

**FAACZ – FACULDADES INTEGRADAS DE ARACRUZ
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

JAUBER SIMOES GASPARINI
JONATHAN CARLO RUI GIACOMIN
MOISÉS DE JESUS NUNES
RUAM FERREIRA BOSI

**SUBSTITUIÇÃO DE BOMBAS DE DESLOCAMENTO POSITIVO POR BOMBAS
CENTRÍFUGAS PARA O PROCESSO DE REGENERAÇÃO EM VASOS DE
TROCA IÔNICA – ESTUDO DE CASO.**

ARACRUZ, 2017.

JAUBER SIMOES GASPARINI
JONATHAN CARLO RUI GIACOMIN
MOISÉS DE JESUS NUNES
RUAM FERREIRA BOSI

**SUBSTITUIÇÃO DE BOMBAS DE DESLOCAMENTO POSITIVO POR BOMBAS
CENTRÍFUGAS PARA O PROCESSO DE REGENERAÇÃO EM VASOS DE
TROCA IÔNICA – ESTUDO DE CASO.**

Trabalho de conclusão do Curso de Engenharia Mecânica da Faculdades Integradas de Aracruz, sob a orientação do Prof. Dr. Harerton Oliveira Dourado, como requisito parcial para conclusão do curso de graduação.

Orientador: Prof. Dr. Harerton Oliveira Dourado.

ARACRUZ, 2017.

JAUBER SIMOES GASPARINI
JONATHAN CARLO RUI GIACOMIN
MOISÉS DE JESUS NUNES
RUAM FERREIRA BOSI

**SUBSTITUIÇÃO DE BOMBAS DE DESLOCAMENTO POSITIVO POR BOMBAS
CENTRÍFUGAS PARA O PROCESSO DE REGENERAÇÃO EM VASOS DE
TROCA IÔNICA – ESTUDO DE CASO.**

Trabalho de conclusão do Curso de Engenharia Mecânica da Faculdades Integradas de Aracruz, sob a orientação do Prof. Dr. Harerton Oliveira Dourado, como requisito parcial para conclusão do curso de graduação.

Orientador: Prof. Dr. Harerton Oliveira Dourado.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Harerton Oliveira Dourado
Faculdades Integradas de Aracruz

Prof. Esp. Anderson Fanchiotti
Faculdades Integradas de Aracruz

Prof. Me. João Alberto Altoé
Instituto Federal do Espírito Santo

“O pessimista vê dificuldade em cada oportunidade: O otimista,
a oportunidade em cada dificuldade.”

(Autor desconhecido)

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, por nos iluminar e permitir que chegássemos até aqui.

Aos nossos pais e familiares, que nos possibilitaram estar neste curso de graduação, pela paciência e motivação de sempre.

Ao nosso orientador Prof. Dr. Harerton Oliveira Dourado pelo incentivo, pelo auxílio às atividades, disposição e atenção.

RESUMO

As resinas são utilizadas em grande escala no processo de desmineralização de água para caldeiras e possuem uma capacidade de troca iônica limitada. Ao ocorrer a saturação das mesmas pela impregnação dos íons dissolvidos na água bruta os condutímetros e silicômetros instalados na saída de água das plantas indicarão um valor acima do máximo permitido nos parâmetros operacionais, sendo assim necessário efetuar a regeneração dos vasos de resina.

O estudo de caso apresentado analisará todo o sistema de bombeamento de hidróxido de sódio na regeneração de resinas de troca iônica da Fibria Celulose S/A, onde atualmente bombas de deslocamento positivo são responsáveis pela aplicação do produto químico nas resinas, fazendo com que as mesmas sejam regeneradas e prontas para uma nova campanha de tratamento de água.

Devido baixa disponibilidade e constantes paradas no sistema de regeneração devido falhas e manutenções corretivas atreladas a um alto custo de manutenção surge a necessidade de estudar a viabilidade de substituição dessas bombas de deslocamento positivo por um outro tipo de bombeamento.

Assim estudaremos nesse trabalho o bombeamento do hidróxido de sódio através de bombas centrífugas com inversor de frequência capaz de variar a vazão de bombeamento de acordo com a necessidade atual das plantas de tratamento de água para caldeiras da Fibria Celulose S/A.

Provaremos através de cálculos que a implantação do novo sistema de bombeamento resultará em uma maior eficiência de bombeamento, um menor gasto de energia elétrica, uma maior disponibilidade operacional das bombas, maior confiabilidade, menor custo com manutenção em geral e um retorno financeiro interessante de forma razoavelmente rápida.

Palavras-chave: Redimensionamento. Disponibilidade. Bombas.

LISTA DE SIGLAS

Pot_{Bba1} - Potência bombas atuais;

Pot_{Bba2} - Potência bombas novas;

n – Rendimento;

P_s – Pressão na sucção;

P_{atm} – Pressão atmosférica;

P_v – Pressão de vapor do líquido à temperatura de bombeamento;

Y – Peso específico do fluido;

g – Aceleração da gravidade;

V_{suc} – Velocidade do fluxo na sucção;

NPSH – Net positive suction head;

h_{fl} - Perda de carga total para a vazão de trabalho;

L_{reto} – Comprimento trechos retos;

L_{equiv} – Comprimento dos trechos equivalentes;

F – Fator de atrito;

HF - Perda de carga do sistema de recalque;

Z_d – Altura geométrica de descarga;

Z_s – Altura geométrica de sucção;

h_s - Altura de sucção;

h_d - Altura de recalque;

D_c - diâmetro do tanque;

Hmáx - Altura máxima de volume de soda no tanque;

Hmín - Altura mínima de volume de soda no tanque;

Hv - Altura variável do fluido dentro do tanque de estocagem;

Q – Vazão;

NaOH – Hidróxido de sódio ou soda caustica;

Mca – metros coluna d'água;

Kw – Quilowatt;

Mw – Megawatt;

SDCD - Sistema digital de controle distribuído;

Dintrec – Diâmetro interno de recalque.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Resinas catiônicas e aniônicas;

Figura 2 - Planta de Desmineralização – Fibria Celulose S/A;

Figura 3 - Operação trocador catiônico;

Figura 4 - Operação trocador aniônico;

Figura 5 - Operação leitos mistos;

Figura 6 - Classificação das bombas;

Figura 7 - Rotor de bomba centrífuga;

Figura 8 - Tipos de rotores;

Figura 9 - Componentes bombas centrífugas;

Figura 10 - Corte típico em bomba centrífuga;

Figura 11a – Instável;

Figura 11b - Ascendente\Descendente;

Figura 11c – Flat;

Figura 11d – Rising;

Figura 11e – Steep;

Figura 12 - Curva bomba radial;

Figura 13 - Curva de rendimento vs vazão.

Figura 14 - Curva NPSHr x Q;

Figura 15 – Croqui da área que será estudada;

Figura 16 – Imagem da área que será estudada;

Figura 17 – Croqui da área que será modificada;

Figura 18 – Alturas geométricas;

Figura 19 – Diagrama de Moody;

Figura 20 – Ábaco de cobertura.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tempo de indisponibilidade das bombas atuais.....	16
Tabela 2: Custo de manutenção com bombas de dosagem de NaOH da Empresa X.	17
Tabela 3: Propriedades físico-químicas do hidróxido de sódio.	44
Tabela 4: Valores de rugosidade na parede do tubo para diferentes materiais.	45
Tabela 5: Comprimento equivalente dos acessórios.....	48
Tabela 6: Diâmetros para tubos.	53
Tabela 7: Dados principais do ponto 1.....	56
Tabela 8: Perda de Carga Total do ponto 1.	57
Tabela 9: Dados principais do ponto 2.....	57
Tabela 10: Perda de Carga Total do ponto 2.	57
Tabela 11: Dados calculados (método inversor de frequência).....	63
Tabela 12: Investimento e ganho do projeto.	65
Tabela 13: Cálculo do payback.	66

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Custo de manutenção corretiva com bombas de dosagem de NaOH da Fibria – Unidade Aracruz.....	16
Gráfico 2: Curva característica do sistema de recalque.....	58
Gráfico 3: Dados técnicos.....	61
Gráfico 4: Dados técnicos para escolha do impelidor.....	61
Gráfico 5: Payback.....	66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	18
2.1	GERAL.....	18
2.2	ESPECÍFICOS.....	18
3	3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	TROCA IÔNICA	19
3.2	BOMBAS HIDRÁULICAS.....	24
3.2.1	Volumétrica ou deslocamento positivo	25
3.2.2	Dinâmica ou turbobomba.....	25
3.3	BOMBAS CENTRIFUGAS.....	28
3.3.1	Princípio de funcionamento	28
3.3.2	Desempenho da bomba centrífuga.....	29
3.3.2.1	Vazão do sistema	29
3.3.2.2	Capacidade da bomba.....	29
3.3.3	Perdas hidráulicas	32
3.3.4	Perdas de carga	32
3.3.5	Escoamento laminar	33
3.3.6	Escoamento turbulento.....	33
3.3.7	Número de Reynolds	33
3.3.8	Fator de atrito	34
3.3.9	Cavitação.....	34
3.3.10	NPSH (net positive suction head)	34
3.3.11	Altura manométrica do sistema	35

3.3.12	Altura manométrica de sucção (hs)	36
3.3.13	Altura manométrica de descarga (hd).....	36
3.3.14	Teorema de Bernoulli	36
3.3.15	Fatores que afetam o ponto de trabalho	36
4	METODOLOGIA.....	38
4.1	SISTEMA ATUAL DE BOMBEAMENTO	38
4.2	PROPOSTA DO SISTEMA DE BOMBAS CENTRÍFUGAS	40
4.3	DIMENSIONAMENTO DE BOMBA CENTRÍFUGA PARA APLICAÇÃO DE NAOH.....	41
4.3.1.1	4.3.1 Cálculo da vazão da bomba.....	41
4.3.2	Curva característica do sistema de recalque	41
4.3.3	Equação de Bernoulli e alturas manométricas de sucção e descarga...42	
4.3.4	Perda de carga do sistema de recalque (hf)	43
4.3.5	Propriedades da soda e da tubulação	44
4.3.6	Número de Reynolds (Re).....	45
4.3.7	Fator de atrito (f)	46
4.3.8	Perda de carga distribuída.....	47
4.3.9	Perda de carga distribuída no escoamento laminar.....	47
4.3.10	Perda de carga distribuída no escoamento turbulento	47
4.3.11	Comprimento equivalente dos acessórios, trechos retos e perda de carga total para vazão de trabalho	47
4.3.12	Perda de carga para outros pontos de vazão	49
4.3.13	Construção da curva característica	49
4.3.14	Cálculo do NPSH disponível.....	49
4.3.15	Cálculo da potência estimada do motor elétrico	49
4.3.16	Seleção do modelo de bomba	50

4.3.17	Cálculo da potência anual consumida	50
4.3.18	Ganho energético anual	51
4.3.19	Economia energética financeira.....	51
4.3.20	Payback.....	51
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
5.1	ALTURAS GEOMÉTRICAS DO SISTEMA.....	54
5.2	EQUAÇÃO DE BERNOULLI PARA ENCONTRAR A PERDA DE CARGA DO SISTEMA	54
5.3	PERDA DE CARGA DO RECALQUE	54
5.4	ALTURA MANOMÉTRICA DA VAZÃO DO SISTEMA.....	56
5.5	PERDAS DE CARGAS PARA OUTROS PONTOS DE VAZÃO	56
5.6	CONSTRUÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA DO SISTEMA	57
5.7	CÁLCULO DO NPSH DISPONÍVEL	58
5.8	POTÊNCIA ESTIMADA DO MOTOR ELÉTRICO	59
5.9	SELEÇÃO DO MODELO DE BOMBA E RESULTADOS.....	59
5.10	ALTERAÇÃO DA ROTAÇÃO DA BOMBA	62
5.10.1	Cálculo da potência mecânica através do inversor de frequência	62
5.11	CÁLCULO DA POTÊNCIA ANUAL CONSUMIDA E GANHO ENERGÉTICO	64
5.12	ANÁLISE DA ECONOMIA E CUSTO NO ANO	64
5.13	PAYBACK	65
6	CONCLUSÃO.....	67
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	68
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	69
	ANEXO I	71

1 INTRODUÇÃO

Uma das principais realidades vivida pela indústria é a otimização do processo, conjugado com diminuição do custo, ou seja, redução de custo de processo e manutenção além do aumento da produção.

Este trabalho apresenta um estudo para a substituição das bombas de deslocamento positivo por bombas centrifugas para bombeamento de hidróxido de sódio, a soda cáustica, no processo de regeneração de resinas aniônicas no setor de tratamento de água para Caldeiras da Fibria Celulose S/A – Unidade Aracruz.

A regeneração das resinas se faz necessário devido à saturação da mesma com o decorrer do tempo de operação. Como o processo ocorre por troca de íons, chega a determinado ponto onde a retenção dos sais, sílica e outras impurezas ficam prejudicadas e a condutividade final da água passa a não atender os padrões de utilização.

O controle da qualidade final da água se faz necessário para garantir a estabilidade da operação das Caldeiras, evitando incrustações dos tubos por sólidos e impurezas, garantindo assim a operação com segurança e dentro dos parâmetros mínimos determinados.

Devido ao alto índice de intervenção de manutenção no sistema de bombeamento de NaOH e HCl para regeneração de resinas de troca iônica da Fibria, esse trabalho visa buscar alternativas que proporcionem maior confiabilidade ao sistema, gerando assim, menor número de falhas operacionais e custos com manutenção.

A aplicação de produtos químicos – NaOH e HCl – para regeneração de resinas de troca iônica é de extrema importância para o bom funcionamento de uma planta de desmineralização de águas a serem utilizadas em caldeiras de alta pressão para geração de vapor. Nesse contexto, as bombas utilizadas para dosagem de soluções regenerantes devem possuir alta confiabilidade operacional, uma vez que seu baixo rendimento pode causar problemas diretos (falha de regeneração, aumento de custo com produtos químicos) e indiretos (redução de fabrica devido nível baixo de água desmineralizada) em unidades industriais.

O sistema de bombeamento de químicos utilizado na planta estudada se faz através de bombas de deslocamento positivo com regulagem manual para densidade e água

de diluição. No entanto, essa forma de aplicação vem gerando inúmeros problemas de manutenção e anomalias operacionais.

A tabela 1 evidencia dados retirados no livro de ocorrência utilizado pela empresa de 2014 à 2017 para mostrar o tempo de indisponibilidade do equipamento e qual esse custo de manutenção.

