

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

ISADORA MULLER SANTOS MORAIS

**ESTUDO HIDRÁULICO DE DESCARGA DE ETANOL  
HIDRATADO CARBURANTE A PARTIR DE  
CAMINHÃO-TANQUE**

SÃO CARLOS -SP  
2024

ISADORA MULLER SANTOS MORAIS

**ESTUDO HIDRÁULICO DE DESCARGA DE ETANOL HIDRATADO CARBURANTE A  
PARTIR DE CAMINHÃO-TANQUE**

Trabalho de Graduação apresentado ao  
Departamento de Engenharia Química  
da Universidade Federal de São Carlos,  
para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Química.

Orientadora: Profa.Dra Vadila Giovana Guerra Bettega

São Carlos-SP  
2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e Tecnologia  
Departamento de Engenharia Química

**Folha de aprovação**

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Trabalho de Graduação da candidata Isadora Muller Santos Moraes realizada em 09/09/2024:

---

Profa. Dra. Vadila Giovana Guerra Bettega  
Departamento de Engenharia Química UFSCar

---

Prof. Felipe de Aquino Lima  
Departamento de Engenharia Química UFSCar

---

Prof. Dr. Fabio Bentes Freire  
Departamento de Engenharia Química UFSCar

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais Cesar e Sylvania, por todo o suporte dado para que eu pudesse me dedicar aos estudos, por não me deixarem desistir nos momentos difíceis e pelo amor incondicional. Obrigada por me proporcionarem todas as oportunidades que vocês nunca tiveram, sem vocês eu não teria conseguido. O maior mérito em formar a primeira engenheira da família é todo de vocês.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por sempre iluminar os meus caminhos, me ajudando a fazer boas escolhas e a seguir pelos caminhos certos.

Aos meus avós Aristides, Alice e Iolanda que mesmo com tão pouco estudo sempre valorizaram e incentivaram o conhecimento, sempre me apoiaram e me ajudaram em toda minha trajetória, obrigada por serem seres de luz na minha vida.

Aos meus tios e primos que contribuíram em toda a minha jornada, muito obrigada pelo suporte e apoio. Em especial aos meus tios Aguinaldo e Luciana por estarem sempre dispostos e presentes em todos os momentos, bons ou ruins, obrigada por todo o suporte, amor e carinho, essa conquista também é de vocês. A minha prima Jéssica, que é uma irmã de outra mãe, obrigada por vibrar cada conquista comigo, não vejo a hora de vibrarmos a sua também.

Agradeço aos meus amigos de faculdade, em especial a Karlla, Lucas, Giovanna, Natália, Gabriel e Olsen, por todo o apoio e carinho, pelas noites de estudos e as de diversão, vocês tornaram os meus dias em São Carlos mais felizes e cheios de vida.

Agradeço ao meu amor, pela compreensão das ausências, por todo suporte e por nunca me deixar desanimar, obrigada por acreditar na minha capacidade nos dias em que nem eu mesma acreditava.

Agradeço a minha orientadora, Profa. Vádila, pelo suporte na execução deste trabalho e principalmente pela paciência e compreensão.

Agradeço ao professor da disciplina, Prof. Fábio, pelo direcionamento com os processos burocráticos e pela disponibilidade e vontade em ajudar.

## RESUMO

A hidráulica é uma área da física que estuda o comportamento dos líquidos, tanto em movimento quanto em repouso, além de ser responsável pelas leis que regem o transporte de fluidos, com ou sem máquinas hidráulicas, como bombas e turbinas, conceitos muito importantes para transportar combustíveis como o etanol dentro de bases de distribuição. O etanol hidratado carburante, produzido a partir da cana-de-açúcar, também conhecido como etanol comum, é um líquido combustível utilizado amplamente como uma fonte renovável de energia para o abastecimento de veículos automotores. Comumente encontrado nos postos de combustíveis, para a chegada deste produto até o consumidor final existem diversos processos, um deles é a chegada deste produto até uma base de distribuição de combustíveis. Essa chegada pode ocorrer de diversas formas, pelo modal ferroviário, fluvial, por dutos ou pelo modal rodoviário, por meio de caminhões-tanque, que será o foco deste trabalho. A partir da chegada do caminhão-tanque na base a descarga do mesmo é realizada conectando-o, com o uso de mangotes, a uma linha de descarga do produto e acionando uma bomba que realiza o transporte deste produto do Caminhão-Tanque (CT) ao tanque. O tempo de descarga de um caminhão tanque irá depender das características do produto e também da linha de descarga, ou seja, distância do CT até o tanque, posição e tipo da bomba, tipo e diâmetro da tubulação, além dos equipamentos da linha (válvulas, cotovelos, entre outros). O objetivo do trabalho de graduação aqui resumido é realizar um estudo hidráulico do transporte de etanol hidratado carburante, levando-o de um caminhão-tanque até o tanque do produto com o uso de uma bomba. A ideia central é analisar, a partir de dados base e dados retirados da literatura, os aspectos desta descarga, tais como perda de carga, tipo de bomba, altura manométrica e comentar sobre pontos de melhoria que aumentem a eficiência relacionada ao tempo da tarefa e a conservação a longo prazo dos equipamentos utilizados. Ressalta-se, por fim, que o etanol hidratado carburante, produzido a partir da cana-de-açúcar, vem tendo cada vez mais seu uso incentivado por ser um combustível considerado verde e renovável, sendo uma alternativa aos derivados de petróleo, necessitando assim de uma distribuição cada vez mais rápida que supra sua crescente demanda volumétrica.

**Palavras-chave:** hidráulica; etanol hidratado; distribuição de combustíveis; caminhão-tanque; sistema de bombeamento; bomba centrífuga; combustível renovável.

## ABSTRACT

Hydraulics is a branch of physics that studies the behavior of liquids, both in motion and at rest, and is responsible for the laws governing fluid transport, with or without hydraulic machines, such as pumps and turbines. Hydrated ethanol, produced from sugarcane and also known as common ethanol, is a liquid fuel widely used as a renewable energy source for fueling motor vehicles. Commonly found at fuel stations, there are several processes involved in getting this product to the final consumer, one of which is transporting the product to a fuel distribution base. This transportation can occur through various modes, including rail, river, pipelines, or by road via tank trucks, which will be the focus of this study. Upon arrival at the distribution base, the tank truck is unloaded by connecting it with hoses to a product discharge line and activating a pump that transfers the product from the tank truck to the storage tank. The unloading time of a tank truck depends on the product characteristics and the discharge line setup, including the distance from the tank truck to the tank, the pump's position and type, the type and diameter of the piping, and the line's equipment (valves, elbows, etc.). The goal of this summarized graduation thesis is to conduct a hydraulic study of the transportation of hydrated ethanol, moving it from a tank truck to the product tank using a pump. The central idea is to analyze aspects of this unloading process, such as pressure loss, pump type, and manometric height, and to suggest improvements that enhance task efficiency and the long-term maintenance of the equipment used. Finally, it is emphasized that hydrated ethanol, produced from sugarcane, is increasingly encouraged for use due to being a green and renewable fuel, serving as an alternative to petroleum derivatives, and thus requiring ever faster distribution to meet its growing volumetric demand.

