcionado ao bocal de saída (SANTOS, 2007).

Alguns exemplos comuns de bombas dinâmicas são: centrífugas radiais, centrífugas helicoidais, centrífugas diagonais e as axiais.

Figura 3 – Bomba Centrífuga Radial



Fonte: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5001518/mod_resource/content/1/PME3230-RL-Bombas.pdf

2.4 DEFINIÇÃO E FUNÇÃO DAS BOMBAS

2.4.1. Bombas Centrífugas em processos industriais

As bombas centrífugas são amplamente conhecidas e utilizadas em uma variedade de aplicações, como sistemas de abastecimento de água, centrais de vapor, indústria petrolífera, saneamento básico, embarcações, combate a incêndios e até usinas nucleares.

De acordo com Cremasco (2012) existem muitas vantagens para a utilização das bombas centrífugas, tais como baixo custo, menor custo de manutenção e a possibilidade do bombeamento de líquidos com partículas sólidas. Também são retratadas algumas desvantagens como uma baixa eficiência com fluidos de alta viscosidade e uma limitada faixa de condições para um melhor rendimento.

2.4.2. Funcionamento das Bombas Centrífugas

As bombas centrífugas operam transferindo energia cinética para um fluido e convertendo-a em energia potencial, seja por meio da posição ou, mais comumente, da pressão no bocal de descarga da bomba, esse processo é baseado no princípio de Bernoulli.

Impulsionadas mecanicamente por um eixo rotativo, a rotação do impelidor transfere energia para o fluido à medida que este passa pelo próprio. O líquido é succionado para dentro do rotor através de uma abertura central chamada olho do rotor, passando por canais formados entre as pás do impelidor e se movendo em direção ao bocal para saída do fluxo (vide **figura 3**). O fluido deixa o rotor com alta velocidade absoluta e energia cinética, que precisa ser convertida em energia potencial de pressão. Isso é realizado em componentes não rotativos, no caso na voluta da bomba, também conhecida como espiral, que termina em um bocal de descarga.

A potência fornecida ao fluido por uma bomba centrífuga depende do diâmetro do rotor, da velocidade de rotação e do projeto do rotor. Se a demanda de energia do sistema exceder a capacidade da bomba, o fluxo não ocorrerá e o fluido estará apenas sob pressão.

É importante selecionar uma bomba centrífuga específica para cada aplicação, pois a simples instalação de qualquer bomba centrífuga em um sistema hidráulico não garante seu funcionamento adequado. A escolha da bomba, o projeto do sistema de tubulação e a compatibilidade com o fluido bombeado são essenciais para o correto funcionamento do sistema.

2.4.3. Bombas TORNADO em processos industriais

Pode ser aplicada em diversos segmentos, dentre eles: alimentício, químico, papel e celulose, farmacêutico, dentre outros. Seu projeto permite sua operação em modo intermitente ou contínuo, sendo ideais para fluidos com alta ou baixa viscosidade, podendo trabalhar com fluidos limpos ou que contenham partículas sólidas.

Existe uma faixa muito ampla de variáveis de processo para essa bomba, podendo operar (dependendo do modelo do equipamento) com vazões de até 1000m³/h, pressões de até 6bar, viscosidades de 1cP até 50000cP e possui ainda uma capacidade de sucção de 8,5mca.

É uma bomba de construção compacta, podendo ser facilmente instalada mesmo que haja restrições de espaço no local, possui também capacidade de trabalho a seco além ainda da possibilidade de reversão de fluxo dependendo do tipo de processo no qual será utilizada.

2.4.4. Funcionamento das Bombas TORNADO

São bombas do tipo deslocamento positivo (volumétricas) rotativas, possuindo dois rotores onde são acoplados os lóbulos que giram em sentidos opostos dentro da câmara da bomba. É gerado um vácuo no lado de sucção do equipamento devido a rotação dos rotores, atraindo assim o meio bombeado.

Pode possuir de duas a seis cavidades preenchidas com o fluido bombeado

por rotação, porém isso irá depender do tipo de lóbulo existente em cada rotor podendo ser bilobular, trilobular ou tetralobular, sendo assim permite uma dosagem do fluido proporcional à velocidade de rotação. Vale ressaltar que os lóbulos são fabricados, em sua maior parte, com borracha vulcanizada, eliminando assim a obrigatoriedade de lubrificação interna (como ocorre na maioria das bombas de deslocamento positivo).

Figura 4 - Bomba de Lóbulos Rotativos TORNADO® - NETZSCH do Brasil



Fonte: Arquivo da empresa Netzsch do Brasil

2.4.5. Bomba Centrífuga Radial x Bomba de Lóbulos TORNADO

Nesse tópico serão abordadas as principais características e diferenças entre os dois tipos de bomba. Uma delas se trata de um equipamento já existente no sistema atual (Centrífuga Radial) e a outra é a ideia de implementação que visa esse projeto (Lóbulos Rotativos TORNADO).

Nota-se que, fisicamente falando, a principal diferença está no tipo de energia transmitida ao fluido. A Centrífuga é baseada na cinética que posteriormente é transformada em pressão, na TORNADO a energia que é produzida já se encontra na forma de pressão.

A bomba TORNADO tem vantagem quando se trata do tipo de fluido a ser bombeado (por mais que quase em sua totalidade o fluxo do efluente seja a base de água) em uma empresa de papel e celulose, como é o caso da Ahlstrom, pode ocorrer o despejo de substâncias fibrosas ou até mesmo tintas oriundas do processo

de fabricação do papel, sendo capaz que aconteça um leve aumento da viscosidade do fluido, o que não seria um problema para a bomba de lóbulos, visto que são capazes de trabalhar acima da viscosidade da água, variando de 1cP até 50000cP dependendo do modelo escolhido. No caso das bombas Centrífugas Radiais, são adequadas para o trabalho com água, não apresentando um desempenho tão eficiente com outros tipos de fluido devido suas características construtivas, tendo por consequência a redução da sua eficiência.

Ao realizar uma comparação em relação ao custo-benefício imediato, a bomba TORNADO também se sai superior. Uma bomba desse tipo custa aproximadamente R$ 41.000,00, já uma bomba centrífuga (semelhante às bombas existentes atualmente no local do projeto) está em uma média de preço de R$ 85.000,00.

Quando se fala de vazão, as bombas centrífugas geralmente apresentam melhor desempenho, pois devido à alta energia cinética gerada pelo seu rotor o fluido ganha grandes velocidades e vazões, permitindo uma ampla gama de aplicação nesse quesito. Já a bomba de lóbulos rotativos TORNADO também alcança as vazões necessárias para atender o projeto, porém é preciso um modelo mais robusto, acarretando em um custo maior.

Para manutenção das bombas a centrífuga também tem vantagem quanto ao custo, isso se dá devido aos valores de manutenção serem mais baratos e acessíveis, visto que são bombas mais comercializadas facilitando a procura de peças, mão de obra e valores das peças devido maior demanda. A bomba TORNADO fica para trás no custo da manutenção, mas ganha em confiabilidade e facilidade, diminuindo a periodicidade de manutenção devida suas características de projeto, e facilitando a realização da tarefa pelos operadores sem que haja grandes dificuldades para desmontar a bomba (como pode ser observado na **figura 21**).

2.5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.5.1. Conceitos de Mecânica dos fluidos

Os conceitos citados a seguir são de suma importância para entender, estudar, calcular e verificar os critérios relacionados na escolha da bomba ideal, isto

é, o quanto ela irá necessitar de vazão e pressão para atuar nas condições existentes.

2.5.2. Aplicabilidade da Bomba

Para descobrir se uma bomba é aplicável ou não para determinadas situações é preciso saber sua capacidade, que é a quantidade de líquido (fluido) que ela consegue descarregar por unidade de tempo, que não é nada mais que a vazão fornecida à rede. Para isso os fabricantes concedem gráficos que demonstram os valores de vazão para operação da bomba, o qual será abordado em detalhes posteriormente.

2.5.3. Vazão do Sistema

Existem dois métodos para representar a vazão:

A vazão volumétrica é a razão entre o volume de um fluido, que escoa em determinada seção (uma tubulação, por exemplo), em certo intervalo de tempo.

$$\boldsymbol{Q = \frac{V}{t}} \tag{3.1}$$

É dado o nome de vazão mássica à razão entre a massa de um fluido, que escoa por uma determinada seção, por um intervalo de tempo.

$$\boldsymbol{Qm = \frac{m}{t}} \tag{3.2}$$

Pode-se escrever a equação da vazão volumétrica (equação 3.1) de outra forma, utilizando a velocidade do fluido e a área do tubo por onde ele flui.

$$\boldsymbol{Q = v \,.\, A} \tag{3.3}$$

Sendo A, á área da seção do tubo, calculada por:

$$\boldsymbol{A = \frac{\pi . D^2}{4}} \tag{3.4}$$

Nesse estudo para substituição da bomba já existente a vazão é um elemento fundamental, pois se faz necessário que haja uma vazão mínima que supra a demanda dos efluentes p', causando desperdícios, onerando custos ao projeto e até mesmo uma parada na linha de produção da fábrica.

2.5.4. Carga e curva característica da bomba (CCB)

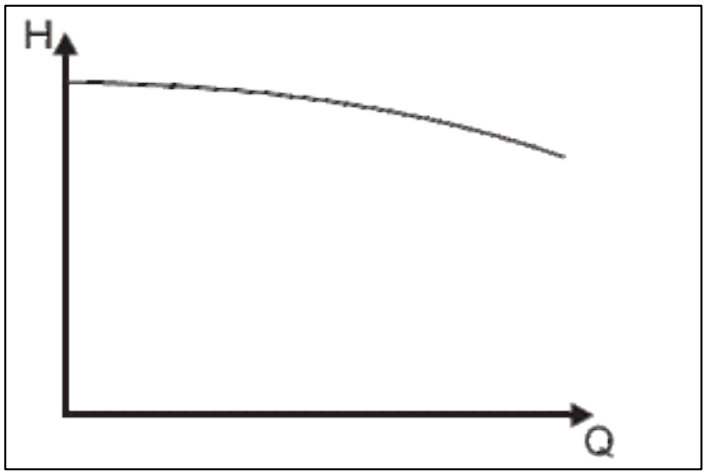
A definição de carga das bombas nada mais é do que a energia por unidade de peso que esta fornece ao fluido, normalmente é feita uma simplificação para a altura da coluna de líquido, que pode ser representada pela letra H.

Existem diversos tipos de bombas no mercado, para atender os divergentes tipos de sistemas, por isso deve-se conhecer os fatores principais para seleção, visando o melhor resultado possível.

O gráfico da Curva Característica da Bomba (CCB) deve ser entendido e interpretado minunciosamente, pois é de onde são extraídas as informações para seleção da bomba. A seguir há um exemplo da CCB de uma bomba, traçada em um gráfico head x vazão, onde há uma relação entre a carga e vazão da bomba, fornecida pelo fabricante.

Abaixo um exemplo de um gráfico head x vazão:

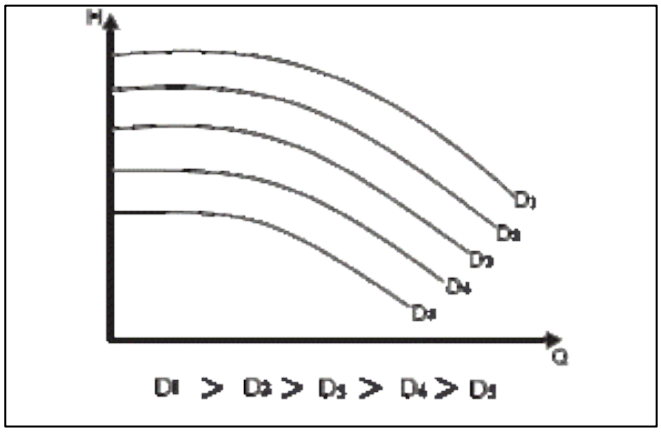
Figura 5 - Gráfico head x vazão de uma bomba



Fonte: http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/aulasfei/ccb.htm

É muito comum que sejam fornecidas diversas curvas em um único gráfico, isso se dá ao fato de que o diâmetro do rotor poder variar para o equipamento de um mesmo modelo, alterando assim a área, que acaba interferindo diretamente nos cálculos, como já citado anteriormente. Entretanto a característica principal é a variação da carga em relação à vazão: H = f(Q) (SANTOS, 2007).

Figura 6 - Curvas de uma família de bomba com diferentes diâmetros de rotor



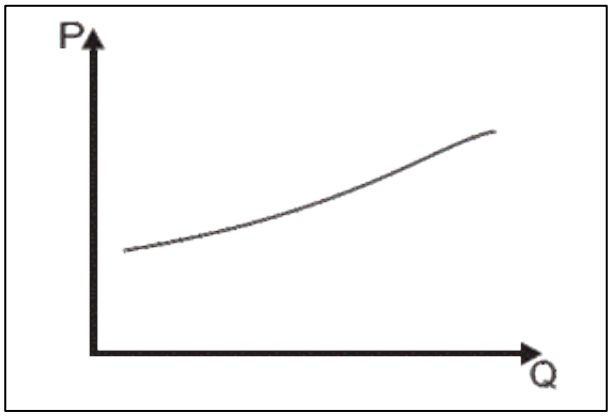
Fonte: http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/aulasfei/ccb.htm

2.5.5. Outras curvas características das bombas

Além do head x vazão existem outros dois tipos de gráficos que se pode utilizar para analisar uma bomba, sendo eles rendimento x vazão e potência consumida x vazão.