Tabela 1: Tempo de indisponibilidade das bombas atuais.

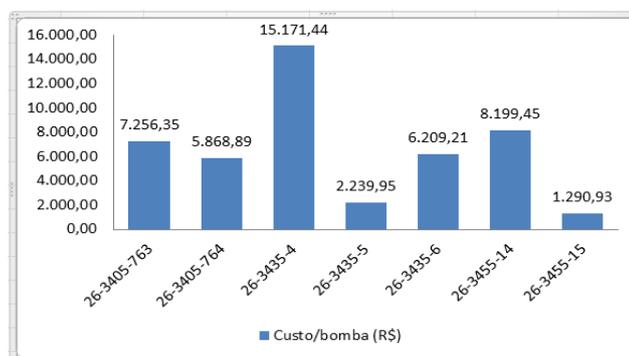
Tempo de indisponibilidade das bombas atuais		
TAG Bomba NaOH	Indisponibilidade (h)	Falhas que comprometem a operação
26-3405-763	1900	
26-3405-764	1472	- Regulagem no máximo, não atinge densidade suficiente;
26-3435-4	2067	
26-3435-5	954	- Regulador de densidade danificado;
26-3435-6	1244	- Vazamento de óleo que possa contaminar a área.
26-3455-14	1635	
26-3455-15	801	

Fonte: Livro de ocorrências Fibria Celulose S/A.

Vale ressaltar que as bombas 26-3405-764, 26-3435-5 e 26-3455-15 são reservas, são utilizadas quando as principais (26-3405-763; 26-3435-4; 26-3435-6; 26-3455-14) estão impossibilitadas pela sua condição, de entrar em operação.

No mesmo período de tempo, também foram levantados os custos de manutenção com todas essas bombas.

Gráfico 1: Custo de manutenção corretiva com bombas de dosagem de NaOH da Fibria – Unidade Aracruz.



Fonte: Autor.

Com isso, realizamos pesquisa no mercado em empresas do mesmo ramo de atuação e identificado na Empresa X, a utilização de modelo de aplicação de químicos utilizando bombas centrífugas, com inversor de frequência e válvulas automáticas para controle de fluxo e densidade na aplicação. Em visita realizada a empresa, vimos que o sistema é altamente confiável, gerando custos mínimos de manutenção para o período de 2014 à 2017, como mostra a tabela 2.

Tabela 2: Custo de manutenção com bombas de dosagem de NaOH da Empresa X.

Falha	Data	Custo (R\$)
Revisão geral Kit da bomba	01/02/2013	196,15
Substituir selo bba 3402-11	12/01/2014	1037,6
	Total	1233,75

Fonte: Livro de ocorrências Empresa X.

Uma observação importante é que não houve registro de manutenção corretiva nos livros de ocorrência da Empresa X, toda manutenção realizada foi de maneira programada.

Mediante aos fatos apresentados, estudaremos a oportunidade de modificação do sistema utilizado atualmente pela Fibria, por um modelo que possui bombas centrífugas.

O projeto foi desenvolvido com 2 bombas, uma titular e outra reserva, para que em caso de falha a regeneração não seja prejudicada, sendo necessário apenas alinhar a outra bomba para o sistema, dando tempo hábil para realizar o reparo ou disponibilizando a mesma em casos de manutenção preventiva.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

- Analisar a viabilidade da substituição das bombas de deslocamento positivo por bomba centrífuga para o processo de regeneração de vasos de troca iônica.

2.2 Específicos

- Analisar consumo atual de potência;
- Levantar custo de manutenção das bombas de deslocamento positivo;
- Calcular consumo de potência para nova bomba;
- Comparar consumos de cada tipo de bomba;
- Realizar análise de viabilidade financeira.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados conceitos e definições para um melhor entendimento do conteúdo que aparecerá ao longo deste trabalho.

3.1 Troca iônica

A água desmineralizada é utilizada para inúmeras aplicações industriais, como nas empresas farmacêuticas, alimentícias, em unidades de geração de vapor em caldeiras de alta pressão, entre outras aplicações, sendo o processo de desmineralização de águas troca iônica considerado o processo mais econômico, simples e o mais utilizado para este fim (CUNHA, 2006).

O processo de troca iônica visa remover, da água, as substâncias que se encontram dissolvidas, principalmente os componentes iônicos, os quais são transferidos para uma fase sólida insolúvel, denominada de resina de troca iônica a qual, ao reter íons indesejáveis, presentes na água, libera uma quantidade equivalente de outras espécies iônicas que estavam armazenada na estrutura da resina, sendo que estes íons não irão comprometer a qualidade da água tratada (NALCO, 1988).

Segundo DOS SANTOS (2013) ocorre uma substituição por quantidades equivalentes destes íons considerados impurezas por outros compostos iônicos de mesmo potencial liberados pelo material sólido.

No processo de troca iônica, utilizam-se compostos orgânicos sintéticos chamados de resinas, que tem a capacidade de atrair cátions e ânions (Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , etc), que serão substituídos por íons hidrogênio (H^+) e hidroxila (OH^-), que irão reagir entre si para formar uma molécula de água. As resinas ao entrarem em contato com água poderão liberar íons hidroxila, hidrogênio e efetuar a troca iônica com a água, gerando íons que em diversos seguimentos industriais não são desejáveis (DOS SANTOS, 2013).

Figura 1: Resinas catiônicas e aniônicas.



Fonte: Manual Fibria.

As plantas de troca iônica da Fibria Celulose SA para desmineralização da possui duas linhas com 5 vasos ligados em série, vaso de desclorador (carvão ativado), trocador catiônico, aniônico fraco, aniônico forte e leito misto.

Figura 2: Planta de Desmineralização – Fibria Celulose SA.



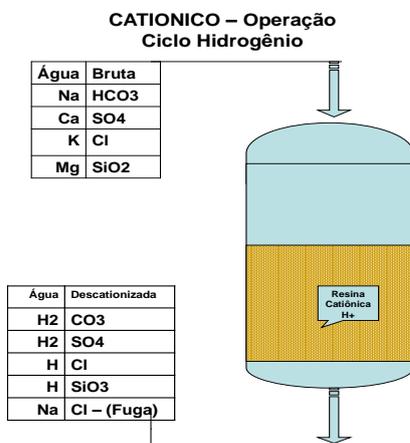
Fonte: Autor.

Cada etapa de uma unidade de desmineralização em seu efeito observado, na etapa inicial, que consiste na passagem da água bruta (WFC) por um leito de carvão ativado que tem como papel a retirada de contaminantes orgânicos, como coloides e sólidos suspensos que não foram retiradas na Estação de tratamento de água (TOUMA, 2013).

Logo após este vaso, o fluxo de água que já contém uma carga de contaminantes reduzida devido passagem pelo leito de carvão, passa por um leito formado por resinas catiônica, que possui elevada afinidade por átomos de Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg), representado na figura 3, a troca iônica acontece devido a um átomo de Hidrogênio presente na superfície da resina que é liberado para a água e em seu lugar fica

átomos indesejáveis, com isso a resina fica contaminada de impurezas e o fluxo de água segue sem os íons que estavam presente inicialmente (PUROLITE, 2015).

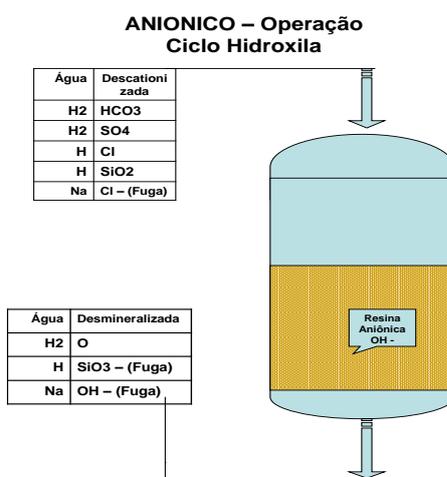
Figura 3: Operação trocador catiônico.



Fonte: Autor.

Após a passagem por estes dois vasos, as cargas de íons contaminantes na água ainda necessitam ser removidas, sendo assim o fluxo atravessa dois vasos de resinas aniônicas, na qual irá efetuar a troca iônica com o restante dos íons livres dos tipos sulfatos, cloretos, nitratos e principalmente silicatos como pode ser visto na figura 4 (PUROLITE, 2015).

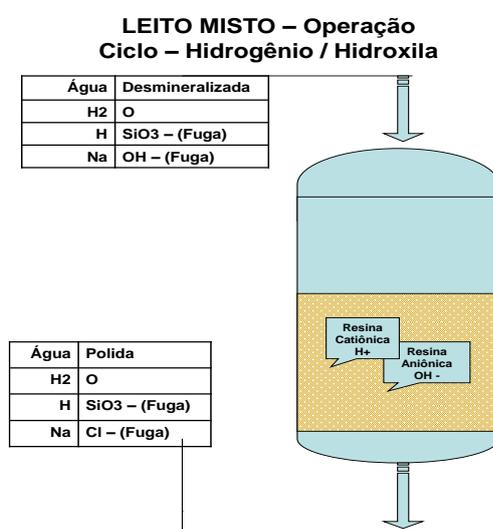
Figura 4: Operação trocador aniônico.



Fonte: Autor.

Após estas etapas de purificação e retirada de íons da água bruta, ainda existe uma certa quantidade de íons contaminantes presentes na água devido fuga dos vasos anteriores, na qual se faz necessário executar um trabalho de polimento da água. A figura 5 mostra a passagem a mesma por um vaso misto com resinas aniônicas e catiônicas na qual visa a remoção do restante dos íons presentes no meio, fazendo com que a água se mantenha nos padrões operacionais estabelecidos para alimentação das caldeiras.

Figura 5: Operação leitos mistos.



Fonte: Autor.

As resinas de troca iônica apresentam capacidade limitada para retenção de íons em sua estrutura, essa característica é denominada capacidade de troca e em função dessa, durante a sua utilização, as resinas acabam sendo saturadas com os íons inicialmente presentes na água que está sendo processada devendo-se, nessa condição, interromper o processo de tratamento para que seja realizada a regeneração das resinas. Na Fibria Celulose SA, a saturação das resinas é identificada através de instrumentos como condutivímetros e silicômetros, que possuem limites operacionais pré-estabelecidos e indicam no SDCD quando esses valores são ultrapassados.

O processo de regeneração de resinas consiste na passagem de soluções específicas, ácidas ou básicas, com uma concentração satisfatória, cujo objetivo será substituir os íons removidos da água pelos de hidrogênio e hidroxilas, adequando o sistema

para uma nova campanha. Na Fibria Celulose S/A, utiliza-se ácido clorídrico para regeneração do leito catiônico e hidróxido de sódio para o leito aniônico (FIBRIA, 2017).

Seguindo dados do manual de Desmineralização da Fibria Celulose S/A, a regeneração dos vasos de troca iônica ocorre conforme descrito abaixo:

As regenerações são realizadas utilizando-se de um ácido forte para a resina catiônica e de uma base forte para a resina aniônica, no nosso caso ácido clorídrico, e como base usamos hidróxido de sódio. No desclorador, a única condição para se efetuar a regeneração de seu mando é realizar a retirada de sólidos suspensos e coloides, ou seja, onde o fluxo de água passa em contracorrente.

A regeneração do trocador catiônico é realizada passando uma solução de ácido clorídrico à 30% por litro de resina, dados estipulados pelos fabricantes, este processo promove a retirada de íons que estão retidos na superfície da resina, deixando H^+ em seu lugar (PUROLITE, 2015). Após isso, é feita a lavagem da resina, onde se passa água bruta até obter um pH próximo a 3,5, após isso pode-se avançar para mais uma etapa.

A regeneração do trocador aniônico, que contém resina aniônica, é realizada passando uma solução de soda caustica com 30 % de concentração para cada litro de resina, este procedimento tem como princípio a retirada de íons que estão impregnados na superfície da resina por OH^- , assim os íons que estavam no corpo da resina são trocados por íons OH^- , regenerando a resina e deixando-a pronta para um novo ciclo de troca iônica. Posteriormente, é feita a lavagem da resina, onde se passa água bruta até obter um pH próximo a 9,0, após isso pode-se avançar para mais uma etapa.

Com foco na regeneração do leito misto, inicialmente deve-se separar as resinas, através da passagem de água em contracorrente, para que a resina catiônica fique na parte de baixo (mais densa) e a resina aniônica fique na parte superior (menos densa), depois da separação do manto de resinas, a regeneração do leito misto deverá ser realizada por partes, ou seja, primeiramente a resina catiônica e logo após a resina aniônica, nos mesmos moldes mencionados acima.

3.2 Bombas hidráulicas

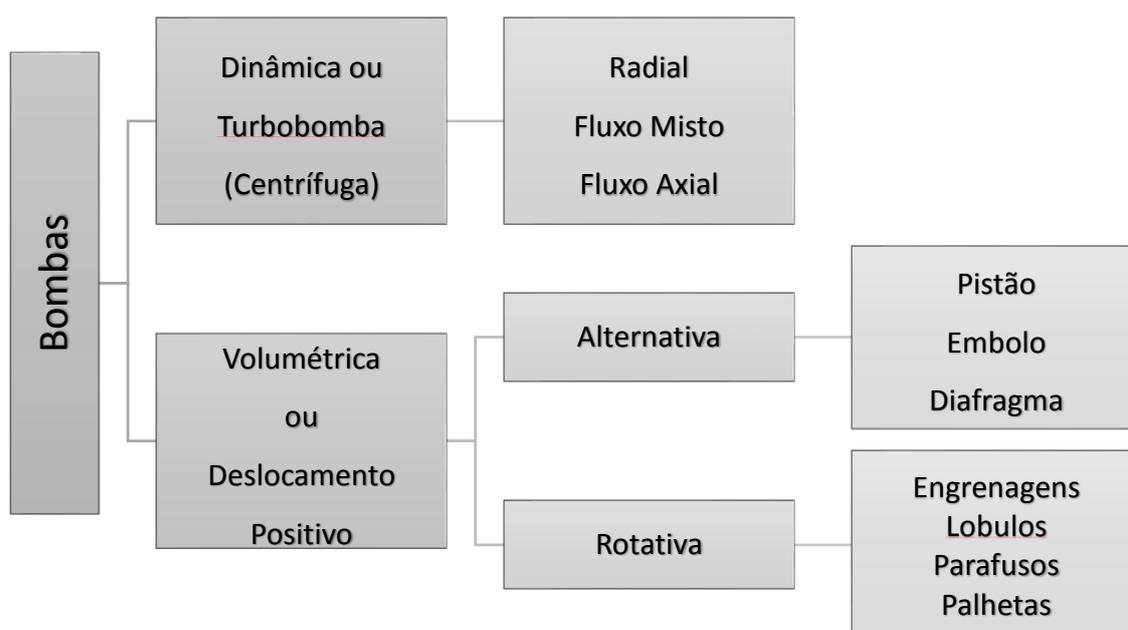
Segundo MACINTYRE (1997), bombas hidráulicas são máquinas geratrizes cujo objetivo é proporcionar o deslocamento de um líquido por escoamento. Elas recebem energia de uma fonte motora, podendo ser motores elétricos ou vapor – no caso de turbobombas -, com a finalidade de transformar o trabalho mecânico em energia cinética (movimento), energia de pressão ou as duas simultaneamente e transmiti-las ao fluido com a função de transportá-lo para qualquer ponto do sistema.