**Keywords:** hydraulics; hydrated ethanol; fuel distribution; tank truck; pumping system; centrifugal pump; renewable fuel.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Deslocamento de Placas Paralelas Levando o Fluido a Entrar em Escoamento não Linear	17
Figura 2 – Experimento de Reynolds	18
Figura 3 – Exemplo de Comprimento Equivalente de uma Válvula em Trecho Reto	20
Figura 4 – Diagrama de Moody	21
Figura 5 – Produção Mundial de Etanol Hidratado Carburante por Região	23
Figura 6 – Bomba Heroás 180SH75 3500 rpm Marca HERO	25
Figura 7 – Gráfico de Seleção da Bomba	26
Figura 8 – Curvas Características da Bomba	27
Figura 9 – Sistema de Bombeamento de Etanol Hidratado	30
Figura 10 – Fator de Atrito pelo Diagrama de Moody	33
Figura 11 – Gráfico de Seleção da Bomba a Partir dos Resultados	34
Figura 12 – Valor do NPSH Requerido para a Vazão do Sistema	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Rugosidades absolutas por tipo de material	20
Tabela 2 – Comprimento Equivalente dos Acessórios da Linha	28

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Quantidade e Comprimento dos Equipamentos da Linha de Descarga do Etanol Hidratado 28

Quadro 2 – Quantidade e Comprimento dos Equipamentos da Linha de Descarga do Etanol Hidratado 29

## LISTA DE ABREVIATURAS

CT – Caminhão-Tanque

EH – Etanol Hidratado

EHC – Etanol Hidratado Carburante (ou Combustível)

SG – Specific Gravity

## LISTA DE SIGLAS

Re – Número de Reynolds

lw – Perda de carga

f – Fator de atrito

D – Diâmetro

H<sub>s</sub> – Altura manométrica do sistema

NPSH – Carga Positiva de Sucção da Bomba Requerida

P – Pressão

g – Aceleração da gravidade

cP – Centipoise

Q – Vazão volumétrica

A – Área

v – Velocidade

L – Comprimento

z – Altura estática

E – Energia

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\varepsilon$  – Rugosidade

$\mu$  - Viscosidade dinâmica

$\rho$  – Densidade

$\gamma$  – Peso específico

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	16
2.1. CONCEITO DE FLUIDO .....	16
<b>2.1.1. Propriedades dos fluidos</b> .....	16
<b>2.1.2. Massa Específica, Peso Específico e Densidade</b> .....	16
<b>2.1.3. Viscosidade</b> .....	17
2.2. A EXPERIÊNCIA DE REYNOLD - ESCOAMENTO LAMINAR, DE TRANSIÇÃO E TURBULENTO .....	17
2.3. TUBULAÇÕES .....	19
2.4. PERDA DE CARGA.....	19
2.5. BOMBAS .....	21
<b>2.5.1. Altura manométrica</b> .....	22
<b>2.5.2. Curvas Características de Bombas</b> .....	22
2.6. ETANOL HIDRATADO .....	23
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	24
3.1. DADOS BASE E CONDIÇÕES DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO .....	24
<b>3.1.1. Dados Base</b> .....	24
<b>3.1.2. Condições do Sistema de Bombeamento</b> .....	24
<b>3.1.3. Bomba Utilizada</b> .....	25
<b>3.1.4. Equipamentos e Acessórios da Linha</b> .....	27
3.2. PERDA DE CARGA.....	29
3.3. CÁLCULO DO NÚMERO DE REYNOLDS .....	29
3.4. CÁLCULO DA ALTURA MANOMÉTRICA .....	30
3.5. CÁLCULO DO NPSH DISPONÍVEL .....	31
3.6. METODOLOGIA DE CÁLCULOS .....	32
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	33
4.1. NÚMERO DE REYNOLDS E FATOR DE ATRITO .....	33
4.2. PERDA DE CARGA TOTAL DO SISTEMA E ALTURA MANOMÉTRICA .....	33
<b>4.2.1. Análise da Bomba Utilizada</b> .....	34
4.3. PERDA DE CARGA DO TRECHO DE SUCÇÃO.....	35
<b>4.3.1. NPSH Disponível e Requerido</b> .....	35
4.4. ANÁLISES DE MELHORIA NO SISTEMA .....	37
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	38
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	39

## 1. INTRODUÇÃO

O mercado de combustíveis tem tentado cada vez mais buscar soluções verdes e renováveis em contraponto ao uso de combustíveis fósseis não renováveis. O etanol hidratado carburante é um dos aliados nessa busca. O Brasil é pioneiro na utilização em larga escala de etanol combustível desde o fim da década de 1970. Atualmente, é um dos que mais utilizam o produto e ainda o segundo maior produtor mundial (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2020).

Apesar de possuir um poder calorífico inferior ao de combustíveis fósseis, o etanol possui uma queima considerada mais limpa e menos poluente, auxiliando muito na redução de impactos climáticos. Essa característica torna o etanol uma opção viável para a substituição total e/ou parcial de combustíveis fósseis em várias aplicações, especialmente no setor de transportes (GNANSOUNOU & DAURIAT, 2005).

Para suprir a crescente demanda deste produto existe a necessidade de uma distribuição mais rápida e eficiente deste produto e para que isso ocorra as bases distribuidoras precisam estar sempre abastecidas. Porém, no caso de lugares em que o produto chega até a distribuidora por meio de caminhão-tanque, o produto precisa ser bombeado do caminhão até o tanque de armazenamento.

Segundo Silva, durante esse trajeto o produto sofre um escoamento forçado por uma tubulação e passa por inúmeras situações de perda de carga, seja em mudanças na direção do fluxo, como curvas, ou em retenções como válvulas e equipamentos da linha.

Para ser conduzido por esse trajeto é necessário que o fluido seja bombeado e para isso a bomba responsável por tal deve ser a mais adequada ao sistema, mas nem sempre é o que acontece. A situação problema deste trabalho foi desenvolvida baseando-se em uma base de distribuição brasileira de uma empresa de combustíveis, em tal é utilizada uma bomba centrífuga da marca Hero e do modelo 180-SH-75, porém a mesma enquanto em funcionamento apresenta sons característicos de que está ocorrendo uma cavitação levando a uma alta frequência de manutenção por desgaste da bomba. A solução para evitar que esse cenário siga ocorrendo pode estar em modificar alguns trajetos do sistema ou até mesmo na substituição dessa bomba por uma mais adequada ao trabalho.