A curva de potência x vazão auxilia no dimensionamento de um motor correto para a bomba, de maneira que a potência fornecida pelo motor possa ultrapassar quaisquer possíveis pontos de operação da bomba, sendo assim, mesmo que haja alguma modificação no sistema que afete diretamente o seu funcionamento, não haverá perca de capital para substituir o motor.

Figura 7 - Gráfico potência consumida x vazão



Fonte: http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/aulasfei/ccb.htm

Para o cálculo da potência consumida pode-se utilizar:

$$\boldsymbol{Pot_{Cons} = \frac{\gamma . Q . H}{75 . \eta}} \quad (3.5)$$

Sendo:

γ: peso específico do fluido [kgf/m³];

Q: vazão [m³/s];

H: carga [m];

η: rendimento da bomba

PotCons: potência consumida [CV].

Há também o cálculo da potência cedida ao fluido, denominada como potência hidráulica, através da fórmula:

$$\boldsymbol{Pot_{HIDR} = \frac{\gamma . Q . H}{75}} \quad (3.6)$$

Sendo:

γ: peso específico do fluido [kgf/m³];

Q: vazão [m³/s];

H: carga [m];

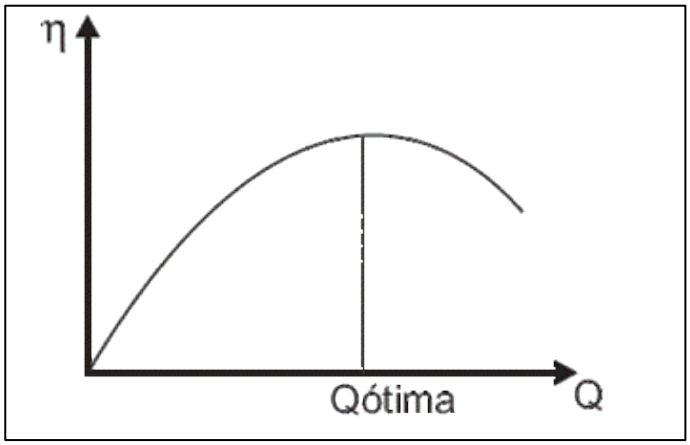
PotHIDR: potência hidráulica [CV].

Agora, para a curva que avalia o rendimento necessita-se das duas fórmulas vistas anteriormente (potência hidráulica e potência consumida). A partir dessas informações é traçada uma curva no gráfico em função da vazão.

$$\eta = \frac{Pot_{Cons}}{Pot_{HIDR}} \quad (3.7)$$

O modelo da curva é semelhante ao exemplo abaixo:

Figura 8 - Gráfico eficiência x vazão



Fonte: http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/aulasfei/ccb.htm

A sentença “Qótima” representa o melhor ponto para atuação da bomba.

2.5.6. Perda de carga no sistema

Para a escolha de uma bomba ideal no sistema será considerado também as perdas de carga, sendo, o atrito do fluido com o esquema de tubulações implantado na linha dos efluentes. Essa carga perdida (hf) dar-se-á de duas formas diferentes: a

carga localizada (hfl), referente aos acessórios da linha, como válvulas e demais conexões; e a carga distribuída (hfr), pertencente aos trechos retos e lineares de tubulação.

$$\boldsymbol{hf = hfr + hfl} \tag{3.8}$$

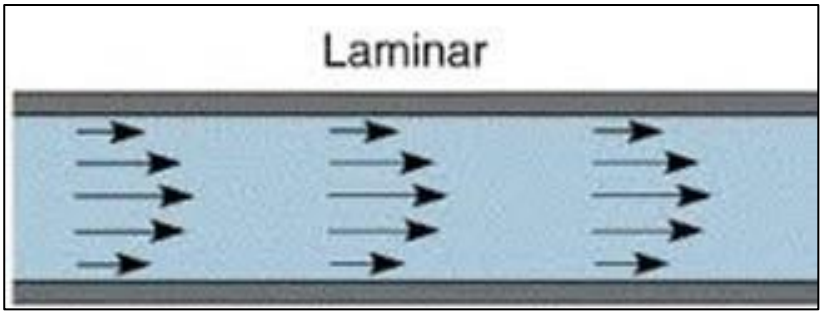
Essa perda de energia (perda de carga) irá depender também do tipo de escoamento do fluido, melhor dizendo, se o fluxo é laminar ou turbulento nas condições encontradas (FALCO, MATTOS 1998). Para entender melhor sobre esse assunto será abordado seguir.

2.5.6.1. Escoamento Laminar

Este acontece quando o fluido escoa de modo no qual as suas partículas fluem em camadas paralelas, sem intervirem no caminho das demais partículas.

É um tipo de escoamento mais comum quando há fluidos com alto nível de viscosidade e com velocidades mais amenas.

Figura 9 - Escoamento Laminar

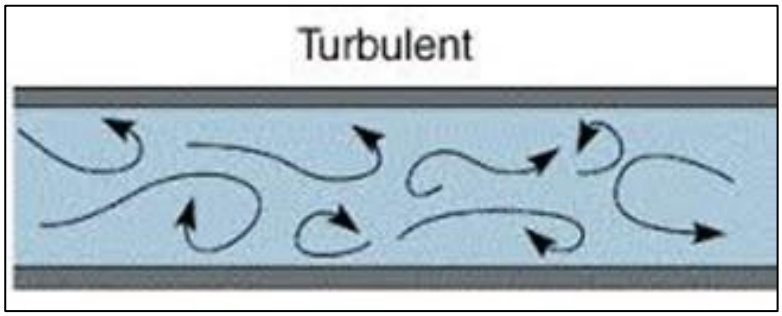


Fonte: http://masimoes.pro.br/op_uni/1_cin_fluidos/cin_fluidos_slides.pdf

2.5.6.2. Escoamento Turbulento

Já o escoamento turbulento, diferente do laminar, é caracterizado pelo movimento desordenado e transversal, sem haver o seguimento de uma trajetória bem definida. É um tipo de escoamento bem comum a água (fluido utilizado pelo sistema de efluentes representado nesse trabalho), devido sua baixa viscosidade.

Figura 10 - Escoamento Turbulento



Fonte: http://masimoes.pro.br/op_uni/1_cin_fluidos/cin_fluidos_slides.pdf

2.5.7. Número de Reynolds

Esse é um fator adimensional que permite analisar a natureza do tipo de escoamento, tanto em regiões internas (como dentro de um duto) quanto em regiões externas (superfícies no geral) (FOX, MCDONALD, PRITCHARD, 2006).

O nome do fator é por causa de Osborne Reynolds um físico irlandês, que por meio do seu trabalho e experimentos descobriu o número, além de também provar experimentalmente os dois modelos de escoamento (laminar e turbulento), utilizando das propriedades e características dos fluidos.

A fórmula para o cálculo do número de Reynolds é:

$$\boldsymbol{Re = \frac{\rho . V . D}{\mu}} \tag{3.9}$$

Sendo:

ρ: Massa específica do fluido

V: Velocidade de escoamento do fluido

D: Diâmetro interno do tubo

μ: Viscosidade absoluta

Para determinação do escoamento é adotado o seguinte critério:

Re < 2000 – Escoamento Laminar

2000 < Re < 4000 - Escoamento Transitório

Re > 4000 – Escoamento Turbulento

2.5.8. Fator de Atrito

Esse fator é um parâmetro adimensional dado pela abreviatura **f**. É obtido em função do número de Reynolds e da rugosidade relativa da tubulação (e/D), sendo **e** a rugosidade e **D** o diâmetro do tubo. A sentença anterior é válida exceto quando o escoamento é laminar, onde **f** passa a depender somente de **Re** (equação 3.9).

Para a obtenção dos valores de rugosidade do tubo recorre-se a tabelas, para cada tipo de material utilizado haverá uma rugosidade diferente. Abaixo há uma tabela que indica os valores da rugosidade da parede dos tubos, que foi extraída do manual da KSB (SILVA, 2003).

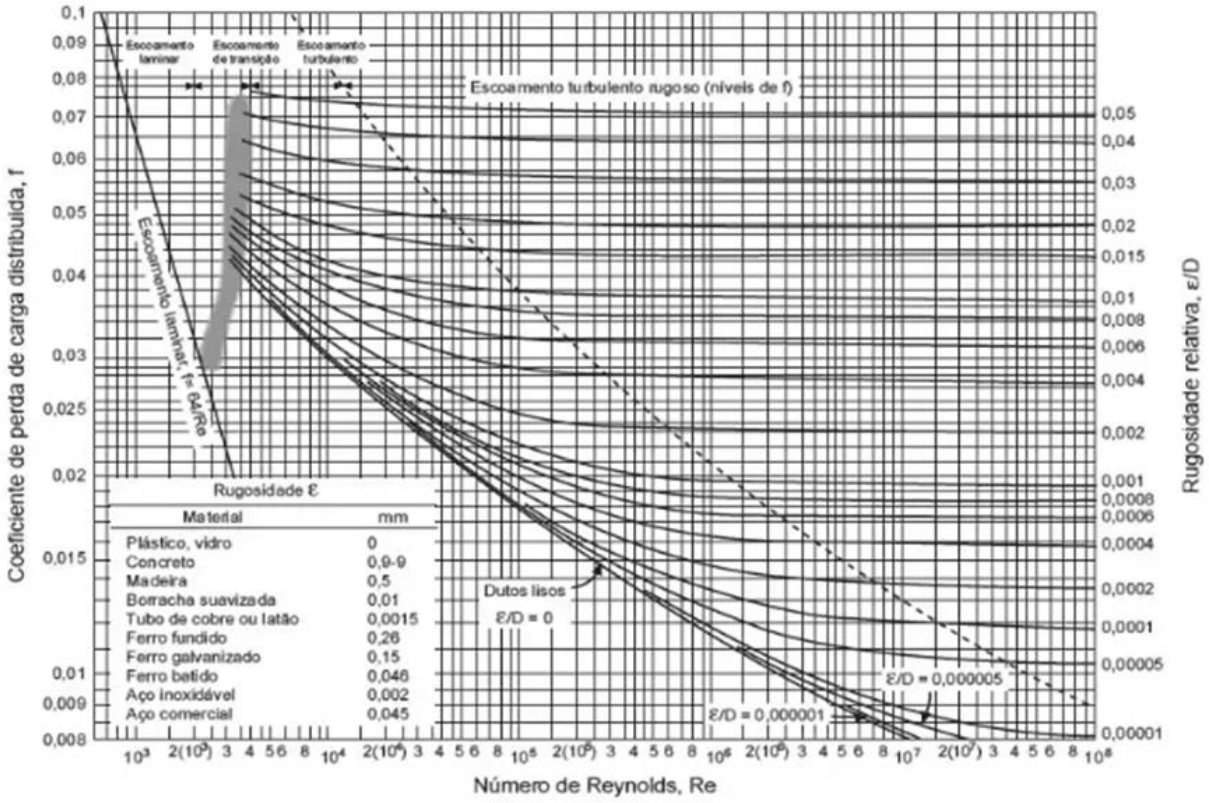
Figura 11 - Rugosidade da Parede dos Tubos

MATERIAL	k (m) - TUBOS NOVOS	k (m) - TUBOS VELHOS
Aço galvanizado	0,00015 - 0,00020	0,0046
Aço rebitado	0,0010 - 0,0030	0,0060
Aço revestido	0,0004	0,0005 - 0,0012
Aço soldado	0,00004 - 0,00006	0,0024
Chumbo	lisos	lisos
Cimento amianto	0,000013	---------
Cobre ou latão	lisos	lisos
Concreto bem acabado	0,0003 - 0,0010	---------
Concreto ordinário	0,0010 - 0,0020	---------
Ferro forjado	0,00004 - 0,00006	0,0024
Ferro fundido	0,00025 - 0,00050	0,0030 - 0,0050
Madeira com aduelas	0,0002 - 0,0010	---------
Manilhas cerâmicas	0,0006	0,0030
Vidro	lisos	lisos
Plástico	lisos	lisos

Fonte: Manual de Treinamento KSB
http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/segundo2008/manual_de_treinamento.pdf

Quando houver um escoamento do tipo turbulento, utiliza-se o fator de atrito encontrado de acordo com a análise do diagrama de Moody-Rouse.

Figura 12 - Diagrama de Moody-Rouse



Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Figura-113-Diagrama-de-Moody-Rouse_fig1_343858524

No diagrama demonstrado acima foi aplicado o valor de Reynolds (3.9) no eixo da abscissa (X) e a rugosidade referente à parede do tubo no eixo da ordenada ao lado direito (Y). Com esses valores como diretriz se encontra o fator de atrito, também no eixo da ordenada, mas do lado esquerdo do diagrama.

2.5.9. Perda de Carga Distribuída no Escoamento Laminar

O conceito de Perda de Carga Distribuída é baseado em uma perda de pressão, imposta pelo atrito com as paredes internas do tubo, fazendo com que gradativamente em trechos retilíneos ao decorrer do seu comprimento o fluido perca carga (pressão). Esse valor pode variar de acordo com a condição do tipo de escoamento.