São máquinas que recebem trabalho mecânico e o transformam em energia hidráulica, fornecendo energia ao líquido (DENICULI, 2001).

De acordo com Hydraulic Institute (2009), a forma de classificação das bombas ocorre através do modo pelo qual é realizado a modificação do trabalho em energia hidráulica e o mecanismo utilizado para cedê-la ao líquido aumentando sua velocidade e pressão.

De acordo com suas características, as bombas podem ser classificadas como (MATTOS, FALCO,1998):

Figura 6: Classificação das bombas.



Fonte: Adaptado de MATTOS, FALCO,1998.

Os tipos mais comuns de bombas, de acordo com suas aplicações, são: abastecimento de água, sistema de esgoto, rede de incêndio, sistemas hidráulicos e de lubrificação, alimentação de caldeiras, sistema de retorno de condensado, aplicação de produtos químicos, drenagem, indústria química, produção e processamento de petróleo, ignição, usinas de celulose e papel, indústria de alimentos e bebidas, serviço nuclear (MATTOS, FALCO,1998).

3.2.1 VOLUMÉTRICA OU DESLOCAMENTO POSITIVO

Possuem uma ou mais câmaras, em cujo interior o movimento de um órgão propulsor comunica energia de pressão ao líquido, provocando o seu escoamento (MACINTYRE, 1997). Assim, volume de líquido remetido está diretamente relacionado com o deslocamento do elemento pistão e, portanto, aumenta em conjunto com a velocidade e não é afetado pela pressão. Uma das características mais importante dessas bombas é o fato de manterem a vazão média praticamente constante, independentemente do sistema que atuam desde que a velocidade seja constante (MATTOS, FALCO,1998).

Caracterizada pela admissão de uma dada quantidade de fluido, que é retida no seu interior, comprimindo até a pressão de descarga e deslocado por completo através da tubulação de descarga (SILVA, 2007).

Um dos principais tipos dessas bombas, são as consideradas dosadoras, usadas para aplicação de produtos químicos em caldeiras, industrias de celulose, alimentícia, entre outros.

LIMA (2003), a define como o tipo de bomba alternativa que permite variar a vazão por meio da modificação do curso do elemento bombeador, o que permite uma alternância de zero a 100% do valor para capacidade de dosagem.

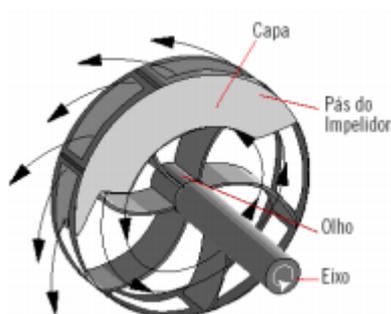
3.2.2 DINÂMICA OU TURBOBOMBA

Segundo CARVALHO (1999) as turbobombas ou bombas hidrodinâmicas são aquelas que se caracterizam pela existência de um rotor dotado de palhetas acionado por uma fonte externa de energia e em contato com o fluido de material.

O rotor, também conhecido como “impelidor” ou “impulsor”, é uma peça cônica que possui pás, cuja finalidade é informar ao fluido a aceleração, com intuito de obter energia cinética e produzir então a transformação da energia mecânica (MACINTYRE, 1997).

De acordo com LIMA (2003), o rotor é a peça mais importante da bomba, sendo classificado em três critérios fundamentais: quanto a admissão de líquido, quanto às paredes e quanto a direção de saída do líquido.

Figura 7: Rotor de bomba centrífuga.



Fonte: MATTOS, FALCO,1998.

SANTOS (2007) afirma que os rotores são ainda classificados em: fechados, quando possuem tampas traseiras e dianteiras, sendo mais aplicado no transporte de líquidos com alto grau de pureza, semifechados, quando dispõe de apenas tampa traseira, ou abertos, quando não apresentam coroa circular e no transporte de líquidos com maior teor de impurezas como pastas, lamas, areia, etc.

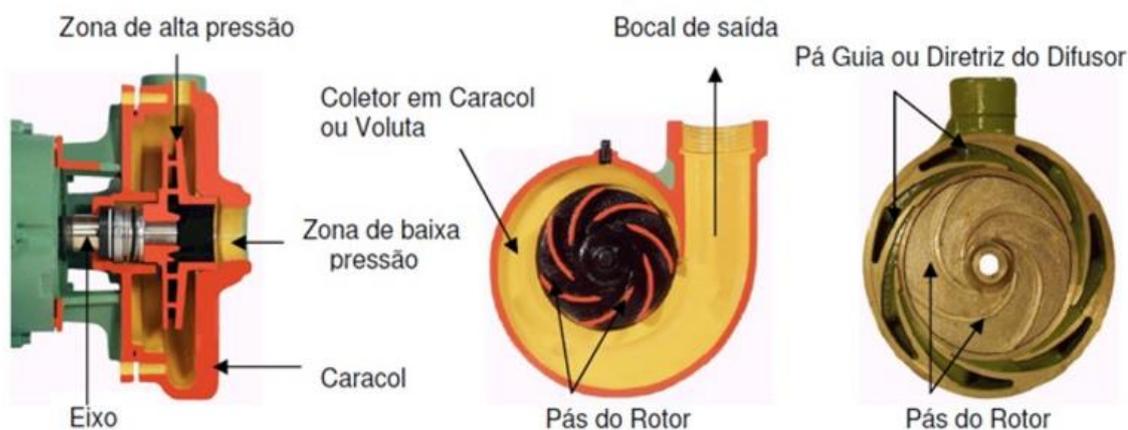
Figura 8: Tipos de rotores de bombas dinâmicas.



Fonte: MATTOS, FALCO,1998

Para seu funcionamento, as turbobombas também precisam de outro órgão, o difusor, também conhecido como recuperador, onde é realizada a conversão da maior cota da excessiva energia cinética com que o líquido deixa o rotor, em energia de pressão. Assim, ao alcançar o bocal de recalque da bomba, o fluido é capaz de transcorrer em velocidade satisfatória, mantendo equilíbrio entre a pressão que se opõe ao escoamento. Essa modificação é feita de acordo com o teorema de Bernoulli, devido o difusor sendo, na maior parte dos casos, de seção progressivamente crescente, realiza uma contínua e gradativa redução da velocidade do líquido que por ele transcorre, com simultânea elevação da pressão, fazendo com que está possua alto valor e a velocidade seja reduzida da ligação da bomba a tubulação de descarga. Os difusores podem ser subdivididos de acordo com o tipo de turbobombas, podendo ser de tubo reto troncônico nas bombas axiais e de caixa com forma de caracol ou voluta nas demais. Em alguns tipos de bombas, desejando diminuir as perdas por atrito ou turbulências, são instalados acessórios entre a voluta e a saída do rotor, como palhetas denominadas “pás guias” (MACINTYRE, 1997).

Figura 9: Componentes bombas centrífugas.



Fonte: MATTOS, FALCO, 1998.

MACINTYRE (1997) afirma que as turbobombas podem ser classificadas segundo vários fatores: trajetória do líquido no rotor, número de rotores empregados, número de entradas para sucção, modos pelo qual é obtida a transformação de energia cinética em energia de pressão.

Neste trabalho, iremos abordar a classificação quanto a trajetória do líquido no rotor, sendo as bombas classificadas em:

- Bomba centrífuga pura ou radial;
- Bombas de fluxo misto ou diagonal;
- Bomba axial ou propulsora.

3.3 Bombas centrífugas

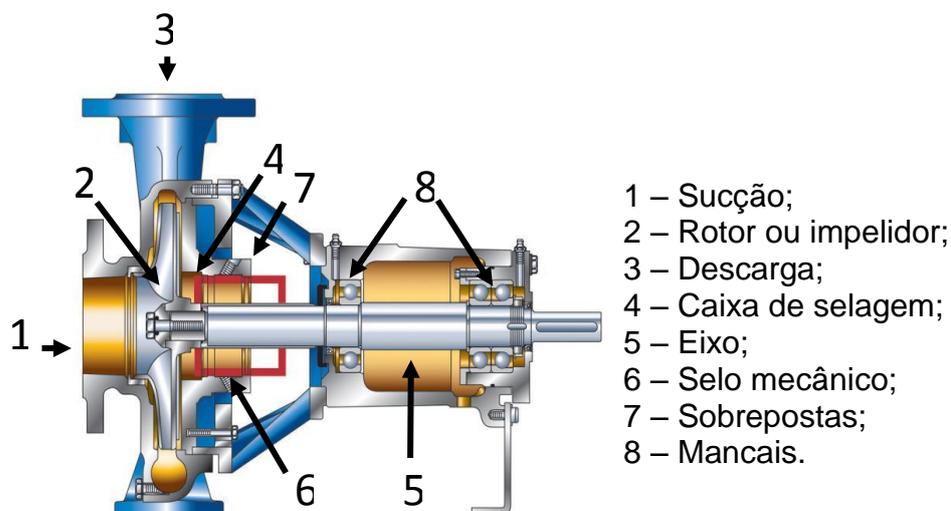
Fazem parte das bombas dinâmicas, ou seja, a energia transmitida ao líquido é essencialmente do tipo cinética (pode ter origem através da centrífuga ou de arrasto, ou uma combinação de ambas, através da forma do impelidor), sendo futuramente convertida na maior parte em energia de pressão (fazendo com que o fluido que sai do impelidor passe em conduto de área crescente) (MATTOS, FALCO;1998). São caracterizadas pela trajetória percorrida pelo líquido ao percorrer o rotor.

3.3.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO

O funcionamento das bombas centrífugas é dado pelo movimento do rotor que aumenta a velocidade do líquido através da força centrífuga (TSUTIYA, 2004). Isto é, a energia cinética é fornecida à massa líquida através da rotação, proporcionando a conversão dessa energia em energia de pressão, por meio do difusor. Segundo MONACHESI (2005), essas transformações de energia são geradas de acordo com teorema de Bernoulli e a equação da continuidade, pois, como dito anteriormente, o difusor tem seção crescente que proporciona a redução de velocidade do líquido e o aumento da pressão na saída de carcaça da bomba. As palhetas movimentando-se no interior da carcaça arrastam o fluido para dentro, por meio da abertura central de entrada, e através da força centrífuga o líquido é empurrado para fora pela abertura de saída na lateral da carcaça.

A figura 10 ilustra os principais componentes de centrífugas:

Figura 10: Vista em corte de uma bomba centrífuga típica.



Fonte: ADAPTADA DE MATTOS, FALCO, 1998.

3.3.2 DESEMPENHO DA BOMBA CENTRIFUGA

Para calcular a performance de uma bomba é necessário a determinação de fatores como vazão, carga, potência consumida e rendimentos. Com informações emitidas pelos fabricantes sempre temos conhecimento das curvas do sistema, o que determina o desempenho eficiente da bomba (KARASSIK, 1984).

3.3.2.1 Vazão do sistema

Grandeza que determina a razão entre o volume de um fluido que escoar por uma determinada seção em um período de tempo.

3.3.2.2 Capacidade da bomba

A capacidade da bomba é o quanto de fluido a bomba pode descarregar por unidade de tempo, ou seja, a vazão fornecida para o sistema. Existem algumas variáveis que podem influenciar este fator, tais como: diâmetro e rotação de impelidor, viscosidade do fluido. O próprio fabricante fornece a faixa de vazão estipulada para cada modelo de bomba.