Modificar esses trajetos, muitas vezes construídos já a muitos anos, a fim de otimizar a descarga do produto, demandaria um esforço financeiro e espacial muito grande, mas não impossível. Além disso, a paralisação das linhas deste produto para alterações pode comprometer por um longo período de tempo a distribuição do etanol na região. Por outro lado, alterar a bomba utilizada no sistema pode significar uma paralisação menor em questão de tempo em contrapartida de um maior gasto financeiro.

Este trabalho visa, a partir de dados supostos de uma descarga de etanol hidratado carburante, avaliar quais as perdas de cargas que ocorrem, se está adequado o tipo de bomba utilizada, quais os déficits existentes e verificar quais as

possibilidades de melhoria para esta linha de descarga em uma base de distribuição de combustíveis.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Ao abastecer um carro com etanol dificilmente pensa-se sobre todas as etapas em que passou a matéria-prima até aquele produto final, menos ainda sobre todas as etapas de transporte pela qual este fluido passou até chegar ao tanque de combustível do veículo.

Para transportar um fluido de um ponto a outro por meio de um escoamento forçado é necessário antes entender como funciona a mecânica dos fluidos e quais as forças envolvidas em tal. O transporte de um fluido (líquido ou gás) num conduto fechado (que é comumente chamado de tubo se sua seção transversal é circular e duto se a seção for não circular) é extremamente importante no cotidiano (Wu, 2010).

A mecânica dos fluidos surge principalmente com a necessidade do ser humano da utilização da água disponível na natureza para diversos fins, seja para abastecimento humano ou para irrigação, vindo a partir de um processo empírico que seria futuramente lapidado para as teorias que temos hoje (Silva, 2010).

Esse tipo de transporte está presente hoje em dia por exemplo no bombeamento de água para uma caixa d'água de um edifício, no transporte de produtos dentro de uma indústria e até mesmo no transporte de combustíveis dentro de uma distribuidora, que é o foco deste trabalho. O transporte e a efetividade do mesmo vão depender do fluido a ser trabalhado e para isso é necessário conhecer a fundo seus conceitos e características.

### **2.1. CONCEITO DE FLUIDO**

É considerado um fluido, segundo a mecânica, tudo aquilo que não é sólido. Ou seja, tudo que, ao ser submetido a uma tensão de cisalhamento, mesmo que pequena, sofre deformação. A substância muda continuamente de forma (escoa), enquanto a tensão de cisalhamento permanece aplicada, e a velocidade aumenta com a intensidade da força (Wu, 2010).

Sendo ainda que, se um fluido é tudo que não é sólido ele pode ser de duas classes: dos líquidos ou dos gases. Podem ser considerados da classe dos gases todos aqueles que possuem grandes espaços vazios entre suas partículas, interagem muito pouco umas com as outras e ao serem comprimidos sofrem redução de volume. Os líquidos por sua vez possuem uma proximidade maior entre suas partículas e ao sofrer compressão não tem seu volume alterado (Wu, 2010).

#### **2.1.1. Propriedades dos fluidos**

Conhecer as propriedades de um fluido é de grande importância para desenvolver sistemas de produção, transporte e armazenagem dos mesmos. Dentre suas principais propriedades temos a sua massa específica, peso específico, densidade e viscosidade.

#### **2.1.2. Massa Específica, Peso Específico e Densidade**

A massa específica de um fluido é a massa dessa substância que está contida em uma unidade de volume. Usualmente para os líquidos não há grande variação da massa específica em razão das mudanças de pressão e temperatura, em contrapartida a dos gases é fortemente influenciada por essas variáveis. Já o peso específico de um fluido é o peso dessa substância que está contido em uma unidade de volume (Wu, 2010).

A densidade de um fluido, designada por SG (*specific gravity*), é definida como a razão entre a massa específica do fluido e a massa específica da água numa certa temperatura. Usualmente, a temperatura especificada é 4°C (nessa temperatura a massa específica da água é 1000 kg/m<sup>3</sup>) (Wu, 2010).

### 2.1.3. Viscosidade

Segundo Brunetti a viscosidade é uma coesão (força atrativa) entre as moléculas e o choque entre elas. Dessa forma a viscosidade pode ser entendida como o atrito interno dos fluidos, ou seja, a sua resistência ao escoamento.

A Lei da Viscosidade de Newton, surge, pois por meio dos seus estudos ele percebeu que em muitos fluidos a tensão de cisalhamento é proporcional ao gradiente de velocidade, ou seja, quanto maior a força aplicada no fluido mais rápido será o seu escoamento e será multiplicado ao longo da área. E todos os fluidos que seguem essa Lei são considerados fluidos newtonianos.

Um exemplo é que ao colocarmos um fluido em repouso entre duas placas e movermos a placa superior o fluido entra em movimento, apresentando um escoamento, porém a velocidade deste escoamento não é linear devido a resistência do fluido ao cisalhamento.

Figura 1 - Deslocamento de Placas Paralelas Levando o Fluido a Entrar em Escoamento não Linear



