



PROJETO DE CIRCUITO HIDRÁULICO PARA ESTAÇÃO DE ÁGUA DESMINERALIZADA DE UMA USINA NUCLEAR

Ronaldo Fonseca Junior

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador:

Prof. Armando Carlos de Pina Filho; D.Sc.

Rio de Janeiro

Junho de 2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DEM/POLITÉCNICA/UFRJ



**PROJETO DE CIRCUITO HIDRÁULICO PARA ESTAÇÃO DE ÁGUA
DESMINERALIZADA DE UMA USINA NUCLEAR**

Ronaldo Fonseca Junior

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado por:

Prof. Armando Carlos de Pina Filho; D.Sc.

Prof. Vitor Ferreira Romano; Dott. Ric.

Prof. Fernando Pereira Duda; D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

JUNHO DE 2021

Fonseca Junior, Ronaldo.

Projeto de Circuito Hidráulico para Estação de Água Desmineralizada de uma Usina Nuclear / Ronaldo Fonseca Junior – Rio de Janeiro: UFRJ / ESCOLA POLITÉCNICA, 2021.

XIII, 78 p.: il.; 29,7 cm

Orientador: Armando Carlos de Pina Filho

Projeto de Graduação – UFRJ / Escola Politécnica / Curso de Engenharia Mecânica, 2021.

Referências Bibliográficas: p. 78.

1. Introdução. 2. Revisão Bibliográfica. 3. Descrição e Análise dos Circuitos Hidráulicos 4. Escolha do Material para a Tubulação. 5. Definição do Tipo de Vedação da Bomba. 6. Seleção da Bomba 7. Especificação das Válvulas 8. Conclusões. 9. Referências Bibliográficas I. De Pina Filho, Armando Carlos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Mecânica. III. Projeto de um Circuito Hidráulico para Estação de Água Desmineralizada de uma Usina Nuclear.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, Carmem Lucia da Costa Campos, por todo o suporte e ensinamentos passados todos os dias. Você é minha base e minha maior inspiração de vida. Esta conquista também é sua.

Aos meus amigos que fiz no intercâmbio, especialmente Julien Duverger, Patrick Boyer e todos os alunos que conheci do INSA de Lyon, que me acolheram e me proporcionaram uma experiência única.

Aos meus amigos da Engenharia Mecânica UFRJ, que me ajudaram a construir esta jornada e me incentivaram nos momentos mais difíceis.

Aos meus amigos do futsal – Atlético Engenharia UFRJ, que me inspiram a ter um amor ainda maior pelo esporte e pela faculdade, além de todos os títulos que conquistamos dentro das quatro linhas.

Ao professor Armando Carlos de Pina Filho, por toda orientação durante este processo. Seus ensinamentos serão levados por toda a vida.

Agradeço também a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação, tanto pessoal quanto acadêmica. Muito obrigado.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica / UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Projeto de Circuito Hidráulico para Estação de Água Desmineralizada de uma Usina Nuclear

Ronaldo Fonseca Junior

Junho/2021

Orientador: Armando Carlos de Pina Filho

Curso: Engenharia Mecânica

Os circuitos hidráulicos e seus componentes (bombas, válvulas, tubulações, etc.) possuem um papel fundamental nos setores industriais e petrolíferos. Uma vez que haja necessidade de transporte de um determinado fluido, esse sistema é empregado para visualizar e controlar os equipamentos e, posteriormente, realizar os cálculos de carga, velocidade do escoamento, dentre outras coisas. O objetivo deste trabalho é apresentar cada etapa do projeto de circuito hidráulico para uma usina nuclear, detalhando os cálculos por meio de equações matemáticas e com auxílio de planilhas Excel. Os resultados foram satisfatórios porque foi possível projetar um sistema que atendesse os requisitos de operação.

Palavras-chave: Circuito Hidráulico, Bomba, Resinas, Usina Nuclear e Escoamento.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Mechanical Engineer.

Project of a Hydraulic Circuit for a Demineralised Water Station of a Nuclear Plant

Ronaldo Fonseca Junior

Junho/2021

Advisor: Armando Carlos de Pina Filho

Course: Mechanical Engineering

Hydraulic circuits and their components (pumps, valves, piping, etc.) have a fundamental role in Industrial and oil sectors. Once there is a need to transport a certain fluid, this system is used to view and control the equipment and, subsequently, perform the load calculations, flow velocity, among other things. The objective of this work is to present each stage of the hydraulic circuit design for a nuclear power plant, detailing the calculations by means of mathematical equations and with the aid of excel spreadsheets. The results were satisfactory because it was possible to design a system that met the operating requirements.

Keywords: Hydraulic Circuit, pump, resins, nuclear plant and flow.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Princípio de Funcionamento de um Reator de Água Pressurizada (RAP).....	1
1.2 Circuito primário.....	2
1.3 Circuito secundário.....	3
1.4 Circuito terciário.....	4
1.5 Estação de Tratamento de Água Desmineralizada.....	4
1.5.1 Decantação e Descarbonização.....	5
1.5.2 Filtração.....	6
1.5.3 Desmineralização.....	6
1.6 Objetivo.....	7
1.7 Organização do Projeto.....	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1 Propriedade dos Fluidos.....	9
2.1.1 Massa Específica.....	9
2.1.2 Peso Específico.....	9
2.1.3 Viscosidade Absoluta.....	9
2.1.4 Pressão de Vapor.....	9
2.2 Escoamento de Fluidos em Tubulações.....	10
2.2.1 Classificação do Escoamento.....	10
2.2.2 Número de Reynolds.....	11
2.2.3 Teorema de Bernoulli.....	11
2.2.4 Perda de Carga.....	12
2.3 Características de um Sistema Hidráulico.....	16
2.3.1 Altura Manométrica de Sucção.....	17
2.3.2 Altura Manométrica de Descarga.....	17
2.3.3 Altura Manométrica Total.....	17
2.3.4 Curva Característica do Sistema.....	17
2.3.5 NPSH Disponível.....	18
2.4 Bombas.....	18
2.4.1 Tipo de Bombas.....	19
2.4.2 Curva de Carga (H) x Vazão (Q).....	20
2.4.3 Curva de Potência Absorvida ($P_{\text{Pot}_{\text{abs}}}$) x Vazão (Q).....	21

2.4.4	Curva de Eficiência (η) x Vazão (Q).....	21
2.4.5	Correção das Curvas Características para Líquido Viscoso.....	22
2.4.6	Cavitação.....	24
2.4.6.1	Descrição do Fenômeno.....	24
2.4.6.2	Consequências.....	25
2.4.7	NPSH Requerido.....	25
3.	DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS CIRCUITOS HIDRÁULICOS.....	27
3.1	Modelo de Cálculo para o Circuito Hidráulico do Ácido Sulfúrico.....	28
3.1.1	Propriedade do Fluido.....	28
3.1.2	Linhas de Sucção e Descarga.....	28
3.1.3	Altura Manométrica de Sucção.....	28
3.1.3.1	Altura Estática de Sucção.....	28
3.1.3.2	Pressão Manométrica no Reservatório de Sucção.....	29
3.1.3.3	Peso Específico.....	29
3.1.3.4	Perda de Carga na Linha e Acessórios de Sucção.....	29
3.1.4	Altura Manométrica de Descarga.....	30
3.1.4.1	Altura Estática de Descarga.....	30
3.1.4.2	Pressão Manométrica no Reservatório de Descarga.....	31
3.1.4.3	Perda de Carga na Linha e Acessório de Descarga.....	31
3.1.5	Altura Manométrica do Sistema.....	32
3.1.6	Curva Característica do Sistema.....	32
3.1.7	Cálculo do NPSH Disponível.....	33
3.2	Modelo de Cálculo para o Circuito Hidráulico do Hidróxido de Sódio.....	34
3.2.1	Propriedades do Fluido.....	34
3.2.2	Linhas de Sucção e Descarga.....	35
3.2.3	Altura Manométrica de Sucção.....	35
3.2.3.1	Altura Estática de Sucção.....	35
3.2.3.2	Pressão Manométrica no Reservatório de Sucção.....	35
3.2.3.3	Peso Específico.....	35
3.2.3.4	Perda de Carga na Linha e Acessório de Sucção.....	36
3.2.4	Altura Manométrica de Descarga.....	37
3.2.4.1	Altura Estática de Descarga.....	37
3.2.4.2	Pressão Manométrica no Reservatório de Descarga.....	37
3.2.4.3	Perda de Carga na Linha e Acessório de Descarga.....	37

3.2.5	Altura Manométrica do Sistema.....	39
3.2.6	Curva Característica do Sistema.....	39
3.2.7	Cálculo do NPSH Disponível.....	40
4.	ESCOLHA DO MATERIAL PARA A TUBULAÇÃO.....	42
4.1	Aço Carbono com Revestimento.....	43
4.2	Aço Inoxidável.....	44
4.3	Polímeros.....	45
4.4	Definição do Material.....	46
5.	DEFINIÇÃO DO TIPO DE VEDAÇÃO DA BOMBA.....	48
5.1	Selo Mecânico.....	48
5.1.1	Principais Características.....	49
5.1.2	Princípio de Funcionamento.....	50
5.2	Acoplamento Magnético.....	50
5.2.1	Principais Características.....	50
5.2.2	Princípio de Funcionamento.....	51
5.3	Escolha do Tipo de Bomba.....	52
6.	SELEÇÃO DA BOMBA.....	54
6.1	Seleção de uma Bomba para o Circuito Hidráulico Ácido Sulfúrico.....	54
6.1.1	Fornecedor March Pump.....	54
6.1.1.1	Eficiência.....	56
6.1.1.2	Ponto de Operação.....	57
6.1.1.3	Ocorrência de Cavitação.....	58
6.1.2	Fornecedor Gemme Cotti.....	59
6.1.2.1	Eficiência.....	60
6.1.2.2	Ponto de Operação.....	62
6.1.2.3	Ocorrência de Cavitação.....	63
6.2	Seleção de uma Bomba para o Circuito Hidráulico Hidróxido de Sódio.....	64
6.2.1	Fornecedor March Pump.....	64
6.2.1.1	Eficiência.....	66
6.2.1.2	Ponto de Operação.....	67
6.2.1.3	Ocorrência de Cavitação.....	68
6.2.2	Fornecedor Gemme Cotti.....	69
6.2.2.1	Eficiência.....	71
6.2.2.2	Ponto de Operação.....	72

6.2.2.3 Ocorrência de Cavitação.....	74
7. ESPECIFICAÇÃO DAS VÁLVULAS.....	75
7.1 Válvula de Gaveta.....	75
7.2 Válvula de Retenção.....	76
8. CONCLUSÃO.....	77
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Fissão Nuclear ^[2]	1
Figura 1-2: Circuito primário e secundário ^[3]	2
Figura 1-3: Turbina – Gerador Elétrico ^[4]	3
Figura 1-4: Circuito primário, secundário e terciário ^[5]	4
Figura 1-5: Estação de Tratamento de Água Desmineralizada.....	5
Figura 2-1: Pressão de vapor ^[1]	10
Figura 2-2: Esboço de uma curva característica do sistema ^[1]	18
Figura 2-3: Classificação dos principais tipos de bombas ^[1]	19
Figura 2-4: Carcaça em voluta (à esquerda) e carcaça em difusor (à direita) ^[1]	20
Figura 2-5: Curva de carga <i>versus</i> vazão para diferentes diâmetros do impelidor ^[1]	20
Figura 2-6: Curva genérica de potência <i>versus</i> vazão ^[1]	21
Figura 2-7: Curva genérica de rendimento da bomba ^[1]	22
Figura 2-8: Gráfico dos fatores de correção ^[1]	23
Figura 2-9: Três situações características do colapso da bolha ^[1]	25
Figura 2-10: Curva genérica de NPSHr <i>versus</i> vazão ^[1]	26
Figura 3-1: Esboço do sistema hidráulico estudado.....	27
Figura 3-2: Curva do sistema para o circuito do ácido sulfúrico.....	33
Figura 3-3: Gráfico do NPSH disponível do circuito ácido sulfúrico.....	34
Figura 3-4: Curva do sistema para o circuito do hidróxido de sódio.....	40
Figura 3-5: Curva do NPSH disponível para o circuito hidróxido de sódio.....	41
Figura 4-1: Corrosão (ferrugem) de tubulações e juntas ^[6]	43
Figura 4-2: Estrutura molecular do PVDF ^[7]	45
Figura 5-1: Caixa de gaxeta ^[8]	48
Figura 5-2: Caixa de selagem com montagem interna (a esquerda) e caixa de selagem com montagem externa (à direita) ^[1]	49
Figura 5-3: Filme lubrificante ^[9]	50
Figura 5-4: Componentes de uma bomba magnética ^[10]	51
Figura 5-5: Rotores acoplados magneticamente ^[11]	52
Figura 6-1: Curvas características da bomba magnética March Pump ^[12]	55

Figura 6-2: Eficiência da bomba TE – 5.5k – 2.812.DIA.....	56
Figura 6-3: Eficiência da bomba com indicação da faixa ideal de operação em vermelho.....	57
Figura 6-4: Ponto de operação para o fornecedor March Pump.....	58
Figura 6-5: Gráfico para verificar ocorrência de cavitação para o fornecedor March Pump.....	59
Figura 6-6: Curva característica da bomba do fornecedor Gemme Cotti ^[13]	60
Figura 6-7: Gráfico de eficiência da bomba HTM 10 – D85.....	61
Figura 6-8: Gráfico de eficiência da bomba com a marcação da faixa ideal de operação em vermelho.....	62
Figura 6-9: Ponto de operação para o fornecedor Gemme Cotti.....	63
Figura 6-10: Gráfico para a verificação de cavitação pelo fornecedor Gemme Cotti.....	64
Figura 6-11: Curvas características da bomba do fornecedor March Pump para hidróxido de sódio ^[12]	65
Figura 6-12: Eficiência da bomba TE – 5.5K – 2.937 DIA.....	66
Figura 6-13: Curva de eficiência da bomba TE – 5.5K – 2.937 DIA com faixa de operação em vermelho.....	67
Figura 6-14: Ponto de operação para fornecedor March Pump.....	68
Figura 6-15: Gráfico para análise de cavitação para fornecedor March Pump.....	68
Figura 6-16: Curvas características da bomba para o fornecedor Gemme Cotti ^[13]	70
Figura 6-17: Curva de eficiência da bomba HTM 15 – D90.....	71
Figura 6-18: Curva de eficiência da bomba HTM 15 – D90 com faixa ideal de operação em vermelho.....	72
Figura 6-19: Ponto de operação para o fornecedor Gemme Cotti.....	73
Figura 6-20: Gráfico para análise de cavitação para o fornecedor Gemme Cotti.....	74
Figura 7-1: Válvula de Gaveta ^[15]	75
Figura 7-2: Válvula de Retenção.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Comprimento equivalente para entrada e saída da tubulação ^[1]	13
Tabela 2-2: Comprimento equivalente para reduções e ampliações de diâmetro da tubulação ^[1]	13
Tabela 2-3: Comprimento equivalente para válvulas na tubulação ^[1]	14
Tabela 2-4: Comprimento equivalente para joelhos, curvas e T's na tubulação ^[1]	15
Tabela 2-5: Fatores de correção para os circuitos hidráulicos.....	24
Tabela 3-1: Propriedades do ácido sulfúrico.....	28
Tabela 3-2: Vazão e diâmetro na sucção.....	28
Tabela 3-3: Perdas de carga na linha de sucção.....	29
Tabela 3-4: Perda de carga na linha de descarga.....	31
Tabela 3-5: Vazão e Head do sistema.....	33
Tabela 3-6: Valores para o cálculo do NPSH disponível.....	33
Tabela 3-7: Vazão e NPSH disponível.....	34
Tabela 3-8: Propriedades do hidróxido de sódio.....	35
Tabela 3-9: Vazão e diâmetro do circuito hidróxido de sódio.....	35
Tabela 3-10: Perda de carga na linha de sucção.....	36
Tabela 3-11: Perda de carga na linha de descarga.....	38
Tabela 3-12: Vazões associadas aos heads do sistema.....	39
Tabela 3-13: Valores para o cálculo do NPSH disponível.....	40
Tabela 3-14: Valores de vazão e NPSH disponível.....	40

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho possui como motivação a aplicação para uma usina nuclear. Com isso, neste capítulo será explicado o seu princípio de funcionamento e seus circuitos primário, secundário e terciário. A estação de água desmineralizada da usina será identificada e descrita, bem como o circuito com as resinas utilizado no projeto.

1.1 Princípio de Funcionamento de um Reator de Água Pressurizada (RAP)

Uma central nuclear possui vários circuitos para se proteger dos riscos associados a esse tipo de instalação. De fato, é a fissão nuclear que fornece o calor necessário para produção de energia; os átomos de urânio enriquecido são submetidos a um fluxo de nêutrons no interior do reator. No entanto, produtos fortemente ionizados e perigosos para a saúde humana e o meio ambiente também são obtidos como resultado dessa fissão. A figura 1-1 ilustra esse procedimento.

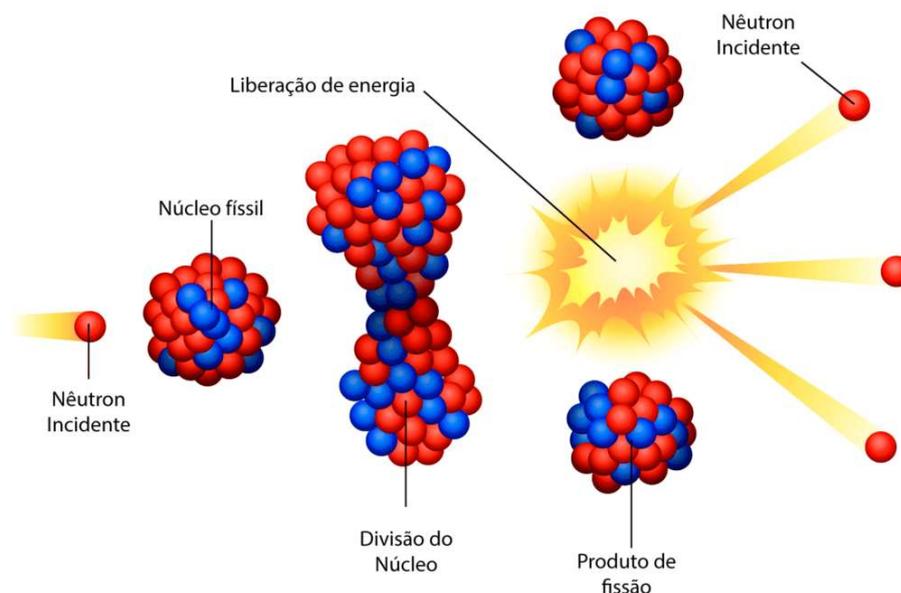


Figura 1-1: Fissão nuclear [2]

O objetivo de todo o funcionamento de um RAP é fazer girar um alternador acoplado a uma turbina para produzir eletricidade. O rotor do alternador está submetido a um campo magnético, que gera uma corrente elétrica. Essa energia elétrica é, em seguida, evacuada através de uma rede de distribuição.

No entanto, para compreender como a turbina é girada, é necessário ter o conhecimento do funcionamento dos circuitos primário, secundário e terciário.

1.2 Circuito Primário

O circuito primário é a fonte de calor da instalação. Ele é composto de um reator, onde o combustível fica armazenado. Água do circuito primário atravessa o reator e se aquece quando em contato com os elementos do combustível. Essa água é, em seguida, dirigida através dos geradores de vapor, onde cederá sua energia.

Por ser a origem de todo calor, o circuito primário é mantido sob pressão para evitar a vaporização da água. Essa função é garantida por um pressurizador que fica localizado dentro do reator. A figura 1-2 ilustra a instalação.

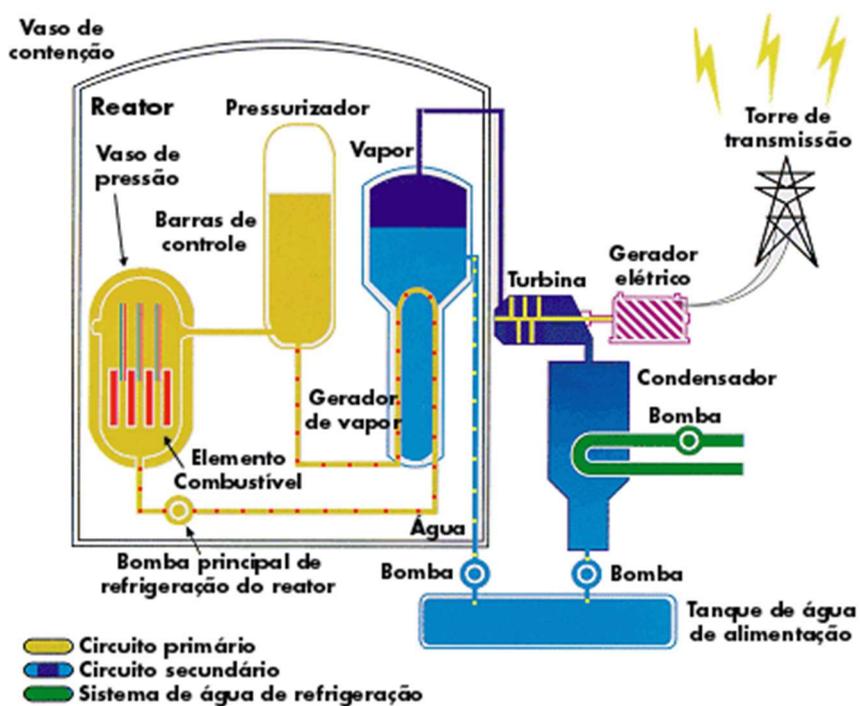


Figura 1-2: Circuito primário e secundário [3]

1.3 Circuito Secundário

A partir do momento que a usina está em produção, este circuito representa a fonte fria do circuito primário. A água do circuito secundário se vaporiza ao entrar em contato com as tubulações do gerador de vapor, conforme mostrado na figura 1-2. Esse vapor é conduzido pelas tubulações fora do reator para a turbina.

A turbina, então, começa a girar devido ao contato com o vapor à elevada pressão. Um gerador elétrico está acoplado ao mesmo eixo de rotação da turbina e isso faz com que haja produção de energia elétrica. O esquema é ilustrado na figura 1-3.

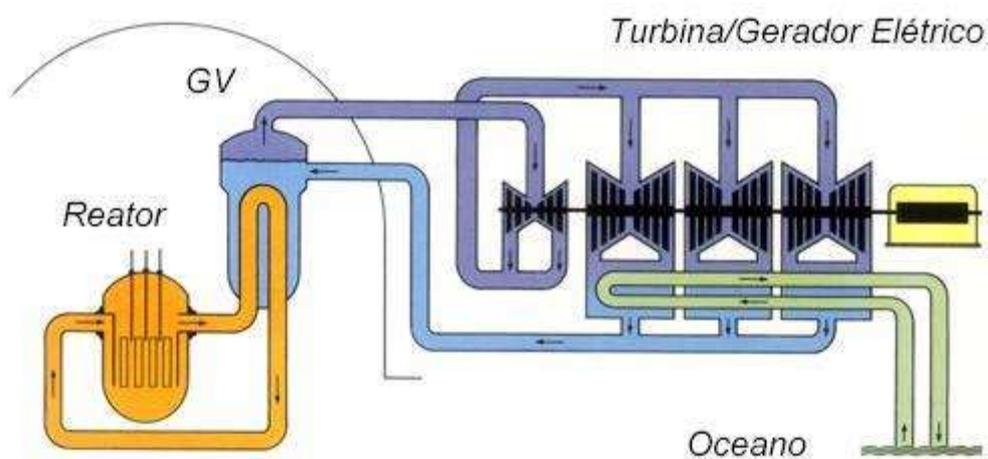


Figura 1-3: Turbina - Gerador elétrico ^[4]

Após ceder sua energia à turbina, o vapor é recolhido dentro do condensador para resfriá-lo e condensa-lo. A água é, em seguida, extraída do condensador pelas bombas para serem injetadas nos reservatórios de baixa e alta pressão para aquecimento antes de serem enviadas aos geradores de vapor.

1.4 Circuito Terciário

Esse circuito é a fonte fria do circuito secundário. Seu objetivo é extrair calor ainda presente no vapor recolhido após a turbina e dentro do condensador. A água circula dentro dos tubos localizados no interior do condensador e, por sua vez, é aquecida. Em seguida, essa água quente é encaminhada para as torres de resfriamento. A figura 1-4 ilustra os três circuitos trabalhando em conjunto.