No escoamento laminar calcula-se a perda de carga distribuída através da equação de Darcy-Weisbach, sendo:

$$\boldsymbol{hfr = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2.g}} \quad (3.10)$$

V: Velocidade média do escoamento

g: Aceleração da gravidade

D: Diâmetro interno do tubo

L: Comprimento do tubo

O valor de $\boldsymbol{f}$ é alusivo ao fator de atrito, que para casos laminares é considerada a seguinte expressão $\boldsymbol{f = \frac{64}{Re}}$.

2.5.10. Perda de Carga Distribuída no Escoamento Turbulento

No escoamento do tipo turbulento é utilizada a mesma fórmula (equação de Darcy-Weisbach) demonstrada acima (3.10) para efetuar o cálculo de perda de carga distribuída. Porém para medir a perda de carga, nesses casos, o fator de atrito (f) será divergente, podendo ser encontrado através de diagramas ou gráfico (caso que será abordado no trabalho) ou até mesmo fórmulas teórico experimentais.

2.5.11. Perda de Carga Localizada

No geral está relacionada com uma perda que costuma ocorrer nos acessórios e conexões existentes ao longo da linha, como por exemplo, válvulas no geral, filtros, curvas, tês, registros, dentre outros. Para sistemas pequenos e com muitos acessórios, pode ocorrer da perda de carga localizada ultrapassar a distribuída.

A perda de carga localizada pode ser calculada de duas formas, sendo elas:

2.5.11.1. Método Direto

Para este método aplica-se a fórmula:

$$\boldsymbol{hfl = K \cdot \frac{V^2}{2.g}} \quad (3.11)$$

O valor de K aponta a intervenção do diâmetro e do comprimento do respectivo acessório utilizado, geralmente são valores tabelados e fornecidos pelos fabricantes.

Essa equação deve ser usada para cada dispositivo separadamente, e em seguida, deve ser somada a perda de todos os componentes, para que se obtenha o valor correto da perda localizada total.

2.5.11.2. Método do Comprimento Equivalente

Já nesse segundo método é realizada uma equivalência da perda de carga do acessório a um trecho reto de tubulação, e para isso utiliza-se da seguinte expressão:

$$\boldsymbol{hfl = f \cdot \frac{Leq}{D} \cdot \frac{V^2}{2.g}} \quad (3.12)$$

O valor de ***Leq*** é encontrado somando todos os comprimentos retilíneos de tubulação mais a soma do comprimento equivalente de cada acessório.

Os valores de comprimento equivalente são tabelados, abaixo foi usada como referência uma tabela do Manual de Treinamento da KSB para demonstrar alguns exemplos (SILVA, 2003).

Figura 13 - Comprimentos Equivalentes para perdas Localizadas em Acessórios

DIÂMETRO D		COTOVELO 90° RAIO LONGO	COTOVELO 90° RAIO MÉDIO	COTOVELO 90° RAIO CURTO	COTOVELO 45°	CURVA 90° R / D - 1 1/2	CURVA 90° R / D - 1	CURVA 45°	ENTRADA NORMAL	ENTRADA DE BORDA	REGISTRO DE GAVETA ABERTO	REGISTRO DE GLOBO ABERTO	REGISTRO DE ÂNGULO ABERTO	TÊ PASSAGEM DIRETA	TÊ SAÍDA DE LADO	TÊ SAÍDA BILATERAL	VÁLVULA DE PÉ E CRIVO	SAÍDA DA CANALIZAÇÃO	VÁLVULA DE RETENÇÃO TIPO LEVE	VÁLVULA DE RETENÇÃO TIPO PESADO
mm	pol.																			
13	½	0,3	0,4	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,1	4,9	2,6	0,3	1,0	1,0	3,6	0,4	1,1	1,6
19	¾	0,4	0,6	0,7	0,3	0,3	0,4	0,2	0,3	0,5	0,1	6,7	3,6	0,4	1,4	1,4	5,6	0,5	1,6	2,4
25	1	0,5	0,7	0,8	0,4	0,3	0,5	0,2	0,3	0,7	0,2	8,2	4,6	0,5	1,7	1,7	7,3	0,7	2,1	3,2
32	1 ¼	0,7	0,9	1,1	0,5	0,4	0,6	0,3	0,4	0,9	0,2	11,3	5,6	0,7	2,3	2,3	10,0	0,9	2,7	4,0
38	1 ½	0,9	1,1	1,3	0,6	0,5	0,7	0,3	0,5	1,0	0,3	13,4	6,7	0,9	2,8	2,8	11,6	1,0	3,2	4,8
50	2	1,1	1,4	1,7	0,8	0,6	0,9	0,4	0,7	1,5	0,4	17,4	8,5	1,1	3,5	3,5	14,0	1,5	4,2	6,4
63	2 ½	1,3	1,7	2,0	0,9	0,8	1,0	0,5	0,9	1,9	0,4	21,0	10,0	1,3	4,3	4,3	17,0	1,9	5,2	8,1
75	3	1,6	2,1	2,5	1,2	1,0	1,3	0,6	1,1	2,2	0,5	26,0	13,0	1,6	5,2	5,2	20,0	2,2	6,3	9,7
100	4	2,1	2,8	3,4	1,3	1,3	1,6	0,7	1,6	3,2	0,7	34,0	17,0	2,1	6,7	6,7	23,0	3,2	6,4	12,9
125	5	2,7	3,7	4,2	1,9	1,6	2,1	0,9	2,0	4,0	0,9	43,0	21,0	2,7	8,4	8,4	30,0	4,0	10,4	16,1
150	6	3,4	4,3	4,9	2,3	1,9	2,5	1,1	2,5	5,0	1,1	51,0	26,0	3,4	10,0	10,0	39,0	5,0	12,5	19,3
200	8	4,3	5,5	6,4	3,0	2,4	3,3	1,5	3,5	6,0	1,4	67,0	34,0	4,3	13,0	13,0	52,0	6,0	16,0	25,0
250	10	5,5	6,7	7,9	3,8	3,0	4,1	1,8	4,5	7,5	1,7	85,0	43,0	5,5	16,0	16,0	65,0	7,5	20,0	32,0
300	12	6,1	7,9	9,5	4,6	3,6	4,8	2,2	5,5	9,0	2,1	102,0	51,0	6,1	19,0	19,0	78,0	9,0	24,0	38,0
350	14	7,3	9,5	10,5	5,3	4,4	5,4	2,5	6,2	11,0	2,4	120,0	60,0	7,3	22,0	22,0	90,0	11,0	28,0	45,0

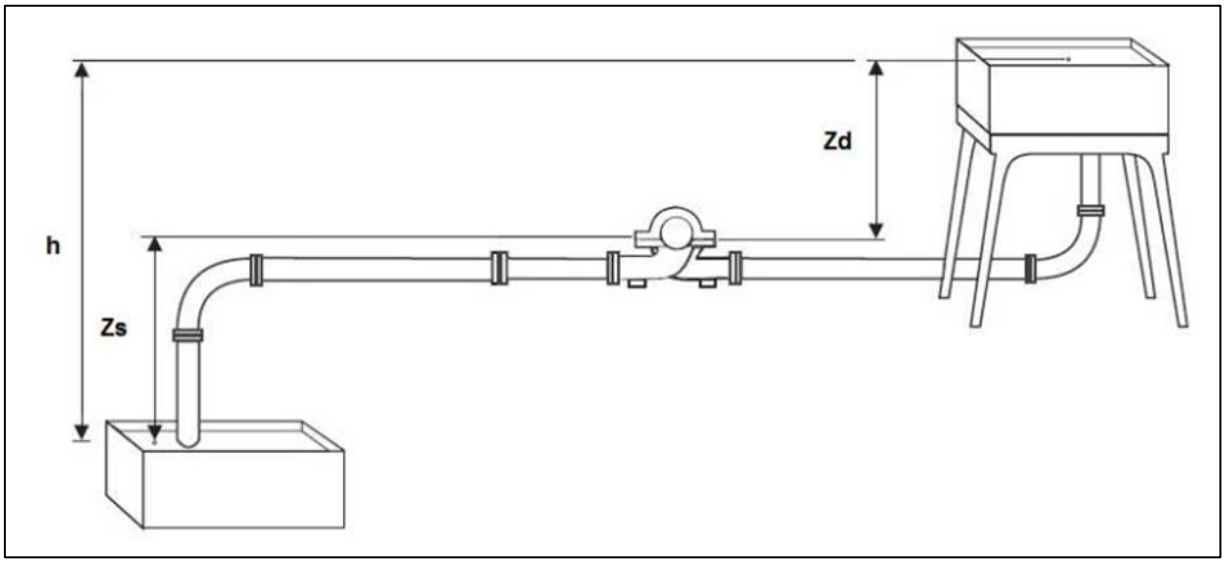
Fonte: Manual de Treinamento KSB
http://www.escoladavida.eng.br/mecfluquimica/segundo2008/manual_de_treinamento.pdf

2.5.12. Altura manométrica da linha

É necessário que seja considerada a altura manométrica (H), que significa basicamente a carga (energia) que o sistema irá requisitar a bomba, para que ela consiga levar o fluido de um ponto ao outro, com uma vazão pré-estabelecida. A energia demandada pelo sistema pode ocorrer de diferentes formas, sendo elas: a altura entre um ponto e o outro (h), a disparidade de pressões nos trechos de recalque (Pd) e sucção (Ps) e as perdas de carga na linha (hf).

Na figura abaixo se observa a altura geométrica (h) como a diferença de nível entre os dois reservatórios, existem também as alturas do reservatório de recalque (Zd) e sucção (Zs). Vale ressaltar que no caso do nosso projeto estão sendo consideradas alterações somente a partir do ponto de recalque (depois da bomba), não havendo interferências ou modificações nos pontos de sucção (tubulação antecedente a bomba).

Figura 14 - Altura manométrica de um sistema



Fonte: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4469807/mod_resource/content/1/Aula%208%20%20HIDRA%C3%9ALICA%20bombas%20dimensionamento.pdf

Para calcular a altura manométrica de um sistema observa-se a energia já existente na sucção (hs) em conjunto com a energia do recalque (hd). A energia que deve ser fornecida pela bomba é a subtração da sucção pelo recalque (FALCO, MATTOS 1998), sendo:

$$\boldsymbol{H = hd - hs} \tag{3.13}$$

2.5.13. Teorema de Bernoulli

O Teorema de Bernoulli descreve o comportamento dos fluidos que estão em movimento na parte interna dos tubos, que se tratando de um fluido ideal, a energia é conservada durante seu percurso, sendo utilizado o princípio da conservação de energia tendo assim uma relação entre a carga manométrica em diferentes pontos do circuito (JÚNIOR, 2023). Pode-se considerar as seguintes formas de energia para o fluxo de um fluido: energia de pressão, que se trata da quantidade de trabalho necessária para a movimentação do fluido contra a pressão reinante no sistema; energia cinética, é devida a velocidade existente no fluido; energia potencial gravitacional, que é a energia relacionada à altitude do fluido (ação da gravidade).

Para a energia de pressão por unidade de peso, em um ponto qualquer do fluido, considera-se:

$$\boldsymbol{Ep = \frac{P}{\gamma}} \tag{3.14}$$

Sendo:

P: Pressão exercida

γ: Peso específico do fluido

Na energia de cinética tem-se:

$$\boldsymbol{Ec = \frac{V^2}{2.g}} \tag{3.15}$$

Sendo:

V: Velocidade média do fluido

g: Aceleração da gravidade

A energia potencial gravitacional é dada como uma determinada cota (Z), em relação ao PHR (Plano horizontal de referência) determinado na instalação.

Santos (2007) diz a respeito do balanço de energia de uma instalação com dois tipos de carga manométrica (Z1 e Z2), sendo a energia necessária para o sistema e a disponível da bomba.