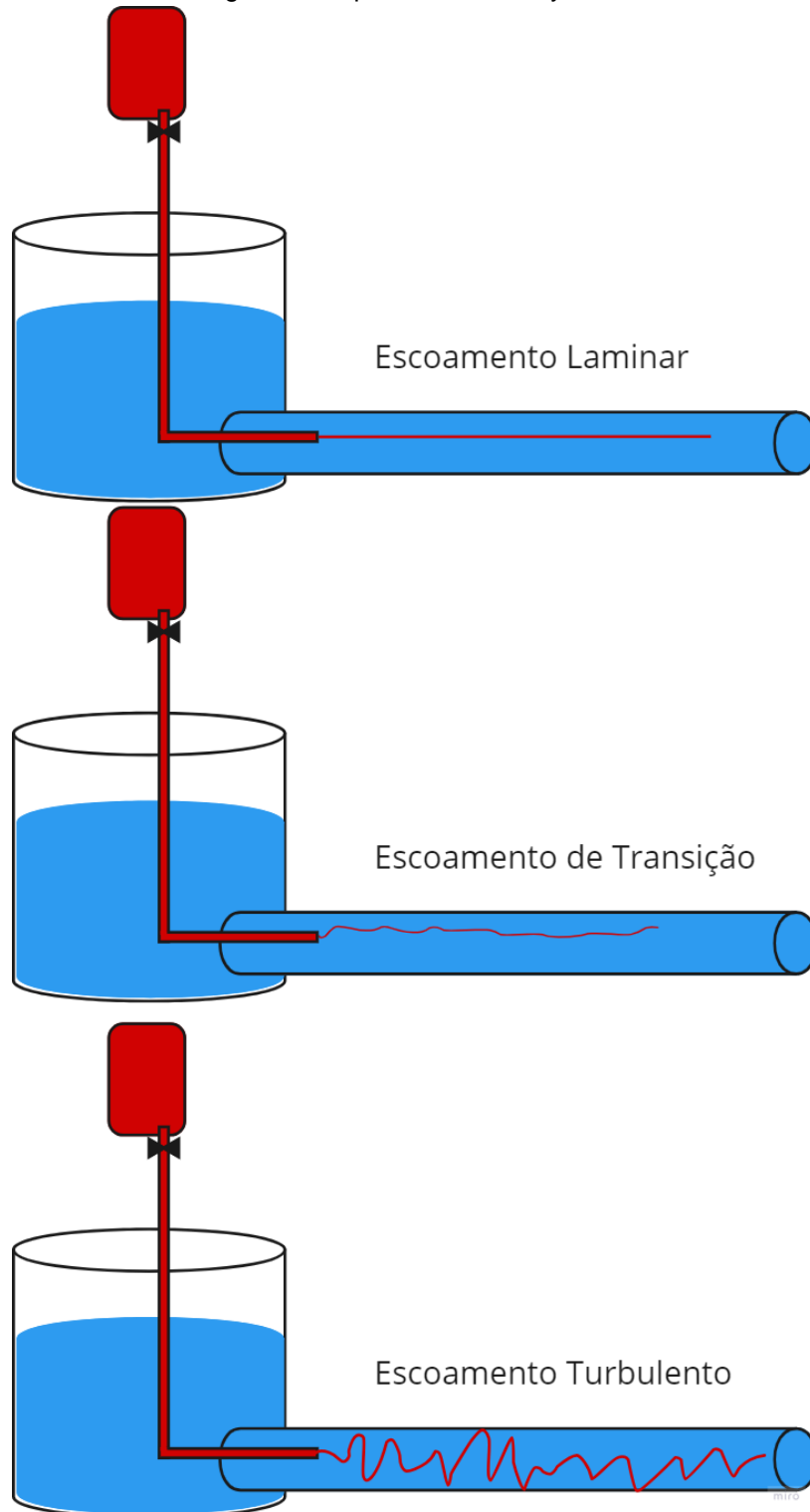
Fonte: Autoria própria

## 2.2. A EXPERIÊNCIA DE REYNOLD - ESCOAMENTO LAMINAR, DE TRANSIÇÃO E TURBULENTO

Em 1883 Osborne Reynolds, um cientista britânico, descobriu por meio de uma experiência que o escoamento de um fluido em um conduto pode ser laminar, de transição ou turbulento, como mostrado na figura 2 a seguir. Essa experiência

consistiu em adicionar corante na saída de água de um reservatório para tubulação transparente, observando assim que quando a vazão era relativamente baixa o traço colorido apresentava uma linha contínua e definida ao longo da tubulação, ao aumentar a velocidade para um valor médio essa linha começava a apresentar algumas oscilações, já em uma alta velocidade o traço de corante apresentou grandes oscilações de forma aleatória apresentando-se como um borrado (Munson, 2013)

Figura 2 - Experimento de Reynolds



Fonte: Autoria própria.

Por meio da experiência descrita acima, Reynolds notou que o tipo de escoamento de um fluido depende de um parâmetro adimensional (número de Reynolds), que relaciona a densidade do fluido em estudo, a sua velocidade, sua viscosidade e o diâmetro do conduto. Com isso nota-se que, tão importante quanto as características do fluido transportado é o conduto (tubulação) pela qual ocorre esse transporte.

### 2.3. TUBULAÇÕES

Tubulações são componentes essenciais em diversos sistemas, desde a distribuição de água em residências até a condução de produtos químicos, bem como a de combustíveis em bases de distribuição. O material da tubulação varia de acordo com o fluido a ser transportado, da temperatura e pressão do sistema, além de outros fatores como corrosão e atrito.

Dentro do termo tubulações temos também seus acessórios que podem ser cotovelos, válvulas, desvios, entre outros componentes que funcionam como auxiliares para que o transporte de fluidos ocorra de forma segura e eficiente.

Segundo Silva (2010) São considerados acessórios de tubulações os dispositivos destinados a: unir duas seções de tubos; alterar o diâmetro de uma linha; interromper uma linha; modificar a direção do escoamento; fazer derivações.

Devido a grande variedade de fluidos a serem transportados, é fundamental para garantir a durabilidade e o desempenho de qualquer sistema de tubulação, seja ele residencial, industrial ou comercial, uma classificação eficaz para tubulações além da escolha correta dos materiais e componentes.

Para isso classificam-se os tubos em duas categorias de acordo com seu tipo de material, sendo eles metálicos e não metálicos. Os tubos não metálicos podem ser de vidro, de concreto ou até mesmo de PVC, comumente utilizados para transporte de água. Já os tubos metálicos podem se dividir em não ferrosos como os de níquel, alumínio e cobre e em ferrosos como ferro fundido, aço-carbono e aços inoxidáveis, sendo estes dois últimos de grande importância para o transporte de combustíveis (Silva, 2010).

### 2.4. PERDA DE CARGA

Ao realizar o transporte de um fluido por um sistema de tubulações o mesmo perde parte da sua energia ao longo do percurso. Essa perda está associada a uma queda de pressão que está diretamente relacionada ao atrito do fluido com as paredes internas da tubulação e com as alterações na velocidade e direção causadas pelos acessórios existentes na tubulação.

O cálculo da perda de carga ( $lw$ ) é essencial para um dimensionamento adequado do sistema de tubulação e do sistema de bombeamento do fluido, pois ele permite determinar a potência necessária para bombear o fluido, a seleção de diâmetros adequados para os tubos e a escolha de acessórios que minimizem as perdas de energia (Silva, 2010).

Diversas fórmulas e métodos de cálculo são utilizados para estimar a perda de carga, levando em consideração fatores como o tipo de fluido, a viscosidade, a

vazão, o diâmetro da tubulação, a rugosidade ( $\epsilon$ ) da parede interna e as características dos acessórios. Compreender os mecanismos que causam a perda de carga e dominar as ferramentas de cálculo é essencial para garantir o funcionamento eficiente e seguro de qualquer sistema que envolve o transporte de fluidos. A rugosidade absoluta de alguns materiais pode ser observada na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Rugosidades absolutas por tipo de material

Material	$\epsilon$ (mm)
Ferro Fundido	0,26 a 1,00
Ferro Galvanizado	0,15
Aço Comercial	0,045
Aço Rebitado	0,04
Latão, Cobre, Chumbo ou Vidro	0,0015
Cimento Alisado	0,30 a 0,80
Concreto Centrifugado	0,07

Fonte: Adaptado de Silva (2010)

Além disso existem duas classificações para a perda de carga ocorrida em um sistema, a primeira é a que ocorre nos trechos retos da tubulação, chamada de perda de carga distribuída. Já a segunda é a que ocorre nos acessórios da tubulação como em válvulas e cotovelos, chamada de perda de carga localizada (Silva, 2010)

Para o cálculo de perda de carga em trechos retos da tubulação, que ocorre principalmente pela rugosidade ou desgaste do tubo, pode-se utilizar uma fórmula conhecida como universal, a equação de Darcy-Weissbach, que será apresentada mais adiante neste trabalho e depende de um fator de atrito ( $f$ ) (Silva, 2010).