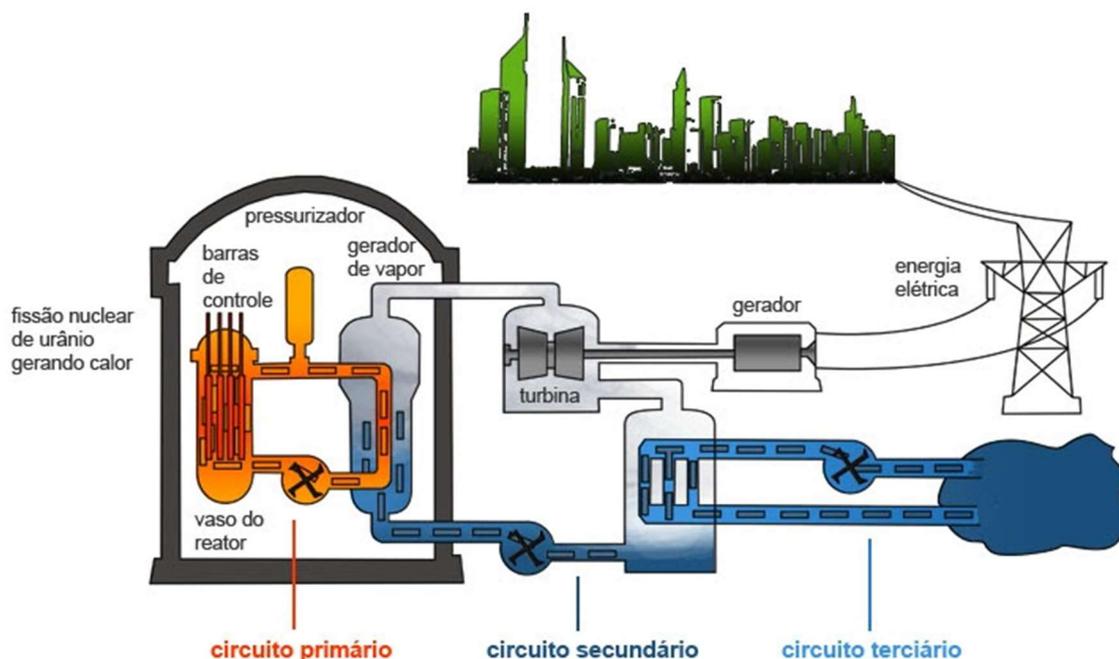


Figura 1-4: Circuito primário, secundário e terciário ^[5]

1.5 Estação de Tratamento de Água Desmineralizada

O objetivo da estação de tratamento de água desmineralizada é de produzir água tão pura quanto possível, com propriedades físico químicas adequadas para serem usadas nos sistemas primário e secundário. Geralmente, as usinas ficam localizadas em lugares onde possuem abundância de recursos hídricos (rios, lagoas, mares, etc.), para usufruírem da água dessa região.

Em termos gerais, antes de ser efetivamente desmineralizada, a água deve passar por um processo de pré tratamento, onde ocorrerá a decantação, descarbonização e filtração. Esse processo é feito de forma intermitente e com tempo de funcionamento de 50 minutos, de acordo com os níveis dos reservatórios do sistema primário e secundário. Nesse sentido, o bom funcionamento da Estação de Tratamento de Água Desmineralizada é primordial e, portanto, sua manutenção deve ser feita da forma mais otimizada possível para não comprometer o bom funcionamento da usina nuclear. A figura 1-5 ilustra as etapas que a água percorre, desde a sua origem hídrica até os reservatórios.

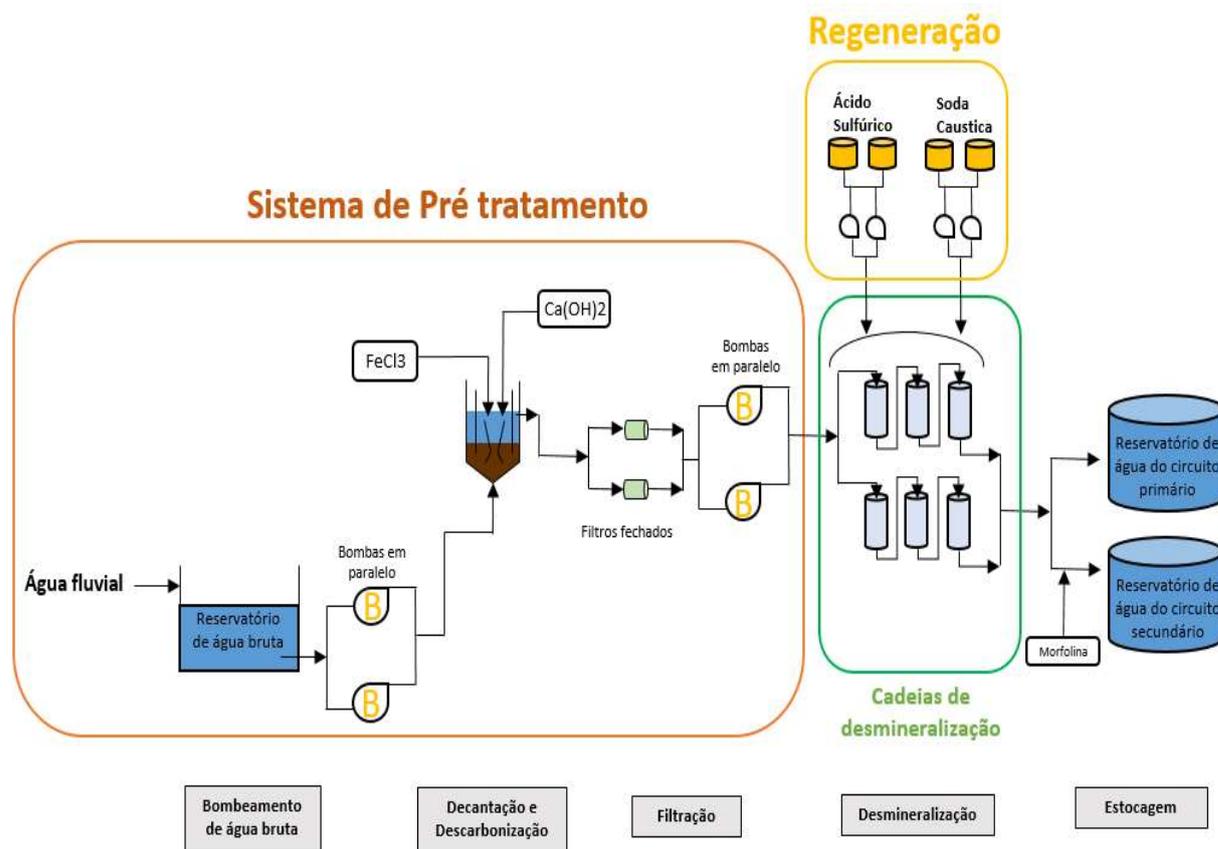


Figura 1-5: Estação de Tratamento de Água Desmineralizada

1.5.1 Decantação e Descarbonização

A decantação é um método físico simples utilizado para separar duas misturas heterogêneas. Para isso, é adicionado cloreto férrico ($FeCl_3$) para reagir com as impurezas contidas na água e, com auxílio de pás giratórias, ocorrer a coagulação (ou floculação). Por serem mais densos, os coágulos indesejáveis são deslocados para o fundo do decantador e a água limpa é recolhida pela superfície.

Nesta mesma etapa, adiciona-se o hidróxido de cálcio para correção do pH. Além disso, a adição deste produto químico protege as tubulações contra corrosão ou incrustações, conforme a água vai sendo distribuída.

1.5.2 Filtração

A água decantada é, em seguida, encaminhada para o processo de filtração. Os filtros são formados por camadas de areia grossa, areia fina, cascalho, pedregulhos e carvão com a função de reter os coágulos que não se decantaram anteriormente. A água filtrada é, então, dirigida para as cadeias de desmineralização.

1.5.3 Desmineralização

A desmineralização consiste no processo de extração de minerais, íons e metais pesados contidos na água. Por ser quimicamente pura, a água desmineralizada evita acúmulo de sais na superfície que causam corrosão nos equipamentos. Essa etapa torna-se, portanto, essencial para a boa circulação nos circuitos primário e secundário, uma vez que a água resultante desse procedimento será submetida a altas temperaturas e pressão.

O processo de extração é composto por troca iônica. Resinas já acumuladas dentro das cadeias de desmineralização realizam a remoção de íons dissolvidos na água como magnésio, cloreto, sílica e cálcio. Em um determinado momento, essas resinas ficam saturadas e precisam ser “renovadas”; o que gera o procedimento denominado de **Regeneração**.

As resinas utilizadas neste trabalho são o ácido sulfúrico (H_2SO_4) à concentração de 98% e o hidróxido de sódio (NaOH) à concentração de 50% – popularmente conhecida como soda cáustica. Com isso, é justamente o circuito hidráulico utilizado para o procedimento de Regeneração nas cadeias de desmineralização que será estudado neste trabalho.

1.6 Objetivo

Conhecendo o princípio de funcionamento de uma usina nuclear e seus principais circuitos, o objetivo deste trabalho é realizar a concepção e dimensionamento de um novo circuito hidráulico contendo resinas para uma estação de água desmineralizada de uma usina nuclear. O projeto leva em conta não só os cálculos de perda de carga e escolha da bomba, mas também a análise e escolha do melhor material para a tubulação.

Todas as tomadas de decisão foram feitas com o objetivo de diminuir a necessidade de manutenção preventiva recorrente, uma vez que geralmente os sistemas primários e secundários de uma usina nuclear são prioridades para a manutenção. Além disso, este trabalho busca alternativas que garantem o funcionamento do sistema no longuíssimo prazo – entre 20 e 30 anos, tornando essencial a análise mais aprimorada da compatibilidade dos materiais com as resinas.

1.7 Organização do Projeto

O objetivo desta seção é descrever resumidamente a estrutura do trabalho, ou seja, o que é apresentado em cada capítulo, até a conclusão do projeto. No capítulo 2, é feita uma revisão bibliográfica, onde são explicados alguns conceitos básicos como propriedades dos fluidos, escoamento de fluidos em tubulações, principais características de um sistema hidráulico e classificação de bombas.

No capítulo 3, é feita uma apresentação mais detalhada do projeto, com as medições do sistema hidráulico estudado, bem como a realização de cálculos matemáticos para realizar o dimensionamento do sistema. Através das fórmulas apresentadas no capítulo 2, pode-se calcular a altura manométrica na linha de sucção e de descarga para o circuito com ácido sulfúrico e também com soda cáustica. Com essas informações e com o uso do Excel, pode-se estabelecer a curva característica de ambos sistemas (ácido e base) - informação extremamente útil para escolha da bomba apropriada.

O capítulo 4 é destinado a escolha do material para a tubulação. Nesse sentido, uma comparação é feita entre três candidatos: aço carbono com revestimento, aço inoxidável e polímeros. Analisando as vantagens e desvantagens de cada material, pode-se escolher aquele que melhor se enquadra nas necessidades do projeto.

No capítulo 5 e 6 são mais específicos para a seleção da bomba. No primeiro, estuda-se a diferença entre dois tipos de vedação mais comuns no mercado: selo mecânico ou acoplamento magnético. Em seguida, no capítulo 6, quatro bombas foram estudadas (duas para o sistema de ácido sulfúrico e duas para o de soda cáustica), com o objetivo de avaliar qual delas seria mais conveniente para a curva do sistema determinada no capítulo 3.

Por fim, no capítulo 7 é destinado para especificação das válvulas do projeto. Foram utilizadas válvulas de gaveta e de retenção, cujos comprimentos relativos possuem referência bibliográfica em [1]. Com isso, conclui-se este trabalho no capítulo 8, consolidando as principais tomadas de decisão para garantir o bom funcionamento do sistema projetado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Propriedade dos Fluidos

Os principais conceitos e propriedades dos fluidos utilizados neste trabalho serão apresentados, assim como seus símbolos e unidades.

2.1.1 Massa Específica

É a quantidade de massa que ocupa uma unidade de volume. Utiliza-se como símbolo a letra grega “ ρ ”, com unidades mais usuais: kg/m^3 , lbm/ft^3 e $slug/ft^3$.

2.1.2 Peso Específico

É a força por unidade de volume, exercida em um corpo de massa específica ρ submetido a uma aceleração igual à da gravidade g , ou seja:

$$\gamma = \rho_{corpo} \cdot g \quad (2.1)$$

2.1.3 Viscosidade Absoluta

Conforme definido por Newton, a viscosidade é a resistência oposta das camadas líquidas ao escoamento recíproco. Ou seja, é a propriedade do fluido que mede sua resistência ao escoamento ou cisalhamento. Sua unidade mais comum é cP (centipoise) e utiliza-se como símbolo a letra grega “ μ ”, onde:

$$1 \text{ cP} = 10^{-3} \text{ Pa/s} \quad (2.2)$$

2.1.4 Pressão de Vapor

Para uma determinada temperatura denominada temperatura crítica (T_c), é a pressão na qual a fase líquida e o vapor coexistem, conforme ilustrado na figura 2-1.

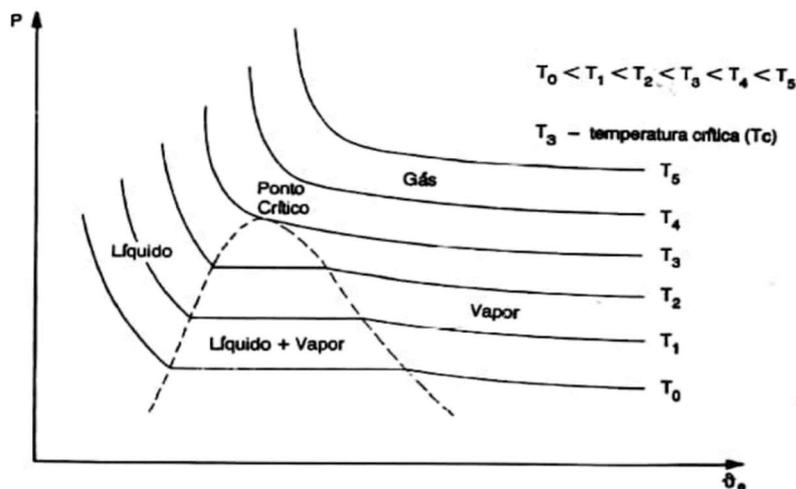


Figura 2-1: Pressão de vapor [1]

Utiliza-se como símbolo “ P_v ” e unidade Pa (pascal).

2.2 escoamento de Fluidos em Tubulações

Nesta seção serão feitas considerações sobre o escoamento de fluidos em tubulações, apresentando o embasamento teórico por trás das principais equações matemáticas usadas para dimensionamento do circuito hidráulico.

2.2.1 Classificação do Escoamento

O escoamento pode ser classificado em:

- 1) Incompressível ou compressível
- 2) Uniforme ou não uniforme
- 3) Permanente ou transitório
- 4) Laminar ou turbulento

De uma forma geral, o escoamento dos líquidos é considerado incompressível, ou seja, não há variação de volume no sistema e a massa específica é constante [1].

Um regime é dito uniforme se a velocidade é a mesma em magnitude e direção em cada ponto do espaço em um instante qualquer. Além disso, um regime é dito permanente se as propriedades em cada ponto não variam com o tempo, podendo variar de um ponto para outro.

Por fim, um escoamento é dito laminar quando todos os filetes líquidos são paralelos entre si e as velocidades em cada ponto são invariáveis em direção e grandeza.

Já um escoamento turbulento é aquele em que as partículas se movem em todas as direções com velocidades variáveis em direção e grandeza.

Neste trabalho, portanto, o escoamento será considerado incompressível, com regime uniforme e permanente. Os cálculos do número de Reynolds nas próximas seções mostrarão que o escoamento é laminar.

2.2.2 Número de Reynolds

É um número adimensional que permite determinar se um escoamento é laminar ou turbulento. Ele foi criado por Osborne Reynolds e sua fórmula é:

$$Re = \frac{\rho \cdot V_{escoamento} \cdot D_{interno}}{\mu} \quad (2.3)$$

Onde “ ρ ” é a massa específica do fluido, “ V ” é a velocidade de escoamento, “ D ” é o diâmetro interno da tubulação e “ μ ” é a viscosidade absoluta do fluido.

Portanto, o regime do escoamento é considerado laminar se o número de Reynolds for menor que 2.000 e, caso seja maior que 4.000, é considerado turbulento. A faixa de transição entre esses dois valores é geralmente considerada turbulenta, porém para valores baixos de “ V ” e altos de “ μ ”, pode ser considerado laminar.

2.2.3 Teorema de Bernoulli

O teorema de Bernoulli pode ser considerado como um caso particular do princípio de conservação de energia e é utilizado para chegar na expressão usada para calcular a altura manométrica de um sistema de bombeamento. Considerando um volume de controle, é necessário definir algumas premissas para simplificar a equação de conservação de energia e chegar na fórmula.

Premissas adotadas:

- 1) Fluido incompressível
- 2) Sistema não troca trabalho
- 3) Sistema sem atrito
- 4) Escoamento em regime permanente

Chega-se, então a seguinte fórmula:

$$\frac{p_s}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g} + Z_s = \frac{p_d}{\gamma} + \frac{V_d^2}{2g} + Z_d = \text{Constante} \quad (2.4)$$

Onde os termos do lado esquerdo são referentes ao ponto de entrada e os do lado direito são referentes ao ponto de saída do volume de controle. Para um sistema de bombeamento, eles são denominados pontos de sucção e descarga, respectivamente.

No entanto, para tomar uso do teorema de Bernoulli é necessário adaptar a equação para líquidos reais. Ou seja, a hipótese de que o líquido é perfeito e sem perda de energia (atrito, viscosidade, etc.) deixa de fazer sentido e, com isso, é feita a introdução do termo “ h_f ” para representar essa perda. Assim:

$$\frac{p_s}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g} + Z_s = \frac{p_d}{\gamma} + \frac{V_d^2}{2g} + Z_d + h_f \quad (2.5)$$

Onde o termo h_f é conhecido como **perda de carga**, representando a energia perdida pelo líquido, por unidade de peso ao se deslocar do ponto de sucção para o ponto de descarga.

2.2.4 Perda de Carga

Conforme definido na seção 2.2.3, o termo h_f representa a energia por unidade de peso perdida no trecho da tubulação em estudo, denominando-se perda de carga. Por definição, existem dois tipos de perda de carga: perda de carga normal (h_{fn}) e perda de carga localizada (h_{fL}). A primeira é aquela que ocorre em trechos retos de tubulação e a segunda é aquela que se verifica em acessórios (válvulas, conexões, etc), onde:

$$h_f = h_{fn} + h_{fL} \quad (2.6)$$

Com isso, pode-se calcular h_{fL} através do método do comprimento equivalente ou pelo método direto, ambas com a mesma precisão. Nesta análise, o método do Comprimento Equivalente será mais direto, usando os valores das tabelas 2-1, 2-2, 2-3 e 2-4.

Método do Comprimento Equivalente

Este método consiste em fixar o valor do comprimento reto de tubulação que reproduziria, nas mesmas condições, a mesma perda de carga que o acessório em questão. As tabelas 2-1, 2-2, 2-3 e 2-4 apresentam os valores médios de comprimento equivalente para diversos tipos de acessórios [1].

Tabela 2-1: Comprimento equivalente para entrada e saída da tubulação [1]

Diâmetro Nominal (Polegada)	Saídas $K = 1,0$	Entradas		
		$K = ,78$	$K = ,5$	$K = ,24$
1/2	2 (0,61)	1,5 (0,46)	1 (0,30)	0,5 (0,15)
3/4	3 (0,91)	2,5 (0,76)	1,5 (0,46)	0,75 (0,23)
1	4 (1,22)	3 (0,91)	2 (0,61)	1 (0,30)
1 1/2	7 (2,13)	5,5 (1,68)	3,5 (1,07)	1,75 (0,53)
2	9 (2,74)	7 (2,13)	4,5 (1,37)	2,25 (0,69)
3	15 (4,57)	12 (3,66)	7,5 (2,29)	3,75 (1,14)
4	20 (6,10)	16 (4,88)	10 (3,05)	5 (1,52)
6	36 (10,98)	29 (8,84)	18 (5,49)	9 (2,74)
8	48 (14,63)	38 (11,59)	24 (7,32)	12 (3,66)
10	62 (18,90)	49 (14,94)	31 (9,45)	15 (4,57)
12	78 (23,78)	60 (18,29)	39 (11,89)	19 (5,79)
14	88 (26,83)	70 (21,34)	44 (13,41)	22 (6,71)
16	100 (30,49)	78 (23,78)	50 (15,24)	25 (7,62)
18	120 (36,59)	95 (28,96)	60 (18,29)	30 (9,15)
20	136 (41,46)	107 (32,62)	68 (20,73)	34 (10,37)
24	170 (51,83)	135 (41,16)	85 (25,91)	42 (12,80)

(1) Comprimentos equivalentes em ft – valores entre parênteses em metros.

Tabela 2-2: Comprimento equivalente para reduções e ampliações de diâmetro da tubulação [1]

Diâmetros Nominais (Polegada)		$d_1 \rightarrow d_2$	$d_1 \leftarrow d_2$
d_1	d_2		
3/4	1/2	,6 (0,18)	,5 (0,15)
1	1/2	1,2 (0,37)	,7 (0,21)
	3/4	,6 (0,18)	,6 (0,18)
1 1/2	3/4	1,6 (0,49)	1,0 (0,30)
	1	1,2 (0,37)	,9 (0,27)
2	1	2,2 (0,67)	1,3 (0,40)
	1 1/2	1,3 (0,40)	1,3 (0,40)
3	1 1/2	3,8 (1,16)	2,4 (0,73)
	2	2,7 (0,82)	2,3 (0,70)
4	2	5 (1,52)	3,2 (0,98)
	3	3 (0,91)	3 (0,91)
6	3	8 (2,44)	5 (1,52)
	4	4 (1,22)	4 (1,22)
8	4	12 (3,66)	7 (2,13)
	6	7 (2,13)	7 (2,13)
10	4	15 (4,57)	8 (2,44)
	6	14 (4,27)	9,5 (2,90)
	8	6 (1,83)	6 (1,83)
12	6	19 (5,79)	12 (3,66)
	8	14 (4,27)	12 (3,66)
	10	6,5 (1,98)	6,5 (1,98)

Diâmetros Nominais (Polegada)		$d_2 \rightarrow d_1$	$d_1 \rightarrow d_2$
d_1	d_2		
14	6	22 (6,71)	14 (4,27)
	8	22 (6,71)	14 (4,27)
	10	15 (4,57)	13 (3,96)
16	12	6 (1,83)	6 (1,83)
	8	27 (8,23)	17 (5,18)
	10	23 (7,01)	17 (5,18)
18	12	15 (4,57)	15 (4,57)
	14	7 (2,13)	7 (2,13)
	10	30 (9,15)	19 (5,79)
20	12	23 (7,01)	19 (5,79)
	14	15 (4,57)	15 (4,57)
	16	4 (1,22)	4 (1,22)
24	12	30 (9,15)	23 (7,01)
	14	21 (6,40)	19 (5,79)
	16	13 (3,96)	13 (3,96)
24	18	5 (1,52)	5 (1,52)
	16	30 (9,15)	25 (7,62)
	18	25 (7,62)	25 (7,62)
20	12 (3,66)	12 (3,66)	

Obs. : Acrescentar esses comprimentos ao comprimento da tubulação de menor diâmetro.