Consequentemente tem-se a seguinte equação para determinar as propriedades do fluido, considerando dois pontos distintos na rede de tubulação:

$$\boldsymbol{\frac{P_1}{\gamma} + \frac{{V_1}^2}{2.g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{{V_2}^2}{2.g} + Z_2} \tag{3.16}$$

A equação anterior (3.16) é válida somente para condições ideais, pois ao ser aplicada para fluidos reais é levado em consideração a energia perdida (hf) ao longo do percurso, devido ao atrito do fluido com a parede das tubulações e demais

acessórios presentes na linha, ficando da seguinte maneira:

$$\frac{\boldsymbol{P_1}}{\boldsymbol{\gamma}} + \frac{\boldsymbol{V_1}^2}{\boldsymbol{2.g}} + \boldsymbol{Z_1} = \frac{\boldsymbol{P_2}}{\boldsymbol{\gamma}} + \frac{\boldsymbol{V_2}^2}{\boldsymbol{2.g}} + \boldsymbol{Z_2} + \boldsymbol{hf} \quad (3.17)$$

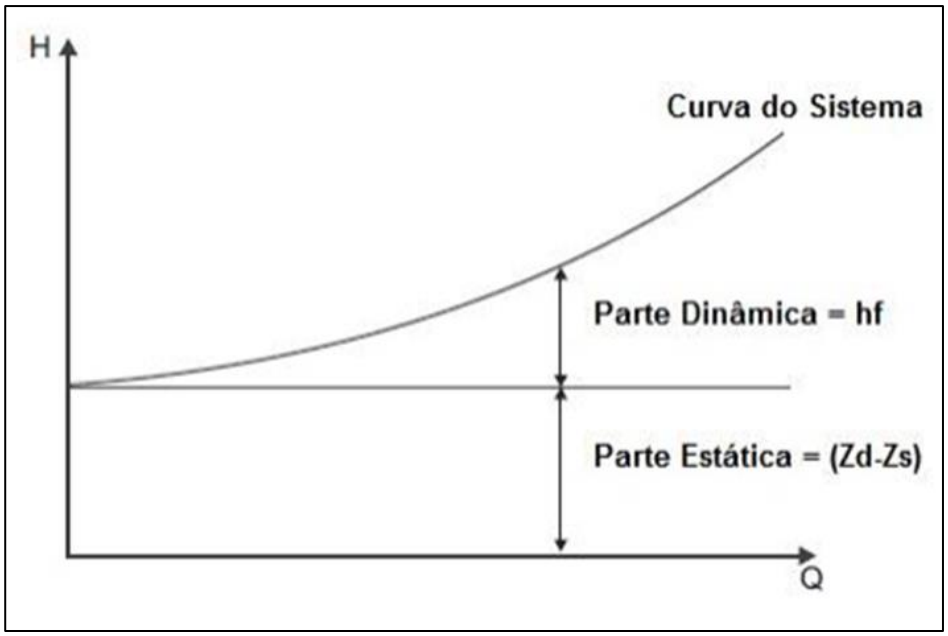
Pode-se reparar de acordo com a equação que, conforme é aumentada a altura manométrica (Z_1 e Z_2), a pressão no reservatório (P_1 e P_2) e a perda de carga (hf), maior será a quantidade de energia requerida (FALCO, MATTOS 1998).

2.5.14. Curva característica da instalação (CCI)

É a curva formada através do conceito de altura manométrica juntamente ao teorema de Bernoulli, sendo obtida pela perda de carga e a altura estática em qualquer diferença de pressão no sistema.

A curva pode ser separada em duas partes, sendo ela estática (fatores que independem da vazão) e dinâmica (são valores que se alteram em função da vazão) como é observado no gráfico a seguir.

Figura 15 - CCI parte dinâmica e estática



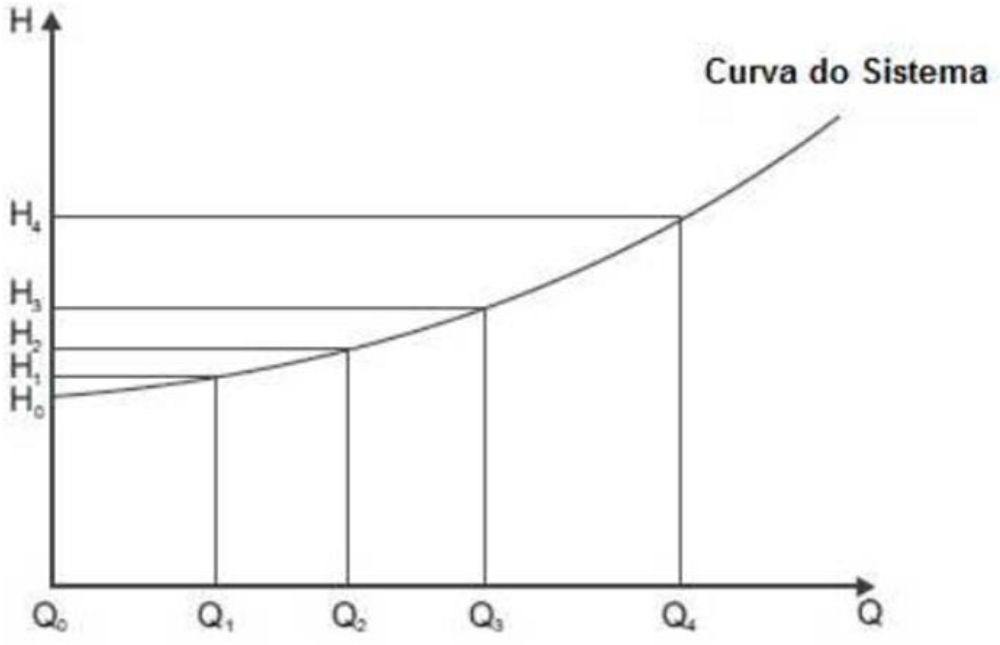
Fonte:
http://www.escoladavida.eng.br/hidraulica_I/Quinta%20aula%20de%20Hidr%C3%A1ulica%20I.pdf

Para o ponto onde Q=0 tem-se o “shut off” da bomba. Já desse trecho para frente as alterações no gráfico são todas devido a perda de carga.

Então é traçada a curva característica do sistema selecionando outros pontos de trabalho além do Q=0, sendo algum deles o ponto de funcionamento da bomba.

Para que seja realizado o levantamento da CCI não se deve buscar fórmulas prontas para substituir as grandezas, pois cada caso é particular. Para resolver os diferentes casos e modelos de instalações basta aplicar a equação da energia (3.17) (SANTOS 2007).

Figura 16 - Construção da CCI



Fonte:
http://www.escoladavida.eng.br/hidraulica_I/Quinta%20aula%20de%20Hidr%C3%A1ulica%20I.pdf

2.5.15. NPSH Disponível x NPSH Requerido

O termo NPSH significa Net Positive Suction Head, e pode ser interpretado como a pressão existente no bocal de sucção da bomba, empurrando o líquido para a voluta do equipamento, e isso ocorre acima da pressão de vapor do próprio fluido.

Para calcular esse termo, entende-se que:

$$NPSH_{Disp} = h_{atm} + Zs - hvp - hfs \quad (3.18)$$

Sendo:

hatm = pressão atmosférica em metros de coluna d'água

Zs = altura manométrica de sucção

hvp = pressão de vapor em metros de coluna d'água

hfs = perda de carga na sucção

Se forem observadas as tabelas abaixo é perceptível que existem variações desses valores para cada altitude (em relação à pressão atmosférica), e para diferentes temperaturas (pressão de vapor).

Figura 17 - Construção da CCI

Tabela 1:

DADOS DE PRESSÃO ATMOSFÉRICA PARA DETERMINADAS ALTITUDES LOCAIS										
Altitude em relação ao mar (metros)	0	150	300	450	600	750	1000	1250	1500	2000
Pressão Atmosférica (m.c.a.)	10,33	10,16	9,98	9,79	9,58	9,35	9,12	8,83	8,64	8,08

Tabela 2:

PRESSÃO DE VAPOR DA ÁGUA PARA DETERMINADAS TEMPERATURAS										
Temperatura da água	0	4	10	20	30	40	50	60	80	100
Pressão de Vapor da água (m.c.a.)	0,062	0,083	0,125	0,239	0,433	0,753	1,258	2,033	4,831	10,33

Fonte: https://foxbombas.com.br/o-que-e-npsh-e-qual-sua-importancia/

Conforme Júnior (2023) no fenômeno de cavitação acontece uma transformação da fase líquida para a fase gasosa, devido à diminuição da pressão do líquido (isso ocorre caso a pressão na entrada da bomba seja menor que a pressão de vapor da água naquela temperatura).

O NPSH é o parâmetro que se deve calcular para evitar a cavitação na bomba, o que acaba gerando danos e degradação a mesma. Para que não ocorra

esse fenômeno deve existir um valor de NPSH disponível maior do que o requerido, garantindo uma pressão de sucção maior do que a pressão de vapor do fluido.

$$\boldsymbol{NPSH_{Disp} \geq NPSH_{Req} + 0,6\ m} \tag{3.19}$$

3 MÉTODOS E MATERIAIS

Nesse tópico do trabalho serão abordadas e apresentadas as principais características de funcionamento do sistema, tanto do sistema já existente quanto ao que será proposto no projeto. Com isso pontua-se a metodologia utilizada e base de dados coletados para o entendimento do sistema.

Sendo assim irá apresentar as alterações necessárias, dados e cálculos pertinentes para a instalação de um novo modelo de bomba, buscando uma melhor eficiência em todo o processo.

3.1 VAZÃO NO SISTEMA

Usando um medidor de vazão já existente na linha consegue-se aferir a quantidade de fluxo que passa pelas tubulações. Foram medidos também outros valores para a vazão durante o período de elaboração desse projeto, porém considera-se o caso mais crítico, onde se obteve um valor de 108 m³/h.

Este valor foi obtido através do medidor de vazão que está conectado ao sistema de controle da empresa Ahlstrom chamado PI Processbook onde é feito o acompanhamento de todos os medidores instalados nos equipamentos de processo conforme figura a seguir.

Figura 18 – Vazão do Sistema



Fonte: Arquivo técnico da empresa Ahlstrom

3.2 CÁLCULOS PARA CARGA/PRESSÃO DA BOMBA

Essa parte do cálculo é a mais complexa, porém fundamental para entender como a bomba escolhida deverá se comportar para suprir as necessidades do sistema. Ela abrange todas as perdas de carga existentes na linha, desde a sua saída da bomba até o seu destino (tanque coletor de efluentes). Os cálculos serão representados passo a passo e com mais detalhes ao longo deste subitem.

3.2.1. Altura manométrica (H)

É medida através dos valores de altura que foram encontrados. Para fazer esse cálculo simplesmente basta subtrair a altura no ponto de sucção da bomba da altura medida no topo do reservatório de recalque.

As medições da altura manométrica e demais dimensões da linha foram realizadas IN LOCO em uma visita técnica (conforme **APÊNDICE A**), utilizando uma trena métrica comum e uma trena a laser.

Dessa maneira existe a seguinte situação:

Zd = 10,50 m

Zs = 0,00 m

Portanto utiliza-se a fórmula **(3.13)**

$$\boldsymbol{H = 10,50\ m - 0,00\ m}$$

$$\boldsymbol{H = 10,50\ m}$$

3.2.2. Diâmetro da Tubulação

Na visita técnica a empresa, foram coletados diversos dados, sendo um deles o diâmetro da tubulação, fator determinante para os demais cálculos a seguir. Nos locais por onde passa o trajeto da tubulação foi medida uma dimensão de 114,3 mm

(tubulação de 4 polegadas) conforme demonstrado na próxima imagem.

Figura 19 – Diâmetro da Tubulação



Fonte: Próprio autor

3.2.3. Perda de Carga no Sistema

A perda de carga será calculada através da fórmula de Darcy-Weisbach.

Será dividida entre perda de carga distribuída e localizada, detalhando-as indicando as tabelas, figuras e demais parâmetros ou conceitos utilizados nos cálculos. Entre os itens fundamentais para esse cálculo tem-se o número de Reynolds, fator de atrito, viscosidade absoluta do fluido, comprimento linear equivalente dos acessórios, rugosidade dos tubos, dentre outros. Essas propriedades serão apresentadas a seguir.

3.2.3.1. Propriedades do Tubo e do Fluido

As propriedades da água (fluido de bombeamento utilizado) podem ser observadas abaixo, e foram retiradas do livro Fluid Mechanics (WHITE F. 1998).

Figura 20 – Propriedades da Água

Liquid	ρ, kg/m^3	μ, kg/(m · s)	Y, N/m*	p_v, N/m^2	Bulk modulus, N/m^2	Viscosity parameter $C^\dagger$
Ammonia	608	2.20 E-4	2.13 E-2	9.10 E+5	—	1.05
Benzene	881	6.51 E-4	2.88 E-2	1.01 E+4	1.4 E+9	4.34
Carbon tetrachloride	1,590	9.67 E-4	2.70 E-2	1.20 E+4	9.65 E+8	4.45
Ethanol	789	1.20 E-3	2.28 E-2	5.7 E+3	9.0 E+8	5.72
Ethylene glycol	1,117	2.14 E-2	4.84 E-2	1.2 E+1	—	11.7
Freon 12	1,327	2.62 E-4	—	—	—	1.76
Gasoline	680	2.92 E-4	2.16 E-2	5.51 E+4	9.58 E+8	3.68
Glycerin	1,260	1.49	6.33 E-2	1.4 E-2	4.34 E+9	28.0
Kerosine	804	1.92 E-3	2.8 E-2	3.11 E+3	1.6 E+9	5.56
Mercury	13,550	1.56 E-3	4.84 E-1	1.1 E-3	2.55 E+10	1.07
Methanol	791	5.98 E-4	2.25 E-2	1.34 E+4	8.3 E+8	4.63
SAE 10W oil	870	1.04 E-1‡	3.6 E-2	—	1.31 E+9	15.7
SAE 10W30 oil	876	1.7 E-1‡	—	—	—	14.0
SAE 30W oil	891	2.9 E-1‡	3.5 E-2	—	1.38 E+9	18.3
SAE 50W oil	902	8.6 E-1‡	—	—	—	20.2
Water	998	1.00 E-3	7.28 E-2	2.34 E+3	2.19 E+9	Table A.1

Fonte: Livro Fluid Mechanics
(http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM240/Marchi/Bibliografia/White_2011_7ed_Fluid-Mechanics.pdf)

Extraindo os valores da tabela apresentada sabe-se a viscosidade absoluta (μ) e a massa específica (ρ), sendo 0,001kg/(m*s) e 998kg/m³ respectivamente.

Agora para o valor de rugosidade da parede do tubo (**Figura 11**) pode-se observar que há variações dependendo do material. O nosso caso é trabalhado com aço galvanizado, tendo uma rugosidade de 0,0002m.