MATTOS, FALCO (1998) afirmam que as principais curvas do sistema são:

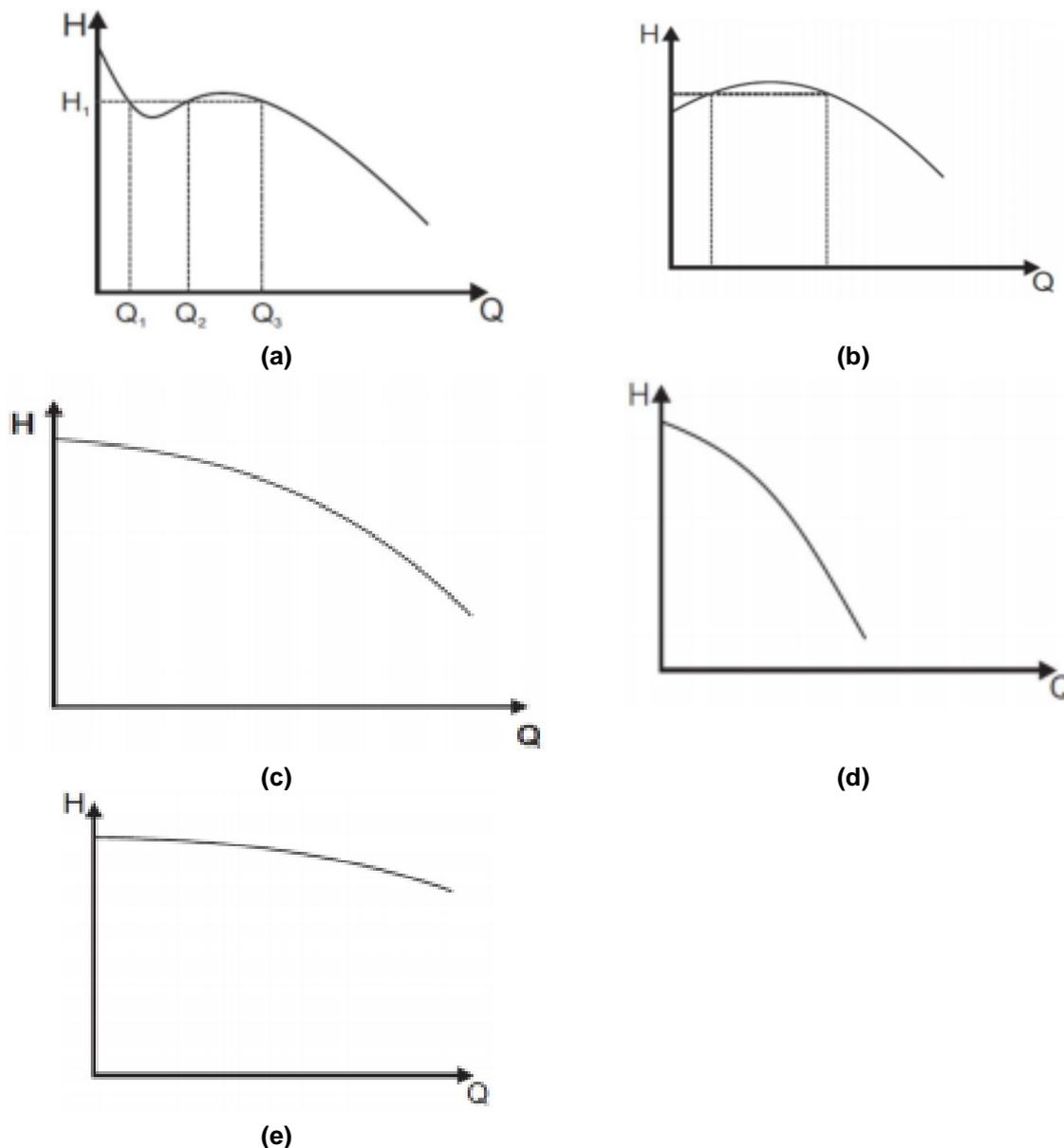
- a) CURVA DE CARGA (H) X VAZÃO (Q);

A carga de uma bomba (H) pode ser definida como a energia por unidade de massa\peso que a bomba tem possibilidades de transmitir ao fluido para certa vazão (Q). Este tipo de curva recebe diferentes denominações de acordo com a forma como se apresenta.

As curvas podem ser:

- Instável: um determinado valor de carga, pode equivaler a duas ou mais vazões, visto na figura 11.a;
- Instável ascendente\descendente: a carga produzida na vazão zero é menor que a desenvolvida para outras vazões, visto na figura 11b;
- Estável (Rising): A carga aumenta continuamente enquanto a vazão diminui, representado na figura 11c;
- Estável (flat): A carga varia muito pouco com a vazão (Figura 11d);
- Estável (Steep): Existe uma grande diferença entre a carga desenvolvida na vazão zero e a da vazão de projeto (Figura 11e).

Figura 11: tipos de curvas de bombas dinâmicas, sendo, instável (a), ascendente\descendente (b), rising (c) flat (d) e steep (e).



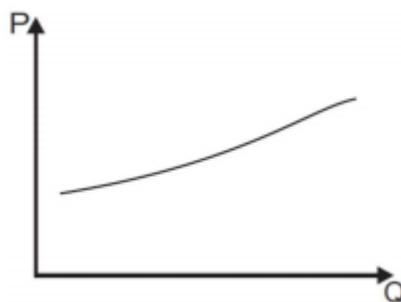
Fonte: MATTOS, FALCO (1998).

b) CURVA DE POTÊNCIA ABSORVIDA (POTABS) X VAZÃO (Q);

O maior enfoque é com a potência absorvida, pois é a requerida para o acelerador e utilizada na escolha seleção da bomba.

Bomba de fluxo radial: A curva para este tipo de bomba, a potência aumenta simultaneamente com a vazão. O motor deve ser projetado para que sua potência supere todos os pontos de operação. Estas curvas também são chamadas "over loading"

Figura 12: Curva bomba radial.

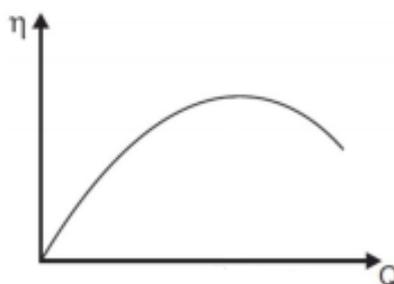


Fonte: MATTOS, FALCO (1998).

c) CURVA DE RENDIMENTO TOTAL (η) X VAZÃO (Q).

Representa relação existente entre potência útil e potência absorvida, correlacionada com a vazão, sempre fornecida pelo fabricante.

Figura 13: Curva de rendimento vs vazão.



Fonte: MATTOS, FALCO (1998).

3.3.3 PERDAS HIDRÁULICAS

A energia transmitida pelo motor ao eixo pode ser perdida na entrada da bomba, no rotor, nos canais das pás guias, em vazamentos por gaxetas, labirintos, etc. (MACINTYRE, 1997).

3.3.4 PERDAS DE CARGA

Para FOX, PRITCHARD E MCDONALD (2011) os escoamentos em tubos apresentam relevante atrito com frequência de turbulência – quando as partículas se movimentam em direções aleatórias, com velocidade e direção variáveis - que causam perdas de energia mecânica. Estas perdas podem ser divididas: em perdas distribuídas (as de maior valor), causadas pelo atrito nas áreas de seção constante dos tubos, e perdas

localizadas (de menor valor) que são causadas pelos acessórios como curvas, válvulas, cotovelos, etc.

Como a perda de carga distribuída irá depender do tipo de escoamento (laminar ou turbulento), é preciso entender a definição deles e como se determina o tipo de escoamento em que o fluido se encontra (MATTOS, FALCO, 1998).

3.3.5 ESCOAMENTO LAMINAR

Acontece no momento em que as partículas e/ou elementos de um fluido se movimentam ao longo de trajetórias bem definidas, tendendo a percorrer trajetórias paralelas, apresentando lâminas ou camadas e tendo cada uma delas a sua particularidade garantida no meio. No escoamento laminar a viscosidade atua no fluido no sentido de absorver a aptidão ao princípio de aparecimento da turbulência. Este tipo de escoamento tem maior incidência a velocidades menores e em fluidos que apresentem grande viscosidade (MATTOS, FALCO, 1998).

3.3.6 ESCOAMENTO TURBULENTO

Ocorre em situações onde partículas de um fluido não se movem ao longo de caminhos definidas, ou seja, as partículas traçam trajetórias irregulares, gerando pequenos redemoinhos. Este escoamento é comum na água, cuja viscosidade é moderadamente baixa (MACINTYRE, 1997).

3.3.7 NÚMERO DE REYNOLDS

O número de Reynolds é um número adimensional, usado em mecânica dos fluidos, que descreve o desempenho global de um fluido. A partir dele, conseguimos definir a natureza do escoamento (laminar ou turbulento) dentro de um tubo ou sobre uma superfície (FOX, MCDONALD, PRITCHARD, 2011).

O seu nome vem de Osborne Reynolds, um físico e engenheiro irlandês, que demonstrou experimentalmente os dois tipos distintos de escoamento. O seu significado físico é um quociente entre as forças de inércia e as forças de viscosidade. Analisando essa relação, podemos deduzir que se o número de Reynolds for alto, os efeitos viscosos são desprezíveis; e se for baixo, os efeitos viscosos são dominantes (FOX, MCDONALD, PRITCHARD, 2011).

3.3.8 FATOR DE ATRITO

O fator de atrito f é função do número de Reynolds e da rugosidade relativa e/D da tubulação, onde e é a rugosidade e D é o diâmetro do tubo. Isso é válido exceto quando o escoamento é laminar, onde f depende apenas de Re ; e no escoamento completamente turbulento, para o qual os valores de Reynolds são bastante altos e f passa a depender somente da rugosidade relativa (MACINTYRE, 1997).

3.3.9 CAVITAÇÃO

As perdas de energia que o fluido é submetido durante o caminho percorrido fazem com que a pressão absoluta no mesmo possa diminuir gradativamente, assim se a pressão de vapor for atingida, aparecerão bolhas oriundas do processo de vaporização, essas bolhas contendo vapor do próprio fluido ou de gases dissolvidos no líquido, são carregados pelo fluxo para uma área de maior pressão onde se condensam, dando origem ao fenômeno de cavitação (LIMA, 2003).

Essas bolhas ao atingirem o rotor com alta pressão e velocidade podem causar sérios danos a sua estrutura por corrosão e fazendo com que a bomba tenha queda de rendimento e ruídos de vibração (MACINTYRE, 1997).

A cavitação gera vários inconvenientes além do citado acima, também pode alterar as curvas características do sistema e dependendo de sua severidade pode danificar o material de fabricação da bomba, além de um aumento de temperatura no local (MATTOS, FALCO, 1998).

3.3.10 NPSH (NET POSITIVE SUCTION HEAD)

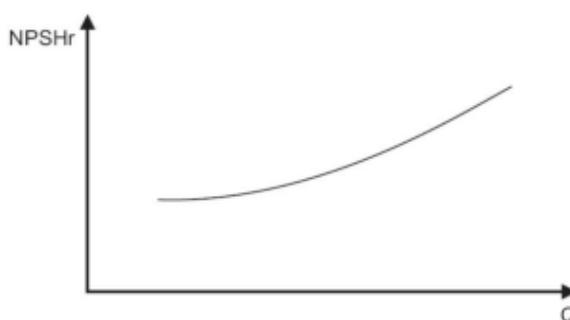
A sigla NPSH, do inglês é Net Positive Suction Head, representa a disponibilidade com que o líquido ou fluido penetra no bocal de aspiração da bomba, e que a ele possibilitará atingir as bordas das palhetas do rotor. (MACINTYRE, 1997).

Representa a energia em altura absoluta do líquido no bocal de entrada da bomba acima da pressão de vapor deste líquido na temperatura de bombeamento, referenciada à linha de centro da bomba. Assim, o objetivo do NPSH é criar limitações às condições de aspiração, de modo a manter a pressão na entrada do rotor da bomba acima da pressão de vapor do líquido bombeado (OMEL, 2017).

Este termo pode ser relativo ao sistema e a bomba. Quando relacionado ao sistema, é considerado NPSH disponível, e pode ser conceituado como a pressão existente no flange de aspiração da bomba que direciona o líquido para as palhetas do impelidor, acima da pressão de vapor do próprio fluido (MACINTYRE, 1997).

Quando o termo é relativo à bomba, é chamado de NPSH requerido. É definido como a pressão no flange de entrada da bomba que está necessita para funcionar corretamente. O NPSH requerido depende somente da bomba, suas características construtivas e do líquido bombeado, uma vez que é caracterizado como a quantidade mínima necessária de energia absoluta por unidade de peso acima da pressão de vapor que deve existir no flange de aspiração da bomba para que não haja a formação de bolhas (MATTOS, FALCO, 1998).

Figura 14: Curva NPSHr x Q.



Fonte: MATTOS, FALCO (1998).

Com as definições acima, entende-se o NPSH como fator para evitar a ocorrência do fenômeno chamado cavitação, que causa muitos danos à bomba. Para que isso não aconteça, o NPSH disponível deve ser maior que o requerido. Assim, é garantido que a pressão de sucção seja maior que a pressão de vapor do fluido (MATTOS, FALCO, 1998).

3.3.11 ALTURA MANOMÉTRICA DO SISTEMA

A altura manométrica do sistema (H) é definida como a energia que o sistema vai solicitar da bomba para que esta consiga transferir um fluido de um ponto a outro a uma determinada vazão. Essa energia irá variar levando-se em conta as resistências que este sistema fornece ao fluido. Tais resistências são: a altura geométrica (h), a

diferença de pressão entre os reservatórios de descarga (P_d) e sucção (P_s) e as perdas de carga da rede (h_f) (MACINTYRE, 1997).

A altura geométrica (h) é a diferença entre os níveis dos reservatórios de descarga (Z_d) e de sucção (Z_s). Essas medidas são feitas a partir da superfície do fluido, no reservatório em que se encontram, até a linha de centro do rotor da bomba. Para obtermos a perda de carga total da rede devemos somar as perdas de carga da sucção (h_{fs}) e descarga (h_{fd}).

3.3.12 ALTURA MANOMÉTRICA DE SUCÇÃO (HS)

Definida como a quantidade de energia por unidade de peso existente na linha de sucção.

3.3.13 ALTURA MANOMÉTRICA DE DESCARGA (HD)

Definida como a quantidade de energia por unidade de peso que se quer obter no ponto final da linha de descarga.

3.3.14 TEOREMA DE BERNOULLI

O teorema de Bernoulli descreve uma situação particular do princípio da conservação de energia, expondo que em um fluido ideal, a energia se conserva durante seu trajeto. A energia total de um fluido pode ser representada nas presentes formas: energia de pressão, que é a energia do fluido devido à pressão que possui; energia cinética, que é a energia devido à velocidade do fluido e a energia potencial gravitacional, que é a energia devido à altura que se encontra o fluido (MATTOS, FALCO, 1998).

3.3.15 FATORES QUE AFETAM O PONTO DE TRABALHO

Após a implementação do sistema de bombeamento, algumas modificações no ponto de trabalho podem ocorrer, podendo ser por necessidade de menor vazão ou aumento natural da perda de carga da tubulação. Para realizar essas mudanças pode se alterar a altura manométrica do sistema, diâmetro do rotor, alteração da rotação, entre outros.

A altura manométrica do sistema pode sofrer alterações em função da variação na pressão dos reservatórios, mudança nos diâmetros da tubulação, inclusão ou exclusão de acessórios nas linhas que alterem a perda de carga localizada, abertura ou fechamento de válvulas, entre outros.

Para alterar o ponto de trabalho do sistema pode-se considerar o controle de vazão através de válvulas controladoras de vazão como sendo o mais comum, pois através dessa operação se torna possível aumentar ou diminuir a perda de carga do sistema, fazendo a curva do sistema alterar e cruzar a curva característica da bomba em uma nova condição de trabalho (SILVA, 2003).

Fox, McDonald e Pritchard (2011) afirmam que para realizar a alteração da rotação bomba, utiliza-se a regra da semelhança, que representa singularmente a relação de proporcionalidade que os resultados de vazão e pressão de uma curva característica de bomba, quando esta se submete à inúmeras rotações. Tais variações de rotações, podem ser obtidas através da operação de motores elétricos com inversores de frequência, que são capazes de alterar a rotação de operação.