Tabela 2-3: Comprimento equivalente para válvulas na tubulação [1]

Diâmetro Nominal (Polegadas)	Válvula pivotada (abertura total)	Válvula globo (2) (abertura total)			Válvula de retenção		Válvulas de esfera ou macho (abertura total)	Válvula de três vias (Área de abertura 80% da área tubo)		Válvula borboleta (abertura total)	Diâmetro Nominal (Polegadas)
					Portinhola	Lovanta- mento		Fluxo direto	Fluxo pelo ramal		
		90°	60°	45°							
1 1/2"	1.75 (0,53)	46 (14,02)	23 (7,01)	18 (5,49)	17 (5,18)	20 (6,10)	2.5 (0,76)	6 (1,83)	20 (6,10)	6 (1,83)	1 1/2"
2"	2.25 (0,69)	60 (18,29)	30 (9,15)	24 (6,52)	22 (6,71)	25 (7,62)	3.5 (1,07)	7.5 (2,29)	24 (7,32)	8 (2,54)	2"
2 1/2"	2.75 (0,84)	70 (21,34)	38 (11,59)	30 (9,15)	27 (8,23)	30 (9,15)	4 (1,22)	9 (2,74)	30 (9,15)	10 (3,05)	2 1/2"
3"	3.5 (1,07)	90 (27,44)	45 (13,72)	38 (11,59)	35 (10,67)	38 (11,59)	5 (1,52)	12 (3,66)	36 (10,98)	12 (3,66)	3"
4"	4.5 (1,37)	120 (36,59)	60 (18,29)	48 (14,63)	45 (13,72)	50 (15,24)	6.5 (1,98)	15 (4,57)	48 (14,63)	15 (4,57)	4"
6"	6.5 (1,98)	175 (53,35)	88 (26,83)	72 (21,95)	65 (19,82)	75 (22,87)	10 (3,05)	22 (6,71)	70 (21,34)	23 (7,01)	6"
8"	9 (2,74)	230 (70,12)	120 (36,59)	95 (28,96)	90 (27,44)	100 (30,49)	13 (3,96)	30 (9,15)	95 (28,96)	27 (8,23)	8"
10"	12 (3,66)	280 (85,37)	150 (45,73)	130 (39,63)	120 (36,59)	130 (39,63)	16 (4,88)	38 (11,59)	120 (36,59)	35 (10,67)	10"
12"	14 (4,27)	320 (97,56)	170 (51,83)	145 (44,21)	140 (42,68)	150 (45,73)	19 (5,79)			40 (12,20)	12"
14"	15 (4,57)	380 (115,85)	190 (57,53)	160 (48,78)	150 (45,73)	170 (51,83)	20 (6,10)			45 (13,72)	14"
16"	17 (5,18)	420 (128,05)	220 (67,07)	180 (54,88)	170 (51,83)	190 (57,93)	22 (6,71)			50 (15,24)	16"
18"	18 (5,49)	480 (146,34)	250 (76,22)	205 (62,50)	180 (54,88)	210 (64,02)	24 (7,32)			58 (17,68)	18"
20"	20 (6,10)	530 (161,59)	290 (88,41)	240 (73,17)	200 (60,98)	240 (73,17)	27 (8,23)			64 (19,51)	20"
22"	25 (7,62)	580 (176,83)	300 (91,46)	255 (77,74)	240 (73,17)	260 (79,27)	30 (9,15)			70 (21,34)	22"
24"	32 (9,76)	630 (192,07)	330 (100,61)	270 (82,32)	250 (76,22)	290 (88,41)	33 (10,06)			78 (23,78)	24"
										100 (30,49)	30"
										125 (38,11)	36"
										145 (44,21)	42"
										165 (50,30)	48"
										175 (53,35)	52"

(2) Para válvulas globo parcialmente abertas, multiplicar os valores da tabela por:

3, se 3/4 aberta

12, se 1/2 aberta

70, se 1/4 aberta

Tabela 2-4: Comprimento equivalente para joelhos, curvas e T's na tubulação [1]

Diâmetro nominal (in.)	Joelho (3) 90°		Curvas (3) 90°		Fluxo pelo ramal	T Fluxo direto	Curvas em gomos		
	Raio curto R = 1D	Raio longo R = 1,5D	R = 5D	R = 10D					
1 1/2	4,5 (1,37)	3 (0,91)	2,5 (0,76)	4 (1,22)	8 (2,44)	3 (0,91)			
2	5,25 (1,60)	3,5 (1,07)	3 (0,91)	5 (1,52)	11 (3,35)	3,5 (1,07)			
2 1/2	6 (1,83)	4 (1,22)	3,5 (1,07)	6 (1,83)	13 (3,96)	4 (1,22)			
3	7,5 (2,29)	5 (1,52)	4 (1,22)	7,5 (2,29)	16 (4,88)	5 (1,52)			
4	10,5 (3,20)	7 (2,13)	5,5 (1,68)	10 (3,05)	20 (6,10)	7 (2,13)			
6	15 (4,57)	10 (3,05)	8,5 (2,59)	15 (4,57)	30 (9,15)	10 (3,05)			
8	21 (6,40)	14 (4,27)	11 (3,35)	20 (6,10)	40 (12,20)	14 (4,27)			
10	24 (7,32)	16 (4,88)	14 (4,27)	25 (7,62)	50 (15,24)	16 (4,88)			
12	32 (9,76)	21 (6,40)	16 (4,88)	30 (9,15)	60 (18,29)	21 (6,40)	60 (18,29)	30 (9,15)	24 (7,32)
14	33 (10,06)	22 (6,71)	19 (5,79)	33 (10,06)	65 (19,82)	22 (6,71)	65 (19,82)	34 (10,37)	27 (8,23)
16	39 (11,89)	26 (7,93)	21 (6,40)	38 (11,59)	75 (22,87)	26 (7,93)	75 (22,87)	38 (11,59)	30 (9,15)
18	44 (13,41)	29 (8,84)	24 (7,32)	42 (12,80)	86 (26,22)	29 (8,84)	86 (26,22)	42 (12,80)	36 (10,98)
20	48 (14,63)	32 (9,76)	27 (8,23)	50 (15,24)	100 (30,49)	32 (9,76)	100 (30,49)	50 (15,24)	39 (11,89)
22	53 (16,15)	36 (10,98)	30 (9,15)	55 (16,77)	110 (33,54)	36 (10,98)	110 (33,54)	56 (17,07)	45 (13,72)
24	57 (17,28)	38 (11,59)	32 (9,76)	60 (18,29)	120 (36,59)	38 (11,59)	120 (36,59)	60 (18,29)	48 (14,63)
30	75 (22,87)	50 (15,24)	40 (12,20)	75 (22,87)	155 (47,26)	50 (15,24)	155 (47,26)	76 (23,17)	60 (18,29)
36	90 (27,44)	60 (18,29)	50 (15,24)	90 (27,44)	180 (54,88)	60 (18,29)	180 (54,88)	96 (29,27)	75 (22,87)
42	105 (32,01)	70 (21,34)	56 (17,07)	101 (30,79)	210 (64,02)	70 (21,34)	210 (64,02)	108 (32,93)	84 (25,61)
48	120 (36,59)	80 (24,39)	62 (18,90)	120 (36,59)	250 (76,22)	80 (24,39)	250 (76,22)	120 (36,59)	93 (28,35)
52	135 (41,16)	90 (27,44)	72 (21,95)	130 (39,63)	260 (79,27)	90 (27,44)	260 (79,27)	140 (42,68)	108 (32,93)

(3) Para joelhos e curvas de 45°, dividir os valores da tabela por 2 e no caso de 180°, multiplicar por 2.

Após ter obtido o comprimento equivalente de todos os acessórios presentes na tubulação, a perda de carga é calculada como se fosse construída de um único trecho reto de comprimento total L_{total} , tal que:

$$L_{total} = L_{reto} + L_{entr e saída} + L_{reduções e ampliações} + L_{válvulas} + L_{joelhos, curvas e T's} \quad (2.7)$$

A perda de carga total h_f é definida como:

$$h_f = \frac{f \cdot L_{total} \cdot V}{2 \cdot D_{interno} \cdot g} \quad (2.8)$$

Onde “ f ” é o fator de atrito, “ V ” a velocidade de escoamento, “ $D_{interno}$ ” o diâmetro interno da tubulação e “ g ” a gravidade local.

Fator de atrito f

O coeficiente de atrito “ f ” é um número adimensional que representa a intensidade do atrito entre o fluido e a parede interna da tubulação. Ele é calculado de forma diferente dependendo do regime do escoamento. Caso seja turbulento, será necessário obter a rugosidade relativa da tubulação e, em seguida, utilizar o Ábaco de Moody. Caso seja laminar, o procedimento é mais simples, basta resolver a seguinte equação:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.9)$$

Conforme será mostrado no capítulo 3, os cálculos demonstrarão que o escoamento se encontra no regime laminar e, portanto, não será detalhado o procedimento para um regime turbulento.

2.3 Características de um Sistema Hidráulico

Nesta seção serão apresentadas as principais características de um sistema hidráulico, como altura manométrica de sucção, descarga e total, curvas características do sistema e NPSH disponível. Esses elementos são de extrema importância para realizar a escolha apropriada da bomba, pois possuímos todas as informações relevantes para o comportamento do sistema.

2.3.1 Altura Manométrica de Sucção

Consiste na grandeza que mede a quantidade total de energia presente no fluido ao passar pelo flange de sucção da bomba. Conforme demonstrado na seção 2.2.3, a sua fórmula é oriunda do teorema de Bernoulli aplicado a fluidos reais e é representada conforme a equação (2.10).

$$H_s = \frac{p_s}{\gamma} + Z_s - h_{fs} \quad (2.10)$$

Onde h_{fs} é a perda de carga de carga total entre o reservatório de sucção e a bomba.

2.3.2 Altura Manométrica de Descarga

Consiste na grandeza que mede a quantidade total de energia presente no fluido ao chegar no reservatório de descarga. Conforme demonstrado na seção 2.2.3, a sua fórmula é oriunda do teorema de Bernoulli aplicado a fluidos reais e é representada da seguinte forma:

$$H_d = \frac{p_d}{\gamma} + Z_d + h_{fd} \quad (2.11)$$

Onde h_{fd} é a perda de carga de carga total entre o flange de descarga da bomba e o reservatório de descarga.

2.3.3 Altura Manométrica Total

Representa a quantidade de energia que a bomba deve fornecer ao fluido para que este consiga atingir o reservatório de descarga. Ela consiste na diferença entre a altura manométrica de descarga e altura manométrica de sucção, conforme a equação (2.12).

$$H_{total} = H_d - H_s \quad (2.12)$$

2.3.4 Curva Característica do Sistema

A curva característica do sistema relaciona a altura manométrica total " H_{total} " com diferentes valores de vazão " Q ", conforme mostrado na figura 2-2.

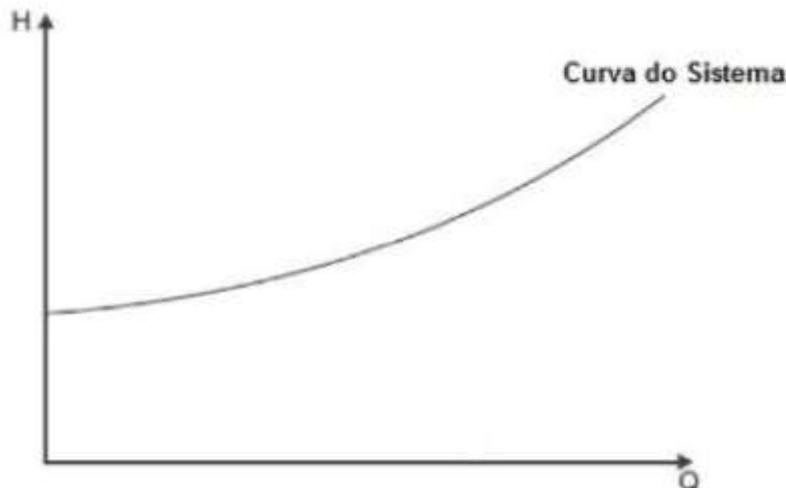


Figura 2-2: Esboço de uma curva característica do sistema ^[1]

Assim, pode-se perceber que a altura manométrica total depende das perdas de carga do sistema que, por sua vez, variam de acordo com a vazão do projeto. Além disso, esta curva será extremamente importante para determinar o **ponto de operação**, fazendo a sobreposição com a curva da bomba, conforme mostrado no capítulo 6.

2.3.5 NPSH Disponível

Consiste na energia que um fluido possui ao chegar no flange de sucção da bomba, além da energia de pressão correspondente à pressão de vapor. Sua fórmula é mostrada na equação (2.13).

$$NPSH_d = H_s + \frac{(p_{Atm} - p_v)}{\gamma} \quad (2.13)$$

O cálculo de NPSH disponível será de extrema importância para verificar a ocorrência de cavitação, conforme será mostrado no capítulo 6.

2.4 Bombas

Pode-se definir uma bomba como uma máquina hidráulica que fornece energia ao líquido com a finalidade de transportá-lo de um ponto ao outro obedecendo às condições do processo. A energia cedida ao líquido pode ser medida pela diferença entre os termos da equação de Bernoulli, na saída e na entrada da bomba.

O objetivo desta seção é apresentar os principais tipos de bombas existentes. Exclusivamente para as centrífugas, serão apresentadas suas principais variáveis e seus indicadores de operação.

2.4.1 Tipo de Bombas

Na figura 2-3 está apresentado um modelo esquemático da classificação dos principais tipos de bombas pela forma com que é fornecida energia do fluido que é transportado. É importante ressaltar que apenas as bombas centrífugas serão estudadas neste trabalho.

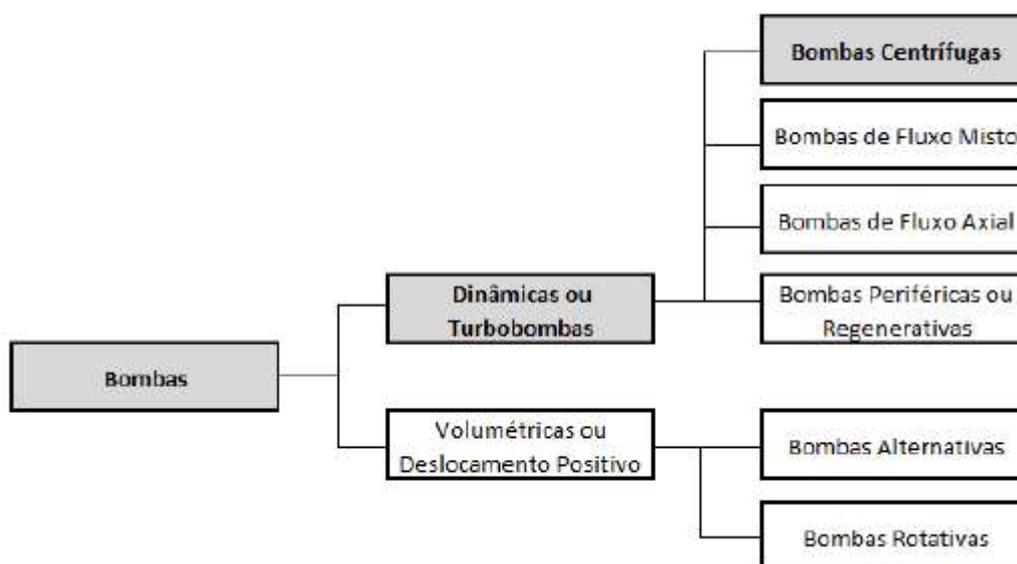


Figura 2-3: Classificação dos principais tipos de bombas [1]

As turbobombas são máquinas nas quais a movimentação do líquido é produzida por forças que se desenvolvem na massa líquida, em consequência da rotação de uma roda (impelidor) com um certo número de pás especiais. A distinção entre os diversos tipos de turbobombas é feita fundamentalmente em função da forma como o impelidor cede energia ao fluido bem como pela orientação do fluido ao sair do impelidor [1].

A principal característica das bombas centrífugas é que a energia é cedida ao fluido primeiramente como energia cinética e posteriormente convertida em energia de pressão. Dependendo da forma do impelidor, a energia cinética pode ter origem puramente centrífuga ou de arrasto. A conversão em energia de pressão é realizada

fazendo com que o fluido que sai do impelidor passe em um conduto de área crescente, conforme mostrado na figura 2-4.

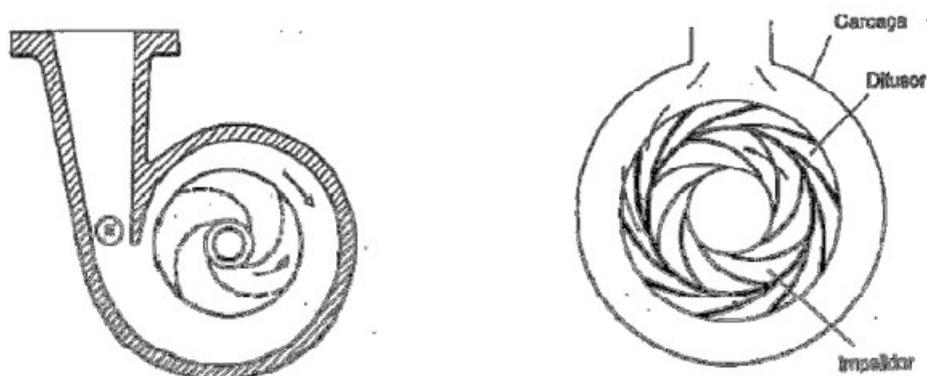


Figura 2-4: Carcaça em voluta (à esquerda) e carcaça em difusor (à direita) [1]

2.4.2 Curva de Carga (H) x Vazão (Q)

Pode-se definir a carga ou head (H) de uma bomba como sendo a energia por unidade de massa que a bomba tem condições de fornecer ao fluido, para uma determinada vazão.

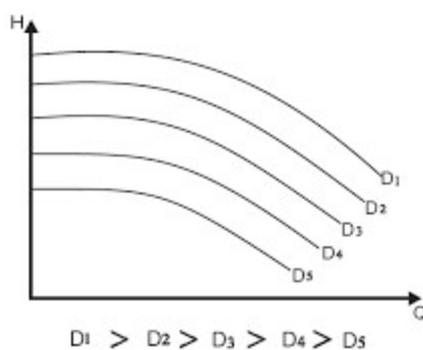


Figura 2-5: Curva de carga versus vazão para diferentes diâmetros do impelidor [1]

É comum, portanto, a representação da curva de carga da bomba em função da vazão para um determinado diâmetro de impelidor e rotação do eixo. Um exemplo de uma curva genérica é mostrado na figura 2-5, para diversos valores de diâmetro do impelidor.

2.4.3 Curva de Potência Absorvida (P_{abs}) x Vazão (Q)

A potência absorvida é uma das preocupações do projeto porque consiste na energia requerida do acionador e, portanto, é usada na seleção da bomba. Assim, para

seleção do acionador apropriado, é necessário ter a mensuração correta da potência demandada pela bomba. A equação (2.14) mostra como essa grandeza é calculada, em KW.

$$Pot_{Abs} = \frac{Pot}{\eta} = \frac{\gamma.Q.H}{\eta} \quad (2.14)$$

Onde “ η ” representa a eficiência da bomba, conforme será detalhado na seção 2.4.4. A figura 2-6 mostra uma curva genérica de potência absorvida x vazão.

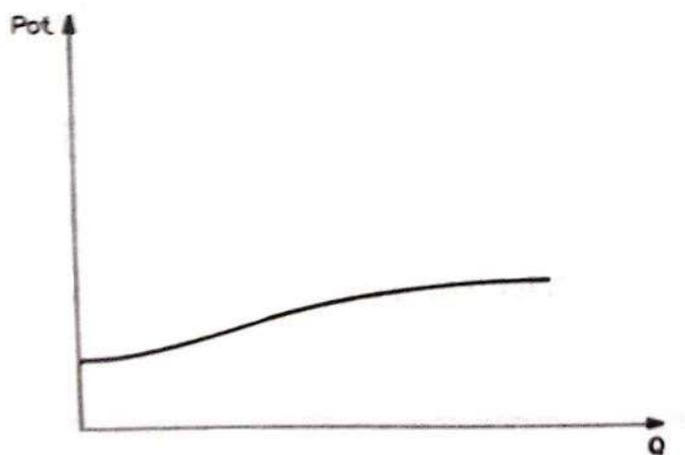


Figura 2-6: Curva genérica de potência versus vazão ^[1]

2.4.4 Curva de Eficiência (η) x Vazão (Q)

A eficiência total de uma bomba pode ser definida como:

$$\eta = \frac{Pot \text{ útil cedida ao fluido}}{Pot \text{ absorvida pela bomba}} = \frac{Pot_c}{Pot_{Abs}} \quad (2.15)$$

Uma curva genérica é ilustrada na figura 2-7.

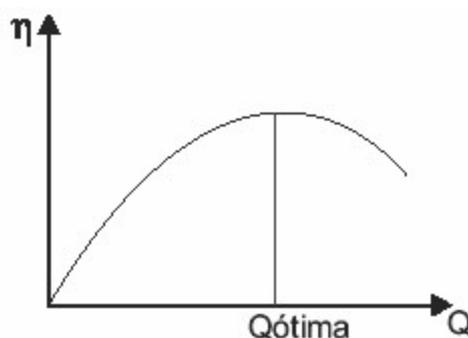


Figura 2-7: Curva genérica de rendimento da bomba ^[1]

Percebe-se, portanto, que existe uma vazão $Q_{\text{ótima}}$, para qual a eficiência da bomba é o máximo possível. Esse conceito é extremamente importante e será utilizado como um dos critérios para selecionar a bomba no capítulo 6.

Além disso, o atrito entre as partes mecânicas fixas e móveis, a turbulência do escoamento e a viscosidade do fluido são os principais fatores que fazem a eficiência de bombas reais ser menor que 100%.

2.4.5 Correção das Curvas Características para Líquido Viscoso

De modo geral, as curvas características das bombas são fornecidas pelos fabricantes tomando a água como líquido de referência. No entanto, muitas das vezes, essas mesmas bombas possuem aplicações para líquidos mais viscosos, como é o caso deste trabalho. A utilização de ácido sulfúrico e hidróxido de sódio como resinas exige necessariamente a correção das curvas características da bomba.

A metodologia utilizada para correção das curvas características operando com líquidos viscosos é baseada na carta editada pelo Hydraulic Institute, conforme ilustrado na figura 2-8.

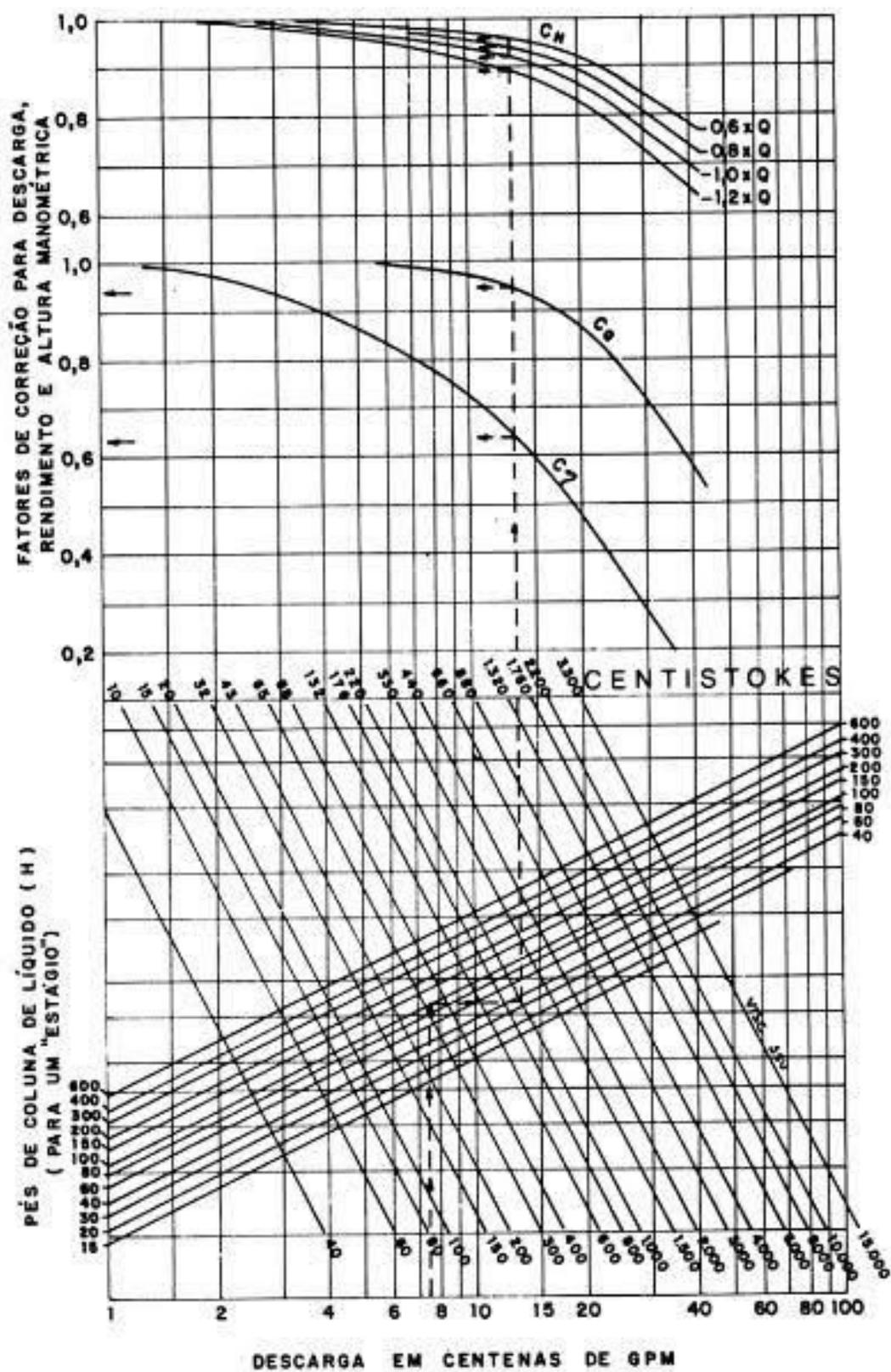


Gráfico dos fatores de correção, para bombas de grandes descargas.

Figura 2-8: Gráfico dos fatores de correção [1]

Portanto, dado um desempenho de uma bomba obtido por teste com água, pode-se obter a curva para fluidos viscosos através dos **fatores de correção C_Q , C_H e C_η** para o ácido sulfúrico e o hidróxido de sódio. A tabela 2-5 mostra os valores corrigidos.

Tabela 2-5: Fatores de correção para os circuitos hidráulicos

Fluido	C_Q	C_H	C_η
Ácido Sulfúrico	0,99	0,98	0,85
Hidróxido de Sódio	1,0	0,99	0,90

Conforme será mostrado no capítulo 6, as bombas utilizadas para este trabalho estão trabalhando a uma faixa de vazão $Q = 13,2$ GPM ($3 \text{ m}^3/\text{h}$). No entanto, será tomado como referência o menor valor apresentado pela carta de correção $Q = 100$ GPM e, portanto, pode-se obter um resultado bastante conservador.

2.4.6 Cavitação

2.4.6.1 Descrição do Fenômeno

Seguramente, a cavitação é um tópico extremamente importante para o estudo de bombas. Esse fenômeno acontece quando, a uma determinada temperatura de operação, a pressão do líquido bombeado se aproxima da sua pressão de vapor. Com isso, ocorre o aparecimento de bolhas no escoamento que, posteriormente, geram consequências desagradáveis ao sistema.