3.2.3.2. Calculando Número de Reynolds (Re)

Esse interfere no tipo de escoamento (laminar ou turbulento). Portanto é preciso calcular esse fator para, sequentemente, descobrir o fator de atrito.

A princípio o cálculo de Reynolds será feito em função da vazão de operação da bomba, utilizando a equação (**3.9**).

Será utilizada a equação (**3.3**) para encontrar o valor da velocidade (V), visto que ao efetuar o cálculo de Reynolds necessita-se dessa incógnita. Sendo assim sabe-se o valor da vazão Q=108m³/h e o diâmetro interno do tubo de 4 polegadas D=0,10226m. Ao substituir os valores na equação obtêm-se uma velocidade de aproximadamente 3,65 m/s, demonstrado abaixo.

$$\boldsymbol{V = \frac{Q}{A} = \frac{108}{3600\pi(0,10226)^2/4} \cong 3,65\ m/s}$$

Para o número de Reynolds tem-se o resultado:

$$\boldsymbol{Re = \frac{\rho . V . D}{\mu} = \frac{998\ .\ 3,65\ .\ 0,10226}{0,001} \cong 3,725\ x\ 10\text{^}5}$$

Re > 4000 – Escoamento Turbulento

Como o valor de Reynolds ultrapassa quatro mil o escoamento é do tipo **turbulento**.

3.2.3.3. Fator de Atrito (f)

Na Figura 12 um exemplar do Diagrama de Moody-Rouse, e com ele é que se define o fator de atrito. Para calculá-lo é necessário o Número de Reynolds (Re) e a rugosidade relativa do material dos tubos (e/D).

Dados:

$$\boldsymbol{Re = 3,725\ x\ 10\text{^}5}$$

$$\boldsymbol{\frac{e}{D} = \frac{0,0046}{0,10226} \cong 0,0195}$$

Com a rugosidade relativa calculada é só rebater o seu valor no gráfico de Moody-Rouse, no eixo das abscissas, ao lado esquerdo, e encontra-se o fator de atrito, no caso será $\boldsymbol{f = 0,025.}$

3.2.3.4. Trechos Lineares de Tubulação

Um desenho esquemático da tubulação é representado no Apêndice A, observando as cotas de comprimento e somando-as ficam em um total de:

$$L_{total} = 183{,}34\ m$$

3.2.3.5. Comprimento Equivalente dos Acessórios

Como já dito anteriormente, o comprimento equivalente dos acessórios da linha equivale a sua perda de carga, simulando um trecho reto de tubo, descrito em metros. Na tabela é observado o valor discriminado para cada acessório, consultando o Manual de Treinamento KSB (SILVA, 2003), e seu respectivo comprimento total (24,0m).

Tabela 1 – Comprimento Equivalente dos Acessórios

Comprimento equivalente dos acessórios			
Tipo	Quantidade	Comprimento Equivalente (m)	Comprimento Equivalente Total (m)
Curva 90° - Raio Longo	8	1,3	10,4
Válvula Guilhotina	1	0,7	0,7
Válvula de Retenção	1	12,9	12,9
		TOTAL	**24,0**

3.2.3.6. Perda de Carga Total (hf)

Levando em conta a vazão de trabalho da nossa linha de 108m³/h, serão realizados os cálculos para a perda de carga total, aplicando as seguintes fórmulas:

$$hfl = f \cdot \frac{Leq}{D} \cdot \frac{V^2}{2.g} \tag{3.12}$$

$$hfr = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2.g} \tag{3.10}$$

$$hf = hfr + hfl \tag{3.8}$$

Tabela 2 – Perdas de Carga Totais

Perda de Carga			
Vazão	hfl	hfr	hf
108 m³/h	30,466 m	3,988 m	34,454 m

3.3 SELEÇÃO DA BOMBA

Todos os cálculos realizados anteriormente serão utilizados para a seleção e demonstração da bomba escolhida nesse capítulo. O objetivo é que a bomba escolhida tenha uma eficiência maior, além de outras características construtivas que se adaptem melhor ao sistema, para evitar os problemas no bombeamento já citados em momentos anteriores do trabalho.

3.3.1. Seleção do Tipo de Bomba

No capítulo 2 foram citados alguns tipos de bomba, existindo uma enorme variedade. Como não há um critério único para a definição de um tipo de bomba específico usam-se todos os dados coletados até aqui, para analisar e decidir qual melhor se encaixa ao processo. Serão abrangidos também para esta ação os itens **6.19** e **6.5.11** da NBR 5626:2020.

3.3.2. Bomba TORNADO

Existem alguns parâmetros e dados que foram usados ao efetuar a escolha desse tipo de bomba, dentre eles estão:

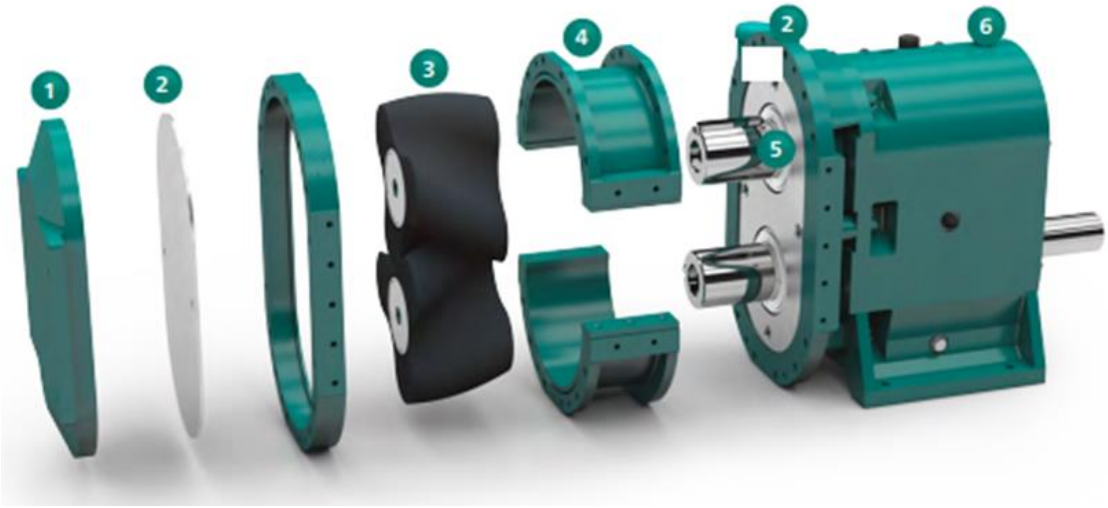
- São ideais para aplicação em fluidos de baixa ou alta viscosidade;
- Propícia para realizar bombeamento de fluidos com partículas sólidas;
- Facilidade de manutenção, sendo possível ser feita pelo usuário no próprio local de trabalho da bomba (ver **figura 21**);
- Baixo custo de instalação e manutenção, devido sua construção compacta;
- Redução de custos de substituição das vedações dos eixos;
- Elimina o risco da passagem do produto bombeado para dentro da caixa de engrenagens, caso ocorra uma improvável falha na vedação do eixo.

Todas as características citadas contribuíram para a seleção dessa bomba, e dentre elas foi escolhido o modelo que melhor se adapta as vazões e carga do sistema, estando de acordo com o item **6.5.11.6** da Norma Brasileira.

Vale ressaltar que devem ser instaladas duas bombas em paralelo, com funcionamento independente entre si, para atender quaisquer demandas de

manutenção que possam ocorrer, de acordo com o tópico **6.5.11.2** da NBR 5626:2020.

Figura 21 - Bomba TORNADO Desmontada para Manutenção



Fonte: Netzsch.com.br

3.3.3. Detalhes construtivos

Aqui serão descritos e demonstrados os principais componentes da bomba selecionada, sendo:

1-Tampa dianteira:

Os rotores, vedação da tampa, placas de desgaste e selos, são de fácil acesso para inspeção, manutenção ou substituição, simplesmente removendo a tampa dianteira, não sendo necessário desmontar a flange de sucção e descarga da tubulação, nem a carcaça da bomba.

2-Placas de desgaste:

Resistentes à abrasão e a produtos químicos, placas de desgaste substituíveis estão instaladas na parte frontal e traseira dos rotores.

3-Rotores:

Rotores retos ou helicoidais são escolhidos para adequar-se aos requerimentos de aplicações individuais. Os rotores estão disponíveis em versões bilobular, trilobular ou tetralobular, numa ampla faixa de materiais.

4-Seguimentos da carcaça:

A construção modular permite simplesmente substituir os segmentos da carcaça em caso de desgaste.

5-Vedação do eixo:

Disponibilizado uma vasta gama de tipos de vedação de eixo e materiais. Estes são selecionados para atender às necessidades individuais de cada aplicação. A disposição do selo inclui fácil acesso para conexão de quench e flushing.

6-Caixa de engrenagens:

O projeto patenteado da caixa de engrenagens inclui a tecnologia NETZSCH GSS, separando a câmara de bombeio da caixa de engrenagens, o que elimina a contaminação cruzada entre o meio bombeado e o lubrificante dos rolamentos e engrenagens. A tecnologia GSS também possibilita a visualização de vazamentos nas vedações dos eixos.

Já que a bomba possui esse tipo de configuração para sua montagem e desmontagem facilita a realização de atividades, tais como, manutenções, movimentações, verificações e testes, atendendo assim ao trecho **6.19** da NBR 5626:2020.

Para melhor visualização de cada componente ver **figura 21.**

3.3.4. Tipo de Bomba x Fluido Bombeado

Como já foi dito em capítulos anteriores o fluido de efluentes contém partículas sólidas em seu meio, o que causa diversos vazamentos nas bombas centrífugas comuns.

Além disso, apesar de o fluido bombeado não ser viscoso (mesmo a bomba TORNADO sendo uma bomba de deslocamento positivo), não impacta no nosso sistema, visto que as bombas desse tipo foram fabricadas para processos industriais, não necessitando de lubrificação dos componentes internos através do fluido bombeado.

3.3.5. Tipo de Bomba x Vazão

Essas bombas tipo TORNADO operam de maneira contínua e intermitente, seus diferentes modelos podem chegar até 1000 m³/h de vazão, o que atende

tranquilamente o nosso estudo abordado (visto que a vazão existente é de 108 m³/h – **figura 18**).

3.3.6. Tipo de Bomba x Carga

As bombas dessa classe conseguem operar líquidos sob pressões de até 6,0bar (60,0mca), sendo mais do que o suficiente para o tipo de processo em questão (conforme gráfico da **figura 31**), de acordo com os cálculos realizados tem-se 44,95mca = 4,49bar de carga na linha).

Deve-se considerar para fins de processo o aproveitamento mais eficiente da carga ou pressão disponível, vide parte **6.5.11.1** da NBR:2020.

3.3.7. Tipo de Bomba x Experiências Anteriores

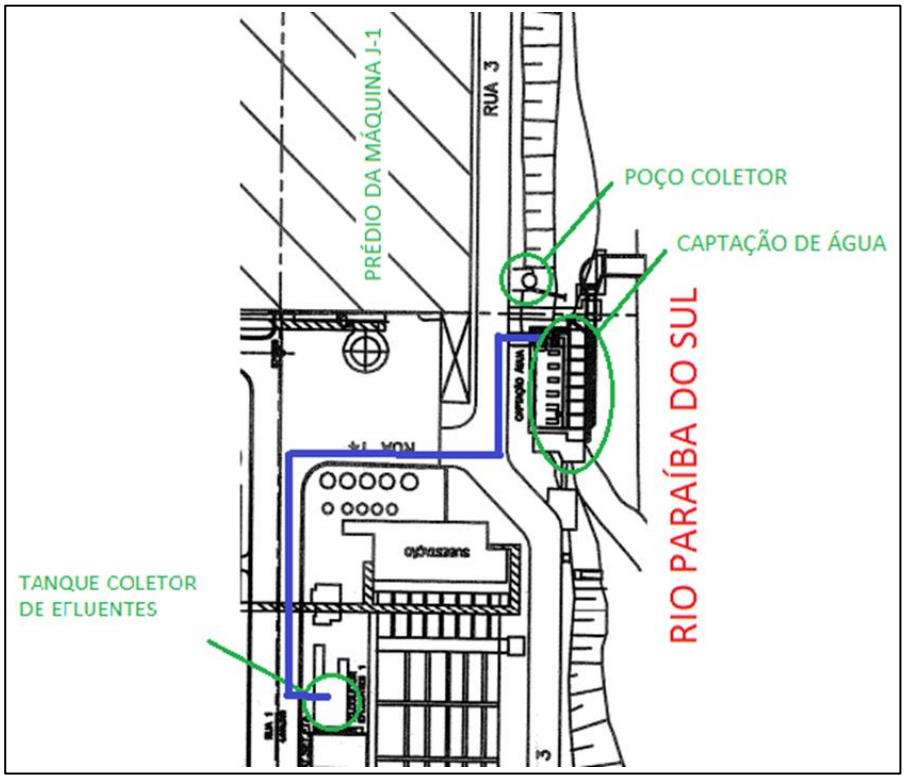
Pode-se comparar essa aplicação com outras instalações já existentes. Por exemplo, já foi utilizado esse mesmo tipo de bomba em partes internas da fábrica (para bombeamento de fluidos similares, como água + produtos químicos), onde se obteve sucesso, principalmente nos custos, frequências e tempo referentes às manutenções efetuadas.