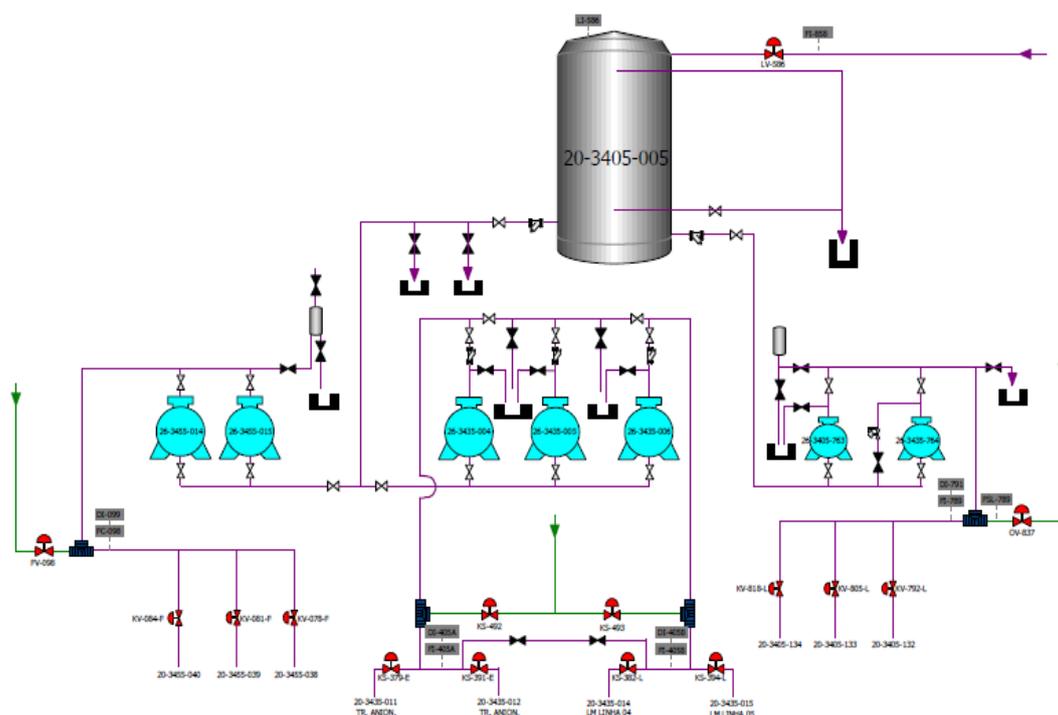
4 METODOLOGIA

Neste item mostraremos como foi desenvolvido o estudo para implantação de uma bomba centrífuga. Serão apresentadas as etapas principais para a execução desta tarefa.

4.1 Sistema atual de bombeamento

Iniciando pelo croqui do sistema de bombeamento de hidróxido de sódio atual, representado na figura 15, que tem por objetivo enviar fluido regenerante para os vasos de troca iônica.

Figura 15: Croqui da área que será estudada.



Fonte: Acervo do autor.

No sistema atual temos um tanque de estocagem de hidróxido de sódio, ilustrado na figura 16, com um volume aproximado de 14,7 m³, com cerca de 3 metros de altura e diâmetro de 2,5 metros. Porém como o nível se limita a 80% de sua capacidade, para não haver risco de transbordamento, adotaremos um volume de 11,76 m³.

Ao todo temos 12 vasos de resinas aniônicas que necessitam ser regenerados por NaOH, porém por limitação de processo, o limite de vasos que podem ser regenerados por vez são 4. Um da planta A, dois da planta B e um da planta D.

As tubulações que existem nas bombas atuais têm diâmetros de 3” na sucção e 2” no recalque e são de aço soldado em tubos velhos.

Com o intuito de não gerar tanto custo de projeto, limitaremos ao máximo o número de modificações possíveis. Permaneceremos com a tubulação atual e somente serão feitos alguns ajustes na sucção e recalque das bombas para atender as linhas que chegam até os vasos.

Figura 16: Imagem da área que será estudada.



Fonte: Acervo do autor.

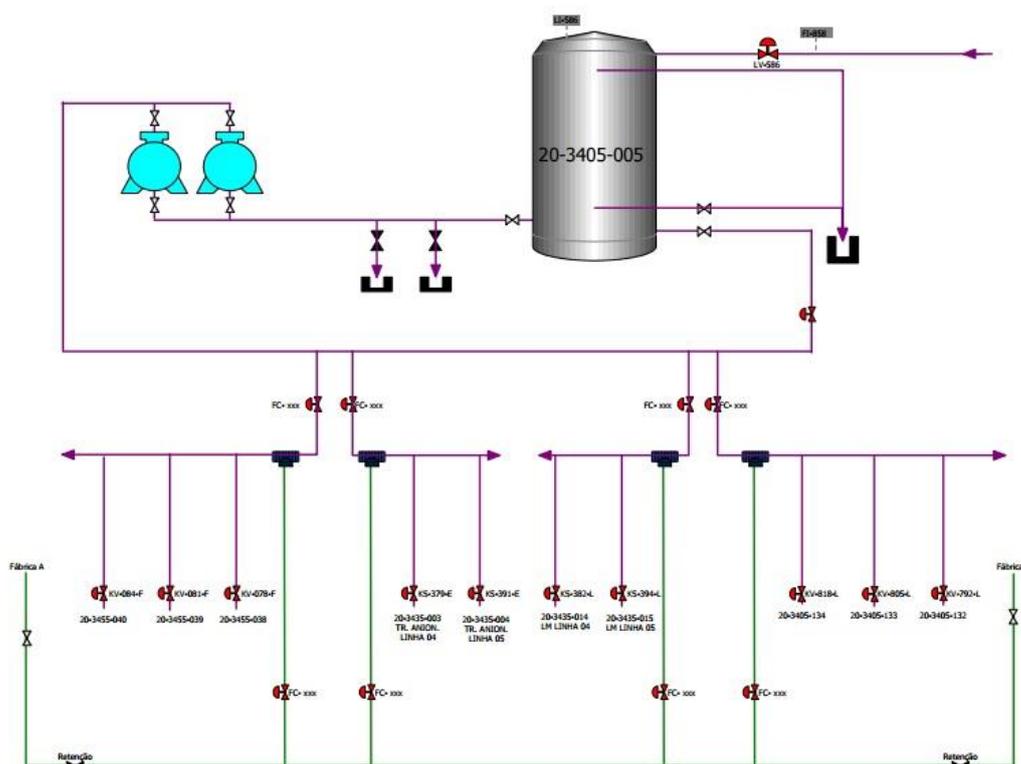
4.2 Proposta do sistema de bombas centrífugas

O sistema estudado possuirá duas bombas centrífugas que serão responsáveis pela injeção de hidróxido de sódio nos leitos de resinas de troca iônica, onde apenas uma é utilizada e a segunda ficará em stand-by para caso de falhas.

O tanque de estocagem também continuará sendo o já existente.

A figura 17 demonstra a proposta para o novo sistema de bombeamento de hidróxido de sódio:

Figura 17: Croqui da área que será modificada.



Fonte: Acervo do autor.

4.3 Dimensionamento de bomba centrífuga para aplicação de NaOH

Para a seleção de uma bomba centrífuga necessitam-se, basicamente, da vazão “Q” e da altura manométrica “Hm” com o fim de calcular a potência necessária da mesma. Sobre posse dessas informações é possível encontrar a bomba adequada para a aplicação desejada em um catálogo de fabricante.

4.3.1.1 4.3.1 Cálculo da vazão da bomba

Para determinar a vazão de trabalho da bomba, temos que considerar a situação mais crítica para o processo, ou seja, a regeneração simultânea das 3 plantas de desmineralização. Sendo assim, são ao todo 4 vasos que receberam o fluido. Portanto:

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Sendo todas essas vazões de valores diferentes e expressadas cada uma individualmente como:

$$Q = \text{volume} / \text{tempo} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

As vazões, representada por Q (m³/h) serão encontradas em medições realizadas durante o bombeamento do sistema atual, comprando o volume consumido do tanque durante o período de tempo de aplicação de NaOH nos vasos.

4.3.2 CURVA CARACTERÍSTICA DO SISTEMA DE RECALQUE

Essas curvas características resultam da relação entre altura manométrica e vazão do sistema.

As curvas são oriundas da equação de altura manométrica total, diferenciando os pontos de vazão e assim, diferentes valores de pressão, além do ponto de trabalho. Portanto, somente a perda de carga (Hf) se altera com a vazão.

Levado em consideração que o tanque de armazenamento e o vaso de resinas estão à pressão atmosférica, a equação 4.3:

$$H = H_b + H_f \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Sendo,

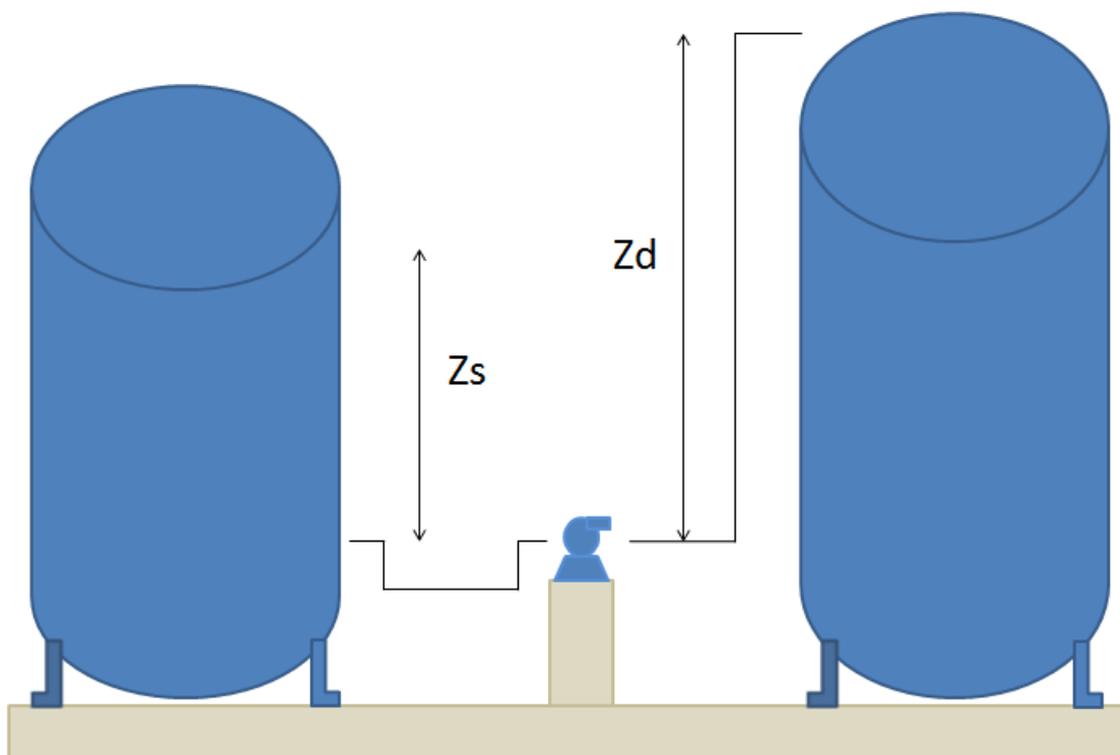
H_b resultado da Equação de Bernoulli (m);

H_f perda de carga de todo sistema (m).

4.3.3 EQUAÇÃO DE BERNOULLI E ALTURAS MANOMÉTRICAS DE SUÇÃO E DESCARGA

A partir da figura 18 podemos descobrir as alturas geométricas do sistema.

Figura 18: Alturas geométricas.



Fonte: Acervo do autor.

A altura geométrica de descarga é a mesma considerando a maior altura do vaso de resina subtraída pelo nível da bomba. Já a altura geométrica de sucção, pode ser encontrada através da diferença entre a posição da bomba de recalque e o tanque de estocagem.

Com o auxílio das alturas geométricas, medidores de pressão das linhas de recalque e diâmetros internos de tubulações, montamos a equação de Bernoulli para os quatro pontos de recalque:

$$z_s + \frac{v_s^2}{2g} + \frac{p_s}{\gamma} + H_b = z_d + \frac{v_d^2}{2g} + \frac{p_d}{\gamma} + h_f \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Sendo,

p pressão (Pa);

γ peso específico (N/m³);

z altura em relação a bomba (m);

H_b altura manométrica para a bomba (m);

h_f perda de carga (m).

4.3.4 PERDA DE CARGA DO SISTEMA DE RECALQUE (HF)

A perda de carga do sistema será calculada a partir da equação 4.5, de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Sendo,

f Fator de atrito;

L Comprimento da tubulação (m);

D Diâmetro interno do tubo (m);

V Velocidade do fluido (m/s);

g Gravidade (m/s²).

As perdas de carga serão definidas e apontadas utilizando valores e parâmetros que serão seguidos como orientação para cálculo, como Número de Reynolds, fator de atrito, velocidade do escoamento, rugosidade da tubulação, comprimento da tubulação, comprimento equivalente dos acessórios, além das propriedades da soda, como massa específica e viscosidade absoluta.

4.3.5 PROPRIEDADES DA SODA E DA TUBULAÇÃO

As propriedades da soda, presentes na tabela 3, são informações passadas pelas empresas Canexus Química Brasil LTDA que fornece o hidróxido de sódio para a Fibria S/A – Unidade Aracruz, através das FISPQ.

Tabela 3: Propriedades físico-químicas do hidróxido de sódio.

Propriedades físico-químicas			
Aparência	Branca, não volátil, solução clara para turva	Ponto de fusão	6 °C
Odor	Sem cheiro	Ponto de ebulição	119 °C
pH	14, fortemente alcalina	Temperatura crítica	Não aplicável
Pressão do vapor	2,0 KPa (15 mmHg) @ 25°C	Densidade	1,35 @ 15 °C
Solubilidade	Solúvel em água em todas proporções.	Coefficiente de partição	Essencialmente zero
Densidade do vapor	Não aplicável	Taxa de evaporação	Essencialmente zero

Fonte: FISPQ da Canexus Química Brasil Ltda, 2005.

Além da densidade encontrada na tabela 3, usaremos também a viscosidade dinâmica como 12,7 cp = 0,0127 N.s/m², para efeito de cálculos.

Assim, para acharmos a viscosidade cinemática, utilizaremos a equação 4.6, através da viscosidade absoluta e densidade:

$$V_{cinemática} = \frac{V_{absoluta}}{densidade} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

Neste sistema utilizaremos o aço soldado para tubos velhos, como já mencionado. Sendo sua rugosidade equivalente a 0,0024 m, conforme tabela 4.