No caso particular das bombas centrífugas, a região de maior probabilidade de ocorrência das bolhas é no olho do impelidor. Isso se dá porque o líquido ainda não foi sujeito a ação da bomba e sua pressão está diretamente relacionada com o seu head de sucção.

Após receber energia (pressão) da bomba, essas bolhas voltam ao seu estado líquido. No entanto, como o volume específico do vapor é maior do que o líquido, há ocorrência das chamadas **ondas de choques ou microjatos**.

A figura 2-9 ilustra três situações características do colapso da bolha.

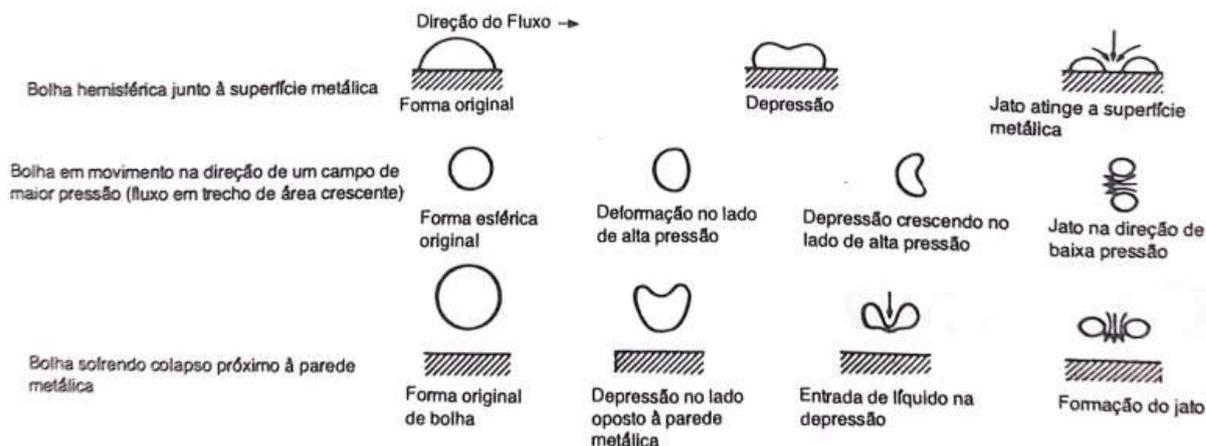


Figura 2-9: Três situações características do colapso da bolha ^[1]

2.4.6.2 Consequências

As consequências da cavitação são bastante inconvenientes para o projeto e devem ser evitadas ou, caso não seja possível, mitigadas ao máximo. Dentre os principais problemas, pode-se citar:

- a) Ruído e vibração
- b) Alteração das curvas características
- c) Danificação do material

No caso de bombas centrífugas, o colapso se dará na região onde a pressão for novamente superior à pressão de vapor. Ou seja, provavelmente ocorrerá no canal do impelidor ou, posteriormente, na entrada da voluta ou no canal das pás difusoras, dependendo do tipo de bomba.

2.4.7 NPSH Requerido

O NPSH, proveniente da nomenclatura inglesa *Net Positive Suction Head*, é a grandeza que indica o mínimo de energia de um escoamento para não ocorrer vaporização do fluido ao entrar na bomba (cavitação). Esta informação é normalmente fornecida pelo fabricante através da curva NPSH requerido *versus* vazão. A figura 2-10 representa uma curva genérica.

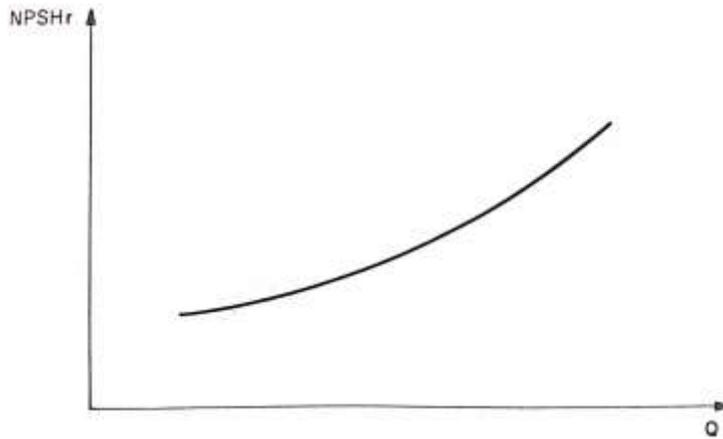


Figura 2-10: Curva genérica de NPSHr versus Vazão ^[1]

Essa curva é extremamente importante, pois será utilizada para evitar a ocorrência de cavitação. A fórmula utilizada envolve o conceito de NPSH disponível e NPSH requerido e a margem de segurança adotada fica a critério do engenheiro. Neste projeto, foi utilizada a margem de 0,6 metros de coluna de líquido. Assim:

$$NPSH_{disponível} \geq NPSH_{requerido} + 0,6 \text{ metros} \quad (2.16)$$

Portanto, sempre que essa condição for respeitada, não haverá ocorrência de cavitação.

3. DESCRIÇÃO E ANÁLISE DOS CIRCUITOS HIDRÁULICOS

Existem dois tipos de resinas utilizadas neste trabalho: ácido sulfúrico e hidróxido de sódio. Elas ficam armazenadas em reservatórios diferentes e são acionadas pelo sistema de automação para o processo de regeneração. Quando isso acontece, os fluidos precisam ser bombeados para o misturador estático, onde ocorre a sua diluição com água tratada. Em seguida a mistura é encaminhada diretamente para a estação de desmineralização. A figura 3-1 mostra um esboço da vista frontal do sistema hidráulico estudado.

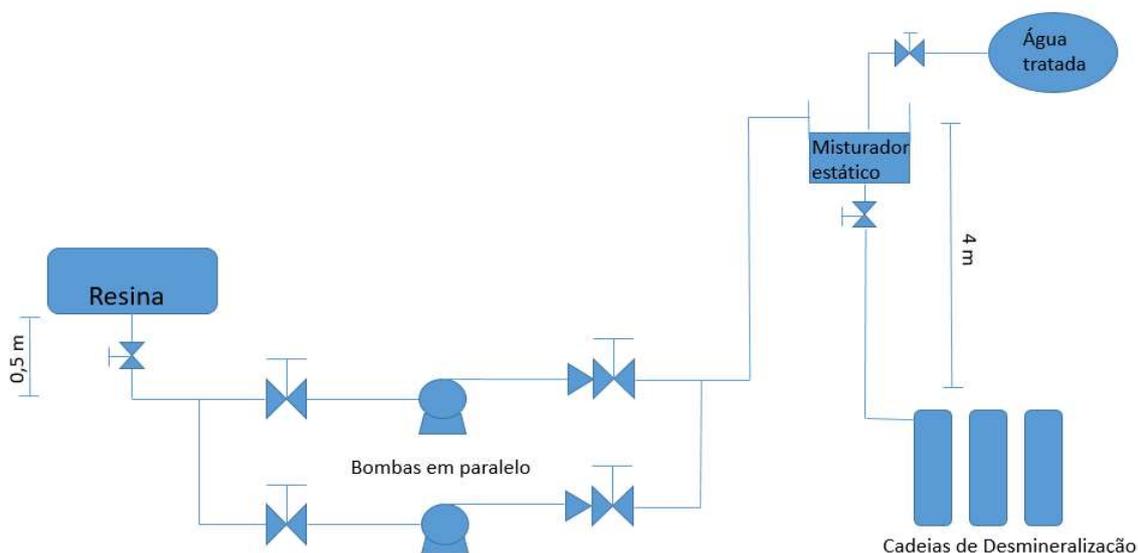


Figura 3-1: Esboço do sistema hidráulico estudado

Embora na Figura 3-1 apresente duas bombas, o estudo será feito apenas para uma, pois a segunda é uma bomba reserva e só será acionada em caso de falha da primeira. Além disso, apesar de os circuitos terem a mesma configuração dimensional, os cálculos serão realizados separadamente para o H_2SO_4 e para o $NaOH$, porque os fluidos possuem propriedades físicas diferentes, o que pode alterar na seleção da bomba para o projeto. Os detalhes da instalação são descritos nas tabelas 3-3 e 3-4 com informações do número de joelhos e válvulas.

As informações fundamentais que um engenheiro precisa para selecionar a bomba correta para determinada aplicação são vazão de projeto, altura manométrica do sistema, natureza e condições do fluido bombeado. A análise deste capítulo será, portanto, focada em determinar a altura manométrica do sistema e o NPSH disponível.

3.1 Modelo de Cálculo para o Circuito Hidráulico do Ácido Sulfúrico

3.1.1 Propriedades do Fluido

O fluido considerado neste capítulo é o ácido sulfúrico à concentração de 98%. Nesse sentido, é importante ressaltar que a recirculação não afeta significativamente as suas características e, portanto, será considerado que as suas condições ficam inalteradas durante todo o processo. Os cálculos serão feitos para as condições determinadas na tabela 3-1.

Tabela 3-1: Propriedades do ácido sulfúrico [17]

Fluido	Temperatura [°C]	Massa Específica [kg/m ³]	Viscosidade [cP]	Pressão de Vapor [Pa]
Ácido Sulfúrico	22,0	1840,0	26,7	0,01

3.1.2 Linhas de Sucção e Descarga

A vazão de projeto (Q) e o diâmetro (D) devem ser as mesmas da instalação atual para não ser necessário alterar a automatização do sistema da usina. Além disso, os diâmetros das linhas de sucção e descarga (D) são iguais, conforme a tabela 3-2.

Tabela 3-2: Vazão e diâmetro na sucção

Vazão (m ³ /h)	Diâmetro [in]	Diâmetro [m]
3,0	1,5	0,0381

3.1.3 Altura Manométrica de Sucção

A altura manométrica de sucção é descrita pela fórmula a seguir:

$$H_s = \frac{p_s}{\gamma} + z_s - h_{fs} \quad (3.1)$$

3.1.3.1 Altura Estática de Sucção:

A altura estática de sucção é dada pelo somatório do comprimento vertical entre a bomba e o reservatório e a altura do fluido dentro desse reservatório. Considerando

um caso crítico, a altura do fluido é de 0,5 m. Dessa forma, utilizando a figura 3-1 como referência, tem-se:

$$Z_s = 0,5 + 0,5 = 1,0 \text{ m} \quad (3.2)$$

3.1.3.2 Pressão Manométrica no Reservatório de Sucção

Será considerado o pior caso, ou seja, a menor pressão possível. Assim:

$$P_s = 9025,2 \text{ Pa} \quad (3.3)$$

3.1.3.3 Peso Específico

O peso específico é dado pela multiplicação da massa específica do fluido pela gravidade.

$$\gamma = \rho_{H_2SO_4} \times g = 1840 \times 9,81 = 18050,4 \text{ N/m}^3 \quad (3.4)$$

3.1.3.4 Perda de Carga na Linha e Acessórios de Sucção

A metodologia usada para calcular a perda de carga total consiste no método do comprimento equivalente. Este último consiste em fixar o valor do comprimento reto da tubulação que produziria, nas mesmas condições, a mesma perda de carga que o acessório em questão [1].

$$h_{fs} = \frac{f_s \cdot L_{total} \cdot V_s^2}{2 \cdot D_s \cdot g} \quad (3.5)$$

O comprimento da linha de sucção (L_{reto}) é de 4,6 m. Segundo as tabelas 2-1, 2-2, 2-3 e 2-4, as perdas existentes no circuito hidráulico são mostradas na tabela 3-3.

Tabela 3-3: Perdas de carga na linha de sucção

Quantidade	Tipo de perda	Comprimento Equivalente [m]
1	Entrada	1,07
6	Joelho 90°	1,37
2	Válvula de gaveta	0,53

A perda total é dada pelo somatório de todas as perdas, levando em consideração a quantidade de acidentes no circuito.

$$h_{fs} = h_{entrada} + 6(h_{joelho}) + 2(h_{valv. Gaveta}) + h_{reto} \quad (3.4)$$

$$h_{fs} = \frac{f_s V_s^2}{2 D_s g} (L_{entrada} + 6(L_{joelho}) + 2(L_{valv. Gaveta}) + L_{reto}) \quad (3.5)$$

A velocidade de escoamento V_s é dada por:

$$V_s = \frac{4Q}{\pi D_s^2}, \quad \text{onde: } Q = 3 \frac{m^3}{h} = 0,000833 \text{ m}^3/s \quad (3.6)$$

$$V_s = \frac{4(0,000833)}{\pi(0,0381)^2} = 0,7309 \text{ m/s} \quad (3.7)$$

Número de Reynolds e fator f:

O número de Reynolds é adimensional e utilizado para determinar o regime de um escoamento. Ele é calculado pela fórmula (3.8).

$$Re = \frac{\rho V_s D_s}{\mu} = \frac{(1840)(0,7309)(0,0381)}{(26,7 \cdot 10^{-3})} = 1919,21 \quad (3.8)$$

Como o número de Reynolds é menor que 2000 para essas condições, considera-se um escoamento laminar. Portanto, o fator de atrito pode ser calculado em (3.9).

$$f_s = \frac{64}{Re} = 0,033 \quad (3.9)$$

Agora, tendo todos os termos necessários, pode-se calcular a perda de carga total na linha de sucção e a altura manométrica de sucção.

$$h_{fs} = \frac{f_s V_s^2 L_{total}}{2 D_s g} = \frac{(0,033)(0,73)^2}{2(0,0381)(9,81)} (14,95) = 0,36 \text{ m} \quad (3.10)$$

$$H_s = \frac{p_s}{\gamma} + z_s - h_{fs} = \frac{9025,2}{18050,4} + (1,0) - 0,36 = 1,14 \text{ m} \quad (3.11)$$

3.1.4 Altura Manométrica de Descarga

A altura manométrica de descarga é descrita pela fórmula (3.12).

$$H_d = \frac{p_d}{\gamma} + z_d + h_{fd} \quad (3.12)$$

3.1.4.1 Altura Estática de Descarga

A altura estática de descarga é dada pelo comprimento vertical entre a bomba e o misturador estático. Dessa forma, utilizando a figura 3-1, tem-se:

$$Z_d = 4,0 \text{ m} \quad (3.13)$$

3.1.4.2 Pressão Manométrica no Reservatório de Descarga

O misturador estático encontra-se aberto e, portanto, está sujeito a pressão atmosférica. Assim:

$$P_d = 101325 \text{ Pa} \quad (3.14)$$

3.1.4.3 Perda de Carga na Linha e Acessórios de Descarga

A metodologia usada para calcular a perda de carga total consiste no método do comprimento equivalente, similar ao realizado para a linha de sucção. Assim:

$$h_{fd} = \frac{f_d \cdot L_{total} \cdot V_d^2}{2 \cdot D_d \cdot g} \quad (3.15)$$

O comprimento da linha de descarga (L_{reto}) é de 6,3 m. Segundo as tabelas 2-1, 2-2, 2-3 e 2-4, as perdas existentes no circuito hidráulico são mostradas na tabela 3-4.

Tabela 3-4: Perda de carga na linha de descarga

Quantidade	Tipo de perda	Comprimento Equivalente [m]
1	Saída	2,13
2	Joelho 90°	1,37
1	Válvula de gaveta	0,53
1	Válvula de retenção	5,18

A perda total é dada pelo somatório de todas as perdas, levando em consideração a quantidade de acidentes no circuito.

$$h_{fd} = h_{saída} + 2(h_{joelh}) + h_{valv. Gaveta} + h_{valv. Retenção} + h_{reto} \quad (3.16)$$

$$h_{fd} = \frac{f \cdot V_d^2}{2 \cdot D_d \cdot g} (L_{saída} + 2(L_{joelh}) + L_{valv. Gaveta} + h_{valv. Retenção} + L_{reto}) \quad (3.17)$$

A velocidade de escoamento V_d é dada por (3.18).

$$V_d = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_d^2}, \text{ onde: } Q = 3 \frac{m^3}{h} = 0,000833 \text{ m}^3/s \quad (3.18)$$

$$V_d = \frac{4(0,000833)}{\pi \cdot (0,0381)^2} = 0,7309 \text{ m/s} \quad (3.19)$$

Número de Reynolds e fator f:

Como a velocidade de escoamento, e as características do fluido e do circuito se mantiveram as mesmas, o número de Reynolds e o fator f são iguais ao da sucção.

$$Re = \frac{\rho \cdot V_s \cdot D_s}{\mu} = 1919,21 \quad (3.20)$$

$$f_d = \frac{64}{Re} = 0,033 \quad (3.21)$$

Agora, tendo todos os termos necessários, pode-se calcular a perda de carga total na linha de descarga e a altura manométrica de descarga, substituindo (3.19), (3.20) e (3.21) em (3.22)

$$h_{fd} = \frac{f_d \cdot V_d^2 \cdot L_{total}}{2 \cdot D_d \cdot g} = \frac{(0,033)(0,73)^2}{2(0,0381)(9,81)} (16,88) = 0,40 \text{ m} \quad (3.22)$$

$$H_d = \frac{p_d}{\gamma} + z_d + h_{fd} = \frac{101325}{18050,4} + (4,0) + 0,40 = 10,02 \text{ m} \quad (3.23)$$

3.1.5 Altura Manométrica do Sistema

Com as alturas manométricas de sucção e descarga calculadas, pode-se determinar a altura manométrica do sistema, conforme a equação (3.24).

$$H = H_d - H_s = 10,02 - (1,14) = 8,88 \text{ m} \quad (3.24)$$

3.1.6 Curva Característica do Sistema

A curva característica do sistema é um gráfico que relaciona a altura manométrica do sistema com a vazão. Com isso, foram calculados seis valores diferentes de vazões, repetindo as etapas realizadas nas seções 3.1.3, 3.1.4 e 3.1.5 com a finalidade de encontrar H_s , H_d e H , mostrado na tabela 3-5.

Tabela 3-5: Vazão e Head do sistema

Q[G.P.M.]	Q[m ³ /h]	H sistema [m]
1,0	0,227	8,171
5,0	1,135	8,401
10,0	2,271	8,688
15,0	3,406	8,975
20,0	4,542	9,262
25,0	5,677	9,549

O gráfico da curva do sistema é mostrado na figura 3-2.

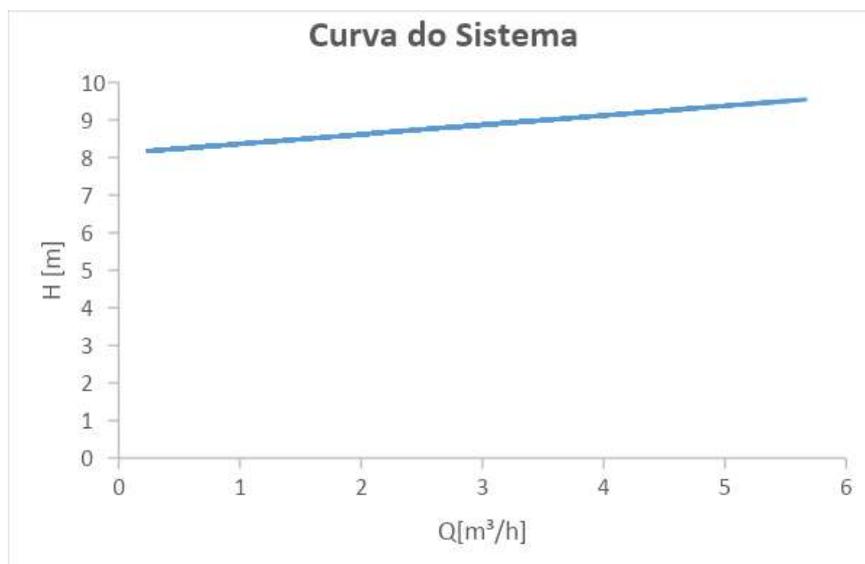


Figura 3-2: Curva do sistema para o circuito do ácido sulfúrico

3.1.7 Cálculo do NPSH Disponível

O cálculo do NPSH disponível é feito através da seguinte fórmula:

$$NPSH_d = H_s + \frac{(p_{Atm} - p_v)}{\gamma} \quad (3.25)$$

Para $Q = 3 \text{ m}^3/\text{h}$, tem-se a tabela 3-6.

Tabela 3-6: Valores para o cálculo do NPSH disponível

H_s [m]	P_{atm} [Pascal]	P_v [Pascal]	γ [N/m^3]
1,14	101325	0,01	18050,4

Pode-se, então, construir a tabela 3-7 relacionando os valores de vazão com o NPSH disponível.

Tabela 3-7: Vazão e NPSH disponível

Q[G.P.M.]	Q[m ³ /h]	NPSH _d [m]
1,0	0,227	7,086
5,0	1,135	6,979
10,0	2,271	6,844
15,0	3,406	6,709
20,0	4,542	6,574
25,0	5,677	6,439

O gráfico do NPSH_d é mostrado na figura 3-3.

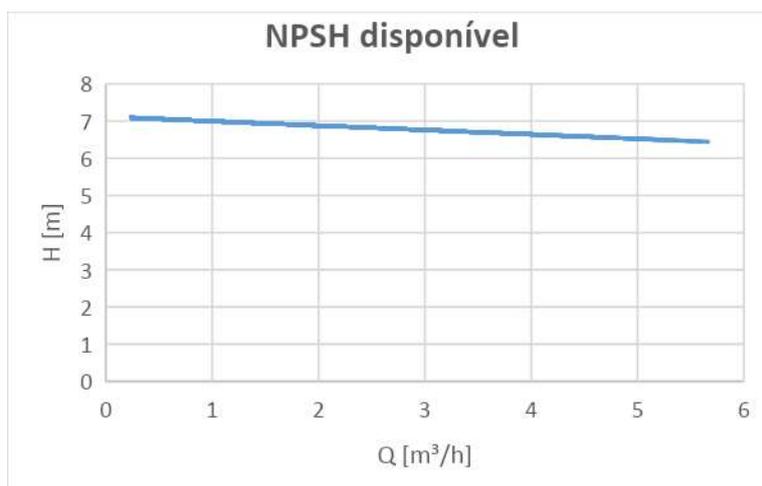


Figura 3-3: Gráfico do NPSH disponível do circuito ácido sulfúrico

3.2 Modelo de Cálculo para o Circuito Hidráulico do Hidróxido de Sódio

3.2.1 Propriedades do Fluido

O fluido considerado neste capítulo é o hidróxido de sódio à concentração de 50%. Nesse sentido, é importante ressaltar que a recirculação não afeta significativamente as suas características e, portanto, será considerado a suas condições ficam inalteradas durante todo o processo. Os cálculos serão feitos para as condições determinadas na tabela 3-8.

Tabela 3-8: Propriedades do hidróxido de sódio^[18]

Fluido	Temperatura [°C]	Massa Específica [kg/m ³]	Viscosidade [cP]	Pressão de Vapor [Pa]
Hidróxido de Sódio	22,0	1520	12,7	1733,19

3.2.2 Linhas de Sucção e Descarga

A vazão de projeto (Q) e o diâmetro (D) devem ser as mesmas da instalação atual para não ser necessário alterar a automatização do sistema da usina. Além disso, os diâmetros das linhas de sucção e descarga (D) são iguais, conforme a tabela 3-9.

Tabela 3-9: Vazão e diâmetro do circuito hidróxido de sódio

Vazão (m ³ /h)	Diâmetro [in]	Diâmetro [m]
3,0	2,0	0,0508

3.2.3 Altura Manométrica de Sucção

A altura manométrica de sucção é descrita pela equação (3.26).

$$H_s = \frac{p_s}{\gamma} + z_s - h_{fs} \quad (3.26)$$

3.2.3.1 Altura Estática de Sucção:

A altura estática de sucção é dada pelo somatório do comprimento vertical entre a bomba e o reservatório e a altura do fluido dentro desse reservatório. Considerando um caso crítico, a altura do fluido é de 0,5 m, similar ao circuito do ácido sulfúrico. Dessa forma, utilizando a figura 3-1, tem-se:

$$Z_s = 0,5 + 0,5 = 1,0 \text{ m} \quad (3.27)$$

3.2.3.2 Pressão Manométrica no Reservatório de Sucção

Será considerado o pior caso, ou seja, a menor pressão possível. Assim:

$$P_s = 7455,6 \text{ Pa} \quad (3.28)$$

3.2.3.3 Peso Específico

O peso específico é dado pela multiplicação da massa específica do fluido pela gravidade.

$$\gamma = \rho_{NaOH} \times g = 1520 \times 9,81 = 14911,2 \text{ N/m}^3 \quad (3.29)$$

3.2.3.4 Perda de Carga na Linha e Acessórios de Sucção

A metodologia usada para calcular a perda de carga total consiste no método do comprimento equivalente, similar ao realizado com o ácido sulfúrico [1].

$$h_{fs} = \frac{f_s \cdot L_{total} \cdot V_s^2}{2 \cdot D_s \cdot g} \quad (3.30)$$

O comprimento da linha de sucção (L_{reto}) é de 4,6 m. Segundo as tabelas 2-1, 2-2, 2-3 e 2-4, as perdas existentes no circuito hidráulico estão descritas na tabela 3-10.