4 SISTEMA ATUAL X SISTEMA PROPOSTO

4.1 SISTEMA ATUAL

O escoamento de efluentes é proveniente dos processos fabris (prédio da máquina de papel J1), chega até as bombas instaladas na área de captação de água após passar por um poço coletor. As duas bombas existentes são do tipo centrífugas radias, que direcionam o fluido bombeando-o até o tanque coletor de efluentes já no ETE. Abaixo há um recorte da planta do local, demonstrando o caminho aproximado que a linha percorre (os trechos em azul são os locais por onde passam os tubos). Mais detalhes podem ser vistos no Apêndice B no final do trabalho.

Figura 22 - Planta baixa do sistema



Fonte: Arquivo técnico da empresa Ahlstrom

4.1.1. Poço Coletor

O poço recebe os efluentes vindos do prédio da fábrica e acumula até certo nível, onde há o escoamento para as bombas. Há também instalado juntamente a ele um agitador (como o efluente é composto também por partículas sólidas o agitador é um acessório que auxilia a dispersá-las).

A área de instalação do poço é um local bem arborizado, facilitando a queda de grandes dejetos (como galhos, pequenos animais, dentre outros) que acabam parando nas bombas, diminuindo sua vida útil, ocasionando vazamentos e gerando uma quantidade elevada de manutenções.

Figura 23 - Poço com agitador



Fonte: Arquivo técnico da empresa Ahlstrom

4.1.2. Área da Captação de Água

Local onde ficam instaladas não somente as bombas responsáveis pelo bombeamento de efluentes, mas também, outras diversas bombas (não abordadas em nosso projeto) que coletam a água do Rio Paraíba do Sul e bombeiam para utilização na indústria.

Figura 24 - Bomba de Captação de Água



Fonte: Arquivo técnico da empresa Ahlstrom

O terreno possui um ponto de drenagem para o rio, que tem a funcionalidade de escoar a água caso haja uma submersão no local, e evitar que os motores das bombas queimem.

Figura 25 - Drenagem para o Rio



Fonte: Arquivo técnico da empresa Ahlstrom

4.1.3. Vazamento de Efluentes

Na área onde fica localizado o ponto de dreno para o Rio Paraíba existem pequenos malejamentos do efluente (fluido de coloração branca demonstrado na figura a seguir). Isso ocorre devido à alta quantidade de partículas sólidas no interior da bomba, danificando seus componentes internos e alterando sua capacidade de vedação.

Os vazamentos no sistema têm se mostrado constantes conforme pode ser observado no **ANEXO A** ao final do trabalho, por se tratar de um sistema antigo os problemas estão constantemente acontecendo, sendo pelo selo mecânico ou pelas juntas, ou até mesmo falhando o equipamento devido a corpos estranhos que adentram as tubulações através das canaletas ou no poço coletor, visto que ele fica em área externa logo abaixo de uma arvore e não é 100% vedado (conforme **figura 23**). Com isso há a possibilidade de parada no sistema de bombeamento, podendo causar uma pausa de produção na linha da fábrica, acarretando perdas significativas de capital.

É de suma importância que seja evitado esse tipo de acontecimento, visto que o vazamento pode chegar até o rio, gerando uma contaminação da água e graves problemas com legislações ambientais (além do prejuízo financeiro gerado a empresa).

Figura 26 – Vazamento na Bomba Centrifuga da linha de Efluentes



Fonte: Arquivo técnico da empresa Ahlstrom

4.1.4. Características das Bombas

Existem locadas na área duas bombas centrífugas radiais, sendo uma para operação contínua e outra como “by-pass” (somente acionada quando uma das bombas está em manutenção). Os equipamentos estão montados em paralelo, porém nunca atuam de maneira simultânea.

Figura 27 - Bombas dos Efluentes Montadas em Paralelo



Fonte: Arquivo técnico da empresa Ahlstrom

Ambas as bombas estão apoiadas em dormentes de concreto, mas não há nenhum tipo de contenção para evitar o vazamento de fluido para o rio, sendo isso uma das providências abordadas pelo projeto.

4.1.5. Características das Tubulações

Os tubos que levam o fluido até o tanque coletor de efluentes tem dimensão de 4 polegadas. Existem também alguns acessórios ao longo da linha, sendo: 1 válvula de retenção (para cada bomba); 1 válvula guilhotina (para cada bomba); 8 curvas de 90º com raio longo.

Além do mais o sistema possui trechos lineares de tubos, com um comprimento total de 183,34m.

Figura 28 - Acessórios da Linha



Fonte: Arquivo técnico da empresa Ahlstrom

4.2 PROBLEMA DO SISTEMA

No sistema ocorrem alguns problemas específicos relacionados a detritos que acabam adentrando no tanque coletor de efluentes acarretando obstrução das bombas. Obstruções essas causadas por pedaços de paletes oriundos do setor de armazenamento de matéria prima próximo ao local, galhos que caem das arvores acima e ao redor do tanque e até mesmos pequenos animais, tais como, roedores e lagartos, comumente encontrados no local, podendo vir a causar um travamento do rotor da bomba centrifuga. Os detritos podem não apenas bloquear a passagem do fluido, mas também causar danos aos demais componentes da bomba como as suas vedações (selo mecânico) ocasionando os vazamentos (conforme mostrado na

imagem 26).

Entende-se também que existem muitas diferenças entre, os dados de projeto e os dados operacionais da bomba centrífuga instalada atualmente no local, levando a um superdimensionamento da bomba devido à vazões muito distantes do ponto de projeto, reduzindo drasticamente a sua confiabilidade e eficiência (MARTINS, 2008).

Abaixo há alguns exemplos dos tipos de detritos:

Figura 29 - Acessórios da Linha



Fonte: Próprio autor

Figura 30 - Acessórios da Linha



Fonte: Próprio autor

4.3 SOLUÇÃO PROPOSTA

As mudanças a seguir serão propostas com a finalidade de melhorar o processo em um todo, fazendo com que haja uma redução de custos das manutenções nas bombas, e um ganho de eficiência, além de sanar os vazamentos provindos das bombas centrífugas existentes e evitar quaisquer riscos de poluição.

4.3.1. Cobertura no Poço Coletor

Com a construção de uma cobertura simples na localidade do poço haverá uma diminuição significativa dos detritos que adentrarão ao poço, e consequentemente a redução de grandes objetos no interior das bombas.

Sendo assim, com essa medida atende-se o segundo critério do ponto

6.5.11.5 da NBR 5626:2020.

4.3.2. Instalação do Triturador

Também é pautado pelo projeto a ideia de instalar um triturador junto a bomba, o mesmo é fornecido pela empresa fabricante da bomba TORNADO (Netzsch), e adaptado para suprir as necessidades de vazão da bomba.

Esse equipamento se enquadra mais como uma melhoria para o processo (visto que pode ocorrer de grandes sujidades adentrarem a bomba, **figura 29**), pois se entende pelos cálculos realizados no projeto que somente a bomba TORNADO já atenderia a demanda.

Existe uma cotação com as especificações do triturador e valores para melhor visualização no **ANEXO C**.

Figura 31 - Acessórios da Linha



Arquivo técnico da empresa Netzsch

4.3.3. Instalação de Barreira de Contenção

A barreira de contenção é uma medida protetiva para evitar a contaminação do meio ambiente com o fluido de efluentes (totalmente agressivo, pois sua composição pode conter elementos químicos advindos dos processos de produção da fábrica).

Com isso é evitado qualquer vazamento ou infiltrações possíveis preservando, assim, tanto o solo como a água do rio, impedindo que escorram para o ponto de drenagem do rio caso haja vazamento.

4.3.4. Substituição das Bombas Centrífugas por Bombas TORNADO

É comum bombas do tipo centrífuga apresentarem vazamentos ao comportarem objetos sólidos no seu interior (uma vez que não foram projetadas para tais condições).

Por isso a modificação principal do projeto é a alteração do tipo de bomba para os efluentes, instalando uma bomba mais adequada ao processo, que também tenha um ganho em eficiência no bombeamento.

As bombas do tipo Tornado requerem menos potência para seu acionamento, uma menor periodicidade de manutenções (além de serem manutenções mais rápidas e fáceis, pois, devido as suas características construtivas não há necessidade de remover a bomba da tubulação para quaisquer manutenções), além de serem ideais para fluidos que contenham partículas sólidas.

Contudo acaba acarretando uma diminuição do Custo Total de Propriedade (TCO), que basicamente define o quanto de capital a empresa gasta para obter e manter esse equipamento em funcionamento.

5 RESULTADO

A tarefa agora é selecionar uma bomba que atendam as demais características do processo já citadas anteriormente, e ao mesmo tempo, tenham uma vantagem em relação à eficiência e custos para aplicação do projeto.

Para isso foram realizados os cálculos que serão desenvolvidos a seguir (com ênfase nos cálculos de carga [H] e vazão [Q] da linha), e partir deles será selecionada a bomba mais adequada conforme o catálogo e curvas características do fabricante.

5.1 CONSTRUÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA

Após todos os cálculos essenciais já efetuados agora será montada a CCI. Isso será feito através da substituição das alturas manométricas (Zd e Zs) pela sigla Hgeo, obtendo assim as expressões:

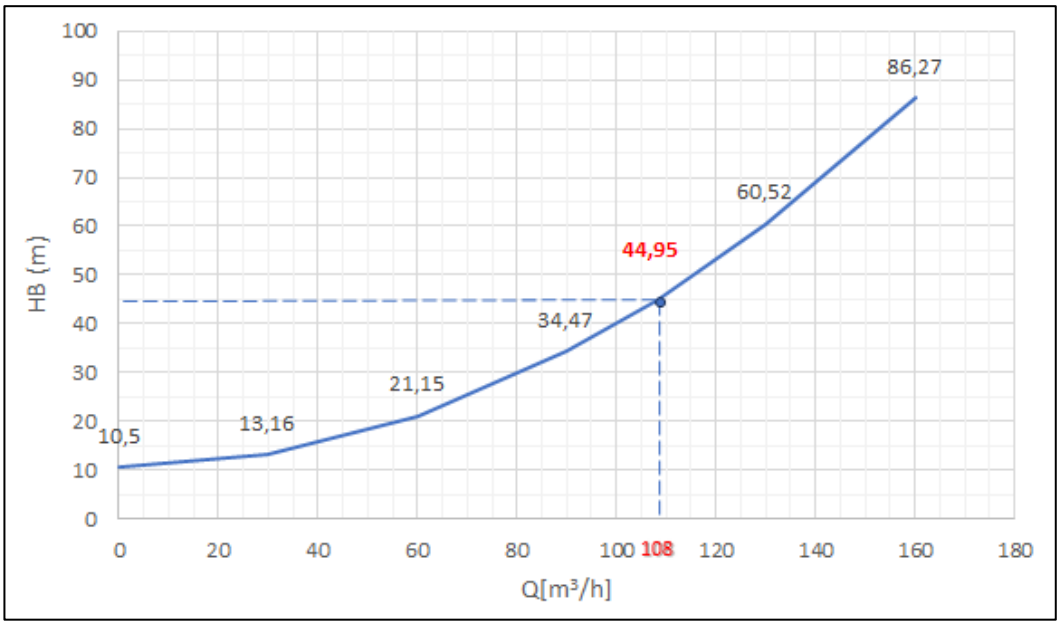
$$\boldsymbol{H = Zd - Zs + hf} \tag{5.1}$$

$$\boldsymbol{H = H_{GEO} + hf} \tag{5.2}$$

É observado acima que para a construção da curva utiliza-se a soma da altura manométrica junto à perda de carga, ficando com os valores:

$$\boldsymbol{H = 10,5\ m + 34,454\ m\ \cong 44,95\ m}$$

Figura 32 – Curva Característica para do Sistema



Fonte: Próprio Autor

Têm-se os seguintes valores para o ponto de funcionamento:

Q = 108,0 m³/h e **H = 44,95 m**

5.2 CÁLCULO DO NPSH DISPONÍVEL

O NPSH será calculado utilizando a equação **(3.18)**, e utilizados os valores referentes à **figura 17** (vale lembrar que a cidade de Jacareí, local da fábrica, está situada em aproximadamente 600 metros de altitude). Têm-se os seguintes valores:

hatm = 9,58 m

Zs = 0 m

hvp = 0,239 m (considerando o fluido a 20°C)

hfs = 2,15 m (para o cálculo foi considerado 5,25 m de tubulação de 6 polegadas, 2 cotovelos e 1 tê ramal)

Substituindo na equação:

$$\boldsymbol{NPSH_{Req} \geq 7,191 + 0,6\,m = 7,791\,m}$$

Para o valor encontrado será selecionada uma bomba que atenda aos requisitos da norma NBR 5626:2020, parte **6.5.11.6**.

5.3 CÁLCULO DA POTÊNCIA NECESSÁRIA DO MOTOR

Teoricamente falando a potência que o motor deve ter é a mesma de consumo da bomba, realizada com a equação (3.5).

$$\boldsymbol{Pot_{Cons} = \frac{\gamma . Q . H}{75 . \eta}}$$

γ = 998 kgf/m³ (observar **figura 20**);

Q = 108 m³/h;

H = 44,95m;

η = 0,75 (considerando uma bomba com rendimento de 75%).