Tabela 4: Valores de rugosidade na parede do tubo para diferentes materiais.

Valores de rugosidade na parede do tubo para diferentes materiais		
Material	K (m) - Tubos novos	K (m) - Tubos velhos
Aço galvanizado	0,00015 - 0,00020	0,0046
Aço rebitado	0,0010 - 0,0030	0,006
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	0,003
Vidro	Lisos	Lisos
Plástico	Lisos	Lisos

Fonte: Silva, 2003.

4.3.6 NÚMERO DE REYNOLDS (RE)

É preciso calcular o número de Reynolds para determinar o tipo de escoamento, se turbulento ou laminar. Neste momento, para a vazão de trabalho da bomba.

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

Sendo,

ρ Massa específica do fluido (kg/m^3);

V Velocidade do fluido (m/s);

D Diâmetro interno do tubo (m);

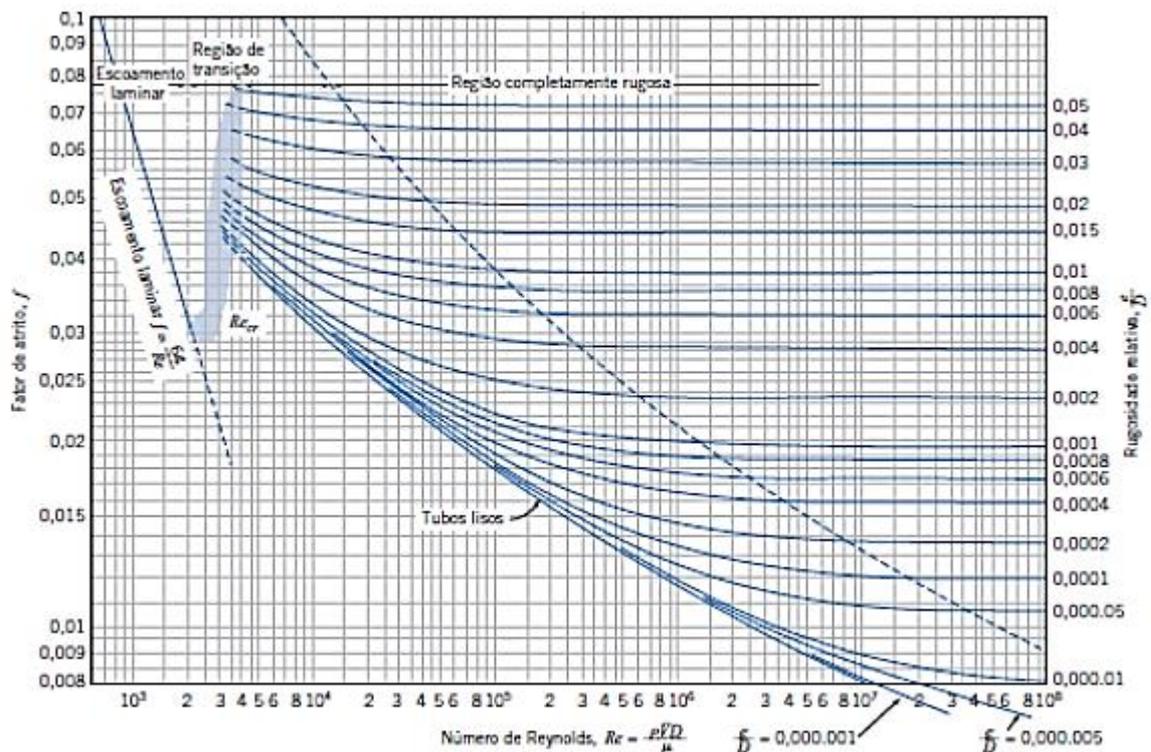
μ Viscosidade dinâmica ($\text{N}\cdot\text{s/m}^2$);

ν Viscosidade cinemática (m^2/s).

4.3.7 FATOR DE ATRITO (F)

O fator de atrito será determinado utilizando o Diagrama de Moody, como ilustra a figura 19, através do Número de Reynolds (Re) e da rugosidade relativa (e/D), sendo esta expressa em função da rugosidade do material e diâmetro adotado.

Figura 19: Diagrama de Moody.



Fonte: FOX, MCDONALD, PRITCHARD (2011).

4.3.8 PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA

A perda de carga distribuída é causada pelo atrito do fluido com as paredes da tubulação. Pode representar a maior perda de energia na tubulação e varia de acordo com o tipo de escoamento.

4.3.9 PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA NO ESCOAMENTO LAMINAR

Podemos calcular a perda de carga distribuída no escoamento laminar utilizando a equação de Darcy-Weisbach:

$$h_{fr} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (\text{Eq. 4.8})$$

Sendo, f o fator de atrito. Para o caso do escoamento laminar, o fator de atrito assume a forma, $f = \frac{64}{Re}$. E os demais:

L Comprimento da tubulação (m);

D Diâmetro interno do tubo (m);

V Velocidade do fluido (m/s);

g Gravidade (m/s²).

4.3.10 PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA NO ESCOAMENTO TURBULENTO

Da mesma forma que no escoamento laminar, podemos utilizar a equação 4.8, de Darcy-Weisbach para calcular a perda de carga distribuída no escoamento turbulento.

4.3.11 COMPRIMENTO EQUIVALENTE DOS ACESSÓRIOS, TRECHOS RETOS E PERDA DE CARGA TOTAL PARA VAZÃO DE TRABALHO

O comprimento equivalente dos acessórios representa a perda de carga expressada na forma de trecho reto. Essa correlação será feita com a ajuda da tabela 5, em função de cada tipo de acessório.

O cálculo da perda de carga localizada será feito pelo método do comprimento equivalente, equação 4.10, juntamente com o comprimento total de trecho reto, equação 4.9, assim conseguiremos determinar um valor, representado em metros, para a perda de carga encontrada. A partir disso, o somatório da perda de carga dos trechos retos com o do comprimento equivalente, expressa na equação 4.11, encontraremos a perda de carga total.

$$h_{fl} = f \frac{L_{reto} V^2}{D 2g} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

$$h_{fr} = f \frac{L_{equiv} V^2}{D 2g} \quad (\text{Eq. 4.10})$$

$$h_f = h_{fl} + h_{fr} \quad (\text{Eq. 4.11})$$

Onde L_{total} é a soma dos comprimentos de trecho reto mais a soma dos comprimentos equivalentes de cada acessório da tubulação. Os valores dos comprimentos equivalentes referentes a cada acessório podem ser encontrados na tabela 5.

Tabela 5: Comprimento equivalente dos acessórios.

Comprimento equivalente dos acessórios				
Diâmetro da tubulação	Acessório	Quantidade	Comprimento equivalente	Comprimento equivalente total (m)
2"	Curva 90°	4	1,1	4,4
2"	Válvula gaveta	1	0,4	0,4
2"	Tês	4	1,1	4,4
3"	Curva 90°	4	1,6	6,4
3"	Válvula gaveta	1	0,4	0,4
			Total	16

Fonte: Autor.

4.3.12 PERDA DE CARGA PARA OUTROS PONTOS DE VAZÃO

Serão determinados mais 2 pontos para a perda de carga em relação a vazão da linha, para que possamos encontrar a curva ideal do sistema, evitando um ponto aleatório que não represente a curva ideal.

4.3.13 CONSTRUÇÃO DA CURVA CARACTERÍSTICA

As curvas características serão construídas a partir da equação 4.12 para esse sistema de recalque, assim teremos a soma da altura manométrica com a perda de carga de cada ponto que foi adicionado e também será utilizado as vazões do sistema.

$$H = H_b + h_f \quad (\text{Eq. 4.12})$$

4.3.14 CÁLCULO DO NPSH DISPONÍVEL

O NPSH vai ser calculado com a equação 4.13:

$$NPSH_{disp} = h_{atm} - Z_s - h_{vp} - h_{fs} \quad (\text{Eq. 4.13})$$

Sendo,

h_{atm} – Pressão atmosférica em metros de coluna de água (mca);

Z_s – Altura geométrica de sucção (m);

h_{vp} – Pressão de vapor do líquido (mca);

h_{fs} – perda de carga na tubulação de sucção (m).

Na tabela 3 do anexo, podemos ver os valores da pressão atmosférica para determinadas altitudes e da pressão de vapor de soda para determinadas temperaturas.

O parâmetro que falta é a perda de carga na sucção da bomba. A perda de carga foi calculada considerando o caminho feito até a sucção da bomba da mesma maneira que foi calculada a perda de carga no recalque.

4.3.15 CÁLCULO DA POTÊNCIA ESTIMADA DO MOTOR ELÉTRICO

A potência estimada pelo motor na realidade deverá ser a potência consumida pela bomba. Na equação a seguir:

$$Pot_{cons} = \frac{\gamma QH}{75n} \quad (\text{Eq. 4.14})$$

Sendo,

Potcons potência consumida (KW);

γ Peso específico (N/m³);

Q Vazão (m³/h);

H Altura manométrica (m);

n Rendimento.

4.3.16 SELEÇÃO DO MODELO DE BOMBA

Utilizaremos o “ábaco de cobertura” do fabricante KSB para nos ajudar na seleção de modelo de bomba. Lembrando que as bombas KSB demonstraram um excelente desempenho e durabilidade na empresa estudada.

4.3.17 CÁLCULO DA POTÊNCIA ANUAL CONSUMIDA

Para encontramos o valor da potência anual consumida será utilizado a potência da bomba usada hoje pela quantidade de horas que esta mesma fica em operação no período de um ano, este valor será retirado do livro de ocorrências da Fibria Celulose S/A.

$$Pot_{Bba1} = Pot_1 \times \text{tempo de operação} \quad (\text{Eq. 4.15})$$

Sendo,

Pot_1 = Potência das bombas atuais (MW).

Para o novo modelo o cálculo será o mesmo.

$$Pot_{Bba2} = Pot_2 \times \text{tempo de operação} \quad (\text{Eq. 4.16})$$

Sendo,

Pot_2 = Potência das bombas atuais (MW).

4.3.18 GANHO ENERGÉTICO ANUAL

Resultado obtido, através da equação 4.17, que será a diferença de potência consumida entre as bombas atuais e as novas.

$$\Delta Pot = Pot_{Bba1} - Pot_{Bba2} \quad (\text{MW}) \quad (\text{Eq. 4.17})$$

Onde,

ΔPot = ganho energético anual.

4.3.19 ECONOMIA ENERGÉTICA FINANCEIRA

$$Economia = \Delta Pot \times Preço \text{ MWh} \quad (\text{R\$}) \quad (\text{Eq. 4.18})$$

4.3.20 PAYBACK

O payback é nada mais nada menos que o tempo de retorno exato necessário para a recuperação de um investimento inicial. Normalmente cada projeto tem seu prazo máximo de retorno financeiro, sendo assim, aceita-se o projeto sempre que o período payback for menor que o período máximo de aceitação do mesmo (BRANCO, 2002).

Para os cálculos, iremos considerar como ganho anual a média de custos gerados com manutenção para as bombas atuais, dados retirados do SAP da Fibria Celulose S/A. O investimento será o valor de aquisição para a bomba nova.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através de dados obtidos no manual de operação das plantas citadas e de medidores de vazões da área estudada, a vazão máxima de operação é de 5,2 m³/h de NaOH. Porém, como a produção pode variar, adotaremos para efeito de cálculo mais 2 valores. Seguiremos o seguinte roteiro:

Considerações:

- 1) O reservatório de sucção e os vasos de descargas são abertos, ou seja, consideramos carga de pressão igual a zero;
- 2) Como a vazão de alimentação do tanque é maior que a vazão recalçada pela bomba, o nível do tanque é considerado constante, logo a velocidade do fluido na saída do tanque é considerada zero;
- 3) A tubulação utilizada no sistema antigo será mantida, então o diâmetro da sucção (D_s) = 3" e o diâmetro do recalque (D_r) = 2", conforme a tabela 6, será utilizada para o referencial de diâmetro interno;
- 4) Fluido bombeado: Hidróxido de Sódio a 20°C, com densidade de 1350 kg/m³; viscosidade dinâmica de 0,0127 N.s/m²;

- Q_{total} : 5,2 m³/h
- Diâmetro de recalque (D_r)

Diâmetro interno para cálculo: $D_r = 52,48 \text{ mm} = 0,05248 \text{ m}$

- Diâmetro de sucção (D_s)

Diâmetro interno para cálculo: $D_s = 77,92 \text{ mm} = 0,07792 \text{ m}$

Tabela 6: Diâmetros para tubos.

Norm. Pol. (")	Diâmetro		Esp. Parede (mm)
	Ext. (mm)	Int. (mm)	
1/4"	13,7	9,22	2,24
		7,66	3,02
3/8"	17,1	12,48	2,31
		10,7	3,20
1/2"	21,3	15,76	2,77
		13,84	3,73
		11,74	4,78
		6,36	7,47
3/4"	26,7	20,96	2,87
		18,88	3,91
		15,58	5,56
		11,06	7,82
1"	33,4	26,64	3,38
		24,30	4,55
		20,70	6,35
		15,22	9,09
2"	60,3	52,48	3,91
		49,22	5,54
		42,82	8,74
		38,16	11,07
3"	88,9	77,92	5,49
		73,66	7,62
		66,64	11,13
		58,42	15,24
3.1/2"	101,6	90,12	5,74
		85,44	8,08

Fonte: www.açotubo.com.br

5.1 Alturas geométricas do sistema

Sucção: $z_s = 2,4 - 1$ (Nível do tanque – Nível da bomba)

$$z_s = 1,4 \text{ m}$$

Recalque: $z_d = 5,2 - 1$ (Nível de descarga – Nível da bomba)

$$z_d = 4,2 \text{ m}$$

5.2 Equação de Bernoulli para encontrar a perda de carga do sistema

$$z_s + \frac{V_s^2}{2g} + \frac{P_s}{\gamma} + H_b = z_d + \frac{V_d^2}{2g} + \frac{P_d}{\gamma} + h_f$$

Logicamente que a equação será usada imaginando a vazão total no ponto mais distante da linha de recalque para podermos garantir a eficiência do sistema.