Tabela 3-10: Perda de carga na linha de sucção

Quantidade	Tipo de perda	Comprimento Equivalente [m]
1	Entrada	1,37
6	Joelho 90°	1,60
2	Válvula de gaveta	0,69

A perda total é dada pelo somatório de todas as perdas, levando em consideração a quantidade de acidentes no circuito.

$$h_{fs} = h_{entrada} + 6(h_{joelh}) + 2(h_{valv. Gaveta}) + h_{Reto} \quad (3.31)$$

$$h_{fs} = \frac{f_s \cdot V_s^2}{2 \cdot D_s \cdot g} (L_{entrada} + 6(L_{joelho}) + 2(L_{valv. Gaveta}) + L_{Reto}) \quad (3.32)$$

A velocidade de escoamento V_s é dada por:

$$V_s = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_s^2}, \quad \text{onde: } Q = 3 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 0,000833 \text{ m}^3/\text{s} \quad (3.33)$$

$$V_s = \frac{4(0,000833)}{\pi \cdot (0,0508)^2} = 0,4111 \text{ m/s} \quad (3.34)$$

Número de Reynolds e fator f:

O número de Reynolds é adimensional e é utilizado para determinar o regime de um escoamento. Ele é definido pela fórmula (3.35).

$$Re = \frac{\rho \cdot V_s \cdot D_s}{\mu} = \frac{(1520)(0,4111)(0,0508)}{(12,7 \cdot 10^{-3})} = 2499,87 \quad (3.35)$$

Como o número de Reynolds está entre 2000 e 4000, **considera-se como um regime laminar**, pois a velocidade de escoamento é baixa e o fluido é viscoso. Portanto, o fator de atrito pode ser calculado em (3.36).

$$f_s = \frac{64}{Re} = 0,0256 \quad (3.36)$$

Agora, tendo todos os termos necessários, pode-se calcular a perda de carga total na linha de sucção e a altura manométrica de sucção nas equações (3.37) e (3.38).

$$h_{fs} = \frac{f_s \cdot V_s^2 \cdot L_{total}}{2D_s \cdot g} = \frac{(0,0256)(0,4111)^2}{2(0,0508)(9,81)}(16,95) = 0,0736 \text{ m} \quad (3.37)$$

$$H_s = \frac{p_s}{\gamma} + z_s - h_{fs} = \frac{7455,6}{14911,2} + (1,0) - 0,0736 = 1,42 \text{ m} \quad (3.38)$$

3.2.4 Altura Manométrica de Descarga

A altura manométrica de descarga é descrita pela equação (3.39).

$$H_d = \frac{p_d}{\gamma} + z_d + h_{fd} \quad (3.39)$$

3.2.4.1 Altura Estática de Descarga

A altura estática de descarga é dada pelo comprimento vertical entre a bomba e o misturador estático. Dessa forma, utilizando a figura 3-1, tem-se:

$$Z_d = 4,0 \text{ m} \quad (3.40)$$

3.2.4.2 Pressão Manométrica no Reservatório de Descarga

O misturador estático encontra-se aberto e, portanto, está sujeito a pressão atmosférica. Assim:

$$P_d = 101325 \text{ Pa} \quad (3.41)$$

3.2.4.3 Perda de Carga na Linha e Acessórios de Descarga

A metodologia usada para calcular a perda de carga total consiste no método do comprimento equivalente, similar ao realizado para a linha de sucção. Assim:

$$h_{fd} = \frac{f_d \cdot L_{total} \cdot V_d^2}{2 \cdot D_d \cdot g} \quad (3.42)$$

O comprimento da linha de descarga (L_{reto}) é de 6,3 m. Segundo as tabelas 2-1, 2-2, 2-3 e 2-4, as perdas existentes no circuito hidráulico são mostradas na tabela 3-11.

Tabela 3-11: Perda de carga na linha de descarga

Quantidade	Tipo de perda	Comprimento Equivalente [m]
1	Saída	2,74
2	Joelho 90°	1,60
1	Válvula de gaveta	0,69
1	Válvula de retenção	6,71

A perda total é dada pelo somatório de todas as perdas, levando em consideração a quantidade de acidentes no circuito.

$$h_{fd} = h_{saída} + 2(h_{joelho}) + h_{Valv. Gaveta} + h_{Valv. Retenção} + h_{Reto} \quad (3.43)$$

$$h_{fd} = \frac{f \cdot V_d^2}{2 \cdot D_d \cdot g} (L_{saída} + 2(L_{joelho}) + L_{Valv. Gaveta} + h_{Valv. Retenção} + L_{Reto}) \quad (3.44)$$

A velocidade de escoamento V_d é dada pela equação (3.45).

$$V_d = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_d^2}, \quad Q = 3 \frac{m^3}{h} = 0,000833 \text{ m}^3/s \quad (3.45)$$

$$V_d = \frac{4(0,000833)}{\pi \cdot (0,0508)^2} = 0,4111 \text{ m/s} \quad (3.46)$$

Número de Reynolds e fator f:

Como a velocidade de escoamento, e as características do fluido e do circuito se mantiveram as mesmas, o número de Reynolds e o fator f são iguais ao da sucção.

$$Re = \frac{\rho \cdot V_s \cdot D_s}{\mu} = 2499,87 \quad (3.47)$$

$$f_d = \frac{64}{Re} = 0,0256 \quad (3.48)$$

Agora, tendo todos os termos necessários, pode-se calcular a perda de carga total na linha de descarga e a altura manométrica de descarga substituindo (3.46), (3.47) e (3.48) em (3.49) e, posteriormente, em (3.50).

$$h_{fd} = \frac{f_d \cdot V_d^2 \cdot L_{total}}{2 \cdot D_d \cdot g} = \frac{(0,0256)(0,4111)^2}{2(0,0508)(9,81)} (19,64) = 0,0852 \text{ m} \quad (3.49)$$

$$H_d = \frac{p_d}{\gamma} + z_d + h_{fd} = \frac{101325}{14911,2} + (4,0) + 0,0852 = 10,88 \text{ m} \quad (3.50)$$

3.2.5 Altura Manométrica do Sistema

Com as alturas manométricas de sucção e descarga calculadas, pode-se determinar a altura manométrica do sistema, conforme a equação (3.51).

$$H = H_d - H_s = 10,88 - (1,42) = 9,46 \text{ m} \quad (3.51)$$

3.2.6 Curva Característica do Sistema

A curva característica do sistema é um gráfico que relaciona a altura manométrica do sistema com a vazão. Com isso, tomaremos cinco valores diferentes de vazões e repetiremos as etapas realizadas nas seções 3.2.3, 3.2.4 e 3.2.5 com a finalidade de encontrar H_s , H_d e H . Os valores são mostrados na tabela 3-12.

Tabela 3-12: Vazões associadas aos heads do sistema

Q[G.P.M.]	Q [m³/h]	H sistema [m]
1,0	0,227	9,307
5,0	1,135	9,355
10,0	2,270	9,415
15,0	3,406	9,475
20,0	4,541	9,535

O gráfico da curva do sistema é mostrado na figura 3-4.

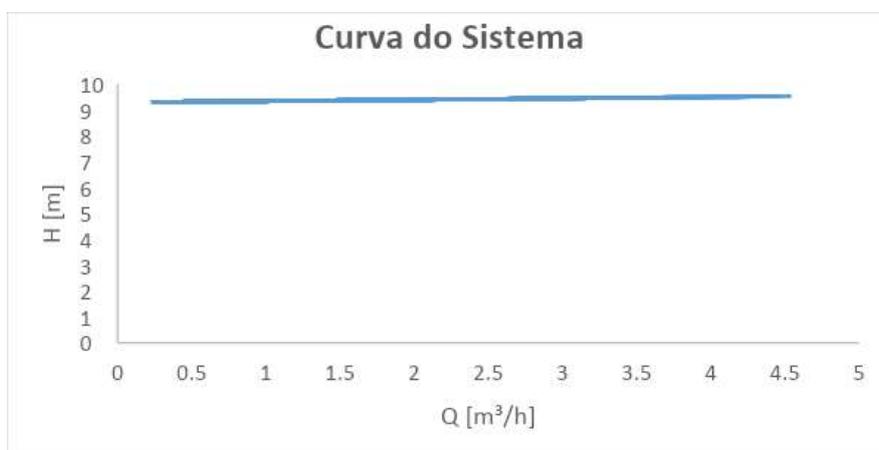


Figura 3-4: Curva do sistema para o circuito do hidróxido de sódio

3.2.7 Cálculo do NPSH Disponível

O cálculo do NPSH disponível é feito através da equação (3.52).

$$NPSH_d = H_s + \frac{(p_{Atm} - p_v)}{\gamma} \quad (3.52)$$

Para $Q = 3 \text{ m}^3/\text{h}$, os valores para calcular $NPSH_d$ estão mostrados na tabela 3-13.

Tabela 3-13: Valores para o cálculo do NPSH disponível

H_s [m]	P_{atm} [Pascal]	P_v [Pascal]	γ [N/m³]
1,42	101325	1733,19	14911,2

Pode-se, então, construir a tabela 3-14 relacionando os valores de vazão com o NPSH disponível.

Tabela 3-14: Valores de vazão e NPSH disponível

Q[G.P.M.]	Q(m ³ /h)	NPSHd (m)
1,0	0,227	8,173
5,0	1,135	8,151
10,0	2,270	8,123
15,0	3,406	8,095
20,0	4,541	8,067

O gráfico do NPSH disponível é mostrado na figura 3-5.

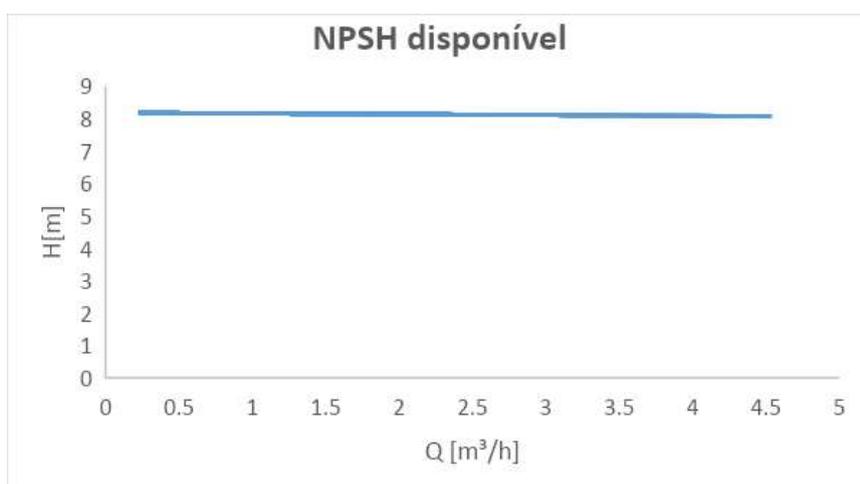


Figura 3-5: Curva de NPSH disponível para o circuito hidróxido de sódio

4. ESCOLHA DO MATERIAL PARA A TUBULAÇÃO

Considerando o contexto de uma usina nuclear, o objetivo deste capítulo é de selecionar o melhor material para compor a tubulação do circuito hidráulico. Para isso, será necessário descrever e avaliar as propriedades físico-químicas de 3 candidatos: **aço carbono com revestimento, aço inoxidável e polímeros**. Além disso, o critério mais importante levado em consideração são com relação a degradação desses materiais e necessidade de manutenção ao longo do tempo, principalmente devido ao efeito da corrosão.

A **corrosão** é definida como sendo o ataque destrutivo e não intencional de um metal; esse ataque é eletroquímico e, normalmente, tem seu início na superfície do material [14]. Nesse sentido, o ar é naturalmente um meio corrosivo, pois é composto por moléculas de água e oxigênio. A reação de oxirredução mostrada em (4.1), (4.2) e (4.3) ilustra a corrosão do ferro, popularmente conhecida como “ferrugem”.



Além disso, segundo [15], ambientes com pH ácido intensificam o processo de corrosão. Portanto, principalmente em regiões urbanizadas, a concentração de CO₂ na atmosfera origina as chamadas “chuvas ácidas”, o que pode acelerar a degradação do material se exposto a elas.

Considerando o contexto deste trabalho, o circuito hidráulico dificilmente estaria exposto a ação de chuvas ácidas ou quaisquer condições ambientais adversas, pois se encontra em ambientes confinados. No entanto, tendo o ácido sulfúrico como um dos fluidos bombeados, a elevada concentração de íons H⁺ pode, portanto, acelerar a degradação do material. A figura 4-1 ilustra os efeitos da corrosão em materiais compostos por ferro:



Figura 4-1: Corrosão (ferrugem) de tubulações e juntas [6]

Existem outras duas variáveis que podem aumentar a taxa de corrosão dos materiais que estão em contato com esse ambiente: a velocidade do fluido e a temperatura. Ou seja, quanto maior forem esses dois fatores, maior é a influência sobre as propriedades de corrosão; o aumento da velocidade tem impacto direto na corrosão devido a efeitos de erosão e o aumento da temperatura funciona como catalisador, aumentando as taxas da reação química. Todavia, conforme descrito no capítulo 3, a velocidade de escoamento dos fluidos é baixa e o sistema está exposto à temperatura ambiente e, portanto, esses dois fatores não possuem tanta influência na corrosão neste caso específico.

4.1 Aço Carbono com Revestimento

Os aços são ligas de ferro-carbono, onde o ferro é o constituinte principal. Suas propriedades mecânicas são bastante sensíveis à concentração de carbono, que normalmente não é inferior a 1%p C. Quando a concentração de carbono é inferior a 0,25%p C, denomina-se aço de baixo teor de carbono. Em concentrações entre aproximadamente 0,25% e 0,60%p C, chama-se aço com médio teor de carbono. Por fim, concentrações entre 0,60% e 1,4%p C, denomina-se aço com alto teor de carbono.

De forma geral, quanto maior a concentração de carbono existente no material, maior a sua resistência e dureza. Isso faz com que aumentem significativamente as possibilidades de aplicação do material, principalmente quando se exige resistência ao desgaste e a abrasão. No entanto, a adição de carbono faz com que o material perca

ductilidade e tenacidade, fazendo com que a escolha do material dependa principalmente da análise das características desejadas mais importantes.

No entanto, conforme demonstrado no início do capítulo, a principal desvantagem desse material é a suscetibilidade à corrosão. Com isso, uma alternativa bastante comum no setor industrial é a aplicação de um revestimento utilizando um metal com potencial de oxidação maior que o do ferro, com a finalidade de protegê-lo. O zinco e o magnésio são excelentes candidatos e, quando o metal de “sacrifício” escolhido é o zinco, denomina-se o procedimento de galvanização em homenagem ao cientista Luigi Galvani (1737-1798).

Portanto, embora a utilização do aço carbono com uma película protetora seja uma alternativa interessante de forma geral, a necessidade de fazer manutenções e reforçar o revestimento de tempos em tempos, torna essa solução desagradável para este trabalho. Conforme mencionado anteriormente, a estação de desmineralização de uma usina nuclear geralmente não possui prioridades para manutenção, devido a importância dos outros sistemas para a segurança do reator.

4.2 Aço Inoxidável

Diferentemente dos aços carbonos, o aço inoxidável é bastante resistente à corrosão, especialmente na atmosfera ambiente. Essa característica é devido a presença do cromo como liga predominante a, pelo menos, 11%p e isso faz com que o material seja menos reativo. A formação de uma película protetora finíssima de óxido de cromo sobre a superfície do aço torna-o impermeável e insolúvel nos meios corrosivos usuais.

Existem situações em que o material é exposto há meios extremamente corrosivos. Nesses casos, é bastante comum adicionar os elementos níquel e molibdênio para melhorar a resistência à corrosão. Evidentemente que, quanto mais elementos são adicionados, maior é a quantidade de tratamentos térmicos feitos e, conseqüentemente, maiores serão os custos desse material.

No contexto deste trabalho, o circuito hidráulico não estaria sujeito a temperaturas elevadas, nem a ambientes corrosivos extremos, portanto não seria necessário escolher esse tipo de material, pois apresenta um custo muito elevado ao projeto.

4.3 Polímeros

Os polímeros que são derivados de plantas e animais têm sido usados por muitos séculos, como a borracha, a madeira, o algodão, etc. No entanto, ferramentas modernas de pesquisa científicas tornaram possível a determinação de estruturas moleculares de numerosos polímeros, sintetizados a partir de moléculas orgânicas pequenas. Esta seção tem como objetivo analisar justamente essa classe de sintéticos que vem revolucionando o campo dos materiais, desde o fim da Segunda Guerra Mundial.

Uma das principais características desses materiais sintéticos é o preço. De fato, eles podem ser produzidos de maneira mais barata, e suas propriedades podem ser administradas num nível altamente eficaz. Peças metálicas e de madeira são frequentemente substituídas por polímeros, pois possuem propriedades satisfatórias e com custos mais baixos.

Trazendo efetivamente para o contexto deste trabalho, seria necessário escolher um material que tivesse uma boa compatibilidade química com ácidos e bases, além de uma elevada resistência à corrosão. Com isso, o Polifluoreto de vinilideno (comercialmente conhecido por PVDF) é um ótimo candidato; ele consiste em um termoplástico parcialmente cristalino, pertencente ao grupo de polímeros com teor de flúor.

Com aproximadamente 59% de teor de flúor, o PVDF possui uma boa resistência química, além de propriedades mecânicas satisfatórias (dureza, rigidez, etc.). A forte ligação entre o flúor muito eletronegativo e o carbono é a razão para a elevada resistência a ácidos e bases [7]. Isso tudo permite que sejam bastante utilizados na construção de instalações químicas, o que é o caso deste trabalho.

A estrutura molecular do polifluoreto de vinilideno é ilustrada na figura 4-2.

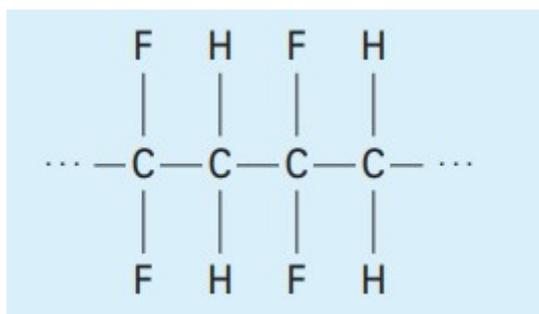


Figura 4-2: Estrutura molecular do PVDF [7]

4.4 Definição do Material

O problema da corrosão metálica é um que apresenta proporções significativas; em termos econômicos, foi estimado que aproximadamente 5% da receita de uma nação industrializada são gastos de prevenção e manutenção ou substituição de produtos perdidos ou contaminados como resultado de reações de corrosão [14].

Os critérios adotados neste trabalho para seleção do material mais apropriado para a tubulação são:

- a) Necessidade recorrente de manutenção
- b) Manuseio e flexibilidade
- c) Compatibilidade com ácidos e bases fortes
- d) Impacto ao meio ambiente (composição e potencial reciclável)
- e) Custo *versus* benefício

A necessidade recorrente de manutenção e o difícil manuseio dos equipamentos são duas grandes desvantagens para a instalação do circuito hidráulico. Conforme mencionado anteriormente, a estação de água desmineralizada de uma usina nuclear normalmente não possui prioridade de manutenção, vide a maior importância dos outros sistemas para garantir a segurança do reator, e ela deve ser feita da forma mais rápida e simples possível. Nesse sentido, dentre os três candidatos para a instalação listados anteriormente, o PVDF é o material com maior flexibilidade e facilidade de manusear, além de não precisar fazer manutenções recorrentes, como é o caso do aço carbono revestido.

Além disso, embora o aço inoxidável consiga retardar a corrosão devido a suas características estruturais e o aço carbono revestido tenha uma proteção significativa contra o mesmo problema, o PVDF é o que possui maior resistência à degradação. Esse polímero também possui uma excelente compatibilidade química com ácidos e bases fortes devido a presença do flúor.

No quesito ambiental, os polímeros em geral são materiais recicláveis e isso vem se tornando um critério cada vez mais importante, devido a rigorosidade das leis ambientais. A composição do PVDF permite que ele seja reaproveitado para diversas aplicações, principalmente na indústria química.

A relação de custo *versus* benefício oferecido pelo PVDF é, portanto, ainda melhor que o ácido inoxidável e o aço carbono com revestimento. Segundo [14], os materiais sintéticos (polímeros) podem ser produzidos de maneira mais barata e mantendo propriedades físico-químicas atrativas. Portanto, será escolhido o PVDF como material para a tubulação.

5. DEFINIÇÃO DO TIPO DE VEDAÇÃO DA BOMBA

Com o objetivo de chegar na melhor configuração de uma bomba, levando em consideração os fluidos utilizados no sistema, este capítulo será dedicado a comparar as duas principais formas de vedação. Será explicado, assim, o funcionamento tanto do selo mecânico, quanto o acoplamento magnético, além de suas vantagens e desvantagens.

5.1 Selo Mecânico

A utilização dos selos mecânicos no mercado começou a partir do início do século XX, com a necessidade de substituir as gaxetas em situações onde o não poderia haver vazamento. Operações com líquidos corrosivos, com elevadas temperaturas, pressões e velocidades são exemplos claros onde isso acontece. De forma geral, as gaxetas são eficientes na vedação de bombas operando com fluidos não perigosos: limpos, não tóxicos, não inflamáveis, etc. A figura 5-1 mostra uma caixa de gaxeta.

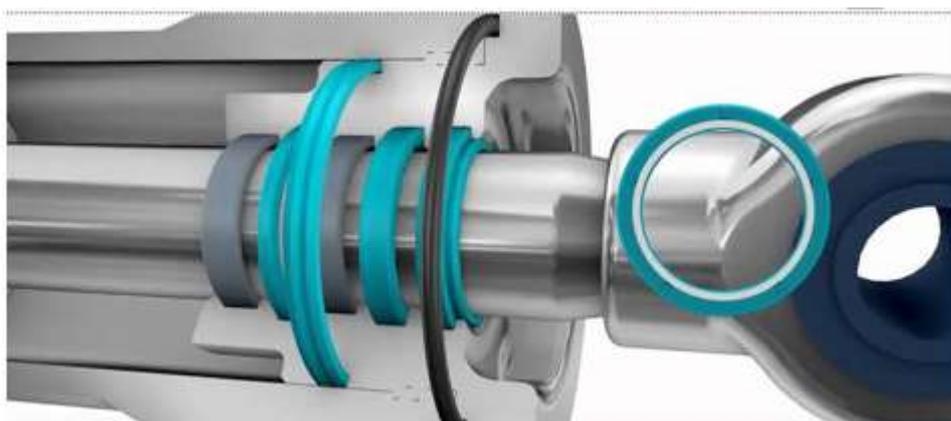


Figura 5-1: Caixa de gaxeta [8]

Diferentemente dos selos mecânicos, nas caixas de gaxetas, a selagem entre o eixo ou a luva de eixo e a parte estacionária da caixa é feita por meio de anéis de gaxeta colocados entre as duas superfícies e mantido apertados pela sobreposta da caixa de gaxetas. O vazamento em volta do eixo é meramente controlado pelo maior ou menor aperto da sobreposta. Entretanto, após um certo ponto o vazamento continua, independentemente do quão apertado esteja. Assim, a potência de atrito aumenta e o calor gerado não é dissipado e a caixa de gaxeta falha em sua função [1].

Assim, tornou-se necessário o desenvolvimento do selo mecânico como um novo tipo de caixa de vedação. Sua aceitação no mercado se mostrou bastante positiva nas aplicações de bombeamento, mas apresenta algumas limitações.

5.1.1 Principais Características

O selo mecânico é um tipo de vedação dinâmica com contato e destina-se a isolar dois, ou mais ambientes, quando entre eles passar um eixo rotativo com nenhum ou com pouco deslocamento axial, segundo Kretschek (1995).

Desde o início do século XX, a forma de um selo mecânico foi se tornando cada vez mais aprimorada. Atualmente, existem diversos tipos de configurações como por exemplo: com auxílio de molas - para aumentar a flexibilidade - e até com montagem dupla (costa a costa) - para líquidos altamente inflamáveis.

Os selos mecânicos podem ser divididos em dois arranjos básicos: com montagem interna ou com montagem externa. O primeiro possui a sede rotativa localizada dentro da caixa de selagem e fica em contato direto com o fluido bombeado. O segundo, por sua vez, a sede rotativa está localizada fora da caixa de selagem. A figura 5-2 ilustra a diferença entre os dois arranjos.