Efetuando os cálculos obtêm-se o valor de:

$$\boldsymbol{Pot_{Cons} = \ 23,92\ CV}$$

Será considerado também um fator de correção para o motor, sendo o valor de 10%, assim o mesmo não trabalhará sempre na sua potência limite.

$$\boldsymbol{Pot \ = \ Pot_{Cons}\ x\ 1,10 = 26,31\ CV}$$

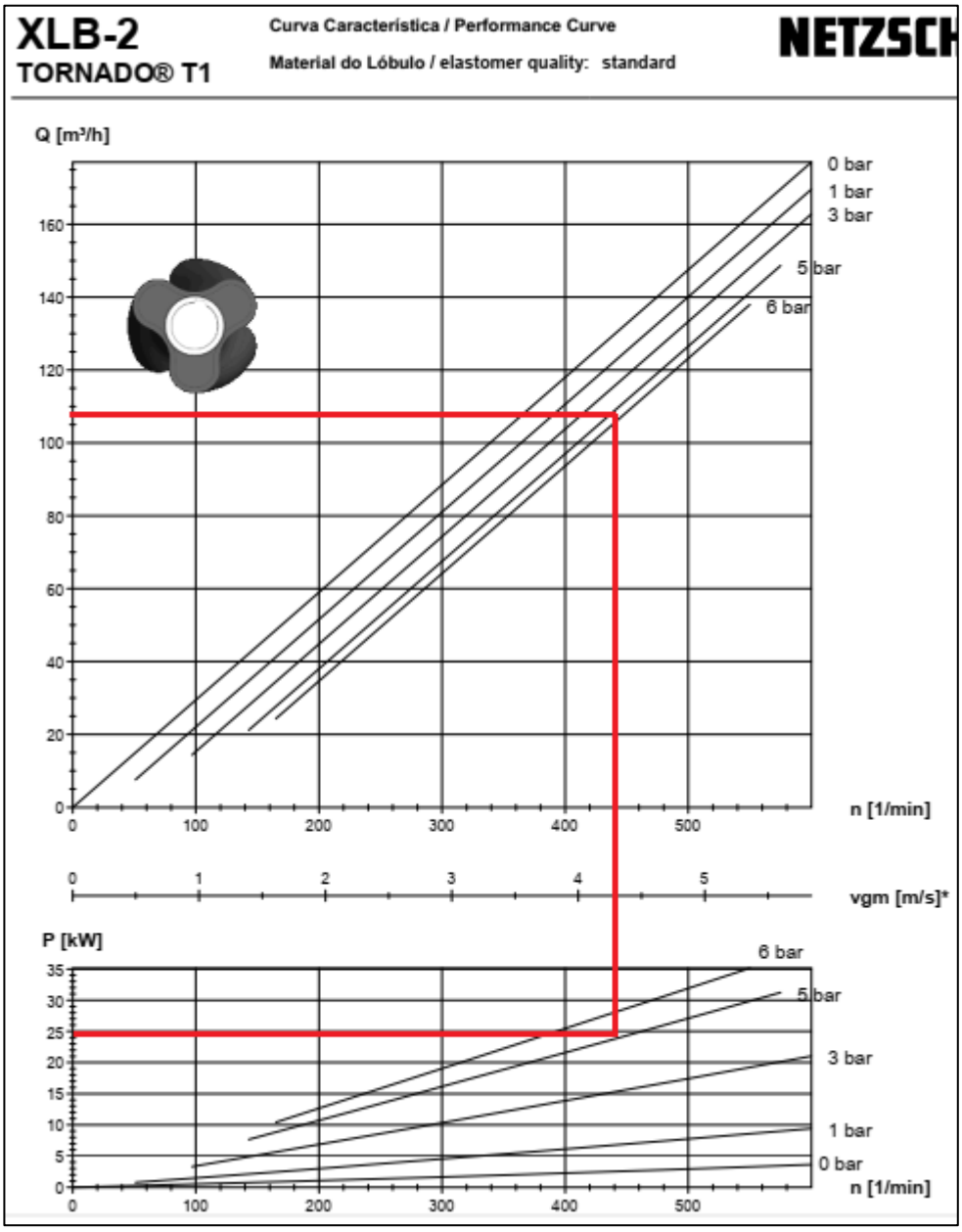
Sabe-se que o motor elétrico deve possuir, aproximadamente, uma potência de 26,31 CV.

5.4 MODELO DA BOMBA

Após definir o tipo de bomba foram verificados alguns modelos para análise (dentre eles: XLB-2, XLB-3 e XLB-4). O escolhido foi **XLB-2**, analisado através das características técnicas, como, potência consumida, eficiência, vazão e carga.

De posse dos cálculos para head (carga) x vazão recorre-se ao gráfico da curva da bomba (este é testado e fornecido pelo fabricante), e como já citado anteriormente e observado na imagem a seguir tem-se os seguintes resultados para o modelo XLB-2 em questão:

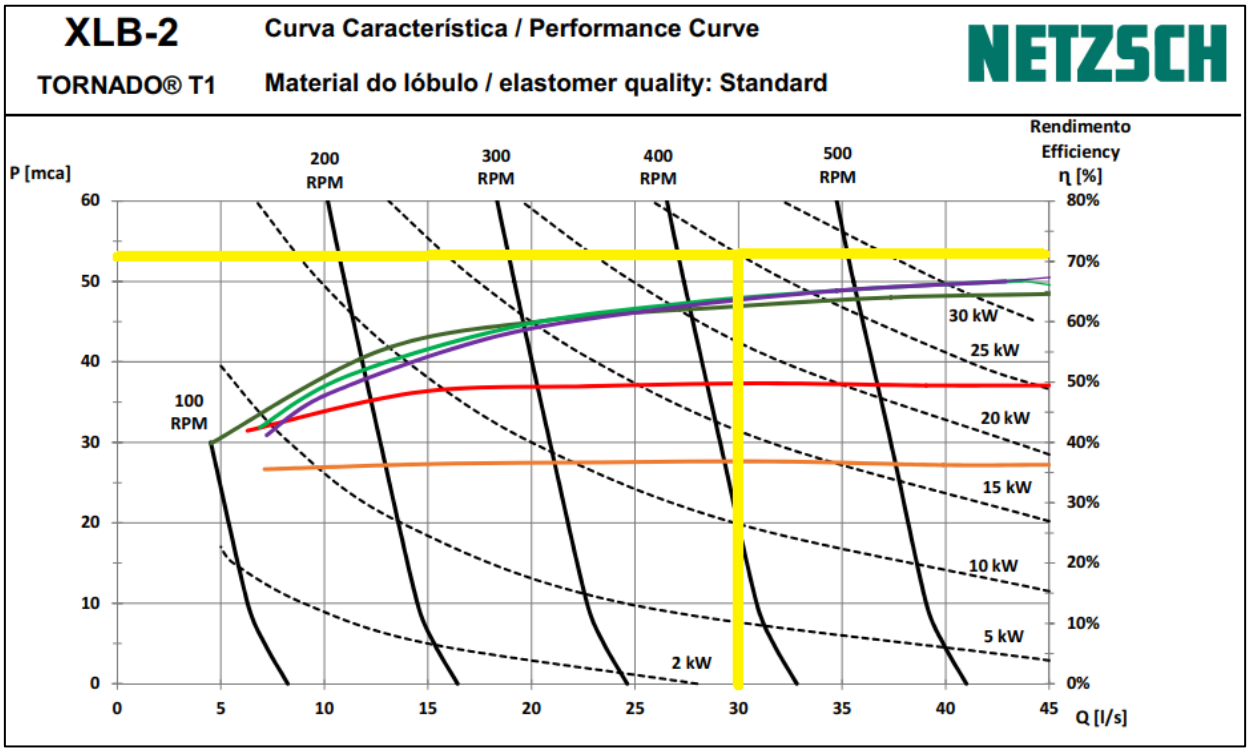
Figura 33 – Curva Característica da Bomba TORNADO



Fonte: Netzsch.com.br

Ao traçar os dados de carga e vazão no gráfico pode-se ver que o motor recomendado pelo fabricante será de **25,0 kw** de potência (34,0 CV), divergindo do cálculo estimado, conforme mencionado no item 5.3. A escolha da potência do motor dessa maneira resulta em economia no consumo energia, minimizando-se mediante a escolha adequada da bomba, conforme estipulado no tópico **6.5.11.12** da NBR 5626:2020.

Figura 34 – Eficiência da Bomba TORNADO



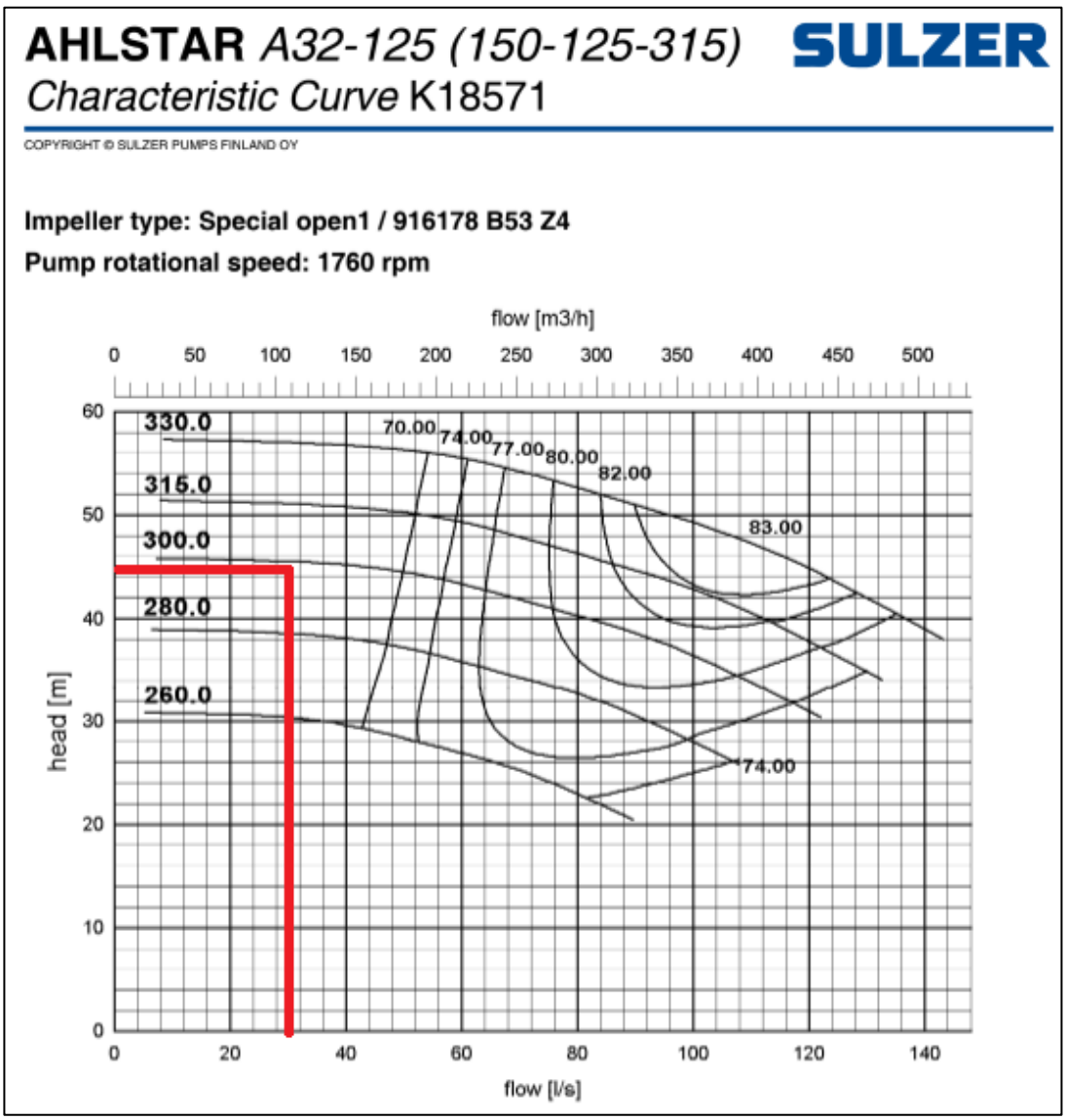
Fonte: Netzsch.com.br

Conforme averiguado acima (linha traçada na cor amarela), para essa vazão (108 m³/h) e um motor de com a potência recomendada pelo fabricante (25 kw) tem-se uma eficiência de aproximadamente **η=72%** e recalcando o efluente a uma pressão de **53 mca** (5,3 bar).

5.4.1. Comparativo com a bomba existente

Houve acesso à curva da bomba existente (fornecida pela empresa Ahlstrom), onde foi localizado um ponto de funcionamento como traçado a seguir, e observado na figura abaixo.

Figura 35 – Eficiência da Bomba Existente



Fonte: Arquivo técnico da empresa Ahlstrom

É possível notar que a bomba instalada no local hoje possui uma eficiência de aproximadamente **η=60%**, isso para a mesma carga e vazão da bomba TORNADO (que é o foco do projeto). Sendo assim conclui-se que, com essa alteração, além de um ganho na parte financeira e ambiental (redução de manutenções e extinção do vazamento de efluentes para o rio) também há um ganho de eficiência no bombeamento.