Assim como as tubulações retas possuem um determinado comprimento os acessórios possuem o que é chamado de comprimento equivalente, que nada mais é que uma medida que equivale a um trecho reto de tubulação que apresenta a mesma perda de carga do acessório como apresentado na figura 3 a seguir, conceito muito útil em cálculos de perda de carga nos transportes de fluidos uma vez que os acessórios são os maiores responsáveis por tais perdas de energia (Silva, 2010).

Figura 3 - Exemplo de comprimento equivalente de uma válvula em trecho reto

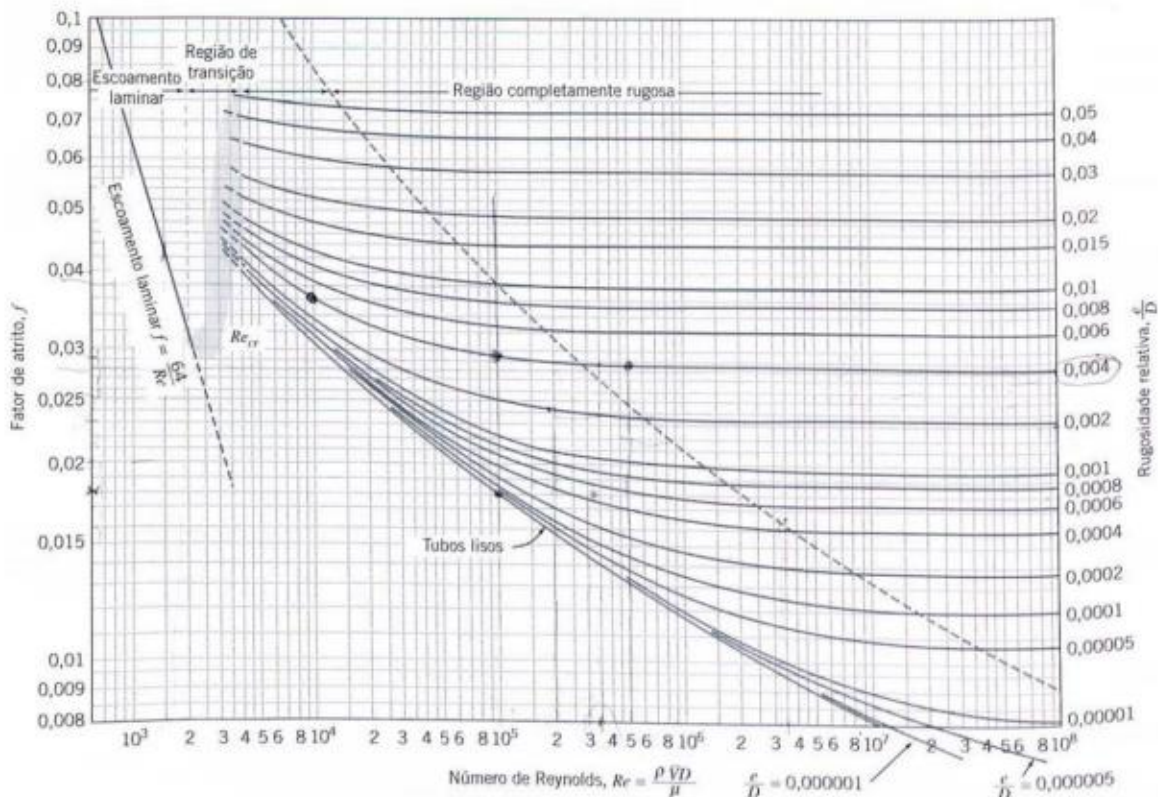


Fonte: autoria própria

Esse fator de atrito por sua vez depende do tipo de escoamento e da rugosidade relativa da parede do tubo, que é a razão entre rugosidade e diâmetro do

tubo. Uma das principais formas de se obter o fator de atrito é por meio do diagrama de Moody (Figura 4) a partir do número de Reynolds e da rugosidade relativa.

Figura 4 - Diagrama de Moody



Fonte: Fox, 2010.

## 2.5. BOMBAS

Bombas são dispositivos responsáveis por fornecer energia a um fluido e dessa forma realizar o seu transporte, isso é realizado a partir da conversão da energia mecânica em energia cinética. Essa energia cinética é então convertida em energia de pressão e assim o fluido é transportado ao longo do sistema de bombeamento (Porto, 2004).

Bombas centrífugas são indispensáveis a nível industrial quando se trata do transporte de fluido e amplamente utilizadas devido à sua grande capacidade de lidar com os mais diversos fluidos. Além disso, são capazes de operar em diferentes condições de pressão e temperatura, adaptando-se a diversas aplicações industriais, como o abastecimento de água, a irrigação, o transporte de etanol hidratado, o tratamento de efluentes e a na indústria química no geral. O termo centrífuga é utilizado pois esse tipo de bomba possui um rotor giratório que impulsiona para fora o fluido que está sendo transportado (Silva, 2010).

A construção e manutenção destes dispositivos é relativamente simples, porém se não forem considerados todos os fatores envolvidos no sistema como o fluido a ser transportado, a temperatura, a pressão, a altura manométrica, e o NPSH, pode ser que seja realizada uma escolha incorreta da bomba levando a um alto custo operacional e diversos problemas de desempenho, como por exemplo a cavitação.

### **2.5.1. Altura manométrica**

Altura manométrica ( $H_s$ ) é um conceito muito importante para análises em um sistema de bombeamento, pois ele representa a energia por unidade de peso que a bomba deve fornecer ao fluido para transportá-lo. Ou seja, a altura manométrica será dada em função da perda de carga do sistema, da velocidade de transporte do fluido e da diferença de altura do ponto de bombeamento até o reservatório que receberá o fluido. Com isso, sabe-se que quanto maior a perda de carga do sistema maior terá que ser a altura manométrica da bomba. Este conceito, juntamente à vazão, é essencial para a escolha da bomba ideal para o processo.

### **2.5.2. Curvas Características de Bombas**

A seleção correta de bombas para os sistemas de bombeamento, como comentado anteriormente, é de suma importância para um funcionamento adequado dos equipamentos e para que sejam atingidos os objetivos propostos e deve ser realizada a partir das curvas características da bomba.

Essas curvas características são fornecidas pelos fabricantes e são obtidas por meio de ensaios em bancada com a água. A curva mais importante é a que relaciona a altura manométrica à vazão, ou seja, a variação da energia por unidade de peso que o sistema solicita em função da vazão (Silva, 2010).

Além dessas curvas existem outras igualmente importantes e uma delas é a que relaciona a vazão ao NPSH requerido ( $NPSH_r$ ). O NPSH é uma sigla em inglês para carga positiva de sucção da bomba requerida, ou seja, define qual a carga líquida positiva da sucção. O NPSH requerido é um dado fornecido pelos fabricantes que determina empiricamente a energia necessária para o fluido vencer as perdas do bocal de sucção até as pás do rotor (Silva, 2010).