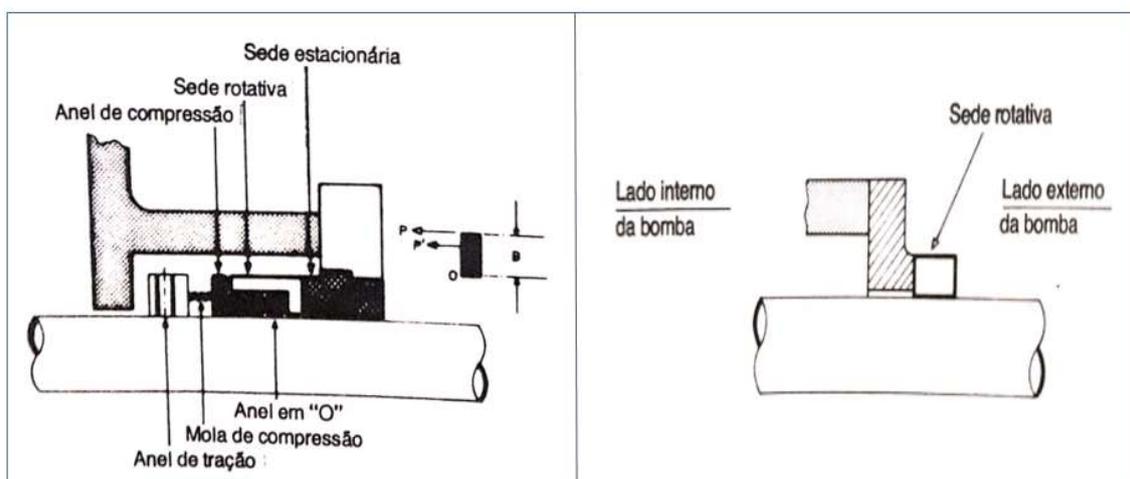


Figura 5-2: Caixa de selagem com montagem interna (à esquerda) e caixa de selagem com montagem externa (à direita) ^[1]

5.1.2 Princípio de Funcionamento

A vedação, conhecida como primária ou dinâmica, acontece quando a força exercida pela mola ou a pressão do fluido atuante na caixa de vedação deslocam o anel deslizante contra a sede estacionária. As duas peças em contato, uma girando e outra parada, impedem que o fluido vaze em grande quantidade. No entanto, o atrito gerado do

contato aumenta o desgaste das peças e, somando o calor excessivo, diminui a vida útil do selo mecânico.

A fim de mitigar esse problema, é necessário que o fluido circule em grande quantidade dentro da caixa de vedação, formando um filme lubrificante. Ele penetra na interface e atua minimizando o calor gerado e reduzindo o desgaste do anel de selagem e da sede estacionária. Com isso, para evitar que não ocorra o desgaste prematuro das faces, todos os selos mecânicos devem ter um vazamento mínimo. A figura 5-3 ilustra a ação do filme lubrificante.

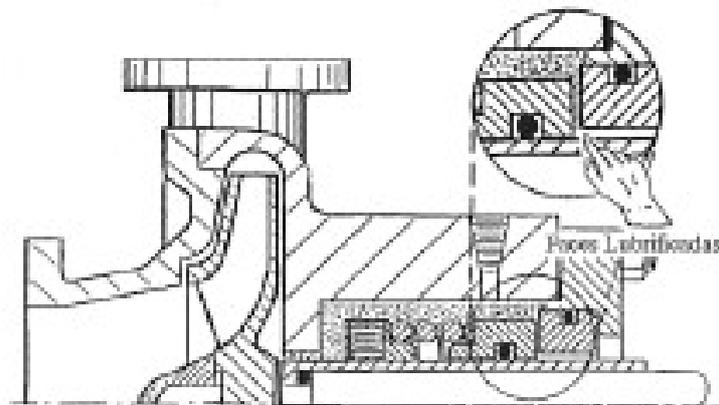


Figura 5-3: Filme lubrificante ^[9]

Atualmente, devido a regulamentos ambientais e de segurança mais rigorosos, estimulou-se o aparecimento de tecnologias onde o vazamento de líquido é zero. Esse é o caso de bombas com acoplamento magnético, sendo abordado na seção 5.2.

5.2 Acoplamento Magnético

5.2.1 Principais Características

O acoplamento magnético possui um sistema de selagem hermética, que pode ser utilizado para todos os tipos de equipamentos rotativos. Considerando as bombas centrífugas, esse tipo de selagem é estático entre a carcaça (ou copo) e a caixa da bomba, onde está o eixo interno. Com isso, a vedação ocorre através de uma barreira estática que dispensa uma vedação dinâmica de eixo, como o que acontece para selos mecânicos e gaxetas. A figura 5-4 ilustra alguns componentes de uma bomba magnética.

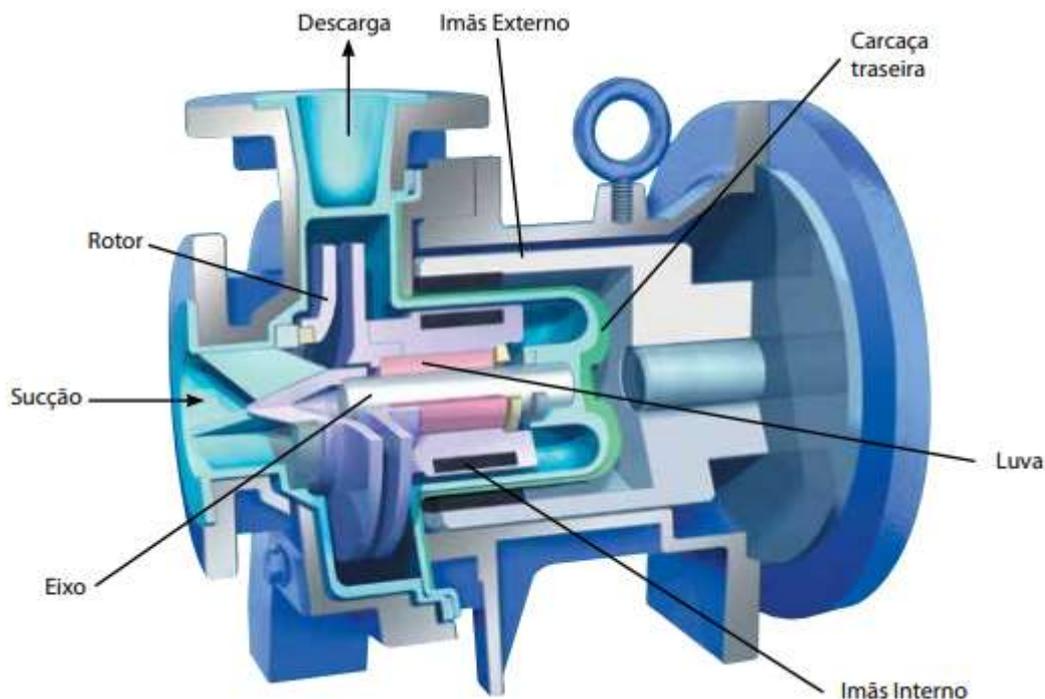


Figura 5-4: Componentes de uma bomba magnética ^[10]

As aplicações para esse tipo de bomba são voltadas para situações onde o vazamento do fluido bombeado é inaceitável, seja pela proteção do operador e do ambiente, seja pelo desperdício de um produto caro. Normalmente, as bombas são fabricadas em Polipropileno e PVDF, tornando-se bastante interessante para este trabalho, pois trata-se de fluidos extremamente agressivos para humanos e materiais de aço carbono: ácido sulfúrico e soda cáustica.

5.2.2 Princípio de Funcionamento

As bombas com acionamento magnético possuem **transmissão de torque indireta** do motor para o rotor interno. Isso ocorre, pois, o conjunto condutor (rotor externo - motor elétrico) e o conjunto conduzido (rotor interno) possuem potentes magnetos axiais distribuídos. Assim, quando a bomba é ligada e os ímãs externos rodam, os ímãs internos são acoplados pela força magnética e fazem girar o rotor na mesma velocidade do motor.

A potência necessária para transmissão do torque depende unicamente da quantidade de magnetos instalada na direção axial e radial. O polo sul no rotor interno é sempre oposto ao pólo norte no rotor externo e vice-versa. Isso faz com que exista uma

sincronia e os rotores sempre girem na mesma velocidade angular, sem deslizamentos. A figura 5-5 ilustra o acoplamento magnético.

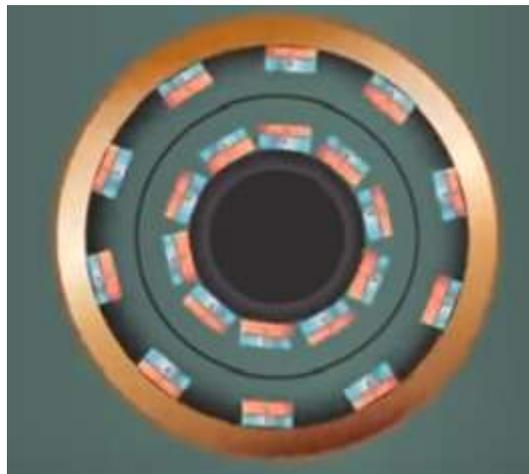


Figura 5-5: Rotores acoplados magneticamente [11]

A circulação do líquido na câmara formada pela carcaça (unidade de contenção) do acoplamento magnético é essencial para a operação da bomba. Isso garante não só a dissipação de calor interna, como também a lubrificação da superfície dos componentes.

5.3 Escolha do Tipo de Bomba

A escolha do melhor tipo de bomba com relação a vedação deve levar em conta as características do selo mecânico e do acoplamento magnético, demonstradas nas seções anteriores. Além disso, é imprescindível considerar o tipo de fluido bombeado (ácido sulfúrico e soda cáustica), pois o seu contato com a pele humana pode causar consequências gravíssimas.

Portanto, pode-se concluir que **a configuração de um acoplamento magnético é mais interessante por não utilizar uma vedação dinâmica**. Isso fica mais evidente quando ocorrem vibrações e envelhecimento do selo mecânico, causando perda de integridade e vazamentos.

Uma vez que a distância entre o eixo e o mancal de apoio das bombas magnéticas é curta, a deformação do eixo geralmente não é um problema catastrófico, diferentemente das bombas que utilizam selos mecânicos. As pequenas deflexões não causam danos aos rotores e, portanto, há um menor número de trocas e manutenções.

No entanto, algumas precauções devem ser tomadas para o uso das bombas magnéticas. Devido ao campo magnético criado, a proximidade de peças magnetizáveis como celulares, computadores e até de pessoas com marca-passo cardíaco pode causar dano tanto ao material, como pessoal. Além disso, é importante que o alinhamento e centralização entre os rotores internos e externos seja feita com precisão para o correto funcionamento da bomba, evitando perda de torque.

A desvantagem com relação a escolha das bombas magnéticas está no quesito financeiro. Essa linha de bombas geralmente possui um preço mais elevado que as tradicionais de selo mecânico. Portanto, dependendo do valor destinado ao projeto, talvez isso seja um fator determinante.

6. SELEÇÃO DA BOMBA

A escolha da bomba ideal para o sistema pode ser difícil de ser feita por diversos motivos. É necessário estar de acordo com os critérios financeiros, logísticos, dentre outros determinados pelo projeto. No entanto, o objetivo desse trabalho é escolher uma bomba para cada sistema – ácido sulfúrico e hidróxido de sódio – e que tenham o máximo de características desejáveis ao sistema, obedecendo os critérios mínimos de projeto.

Conforme determinado no capítulo 5, o modelo escolhido para o projeto será de uma bomba centrífuga com acoplamento magnético, devido ao fato de evitar possíveis vazamentos de resina. Nesse sentido, qualquer bomba que respeite esses critérios poderia ser utilizada, basta avaliar através dos cálculos matemáticos se ela estaria adequada a dimensão do projeto. Dentre alguns fornecedores destacam-se: Pompes Japy, Calpeda Pompes, HNP Mikrosysteme, Hainzl Industriesysteme, March Pump e Gemme Cotti. Assim, foram selecionadas duas bombas com essas características, com fornecedores diferentes (March Pump e Gemme Cotti), para cada um dos sistemas estudado – ácido sulfúrico e soda cáustica.

Para a seleção da bomba, será necessário tomar uso de todas as informações do capítulo anterior, baseando a escolha em cálculos matemáticos e critérios que serão avaliados a seguir – Eficiência, Ponto de Operação e Ocorrência de Cavitação.

6.1 Seleção de uma bomba para o circuito hidráulico ácido sulfúrico

6.1.1 Fornecedor March Pump

Avaliaremos nessa seção a viabilidade de implantar a bomba do fabricante March Pump para o circuito hidráulico ácido sulfúrico. As suas respectivas curvas características estão presentes na figura 6-1.

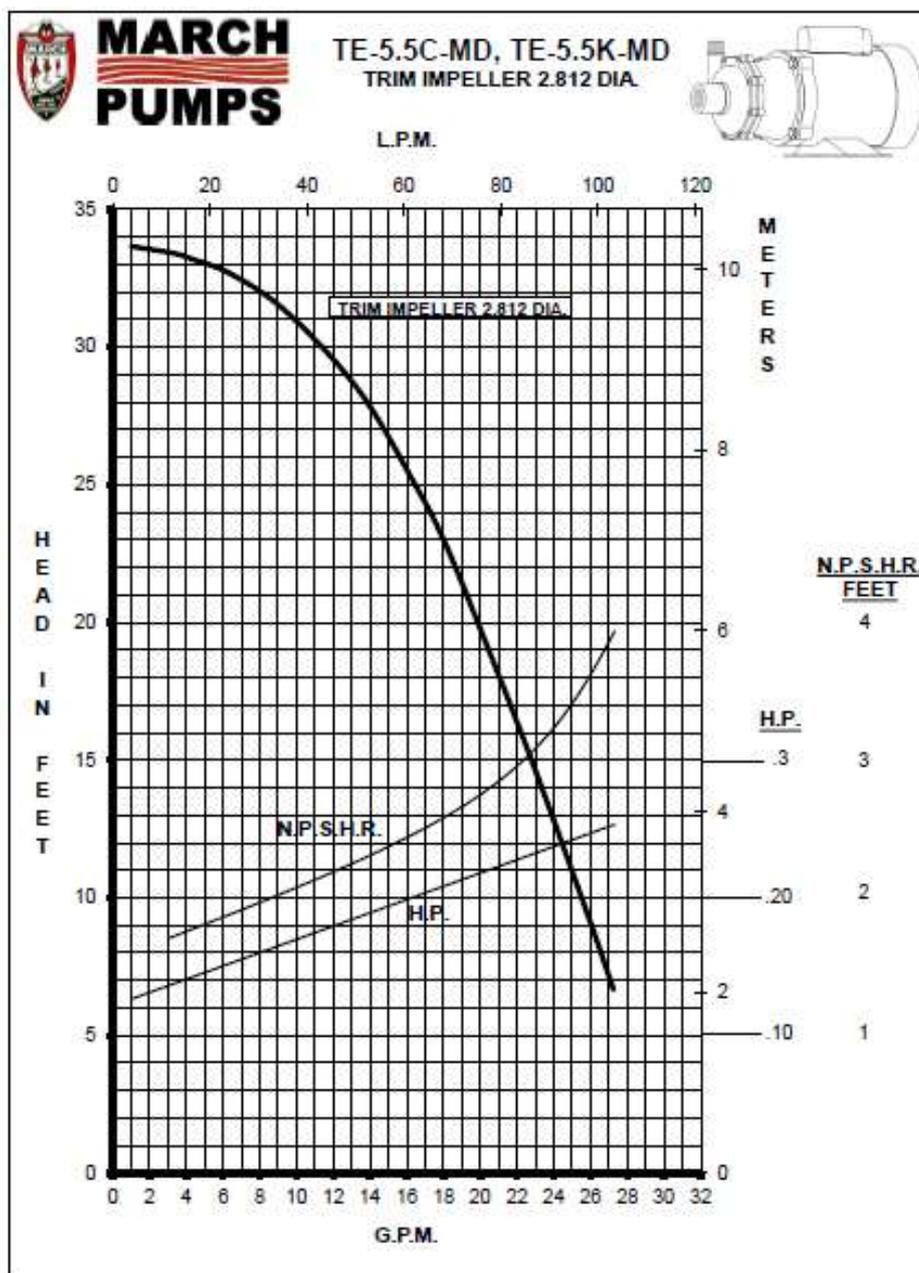


Figura 6-1: Curvas características da bomba magnética March Pump ^[12]

Para realizar as devidas comparações nas próximas seções, foi feita a conversão de unidades de vazão e head do sistema americano (G.P.M e feet, respectivamente) para m^3/h e metros.

6.1.1.1 Eficiência

O fabricante em questão não forneceu a curva de eficiência x vazão diretamente. No entanto, pode-se chegar a essa curva com os valores de **potência, vazão e head** fornecidos, através da relação mostrada na seção 2.4.3.

$$Pot_{Abs} = \frac{Pot}{\eta} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta} \quad (6.1)$$

É importante ressaltar que as curvas foram corrigidas para a viscosidade do ácido sulfúrico, através do método mostrado na seção 2.4.5. Desta forma, o gráfico é mostrado na figura 6-2.

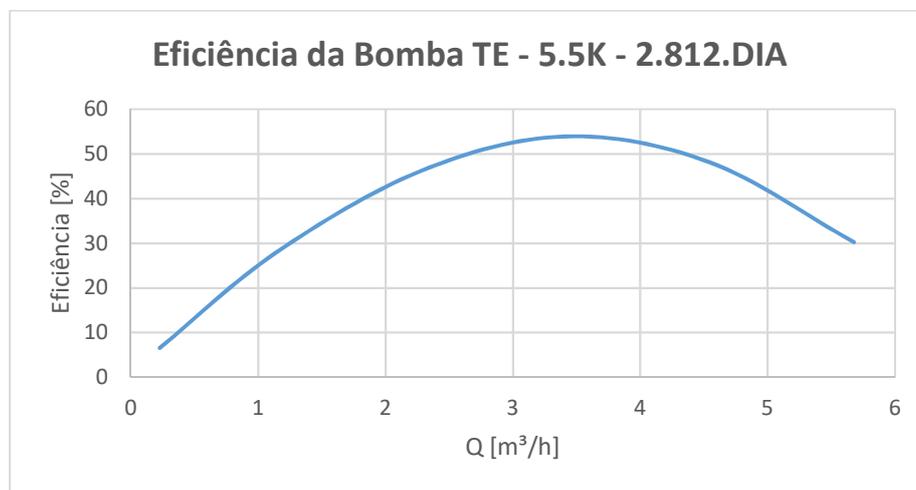


Figura 6-2: Eficiência da bomba TE - 5.5K - 2.812.DIA

O critério utilizado para a seleção da bomba foi o API 610, que determina as faixas de vazão para qual têm-se a melhor eficiência da bomba (BEP – *Best Efficiency Point*).

A primeira faixa é a permitida de operação definida pelo fabricante, onde define-se os limites máximo e mínimo para a vazão que a bomba pode operar. O segundo intervalo, no entanto, é chamado de faixa preferível e abrange de 70% a 120% do BEP. O terceiro é conhecido como a faixa ideal, abrangendo de 80% a 110% do BEP.

O gráfico da figura 6-3 ilustra a marcação da faixa ideal (em vermelho) e da máxima eficiência (em preto), associado à vazão $Q = 3,5 \text{ m}^3/\text{h}$.

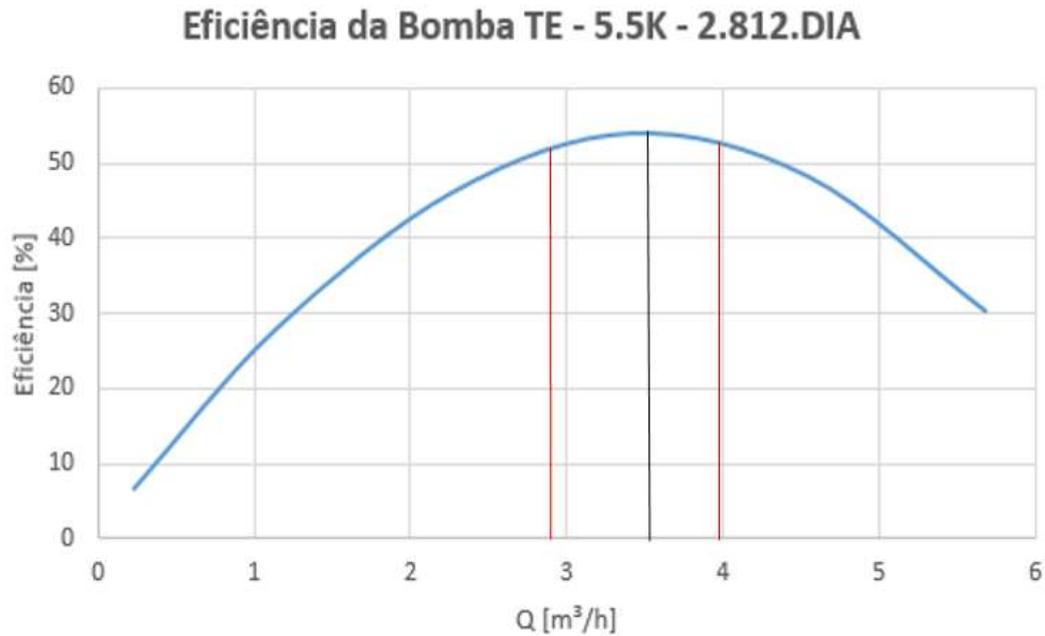


Figura 6-3: Eficiência da bomba com indicação da faixa ideal de operação em vermelho

Portanto, o mais indicado é que o ponto de operação esteja entre as linhas vermelhas, pois essa representa a faixa ideal de operação.

6.1.1.2 Ponto de Operação

O ponto de operação é definido como o ponto de intersecção entre a curva característica da bomba e a curva característica do sistema. Para que a escolha da bomba seja ideal, é importante que a intersecção ocorra no ponto cuja abscissa seja a vazão do projeto.

É importante ressaltar que as curvas foram corrigidas para a viscosidade do ácido sulfúrico, através do método mostrado na seção 2.4.5.

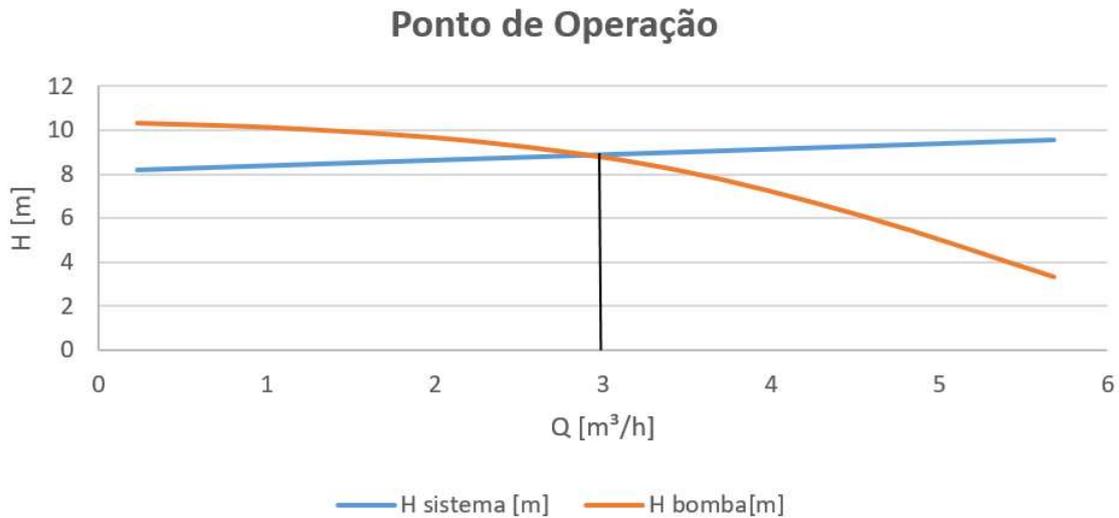


Figura 6-4: Ponto de operação para o fornecedor March Pump

Portanto, o ponto de operação mostrado na figura 6-4 é adequado ao sistema, pois a interseção ocorre na vazão $3 \text{ m}^3/\text{h}$, determinada para o projeto. Além disso, ele se encontra dentro da faixa ideal, segundo o critério da seção 6.1.1.2.

6.1.1.3 Ocorrência de Cavitação

A não ocorrência de cavitação é imprescindível na escolha de uma bomba. Ela pode ser avaliada comparando as curvas de NPSH disponível (calculado no capítulo 3) e requerido (definido pelo fabricante), conforme mostrado no gráfico da figura 6-5.

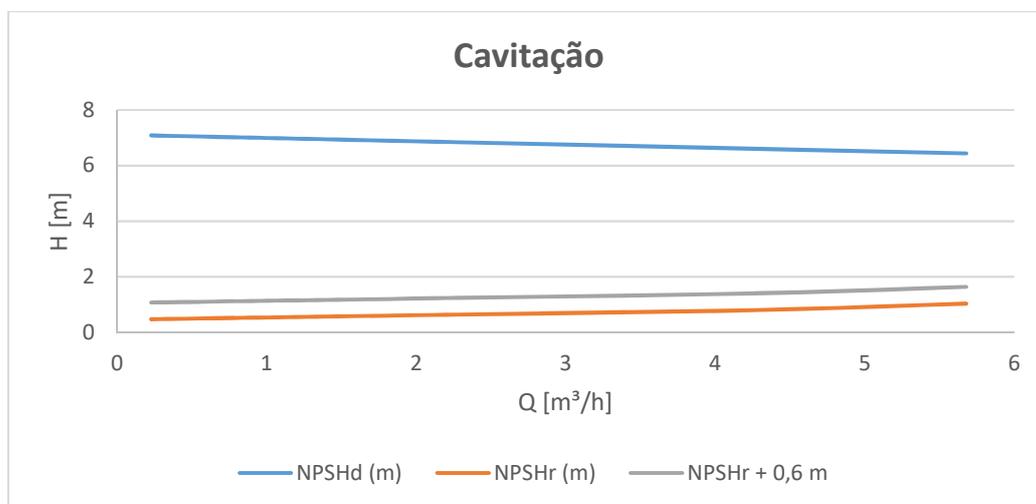


Figura 6-5: Gráfico para verificar ocorrência de cavitação para o fornecedor March Pump

Seguindo o critério estabelecido na seção 2.4.7, observa-se que a curva de NPSH disponível é sempre superior a NPSH requerido + 0,6 metros. Portanto, não há ocorrência de cavitação.