Levando em conta as considerações:

$$z_s + H_b = z_d + \frac{V_d^2}{2g} + h_f$$

$$V_d = \frac{Q_d}{A_d} = \frac{1,45 \times 10^{-3}}{2,163 \times 10^{-3}} = 0,67 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$1,4 + H_b = 4,2 + \frac{0,67^2}{2,9,81} + h_f$$

$$H_b = 2,823 \text{ m} + h_f$$

5.3 Perda de carga do recalque

a) Número de Reynolds (Re)

$$D_{intrec} = 0,0525 \text{ m}$$

$$V = 0,67 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\rho = 1350 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\mu = 0,0127 \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2}$$

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{1350 \cdot 0,67 \cdot 0,0525}{0,0127} = 3739,075$$

Portanto, escoamento considerado transitório entre laminar e turbulento. Mas para efeito de cálculo, como o valor está próximo ao regime turbulento, será considerado este tipo de regime.

b) Fator de atrito

$$\text{Rugosidade do aço soldado – tubo velho} = 0,0024 \text{ m}$$

$$\frac{e}{D} = \frac{0,0024}{0,0525} = 0,0457$$

Após a observação do *Ábaco de Moody*, o fator de atrito determinado é $f = 0,09$.

c) Comprimento dos trechos retos, equivalentes dos acessórios

Através da tabela 5 de comprimento equivalente e o comprimento do trecho reto de 70 metros, utilizamos o método do comprimento equivalente. Utilizado, também, maior valor de velocidade.

$$h_{fl} = f \frac{L_{reto} V^2}{D \cdot 2g} = 0,09 \frac{70}{0,0525} \frac{0,67^2}{2 \cdot 9,81} = 2,75 \text{ m}$$

$$h_{fr} = f \frac{L_{equiv} V^2}{D \cdot 2g} = 0,09 \frac{16}{0,0525} \frac{0,67^2}{2 \cdot 9,81} = 0,63 \text{ m}$$

$$h_f = h_{fl} + h_{fr} = 2,75 + 0,63 = 3,4 \text{ m}$$

5.4 Altura manométrica da vazão do sistema

$$H = H_b + H_f$$

$$H = 3,4 + 2,8$$

$$H \cong 6,2 \text{ m}$$

5.5 Perdas de cargas para outros pontos de vazão

O mesmo procedimento que foi utilizado para encontrar a perda de carga na vazão de trabalho foi utilizado em outras vazões de serviço para estudo: 2 m³/h; 7,5 m³/h.

Ponto 1:

Tabela 7: Dados principais do ponto 1.

Ponto 1				
Q (m ³ /h)	V (m/s)	D (m)	Re	f
2	0,257	0,0525	1,4x10 ³	0,085

Fonte: Autor.

Tabela 8: Perda de Carga Total do ponto 1.

Perda de Carga			
Vazão (m ³ /h)	h _{fl}	h _{fr}	h _f
2	0,382	0,087	0,469

Fonte: Autor.

Ponto 2

Tabela 9: Dados principais do ponto 2.

Ponto 3				
Q (m ³ /h)	V (m/s)	D (m)	Re	<i>f</i>
7,5	0,963	0,0525	5,37x10 ³	0,09

Fonte: Autor.

Tabela 10: Perda de Carga Total do ponto 2.

Perda de Carga			
Vazão (m ³ /h)	h _{fl}	h _{fr}	h _f
7,5	5,67	1,296	6,97

Fonte: Autor.

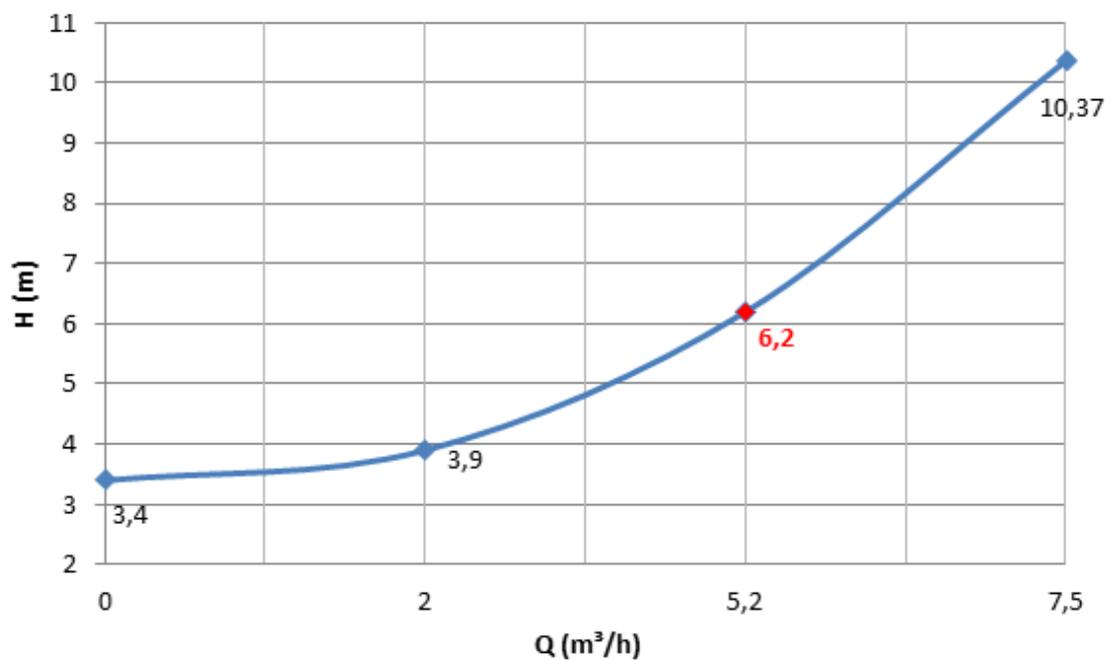
5.6 Construção da curva característica do sistema

Esse sistema de recalque possui curvas características que foram construídas a partir da equação (4.11).

A construção dessas curvas será realizada em função da somatória da altura geométrica encontrada na equação de Bernoulli com as perdas de cargas relativas às vazões determinadas, incluindo o ponto onde $Q=0$.

Temos a seguinte curva (Gráfico 2):

Gráfico 2: Curva característica do sistema de recalque.



Fonte: Autor.

Conforme mencionado anteriormente, o ponto selecionado será:

$$Q = 5,2 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$H = 6,2 \text{ m}$$

5.7 Cálculo do NPSH disponível

$$h_{atm} = 10,2 \text{ mca}$$

$$h_{vp} = 0,2 \text{ mca}$$

$$V_{suc} = 0,304 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$h_{fl} = f \frac{L_{reto} V^2}{D \cdot 2g} = 0,09 \frac{3}{0,07792} \frac{0,304^2}{2 \cdot 9,81} = 0,016 \text{ m}$$

$$h_{fr} = f \frac{L_{equiv} V^2}{D \cdot 2g} = 0,09 \frac{7}{0,07792} \frac{0,304^2}{2 \cdot 9,81} = 0,038 \text{ m}$$

$$h_{fs} = h_{fl} + h_{fr} = 0,02 + 0,06 = 0,054 \text{ m}$$

$$NPSH_{disp} = h_{atm} + Z_s - h_{vp} - h_{fs} = 10,2 - 1,4 - 0,2 - 0,08 = 8,54 \text{ m}$$

Considerando uma margem de 0,6 metros, conforme a equação 4.12:

$$NPSH_{disp} = 9,1 \text{ m}$$

5.8 Potência estimada do motor elétrico

$$\gamma = 1350 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3}$$

$$Pot_{cons} = 0,25 \text{ CV}$$

Considerando uma folga de 25% para o motor elétrico, temos:

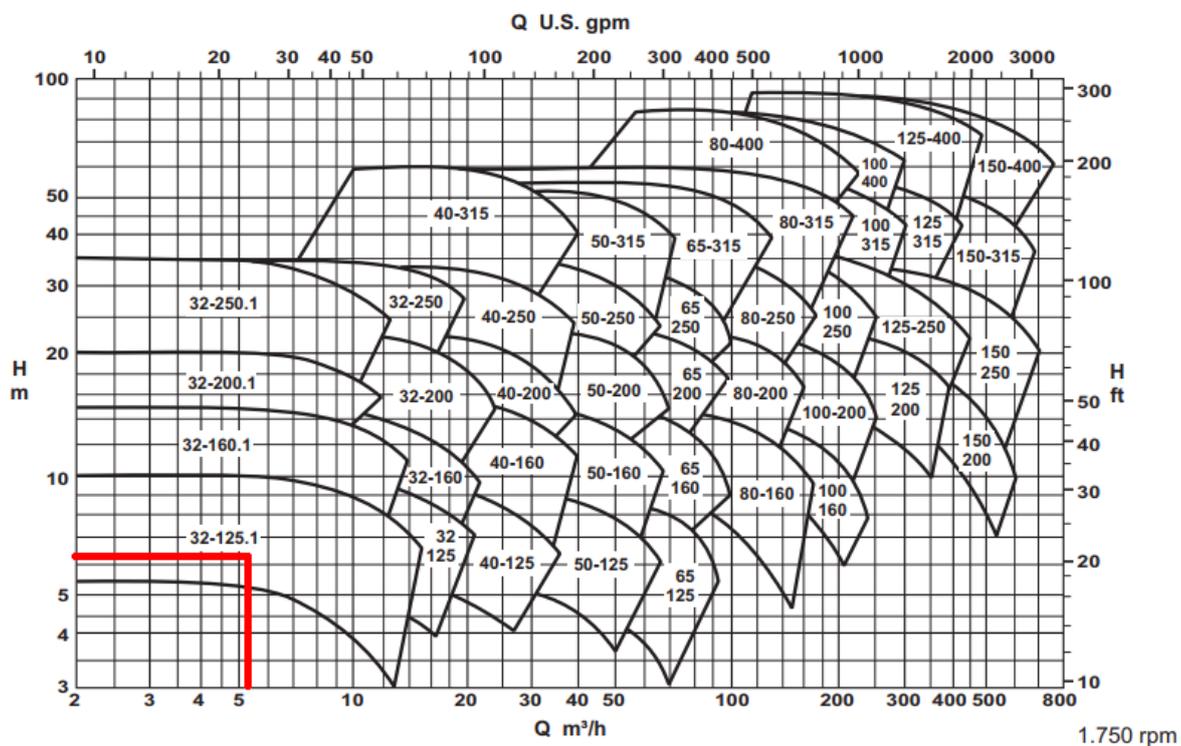
$$Pot_{min} = Pot_{cons} \cdot 1,25 = 0,3 \text{ CV}$$

O motor deverá ter uma potência aproximada de 0,3 CV.

5.9 Seleção do modelo de bomba e resultados

Levando em consideração o “ábaco de cobertura” do fabricante de bombas KSB, visto na figura 20, poderemos verificar as características técnicas (diâmetro do impelidor, NPSH, potência consumida e outros).

Figura 20: Ábaco de cobertura.



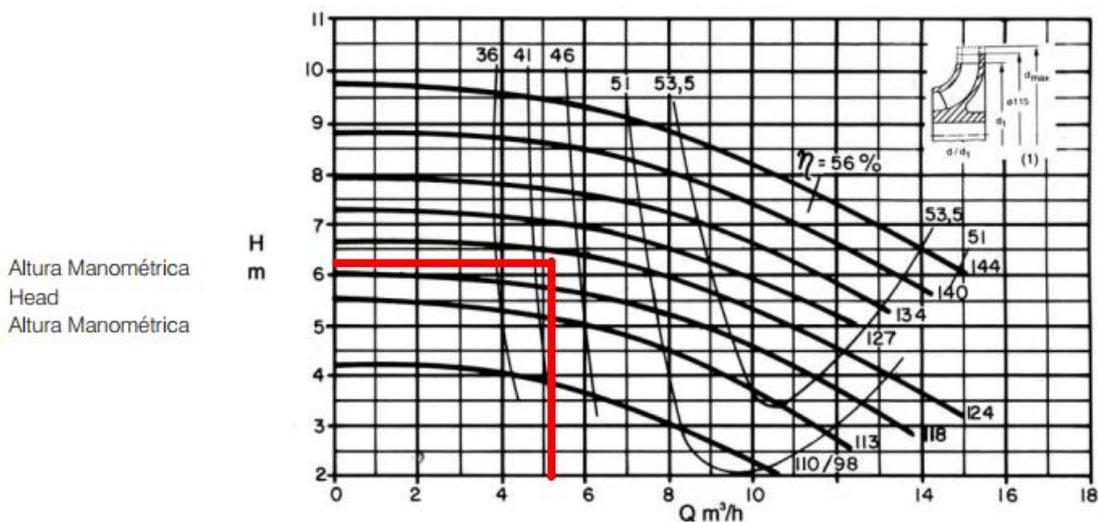
Fonte: KSB.

Tendo em vista os valores calculados, utilizamos a figura 20 para definir o modelo de bomba melhor utilizado. Neste projeto utilizaremos o modelo 32-125.1 do fabricante KSB, que tem como linha Megachem, que é recomendada para bombeamento de fluidos com características agressivas, como é o caso do produto químico concentrado.

Após selecionarmos o modelo e linha, no gráfico 3 conseguiremos determinar o melhor diâmetro para impelidor.

Gráfico 3: Dados técnicos.

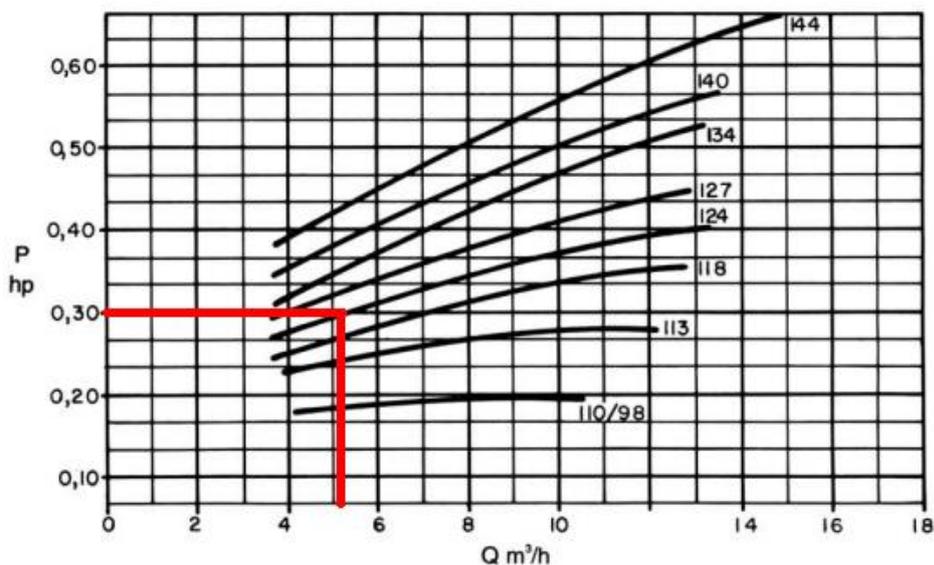
Bomba Tipo Pump Type Tipo de Bomba	KSB MEGANORM KSB MEGACHEM KSB MEGACHEM V	Tamanho Size Tamaño	32-125.1	
Oferta nº Project - No. Oferta - nº	Item nº Item - No. Pos - nº	Velocidade Nominal Nom. Rotative Speed Velocidad Nominal	1750 rpm	



Fonte: KSB.