6 CUSTOS E DEMAIS VALORES

6.1 INSTALAÇÃO

Considerando apenas os itens mínimos necessários para montagem do projeto, pode-se considerar a tabela abaixo com apenas alguns ajustes como os processos em demolição das bases civis, reconstrução das bases civis, ajustes na barreira de contenção e inspeção e testes:

Tabela 3 – Custos de Implantação do Novo Projeto

Projeto Base Padrão	**R$**	**85.335,40**
2 Bombas Tornado	R$	82.364,00
Juntas e acessórios	R$	1.117,90
Materiais de Civil (Concreto, ferragens, etc...)	R$	1.853,50
Adicionais de Melhoria	**R$**	**60.549,00**
Triturador	R$	54.049,00
Cobertura do Poço de Efluentes	R$	6.500,00
Total	**R$**	**145.884,40**

Fonte: Próprio Autor

6.2 VALORES TOTAIS DO PROJETO

Tabela 4 – Comparativo de Custos

Projeto Base Padrão Implantado	**R$**	**85.335,40**
Projeto Base + Complementos	**R$**	**145.884,40**
Bombas Centrifugas Novas	**R$**	**170.000,00**
Manutenção Bombas Centrifugas (01/2018 - 11/2023)	**R$**	**127.799,61**
Ocorrências nas Bombas (01/2018 - 11/2023)	**156 vezes**	

Fonte: Próprio Autor

7 DISCUSSÃO

A aplicação do projeto é benéfica para a empresa, sendo viável para melhorar o sistema de bombeamento. Com as novas modificações o processo irá ganhar em eficiência, consequentemente, reduzindo o tempo para bombear a mesma quantidade de efluentes, o que faz com que a vida útil da bomba seja prolongada, uma vez que necessitará ficar ligada por uma quantidade menor de tempo.

O que pode atrapalhar a implementação do projeto seriam os custos, visto que realizar a compra de equipamentos desse tipo não é nada barato (duas bombas tornado, por exemplo, custam R$ 82.364,00). Mesmo com um valor elevado de capital a ser investido o propósito é valido, pois as bombas centrífugas necessitam de manutenções recorrentemente (um exemplo claro disso é que só de manutenções já foram gastos 127 mil reais, conforme a **tabela 4** e o **anexo A**), havendo a recuperação financeira em longo prazo. Se for observado também em curto prazo de tempo, efetuar a troca pode ser teoricamente mais barato, pois outras duas bombas similares as já existentes (tentando de alguma maneira solucionar o problema) teriam um custo em torno de R$ 170.000,00 conforme já foi efetuada compra anteriormente pela empresa Ahlstrom.

É necessário levar em questão o tipo de bomba escolhida para o projeto, são bombas próprias para trabalhar com este tipo de fluido, sendo assim iriam solucionar um grande problema que existe atualmente, sendo ele o vazamento de efluentes, que acabam escorrendo para o Rio Paraíba do Sul. Isso já evitaria o risco de problemas ambientais, extinguindo as possibilidades de multas ou até mesmo fechamento da fábrica por órgãos ambientais (no caso do estado de São Paulo quem monitora esse tipo de acontecimento é a CETESB).

Com os dados coletados IN LOCO foi possível ter acesso a algumas informações importantíssimas, como, dimensões das tubulações, vazão, acessórios existentes na linha e altura manométrica. Feito o levantamento foi possível realizar os cálculos e traçar a CCI (**figura 32**), já com a curva traçada encontra-se o ponto de funcionamento do sistema (onde ocorre o cruzamento da CCI com a CCB), com isso verificando os modelos de bombas disponíveis no catálogo do fabricante, escolhendo a que melhor se adapta ao processo em termos de eficiência, carga e vazão.

8 CONCLUSÃO

Deduz-se que, a meta do nosso estudo foi atingida com êxito quanto aos problemas e discussões levantadas, as quais motivaram a elaboração do trabalho. Isso porque foram encontradas soluções plausíveis, no entendimento do grupo, para solucionar problemas já existentes, e até mesmo incluir melhorias no processo de bombeamento do efluente industrial.

Ressalta-se ainda a suma importância do conhecimento dos integrantes sobre o processo, graças às visitas técnicas realizadas, que foram proporcionadas e facilitadas pela empresa Ahlstrom. Também houve uma melhor compreensão e viés de atitudes a serem tomadas, devido ao auxílio de nosso Co-orientador (Antônio Capistrano Alckmin), além do breve conhecimento em sistemas fluidos mecânicos adquiridos pelos discentes durante o curso de Engenharia Mecânica.

Com a teórica aplicação do nosso projeto verificou-se que, existem soluções viáveis para os problemas tratados. Uma delas é a substituição da bomba centrifuga já existente, por uma bomba TORNADO – **XLB-2**, melhorando assim a mantenabilidade do processo evitando manutenções devido aos vazamentos. Além disso, seriam extintos os escorrimentos de efluente para o Rio Paraíba do Sul, evitando assim conflitos com legislações ambientais.

Há também um ganho de eficiência muito significativo, visto que comparando os valores encontrados **(figuras 34 e 35**) tem-se um aumento de **20%**, ficando nítida uma melhor eficácia caso a bomba existente seja substituída por uma TORNADO.

Além da melhoria no bombeamento também existe um ganho financeiro, tanto de imediato quanto em longo prazo. Com os dados coletados na Tabela 4 observa-se que haverá uma economia total em torno de **R$ 24.115,60** somente com a substituição das bombas e complementos de melhoria (item 4.3), caso seja levado em conta os gastos com manutenções do ano de 2018 até os dias atuais esse valor sobe para **R$ 151.915,21.**

Contudo, será gerada para a empresa uma grande economia financeira, visto que a bomba do projeto, além de mais barata do que uma bomba centrífuga comum com características similares, também é mais eficiente no seu bombeamento, e possui características construtivas que irão facilitar futuras manutenções ou intervenções.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 5626: Sistemas prediais de água fria e água quente. Rio de Janeiro, 2020.

ARCHELA, Edilson *et al*. Considerações sobre a geração de efluentes líquidos em centros urbanos. Geografia. p. 518, Volume 12, Jan/Jul 2003. Disponível em: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/geografia/article/view/6711> Acesso em: 29 dez. 2023.

CONAMA. Resolução Conama Nº 001. Artigo 1º. 23 de janeiro de 1986.

CREMASCO, Marco Aurélio. Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos. São Paulo: Blucher, 2012.

FALCO, Reinaldo., MATTOS, Edson Ezequiel. Bomba. Bombas Industriais. 2ª edição. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

FOX, Robert W., MCDONALD, Alan T., PRITCHARD, Philip J., Introdução à Mecânica dos Fluidos, 6ª Ed. LTC 2006.

JÚNIOR, João Batista Torentino. Hidráulica Agrícola. Santa Catarina: CCR – Centro de Ciências Rurais, 2023.

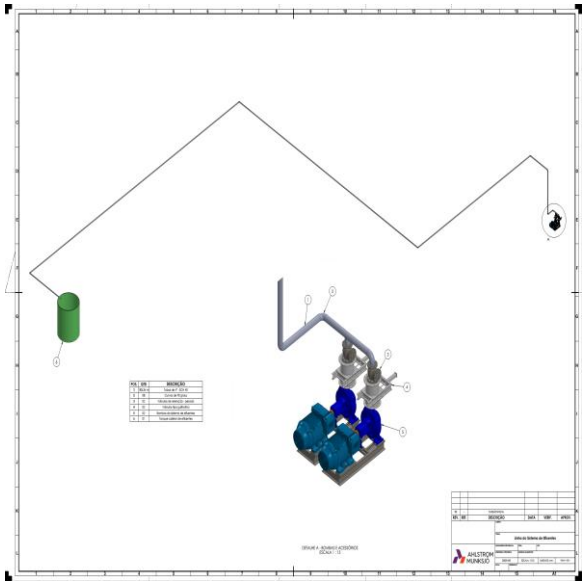
MARTINS, Marcos. Estudo de confiabilidade em bombas centrífugas. Campinas – São Paulo: Universidade São Francisco, 2008.

SANTOS, Sérgio Lopes. Bombas & Instalações Hidráulicas. São Paulo: LCTE Editora, 2007.

SILVA, Marcos Antônio. Manual de Treinamento KSB: Seleção e aplicação de bombas centrífugas. 5ª edição, 2003.

WHITE, Frank M. Fluid Mechanics. 7ª edição. Nova York: McGraw-Hill, 2011.

APÊNDICE A – Desenho do Sistema de Tubulações.



Fonte: Autoria própria

APÊNDICE B – Fluxograma Efluente e Pluviais.



Fluxograma
Efluente e Pluviais.p

ANEXO A – Planilha com histórico de ocorrências

Historico SAP
Efluentes TCC.xlsx

ANEXO B – Resolução N° 357 CETESB

RESOLUÇÃO Nº 357, DE 17 DE MARÇO DE 2005

Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

O **CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA**, no uso das competências que lhe são conferidas pelos arts. 6o, inciso II e 8o, inciso VII, da Lei no 6.938, de 31 de agosto de 1981, regulamentada pelo Decreto no 99.274, de 6 de junho de 1990 e suas alterações, tendo em vista o disposto em seu Regimento Interno, e

Considerando a vigência da Resolução CONAMA no 274, de 29 de novembro de 2000, que dispõe sobre a balneabilidade;

Considerando o art. 9o, inciso I, da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institulu a Política Nacional dos Recursos Hídricos, e demais normas aplicáveis à matéria;

Considerando que a água integra as preocupações do desenvolvimento sustentável, baseado nos princípios da função ecológica da propriedade, da prevenção, da precaução, do poluidor-pagador, do usuário-pagador e da integração, bem como no reconhecimento de valor intrínseco à natureza;

Considerando que a Constituição Federal e a Lei no 6.938, de 31 de agosto de 1981, visam controlar o lançamento no meio ambiente de poluentes, proibindo o lançamento em níveis nocivos ou perigosos para os seres humanos e outras formas de vida;

Considerando que o enquadramento expressa metas finais a serem alcançadas, podendo ser fixadas metas progressivas intermediárias, obrigatórias, visando a sua efetivação;

Considerando os termos da Convenção de Estocolmo, que trata dos Poluentes Orgânicos Persistentes-POPs, ratificada pelo Decreto Legislativo no 204, de 7 de maio de 2004;

Considerando ser a classificação das águas doces, salobras e salinas essencial à defesa de seus níveis de qualidade, avaliados por condições e padrões específicos, de modo a assegurar seus usos preponderantes;

Considerando que o enquadramento dos corpos de água deve estar baseado não necessariamente no seu estado atual, mas nos níveis de qualidade que deveriam possuir para atender às necessidades da comunidade;

Considerando que a saúde e o bem-estar humano, bem como o equilíbrio ecológico aquático, não devem ser afetados pela deterioração da qualidade das águas;

Considerando a necessidade de se criar instrumentos para avaliar a evolução da qualidade das águas, em relação às classes estabelecidas no enquadramento, de forma a facilitar a fixação e controle de metas visando atingir gradativamente os objetivos propostos;

Considerando a necessidade de se reformular a classificação existente, para melhor distribuir os usos das águas, melhor especificar as condições e padrões de qualidade requeridos, sem prejuízo de posterior aperfeiçoamento; e

Considerando que o controle da poluição está diretamente relacionado com a proteção da saúde, garantia do meio ambiente ecologicamente equilibrado e a melhoria da qualidade de vida, levando em conta os usos prioritários e classes de qualidade ambiental exigidos para um determinado corpo de água; resolve:

Art. 1o Esta Resolução dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento dos corpos de água superficiais, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes.

CAPÍTULO I

ANEXOS C – Dados Técnicos e Orçamento do Triturador

NETZSCH do Brasil - Certificada ISO 9001:2008/BVQ

POSIÇÃO 02 – TRITURADOR

TIPO INLINE
MODELO N.Mac 150I



Modelo N.Mac 150I
Imagem Ilustrativa

CONSTRUÇÃO

Carcaça	: Ferro Fundido / Alumínio
Eixo	: 4140 hexagonal endurecido
Facas	: 4140 endurecido
Arranjo das Facas	: Cartucho
Tipo de Facas	: 7 dentes
Quantidade de Cartuchos	: 2 Cartuchos por eixo
Vedação dos Eixos	: Selo Mecânico TC x SIC
Instalação	: Inline
Bocais	: Flange DN 6" – ANSI B16.5; 150 PSI; FF
Pintura	: Carcaça Verde B60G Motor/Redutor/Tampa Cinza RAL 7031

CONDIÇÕES DE TRABALHO

Produto	:Efluente Industrial
Temperatura	:Ambiente
Vazão nominal	:108,0 m3/h
Vazão de Projeto	:máx. 150,0 m³/h

COMPOSIÇÃO DE FORNECIMENTO E PREÇOS

01	Triturador NETZSCH DE EIXOS PARALELOS N.Mac 150I
01	Redutor Cicloidal # i=1:29
01	Motor WEG W22 # 3,0cv #; 220/380/440V; 60Hz Trifásico, TFVE, 4 polos, IP55, I.C. "F" Alto Rendimento
01	Painel Controle
01	Manual de Instruções

REÇO UNITÁRIO DO CONJUNTO **R$** **54.049,00**