6.1.2 Fornecedor Gemme Cotti

Será avaliado nesta seção a possibilidade de implantar a bomba do fabricante Gemme Cotti para o circuito hidráulico ácido sulfúrico. As unidades fornecidas pelo fabricante já estão adequadas para comparar com o sistema e será utilizada a curva de diâmetro 85 mm, pois é a mais apropriada para o sistema.

As suas respectivas curvas características para o fluido estão apresentadas na figura 6-6.

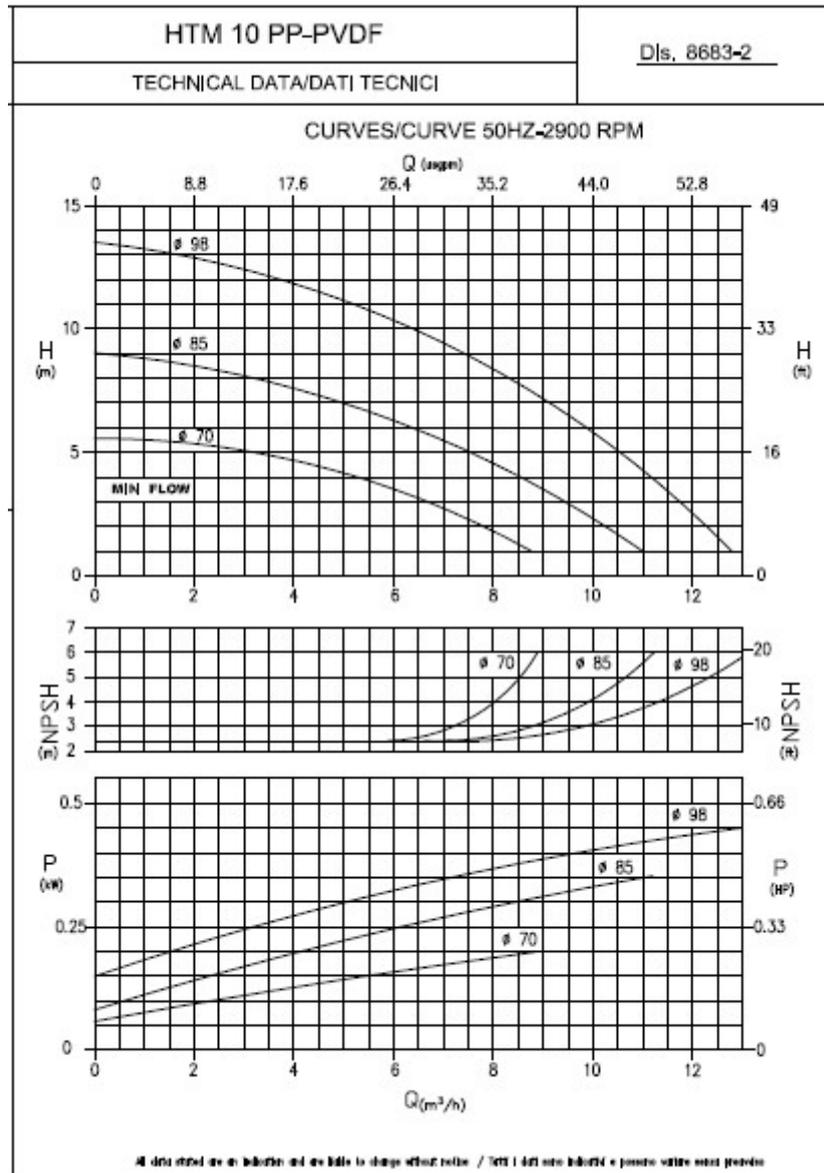


Figura 6-6: Curvas características da bomba do fornecedor Gemme Cotti ^[13]

6.1.2.1 Eficiência

O fabricante em questão não forneceu a curva de eficiência x vazão diretamente. No entanto, pode-se chegar a essa curva com os valores de **potência, vazão e head** fornecidos, através da relação mostrada na seção 2.4.3:

$$Pot_{Abs} = \frac{Pot}{\eta} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta} \quad (6.2)$$

É importante ressaltar que as curvas foram corrigidas para a viscosidade do ácido sulfúrico, através do método mostrado na seção 2.4.5. Desta forma, o gráfico é mostrado na figura 6-7.

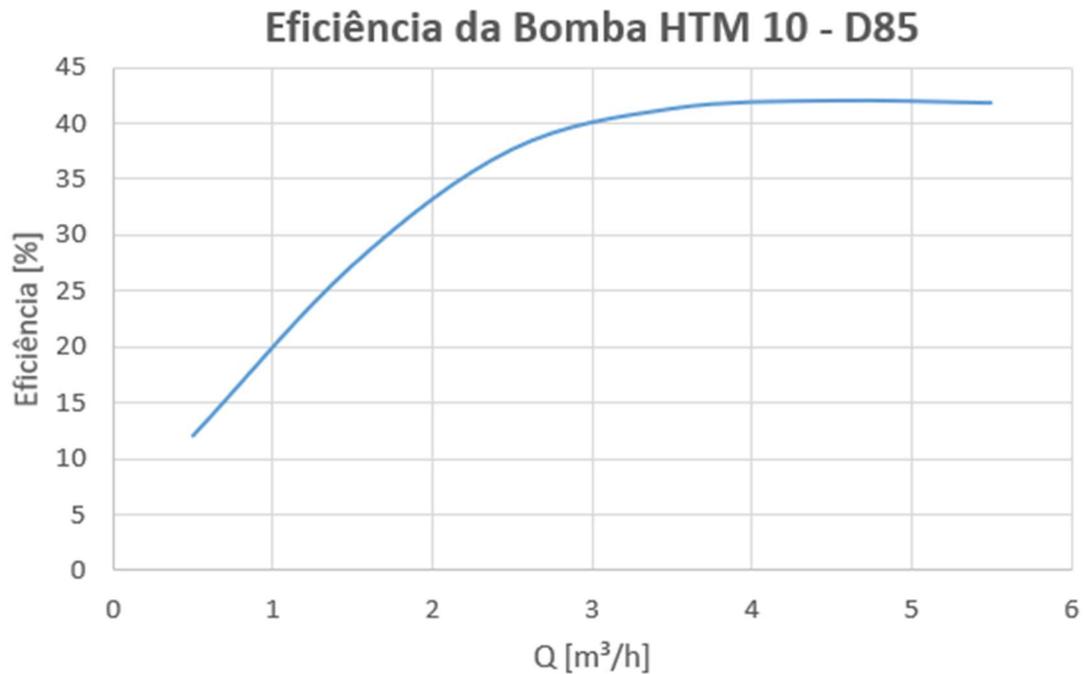


Figura 6-7: Gráfico de eficiência da bomba HTM 10 - D85

O critério utilizado para a seleção da bomba foi o API 610, que determina as faixas de vazão para a qual têm-se a melhor eficiência da bomba (BEP – *Best Efficiency Point*), procedimento análogo ao feito para o fabricante March Pump.

O gráfico da figura 6-8 ilustra a marcação da faixa ideal (em vermelho) e da máxima eficiência (em preto), associado à vazão $Q = 4,5 \text{ m}^3/\text{h}$.

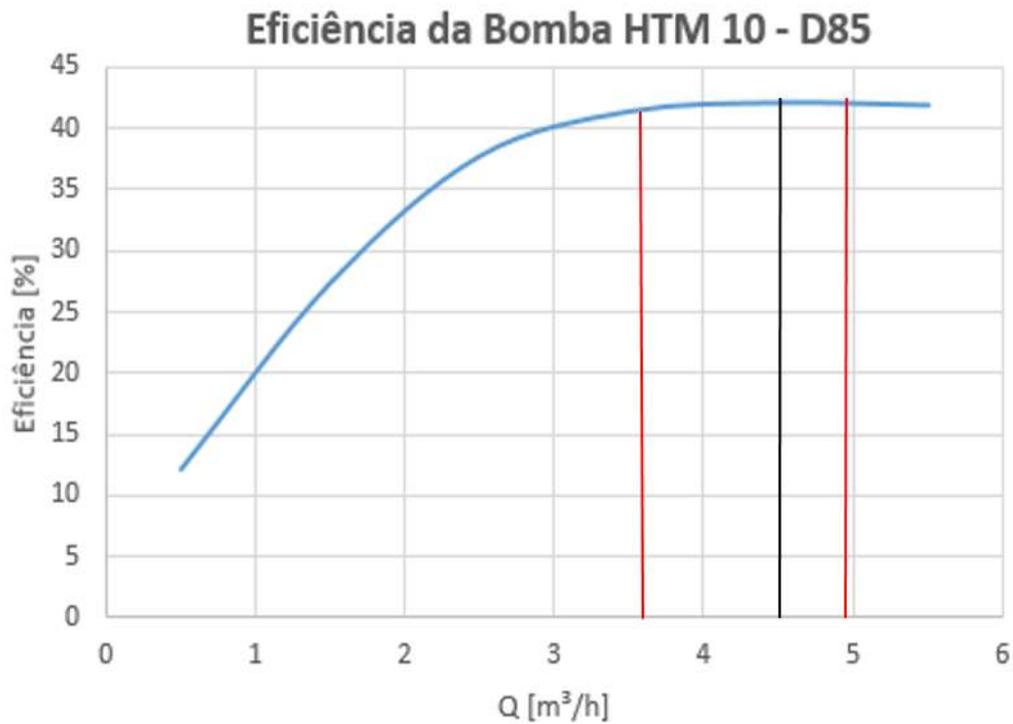


Figura 6-8: Gráfico de eficiência da bomba com a marcação da faixa ideal de operação em vermelho

Portanto, o mais indicado é que o ponto de operação esteja entre as linhas vermelhas, pois essa representa a faixa ideal de operação.

6.1.2.2 Ponto de Operação

Analogamente ao que foi feito para o fornecedor March Pump, deve-se verificar se o ponto de operação está apropriado para as características do projeto.

É importante ressaltar que as curvas foram corrigidas para a viscosidade do ácido sulfúrico, através do método mostrado na seção 2.4.5 e são mostradas na figura 6-9.

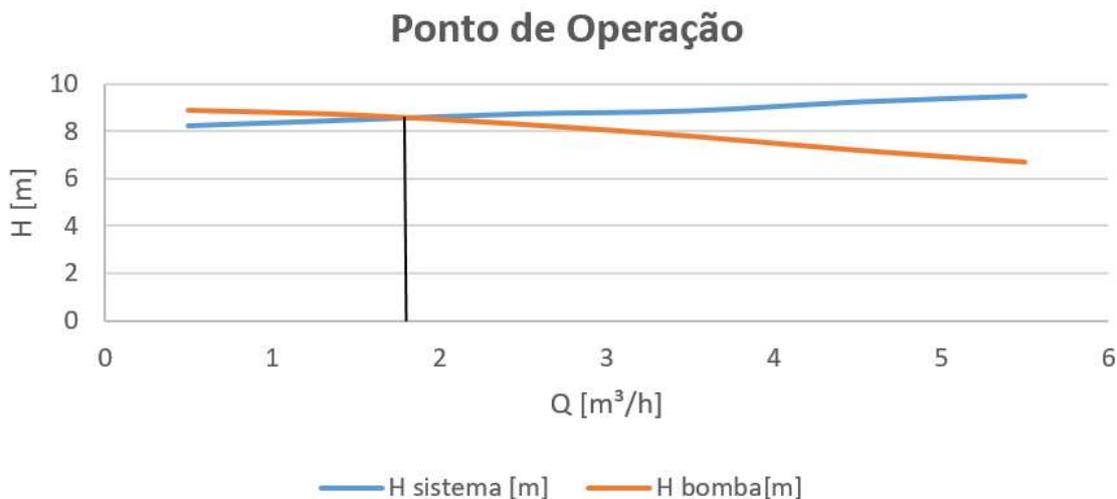


Figura 6-9: Ponto de operação para o fornecedor Gemme Cotti

Observa-se, portanto, que o ponto de operação se encontra em uma vazão menor que $2 \text{ m}^3/\text{h}$, bastante diferente da vazão de projeto ($Q = 3,0 \text{ m}^3/\text{h}$). Além disso, ele está fora da faixa ideal de operação, segundo o critério BEP. Isso significa que **a bomba do fornecedor March Pump é mais apropriada para o circuito hidráulico de ácido sulfúrico.**

6.1.2.3 Ocorrência de Cavitação

Embora a bomba desse fornecedor não seja ideal para o sistema, também foi avaliado quanto ao critério de ocorrência de cavitação. O gráfico comparando o NPSH disponível e requerido é mostrado na figura 6-10.

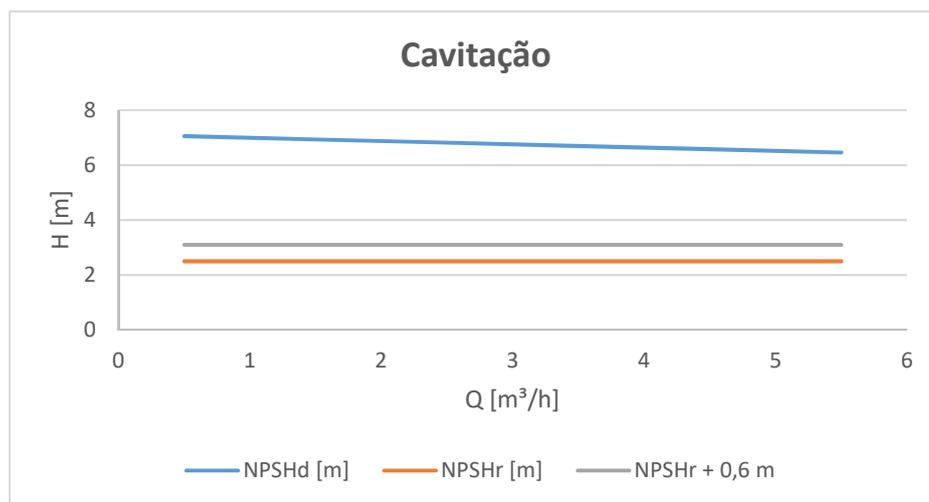


Figura 6-10: Gráfico para a verificação de cavitação pelo fornecedor Gemme Cotti

Observa-se que a curva de NPSH disponível é sempre superior a NPSH requerido + 0,6 metros. Portanto, não há ocorrência de cavitação e a bomba estaria aprovada, se fosse considerado apenas esse critério.

6.2 Seleção de uma Bomba para o Circuito Hidráulico Hidróxido de Sódio

6.2.1 Fornecedor March Pump

Será avaliado nesta seção a possibilidade de implantar as bombas do fabricante March Pump para o circuito hidráulico hidróxido de sódio. Da mesma forma que foi feita para o ácido sulfúrico, para realizar as devidas comparações nas próximas seções, foi feita a conversão de unidades de vazão e head do sistema americano (G.P.M e feet, respectivamente) para m³/h e metros.

As suas respectivas curvas características estão apresentadas na figura 6-11.

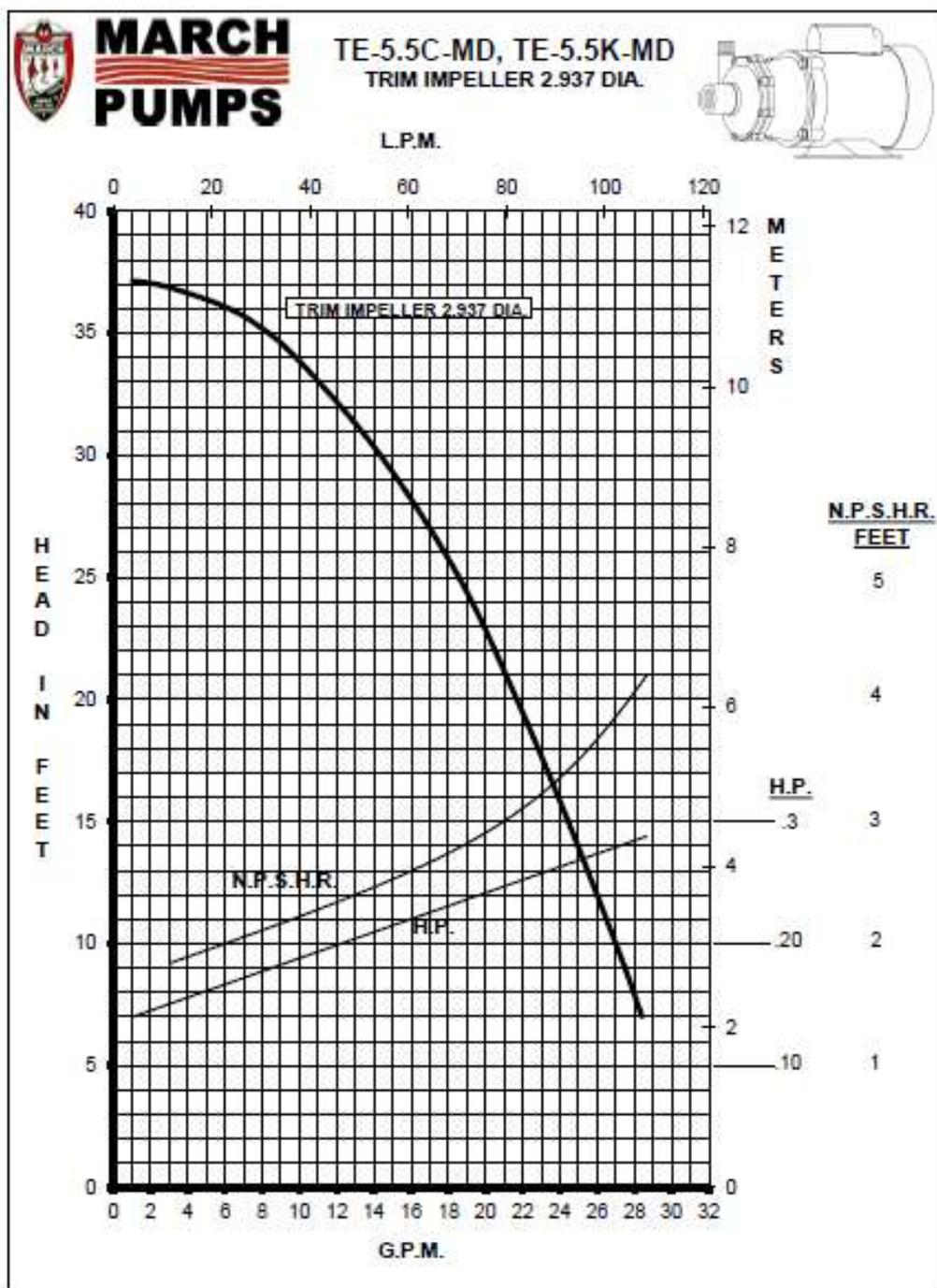


Figura 6-11: Curvas características da bomba do fornecedor March Pump para hidróxido de sódio ^[12]

6.2.1.1 Eficiência

Analogamente ao ácido sulfúrico, o fabricante em questão não forneceu a curva de eficiência x vazão diretamente. No entanto, pode-se chegar a essa curva com os valores de **potência, vazão e head** fornecidos, através da relação mostrada na seção 2.4.3:

$$Pot_{Abs} = \frac{Pot}{\eta} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta} \quad (6.3)$$

É importante ressaltar que as curvas foram corrigidas para a viscosidade do ácido sulfúrico, através do método mostrado na seção 2.4.5. Desta forma, o gráfico é mostrado na figura 6-12.

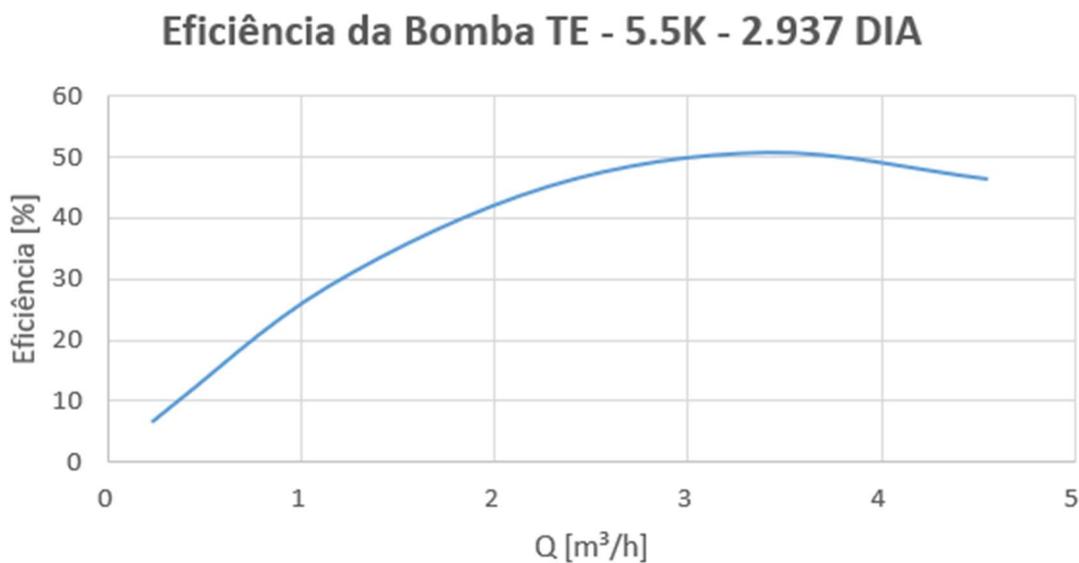


Figura 6-12: Eficiência da bomba TE - 5.5K - 2.937 DIA

O critério utilizado para a seleção da bomba foi o API 610, similar ao feito para o ácido sulfúrico. O gráfico abaixo ilustra a marcação da faixa ideal (em vermelho) e da máxima eficiência (em preto), associado à vazão $Q = 3,5 \text{ m}^3/\text{h}$.

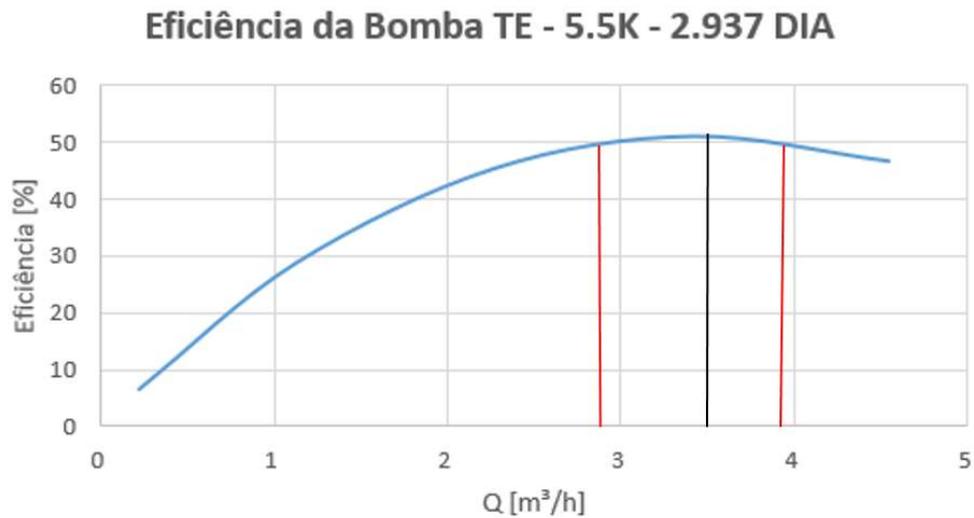


Figura 6-13: Curva de eficiência da bomba TE - 5.5K - 2.937 DIA com faixa de operação ideal em vermelho

Portanto, o mais indicado é que o ponto de operação esteja entre as linhas vermelhas, pois essa representa a faixa ideal de operação.

6.2.1.2 Ponto de Operação

A análise do ponto de operação para o hidróxido de sódio é similar ao que foi feito para o ácido sulfúrico.

É importante ressaltar que as curvas foram corrigidas para a viscosidade do ácido sulfúrico, através do método mostrado na seção 2.4.5.