Conforme traçado no gráfico 4, será utilizado o impelidor com diâmetro de 123 mm.

Gráfico 4: Dados técnicos para escolha do impelidor.



Fonte: KSB.

Porém, seguiremos a tabela de potência do fabricante, utilizando enfim o diâmetro de 124 mm, para melhor se adequar aos cálculos.

5.10 Alteração da rotação da bomba

Utilizaremos um inversor de frequência para determinar a rotação necessária para as vazões de serviço.

5.10.1 CÁLCULO DA POTÊNCIA MECÂNICA ATRAVÉS DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Através da regra da semelhança, temos que:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{Q_1}{Q_2} \quad (\text{Eq. 6.1})$$

$$\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 = \frac{H_1}{H_2} \quad (\text{Eq. 6.2})$$

$$\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 = \frac{P_1}{P_2} \quad (\text{Eq. 6.3})$$

Onde,

n_1 = rotação com valores de Q_1 e H_1 existentes;

n_2 = nova rotação (rpm);

Q_1 = vazão na rotação conhecida (m^3/h);

H_1 = altura na rotação conhecida (m);

Q_2 = vazão na nova rotação (m^3/h);

H_2 = altura na nova rotação (m);

P_1 = potência mecânica requerida na rotação conhecida (CV);

P_2 = potência mecânica requerida na nova rotação (CV).

Para achar a nova rotação, será utilizado a equação 6.1:

$$\frac{1750}{n_2} = \frac{5,2}{2}$$

$$n_2 = 673,1 \text{ RPM.}$$

Através da equação 6.2, encontra-se a nova perda de carga:

$$\left(\frac{1750}{673,1}\right)^2 = \frac{6,2}{H_2}$$

$$H_2 = 0,92\text{m.}$$

E por fim, através da equação 6.3, a nova potência consumida:

$$\left(\frac{1750}{673,1}\right)^3 = \frac{0,3}{P_2}$$

$$P_2 = 0,017 \text{ CV.}$$

Analogamente, elaboramos a tabela 11 com todos valores de potência mecânica consumida por sistemas operados com inversores de frequência.

Tabela 11: Dados calculados (método inversor de frequência).

Dados calculados				
Ponto	Q (m ³ /h)	H (m)	n (rpm)	P (CV)
1	2	3,9	673,1	0,017
2	5,2	6,2	1750	0,3
3	7,5	10,37	2524	0,9

Fonte: Autor.

Entretanto, como a vazão máxima utilizada no sistema é de 5,2 m³/h, desprezaremos a vazão de 7,5 m³/h que foi utilizado para construção da curva do sistema. Assim, a rotação máxima da bomba será a de projeto: 1750 rpm.

5.11 Cálculo da potência anual consumida e ganho energético

Utilizando as equações (4.15) e (4.16) conseguiremos determinar a potência anual consumida da bomba existente e do modelo proposto e através da equação (4.17) a economia. Utilizando um modelo de motor comercial de 0,5 CV, já que a saída da linha terá ajuste de vazão.

$$Pot_{Bba1} = 2208 W \times 1100 h/ano$$

$$Pot_{Bba1} = 2429 kWh/ano$$

$$Pot_{Bba2} = 368 W \times 1100 h/ano$$

$$Pot_{Bba2} = 405 kWh/ano$$

$$\Delta Pot = 2024 kW/ano$$

5.12 Análise da economia e custo no ano

Levando em consideração o valor da energia vendida pela empresa, de acordo com a EBC – Agencia Brasil (2017), para a concessionária, teremos uma economia (equação 4.18), somente com energia em um ano de:

$$Economia = 2,024 \times 488$$

$$Economia = 988 reais/ano$$

Caso a proposta seja aprovada e, o serviço seja realizado pelo próprio pessoal da empresa, com mão de obra da própria equipe de manutenção. Este custo foi estimado por um especialista na área de manutenção mecânica do setor de utilidades e a bomba cotada com um fornecedor da KSB, que será:

$$Custo = R\$ 20.000,00$$

5.13 Payback

O payback foi realizado utilizando como ganho anual o custo médio de manutenção gerado pelas bombas atuais, através disso foi realizado a conversão para obtenção do ganho mensal, valor este que será utilizado para determinar em quantos meses será obtido retorno do investimento realizado.

Tabela 12: Investimento e ganho do projeto.

INVESTIMENTO, GANHO MENSAL E ANUAL			
	Ganho ao ano	Ganho ao mês	Investimento/Custo
R\$	11.600,00	964,00	20.000,00

Fonte: Autor.

Considerando o investimento inicial de R\$ 20.000,00 e um ganho anual sobre a implantação das bombas de R\$ 11.600 calcula-se o ganho mensal (tabela 12). Para assim poder calcular em quanto tempo o dinheiro investido no projeto terá retorno para a empresa (tabela 13).

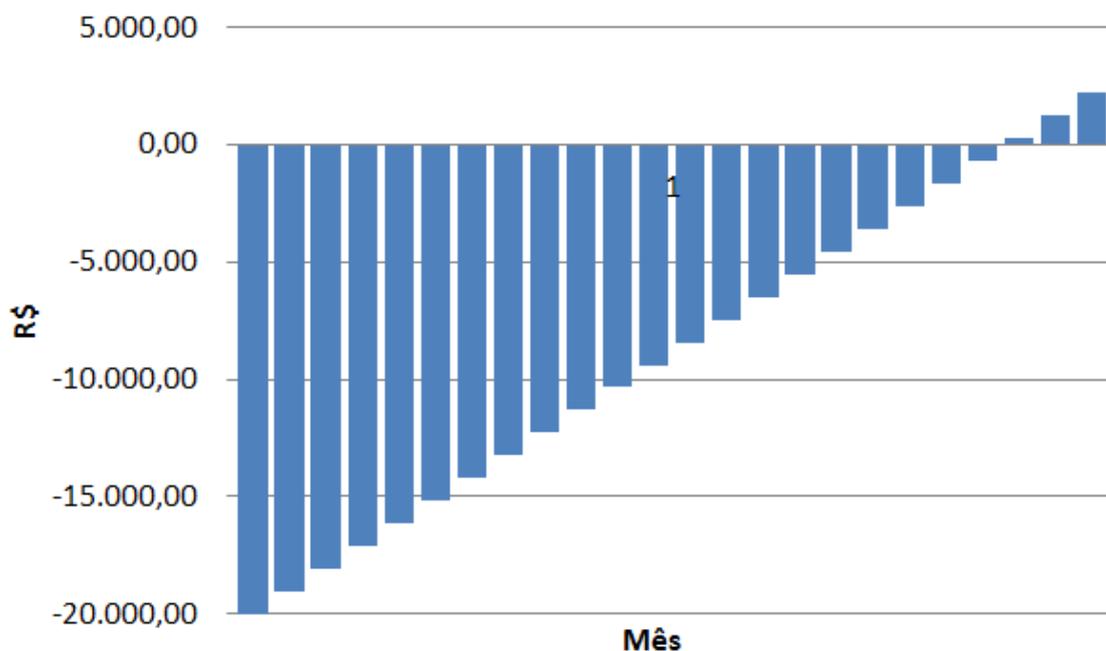
A tabela 13 e o gráfico 5 ilustram que o projeto será pago após o 22º mês de implantação da melhoria.

Tabela 13: Cálculo do payback.

	1° Mês	2° Mês	3° Mês	4° Mês	5° Mês	6° Mês
Ganho	0	964,00	964,00	964,00	964,00	964,00
Despesa	-20.000,00	0	0	0	0	0
Saldo	-20.000,00	-19.036,00	-18.072,00	-17.108,00	-16.144,00	-15.180,00
	7° Mês	8° Mês	9° Mês	10° Mês	11° Mês	12° Mês
Ganho	964,00	964,00	964,00	964,00	964,00	964,00
Despesa	0	0	0	0	0	0
Saldo	-14.216,00	-13.252,00	-12.288,00	-11.324,00	-10.360,00	-9.396,00
	13° Mês	14° Mês	15° Mês	16° Mês	17° Mês	18° Mês
Ganho	964,00	964,00	964,00	964,00	964,00	964,00
Despesa	0	0	0	0	0	0
Saldo	-8.432,00	-7.468,00	-6.504,00	-5.540,00	-4.576,00	-3.612,00
	19° Mês	20° Mês	21° Mês	22° Mês	23° Mês	24° Mês
Ganho	964,00	964,00	964,00	964,00	964,00	964,00
Despesa	0	0	0	0	0	0
Saldo	-2.648,00	-1.684,00	-720,00	244,00	1.208,00	2.172,00

Fonte: Autor.

Gráfico 5: Payback.



Fonte: Autor.

6 CONCLUSÃO

Abordamos em nosso trabalho todo o estudo e análise envolvendo a substituição das bombas de deslocamento positivo por bombas centrífugas e concluímos que é viável a substituição pois irá atender de forma eficiente, alta disponibilidade e alta confiabilidade o sistema.

Mediante os resultados e discussões apresentadas foi evidenciado a viabilidade do estudo de caso e a substituição das bombas de deslocamento positivo por bombas centrífugas resultará em ganhos operacionais e também ganhos em custo de manutenção.

A bomba proposta será suficiente para atender o sistema na etapa de regeneração das resinas pois apresenta uma baixa perda de carga, baixo consumo de energia e rápido retorno financeiro após sua implantação.

A utilização do inversor de frequência proporcionará ao sistema a flexibilidade de efetuar as regenerações de um, dois, três ou quatro vasos. Sendo considerado a regeneração de quatro vasos de resina o pior caso e também a máxima disponibilidade operacional de regeneração das plantas de tratamento de água para caldeiras da Fibria Celulose S/A.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Redimensionar o projeto de tubulações de recalque do sistema atual;
- Dimensionar sistema de bombeamento para Ácido Clorídrico;

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FOX, Robert W.; PRITCHARD, Philip J; MCDONALD, Alan T. **Introdução a Mecânica dos Fluidos**. 7^o ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

TOUMA, S. Lima. **Testes acelerados em colunas de pequena escala: o uso do carvão ativado granular em projetos de reuso de efluentes de refinarias de petróleo**. Rio de Janeiro, 2013

DOS SANTOS, E. Guedes. **Análise da Substituição das Resinas de Troca Iônica em uma Estação de Desmineralização de Águas**. 72 f. Monografia (Bacharel em Engenharia de Produção). Universidade do Planalto Catarinense, Lages, 2013.

CUNHA, O. A. Alves da. **Resinas de Troca Iônica. IBP-Tratamento D'água para fins industriais-Resinas de Troca Iônica**. São Paulo, SP, 2006.

MACINTYRE, J. A., **Bombas e Instalações de bombeamento**. 2^a Edição. Editora LTC, 1997.

MATTOS, E. E. e FALCO, R. **Bombas Industriais**, 2^a Edição. Editora Interciência, 1998.

MONACHESI, Marcelo G.; **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento**; pp. 63-80, Junho, 2005.

TSUTIYA, Milton T. **Abastecimento de água**. 1. ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

Purolite, disponível em <http://purolite.com.br/aplicacoes/desmineralizacao.asp>. Acesso em 04/05/2017

OMEL, disponível em <http://www.omel.com.br/artigos-tecnicos/escola-de-bombas/centrifugas/npsh-e-cavitacao/> acesso em 30/05/2017

LIMA, E.P.C., **Mecânica das bombas**, 2^a edição. Editora Interciência, 2003.

SILVA, N. F., **Bombas alternativas industriais**, Editora Interciência, 2007.

CARVALHO, D.F., **Instalações elevatórias. Bombas**, 6 edição. Belo Horizonte: Grafica Fumarc, 1999.

KARASSIK, I.J. **Engineers' guide to centrifugal pumps**, McGraw-Hill book company, 1984.

DA SILVA, MARCOS A., **Manual de Treinamento KSB - Seleção e Aplicação de Bombas Centrífugas**, 5ª Ed., 2003.

BOMBAS, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – Departamento de Engenharia Mecânica.

FIBRIA CELULOSE, **Manual treinamento desmineralização e osmose reversa**.

BRANCO, A. C. C. **Matemática Financeira Aplicada: Método algébrico**, HP-120, Microsoft Excel. São Paulo. Pioneira Thomson Learning, 2002.

ANEXO I



Tel 55 27 3270 2122

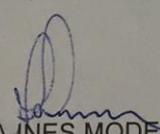
Fibria
Rod Aracruz-Barra do Riacho Km 25
29197 900 | Aracruz ES | Brasil
www.fibria.com.br

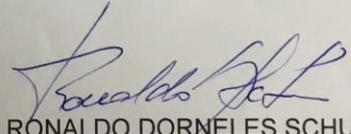
DECLARAÇÃO

Declaramos para os devidos fins que a Fibria Celulose S/A autoriza os empregados JAUBER SIMÕES GASPARINI, JONATHAN CARLO RUI GIACOMIN E MOISÉS DE JESUS NUNES a utilizarem as informações e dados referentes ao sistema de bombeamento de Hidróxido de sódio da área da Desmi/Osmose do setor de Recuperação e Utilidades da Unidade Aracruz, para defesa do Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica realizado pelos mesmos na FAACZ - Faculdades Integradas de Aracruz, cujo o tema é:

- Substituição de bombas de deslocamento positivo por bombas centrífugas para o processo de regeneração em vasos de troca iônica – estudo de caso.

Aracruz (ES), 30 de novembro de 2017.


MARIA INES MODENEZE RECLA
Fibria Celulose S/A
DHO / Centro de Atendimento


RONALDO DORNELES SCHUSTER
Fibria Celulose S/A
Gerente Recup e Utilidades