Porém nem sempre se têm este valor no sistema de bombeamento, existindo então o NPSH disponível ( $NPSH_d$ ) que pode ser obtido a partir da diferença entre a pressão do fluido e a pressão de vapor relacionados com as características manométricas da bomba. Então para garantir um bom funcionamento do sistema é importante garantir que o NPSH disponível seja maior que o requerido, pois isso garante que o fluido possua energia suficiente para chegar às extremidades das pás do rotor sem sofrer cavitação (Silva, 2010).

A cavitação ocorre quando o fluido não possui a energia suficiente para passar do bocal de sucção até as pás do rotor e com isso começa a sofrer evaporação devido a região de baixa pressão no centro do rotor, então é quando essas bolhas vindas da evaporação são conduzidas a regiões de maior pressão onde colapsam e geram ondas de choque que atingem as pás do rotor e causam erosão nas mesmas, queda de vazão e ruídos. Por isso a grande importância em garantir que a pressão

interna seja sempre maior que a pressão de vapor do fluido e para entender melhor sobre essa característica é preciso analisar o fluido a ser trabalhado, neste caso o etanol hidratado.

## 2.6. ETANOL HIDRATADO

O etanol, também conhecido como álcool etílico ( $C_2H_6O$ ), é um dos álcoois mais comuns, grupo este que possuem hidroxilas ligadas a átomos de carbono, sendo o etanol hidratado a sua forma como mistura hidroalcóolica. Desde a antiguidade encontram-se relatos da produção de etanol, normalmente relacionada a fermentação natural de produtos vegetais, que ganharam maior aperfeiçoamento com a descoberta da destilação e com o avanço da industrialização (Paccini, 2008).

Na década de 1970, com a crise do petróleo, o Brasil implementou o programa Pró Álcool que visava incentivar o consumo do etanol como combustível em veículos automotores, buscando suprir a demanda energética deste setor sem sofrer em demasia com o impacto do preço dos derivados de petróleo. Desde então o Brasil disparou na produção desse combustível renovável, principalmente tendo a cana-de-açúcar como matéria prima. Segundo a Renewable Fuels Association, o Brasil é o segundo maior produtor de etanol do mundo, representando cerca de 28% da produção mundial, ficando atrás apenas dos Estados Unidos. Além disso, a matriz energética brasileira já é um exemplo de sustentabilidade, pois enquanto a média mundial é o uso de apenas 14% de fontes renováveis, o Brasil utiliza 46,8% (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2010). A Figura 5 a seguir apresenta a produção mundial de etanol carburante por região do mundo.

Figura 5 - Produção Mundial de Etanol Hidratado Carburante por Região



Fonte: Adaptado de Renewable Fuels Association.

Com a crescente demanda por este produto, visando aumentar a eficiência da produção de etanol sem aumentar o uso da terra, surge o etanol de segunda geração, que visa utilizar a biomassa e produzir etanol a partir da lignocelulose dos resíduos vegetais, uma vez que cerca de dois terços da cana-de-açúcar é composta de lignocelulósico, apresentando assim um grande potencial energético. Devido a todos estes fatores o Brasil caminha em direção a um aumento constante da utilização do etanol como combustível automotor, aumentando sua demanda pela produção e distribuição em massa deste produto.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Realizar um estudo hidráulico sobre a descarga de um produto como o etanol hidratado requer a análise dos equipamentos, materiais e dimensionamentos presentes em toda a linha a ser analisada. Também é necessário analisar as características da bomba empregada no transporte do produto ao longo da linha definida.

#### **3.1. DADOS BASE E CONDIÇÕES DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO**

Para o desenvolvimento deste trabalho são necessários alguns dados base retirados da literatura ou supostos hipoteticamente, tomando como base empresas de distribuição de combustíveis. A seguir serão apresentados estes dados e também quais as condições do sistema de bombeamento em relação a bomba utilizada, tipos de materiais e dimensionamentos.

##### **3.1.1. Dados Base**

Se baseando na base de distribuição analisada para o desenvolvimento do trabalho, sabe-se que apenas a válvula de saída da tubulação para o tanque e a saída do CT para a linha possuem um diâmetro (D) de 6" (seis polegadas), já o restante do sistema, sejam trechos retos ou acessório, possuem um diâmetro de 4". Devido a isso, por questões de facilitação de cálculos futuros foi levado em consideração para todo o sistema o diâmetro de 4" nos trechos retos. É considerada que a pressão na entrada da bomba é de 7,7 kgf/m<sup>2</sup>, pressão máxima suportada pela bomba do estudo de caso, considerando que esta esteja trabalhando sobre o máximo estresse do sistema. Também é levado em consideração que a maior parte do material de composição do sistema é de aço comercial, então tendo como base a tabela 1 é definida a rugosidade ( $\epsilon$ ) de 0,045 milímetros. De acordo com a FISPQ do produto, disponibilizada pela Petrobrás, o mesmo possui pressão de vapor ( $P_v$ ) de 0,074 kgf/m<sup>2</sup>, viscosidade de 1,20 cP (centipoise), pH ideal de 7,0 e densidade de 0,811 g/cm<sup>3</sup>, todos os dados considerando a temperatura de 20°C. Ademais considera-se a aceleração da gravidade sendo  $g=9,81$  m/s<sup>2</sup>.

##### **3.1.2. Condições do Sistema de Bombeamento**

A determinação do material das tubulações e dos equipamentos, vazões (Q) de produto e distribuição da linha foram feitos se baseando em uma base de

distribuição de combustível cujo bombeamento do produto alcança cerca de 90 m<sup>3</sup>/h e se encontra em descarga um caminhão-tanque (CT) contendo 62m<sup>3</sup> de etanol hidratado. Para determinação da velocidade de escoamento do sistema é necessário encontrar a área transversal (A) da tubulação pela equação 1 a seguir.

$$A(m^2) = \pi \cdot \left(\frac{D^2}{4}\right) \quad (1)$$

Então, após o cálculo da área é possível encontrar a velocidade de escoamento a partir da equação 2 a seguir.