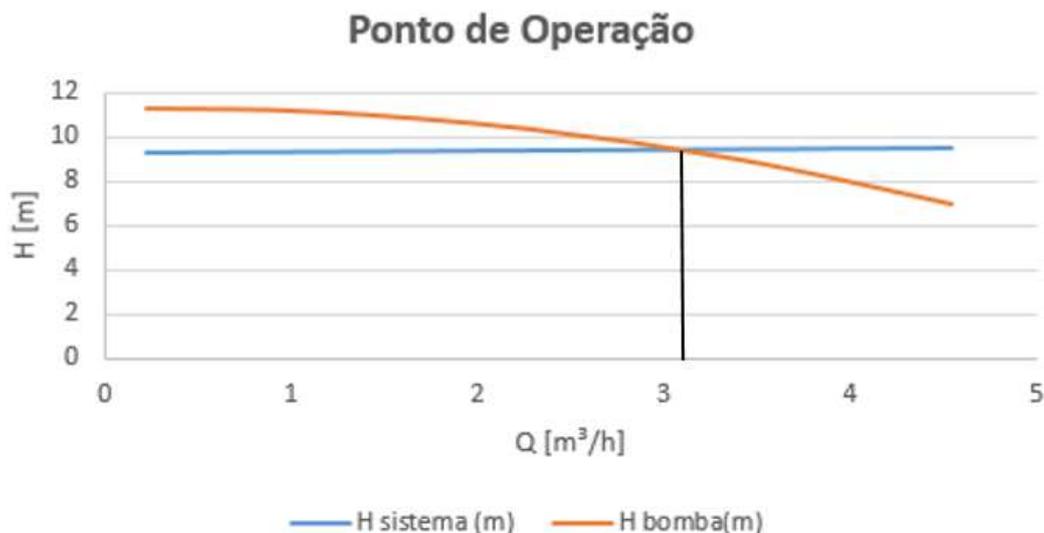


Figura 6-14: Ponto de operação para fornecedor March Pump

Embora o ponto de operação mostrado na figura 6-14 não esteja exatamente na vazão de $3 m^3/h$, pode-se observar que o valor está bastante próximo. Além disso, o valor está dentro da faixa ideal de operação, atendendo o critério BEP da seção anterior.

6.2.1.3 Ocorrência de Cavitação

Pode-se avaliar a ocorrência de cavitação da mesma forma que foi feita para o ácido sulfúrico na seção anterior. O gráfico é mostrado na figura 6-15.

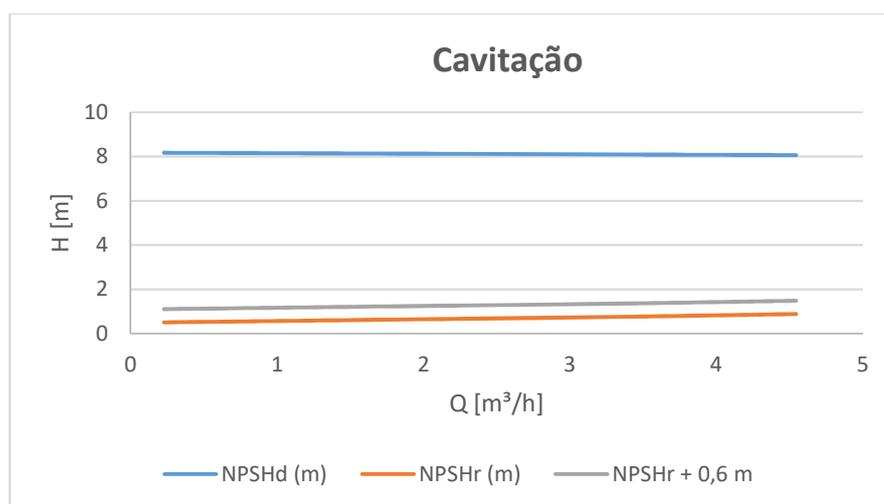


Figura 6-15: Gráfico para análise de cavitação para fornecedor March Pump

Observamos que a curva de NPSH disponível é sempre superior a NPSH requerido + 0,6 metros. Portanto, não há ocorrência de cavitação.

6.2.2 Fornecedor Gemme Cotti

Similar ao que foi feito para o circuito de ácido sulfúrico, será avaliado nesta seção a possibilidade de implantar a bomba do fabricante Gemme Cotti para o circuito hidráulico hidróxido de sódio. As unidades fornecidas pelo fabricante já estão adequadas para comparar com o sistema e será utilizada a curva de diâmetro 90 mm, pois é a que mais se aproxima do ideal.

As suas respectivas curvas características já apropriadas para o fluido estão apresentadas na figura 6-16.

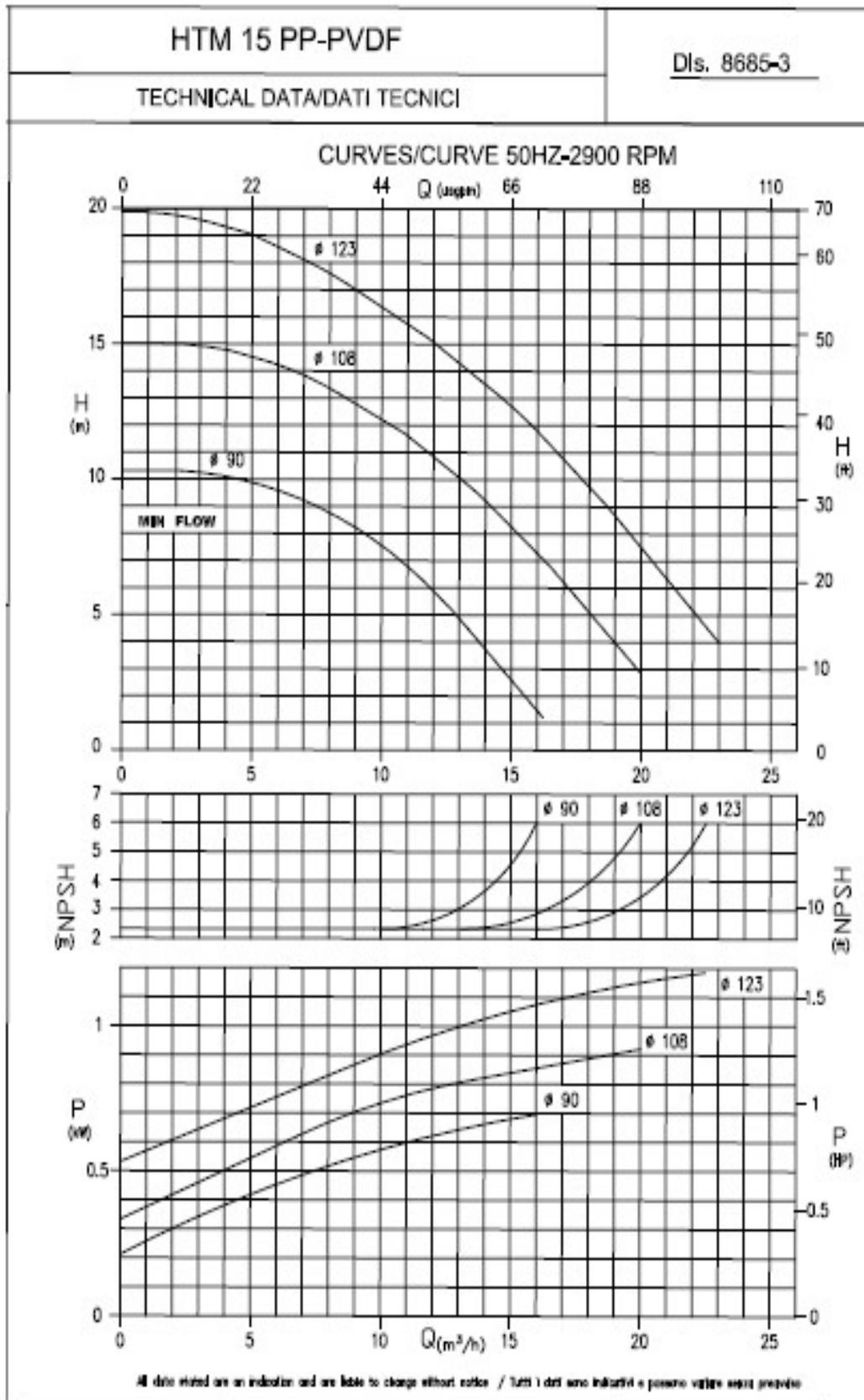


Figura 6-16: Curvas características da bomba para o fornecedor Gemme Cotti [13]

6.2.2.1 Eficiência

Analogamente ao ácido sulfúrico, o fabricante em questão não forneceu a curva de eficiência x vazão diretamente. No entanto, pode-se chegar a essa curva com os valores de **potência, vazão e head** fornecidos, através da relação mostrada na seção 3.4.3:

$$Pot_{Abs} = \frac{Pot}{\eta} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta} \quad (6.4)$$

É importante ressaltar que as curvas foram corrigidas para a viscosidade do ácido sulfúrico, através do método mostrado na seção 2.4.7. Desta forma, o gráfico é mostrado na figura 6-17.

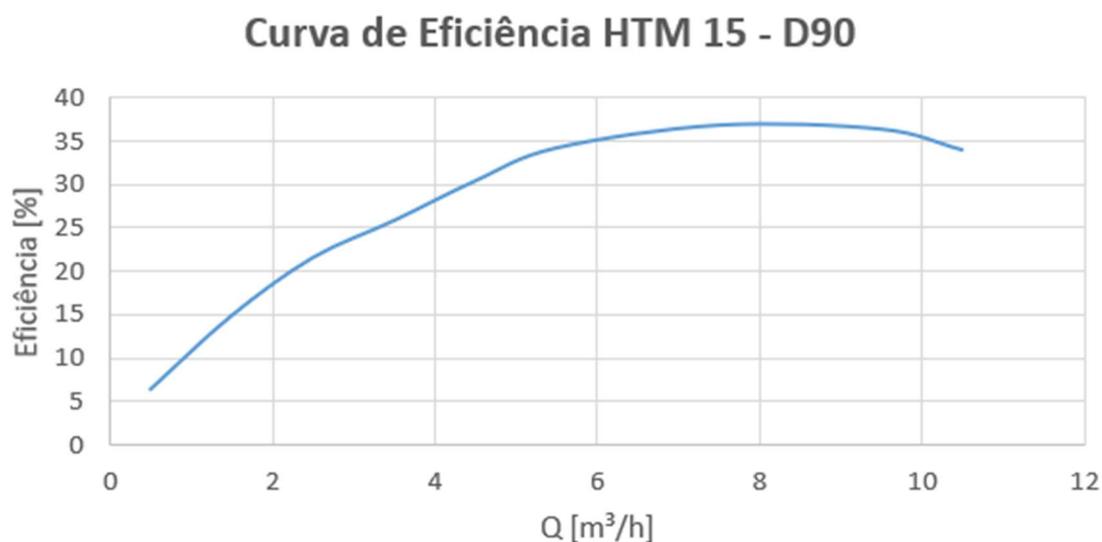


Figura 6-17: Curva de eficiência da bomba HTM 15 - D90

O critério utilizado para a seleção da bomba foi o API 610, similar ao feito para o ácido sulfúrico. O gráfico da figura 6-18 ilustra a marcação da faixa ideal (em vermelho) e da máxima eficiência (em preto), associado à vazão $Q = 8,0 \text{ m}^3/\text{h}$.

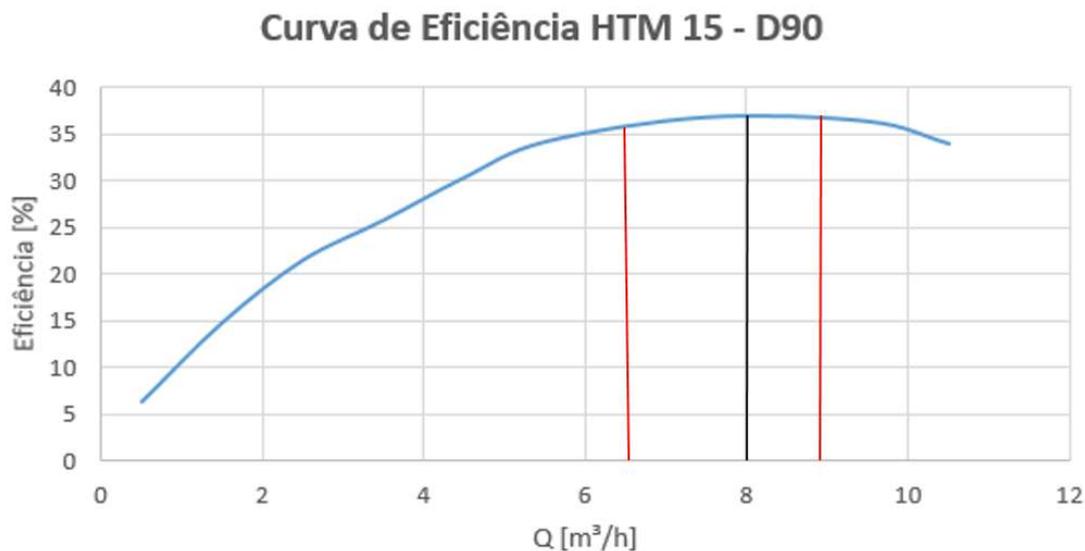


Figura 6-18: Curva de eficiência da bomba HTM 15 - D90 com faixa ideal de operação em vermelho

Diferentemente do que foi visto nos casos anteriores, a faixa ideal de operação não engloba a vazão de projeto $Q = 3,0 \text{ m}^3/\text{h}$. Isso é um indicativo de que a bomba não é apropriada e deve-se ter a confirmação avaliando o ponto de operação.

6.2.2.2 Ponto de Operação

A análise do ponto de operação é similar ao que foi feito anteriormente para o ácido sulfúrico.

É importante ressaltar que as curvas foram corrigidas para a viscosidade do ácido sulfúrico, através do método mostrado na seção 2.4.5.

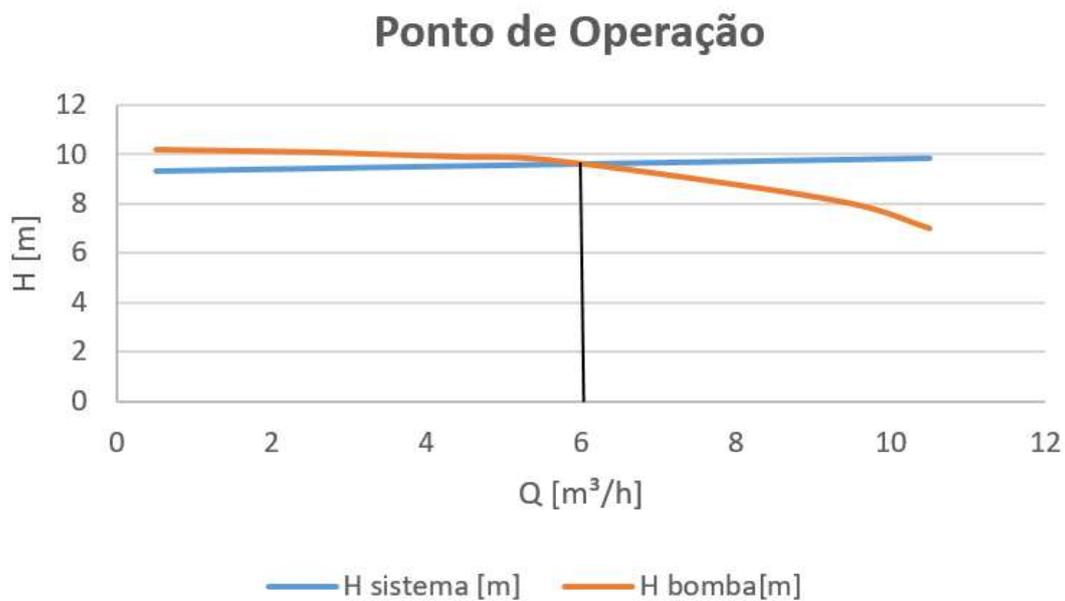


Figura 6-19: Ponto de operação para o fornecedor Gemme Cotti

Primeiramente, pode-se observar pela figura 6-19 que o ponto de operação ($Q = 6,0 \text{ m}^3/\text{h}$) não está contido na faixa ideal de operação. Além disso, o valor da vazão correspondente ($Q = 6,0 \text{ m}^3/\text{h}$) é o dobro da vazão do projeto, fato que inviabiliza a escolha dessa bomba.

Portanto, pelo critério BEP e o ponto de operação, **a bomba mais apropriada para o sistema hidróxido de sódio é a do fornecedor March Pump.**

6.2.2.3 Ocorrência de Cavitação

Embora a bomba analisada não seja adequada para a implantação, também será avaliado quanto à ocorrência de cavitação.

O gráfico comparando o NPSH disponível e requerido é mostrado na figura 6-20.

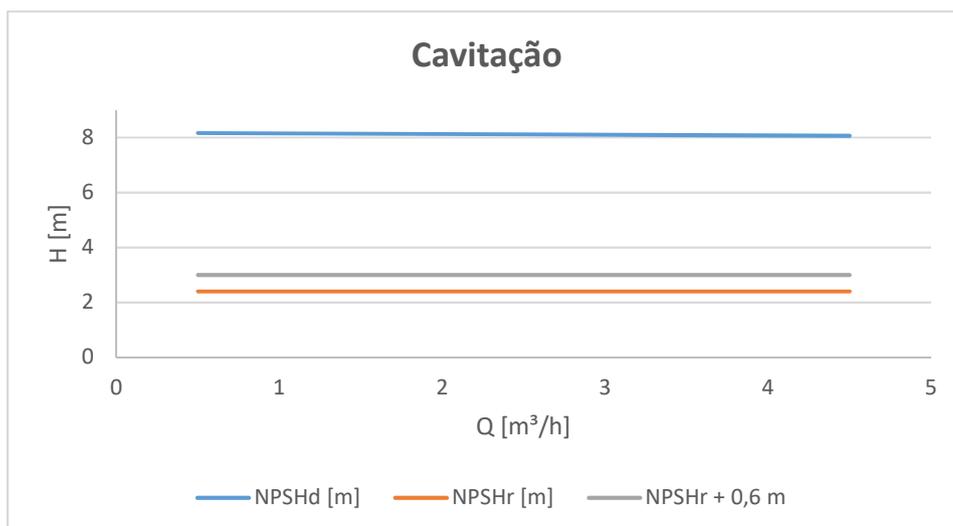


Figura 6-20: Gráfico para análise de cavitação para o fornecedor Gemme Cotti

Observa-se que a curva de NPSH disponível é sempre superior a NPSH requerido + 0,6 metros. Portanto, não há ocorrência de cavitação e a bomba estaria aprovada, se fosse considerado apenas esse critério.

7. ESPECIFICAÇÃO DAS VÁLVULAS

Este capítulo é dedicado para especificar as válvulas utilizadas no projeto e suas principais características.

7.1 Válvula de Gaveta

A válvula de gaveta é largamente utilizada no ramo industrial e é essencialmente importante para controlar o escoamento de um fluido na tubulação. O seu manuseio é bastante simples, todavia, é importante estar atento ao tipo de fluido. Neste trabalho, como já comentado anteriormente, são utilizados o ácido sulfúrico à concentração de 98% e a soda cáustica, ambos extremamente nocivos à saúde humana. Portanto, é extremamente importante o isolamento do ambiente desta válvula, bem como a utilização de equipamentos de proteção adequados.

Para adequação do projeto, foram instaladas três válvulas de gaveta, sendo uma após a saída do reservatório das resinas, outra antes da bomba e a última após a válvula de retenção, conforme foi ilustrado na figura 3-1. Essa configuração permite uma segurança no controle do escoamento ao longo da tubulação. A figura 7-1 ilustra uma válvula de gaveta feita de material polimérico PVDF, o mesmo utilizado para para a tubulação.

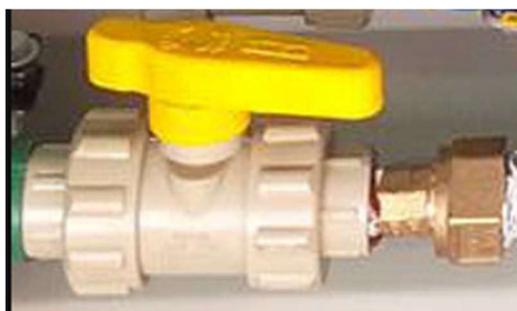


Figura 7-1: Válvula de gaveta [15]

7.2 Válvula de retenção

A utilização de uma válvula de retenção se faz necessária para garantir o fluxo em uma única direção. Os fabricantes deste tipo de válvula oferecem no mercado uma ampla gama com diferentes tamanhos e tipos para diversas aplicações industriais, a fim de evitar retornos de fluxos que sejam dispendiosos ou perigosos para a operação. Da mesma forma

que foi feito para a válvula de gaveta, é indicado que o material escolhido também seja o PVDF, para que a instalação seja mais assertiva e compatível com o projeto.

A figura 7-2 ilustra uma válvula deste tipo.



Figura 7-2: Válvula de retenção

8. CONCLUSÃO

O desenvolvimento do presente trabalho possibilitou a concepção e dimensionamento de um novo circuito hidráulico contendo resinas para uma estação de água desmineralizada de uma usina nuclear. Além disso, permitiu uma pesquisa de novos materiais para tubulações e diferentes modelos de bombas utilizados atualmente na indústria química. Todos os cálculos de perda de carga que resultaram nas escolhas das bombas foram devidamente justificados e adaptados aos fluidos utilizados.

Ao estudar os diferentes tipos de materiais para tubulações no mercado e sua compatibilidade com as resinas (ácido sulfúrico e soda cáustica), verificou-se que, dentre os três candidatos (aço carbono com revestimento em zinco, aço inoxidável 304 e polímero PVDF), o PVDF foi o material que melhor atendeu aos critérios estabelecidos. Dentre eles, pode-se citar a excelente compatibilidade com ácidos e bases fortes, baixo custo com relação aos outros aços, além de fácil manuseio e reciclagem.

Em seguida, a escolha do tipo de bomba e seu tipo de vedação foi essencial para o seguimento do projeto. Após uma comparação entre as bombas tradicionais com vedação por selo mecânico com as bombas magnéticas com vedação hermética, verificou-se que a não ocorrência de vazamentos era essencial para segurança humana e ambiental da operação. Isso levou a escolha das bombas magnéticas, pois era a que melhor atendia a esse critério, além de não necessitar manutenções recorrentes.

Com isso, os cálculos de perda de carga possibilitaram obter as curvas dos sistemas ácido sulfúrico e hidróxido de sódio. Uma comparação entre dois fornecedores (March Pump e Gemme Cotti) foi feita e as bombas escolhidas eram ambas pertencentes ao fornecedor March Pump, pois atendia a todos os critérios determinados. A seleção levou em conta o BEP (Best Efficiency Point) do ponto de operação com a vazão de projeto, além da não ocorrência de cavitação.

Conclui-se, então, que as bombas escolhidas são perfeitamente apropriadas para essa aplicação, não havendo necessidade de qualquer mudança no sistema ou no diâmetro do impelidor.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DE MATTOS, Edson e., DE FALCO, Reinaldo, **Bombas Industriais**, 2ª Ed, Rio de Janeiro, Interciência, 1998.
- [2] Fissão e Fusão Nuclear: o que são, diferenças e aplicações. Disponível em: <https://blog.biologiatotal.com.br/fissao-e-fusao-nuclear-o-que-sao-diferencas-e-aplicacoes/>. Acesso em: Abril, 2021.
- [3] Energia Nuclear. Disponível em: <https://www.eletronuclear.gov.br/Sociedade-e-Meio-Ambiente/Espaco-do-Conhecimento/Paginas/Energia-Nuclear.aspx>. Acesso em: Abril, 2021
- [4] Usina Nuclear. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/nuclear/nuclear.htm>. Acesso em: Abril, 2021.
- [5] Como funciona: Usina Nuclear. Disponível em: <https://energiainteligenteufjf.com.br/como-funciona/como-funciona-usina-nuclear/>. Acesso em: Maio, 2021.
- [6] Corrosão - O que é, e porquê ela ocorre? Disponível em: <https://betaeq.com.br/index.php/2019/04/15/corrosao-o-que-e-e-por-que-ela-ocorre/>. Acesso em: Abril, 2021.
- [7] Plásticos de Alta Performance para Construção de Instalações e Reservatório Químicos. Disponível em: https://www.roechling.com/fileadmin/downloads/Roechling_Industrial/Brochures/PT/DuroProtect/Chemical-processing-BPT.pdf. Acesso em: Abril, 2021.
- [8] Gaxetas e Sistemas de Vedação. Disponível em: <http://balalata.com.br/wp/gaxeta-e-sistemas-de-vedacao/>. Acesso em: Março, 2020.
- [9] LIMA, Epaminondas Pio Correia. **Mecânica das bombas**. 2.ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência: PETROBRAS, 2003.
- [10] Iwaki do Brasil. Disponível em: <http://www.iwakibrasil.com/>. Acesso em: Abril, 2021.

- [11] ALEF Equipamentos Industriais Ltda. Disponível em: <http://www.alef.com.br/> . Acesso em: Abril, 2021.
- [12] March Pump. Disponível em: <https://www.marchpump.com/> . Acesso em: Abril, 2021.
- [13] Gemme Cotti. Disponível em: https://www.gemmecotti.com/chemical-pumps/?gclid=Cj0KCQjwse-DBhC7ARIsAI8YcWLSxVmegFuHaBORY9yWeJXAgZWrGbQSBNBp0dzLfZR-IKVGnkymrQoaAiVSEALw_wcB . Acesso em: Abril, 2021.
- [14] CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais**. 5ª Ed, Rio de Janeiro: Editora LTC - Livros Técnicos e Científicos S/A., 1999.
- [15] Obras e Projetos. Disponível em: <https://www.bueu.com.br/obrasProjetos.htm>. Acesso em: Abril, 2021.
- [16] Válvula de Retenção. Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/valvula-de-retencao/>. Acesso em: Abril, 2021.
- [17] Ácido Sulfúrico. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%81cido_sulf%C3%BArico. Acesso em: Julho, 2021.
- [18] Hidróxido de sódio. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Hidr%C3%B3xido_de_s%C3%B3dio . Acesso em: Junho, 2021.