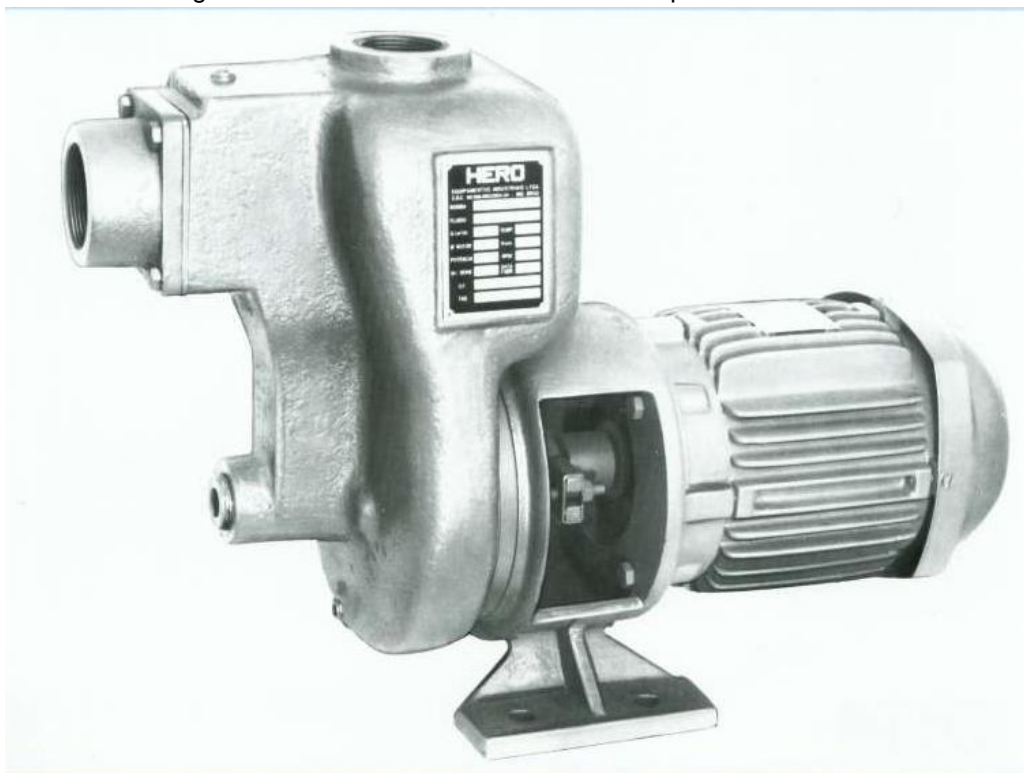
$$v(m/s) = \frac{Q(m^3/s)}{A(m^2)} \quad (2)$$

Foi considerado que o material das tubulações é o aço carbono API 5L Gr. B, das conexões é o aço carbono ASTM A234 Gr. WPB, dos flanges é o aço carbono ASTM A105 e das válvulas é o aço fundido ASTM A216 Gr WCB.

### 3.1.3. Bomba Utilizada

Foi considerado a partir da análise de uma base de distribuição brasileira, que para essas determinadas características de produto, a bomba utilizada para o transporte do EH costuma ser a bomba centrífuga Heroás do modelo 180SH75 com 3500 rpm (rotações por minuto), da linha HERO da empresa Weir do Brasil, como apresentado na Figura 6 a seguir. Dados hipotéticos considerando as mais variadas bombas utilizadas e as mais adequados ao produto a ser transportado.

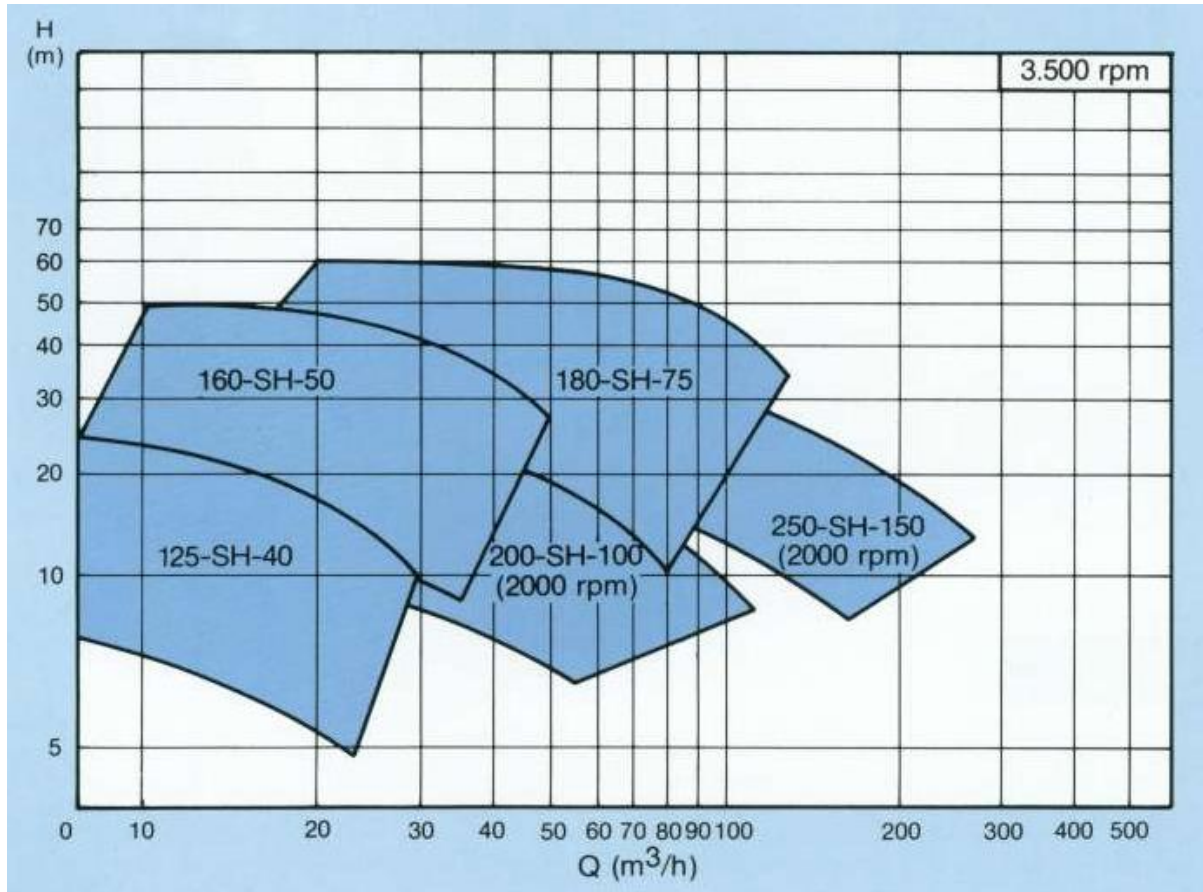
Figura 6 - Bomba Heroás 180SH75 3500 rpm Marca HERO



Fonte: Catálogo Weir do Brasil.

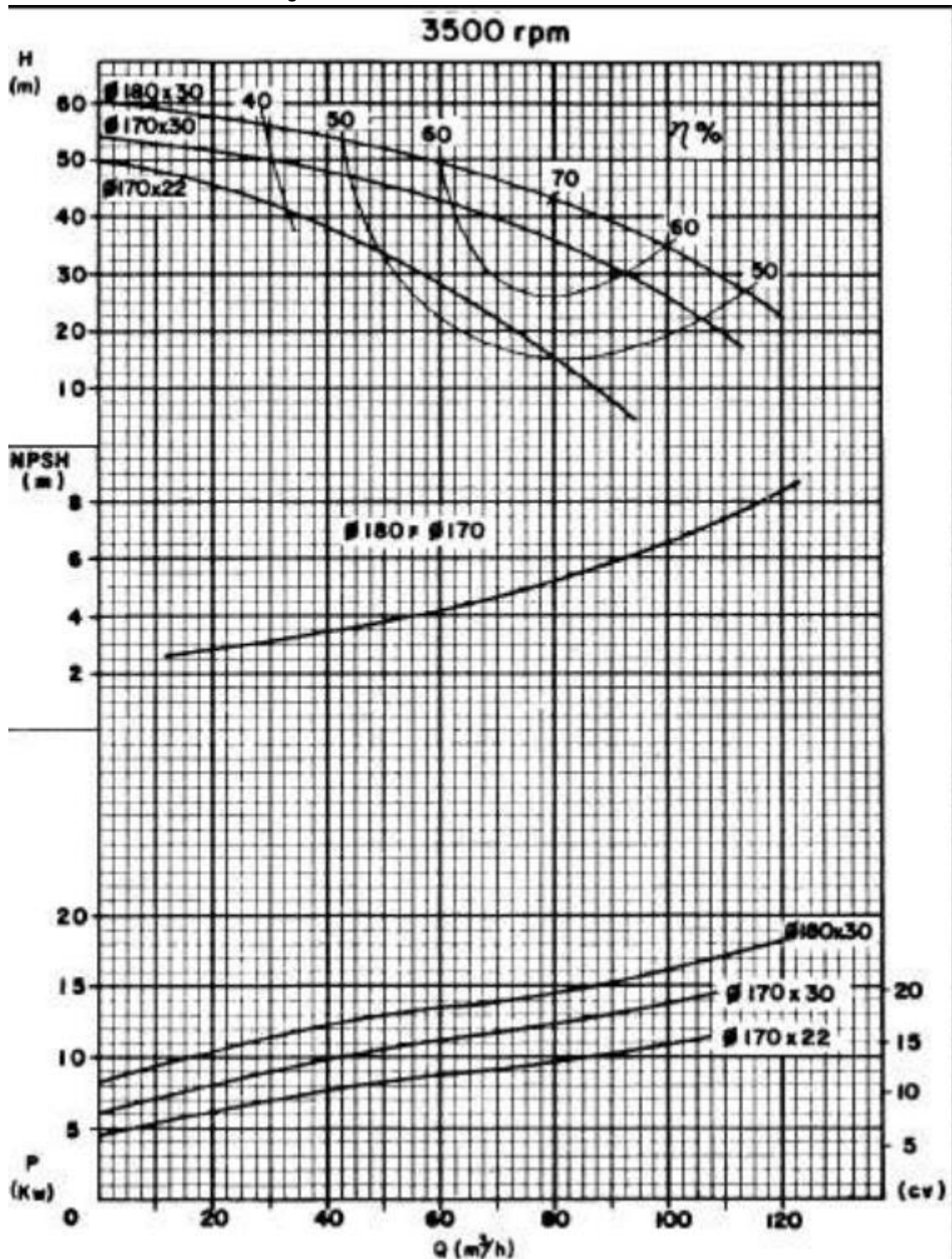
A bomba em questão possui as seguintes curvas necessárias aos cálculos futuros, apresentadas nas Figuras 7 e 8 a seguir.

Figura 7- Gráfico de Seleção da Bomba



Fonte: Catálogo Weir do Brasil.

Figura 8 - Curvas Características da Bomba



Fonte: Catálogo Weir do Brasil.

### 3.1.4. Equipamentos e Acessórios da Linha

Tendo como base locais de distribuição de etanol hidratado, são apresentados no Quadro 1 a seguir os comprimentos de trecho reto e dos acessórios da linha de descarga do produto, onde os comprimentos equivalentes dos acessórios foram calculados com base na Tabela 2 a seguir.

Quadro 1- Quantidade e Comprimento dos Equipamentos da Linha de Descarga do Etanol Hidratado

<b>Linha de Descarga de Etanol Hidratado</b>		
<b>Equipamentos</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Comprimento (m)</b>
Trecho Reto 4"	1	149,09
T 4"	3	15,24
Curva 90° 4"	13	39,62
Válvula Retenção 4"	3	30,48
Válvula Gaveta 4"	2	1,63
Válvula Gaveta 6"	2	2,44
Curva 90° 6"	4	18,29
Curva 22,5° 4"	3	4,57
Válvula Borboleta com Atuador Pneumático 4"	1	4,06
Curva 45° 4"	2	3,05
Saída Afogada 6"	1	0,76

Fonte: Autoria própria

Tabela 2 - Comprimento Equivalente dos Acessórios da Linha

<b>Acessório</b>	<b>Comprimento em número de diâmetros</b>
Curva 90° longa	30
Válvula Gaveta aberta 100%	8
T passagem + saída lateral	50
Curva 22,5°	15
Válvula Borboleta 100% aberta	40
Curva 45° longa	15
Válvula Retenção	100
Saída Afogada	5
Tomada (entrada normal)	17

Fonte: Adaptado de Azevedo Netto e Fernández, 2015.

Sendo que apenas parte deste trecho reto e acessórios se encontram antes da sucção da bomba, ou seja, é o trecho de sucção da bomba. Esta distinção entre toda a linha e apenas o trecho de sucção é importante para a seleção da bomba ideal do sistema e análise da eficiência da bomba atual. Então considera-se como trecho de sucção da bomba apenas os dados apresentados a seguir no Quadro 2.

Quadro 2 - Quantidade e Comprimento dos Equipamentos da Linha de Sucção do Etanol Hidratado

<b>Trecho de Sucção</b>		
<b>Equipamentos</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Comprimento (m)</b>
T	1	5,08
Curva 90°	3	9,14
Válvula Retenção 4"	1	10,16
Trecho Reto 4"	1	11,20

Fonte: Autoria própria

### 3.2. PERDA DE CARGA

Como explicado anteriormente, a fórmula dita universal para o cálculo da perda de carga é a de Darcy-Weissbach apresentada a seguir.

$$lw = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (3)$$

Onde  $lw$  é a perda de carga em metros,  $f$  é o fator de atrito,  $L$  é o comprimento do tubo em metros,  $D$  é o diâmetro do tubo em metros,  $v$  é a velocidade média do escoamento em metros por segundo e  $g$  é a aceleração da gravidade em metros por segundo ao quadrado.

### 3.3. CÁLCULO DO NÚMERO DE REYNOLDS

Como falado anteriormente sabe-se que um dos parâmetros mais importante nos escoamentos em condutos é o número de Reynolds ( $Re$ ), que fornece uma medida da razão entre os efeitos de inércia e os viscosos (Wu, 2010). O qual pode ser obtido utilizando a equação a seguir.

$$Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad (4)$$

Onde  $D$  é o diâmetro interno da tubulação em metros,  $v$  é a velocidade média em metros por segundo,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica e  $\rho$  a densidade relativa do fluido.

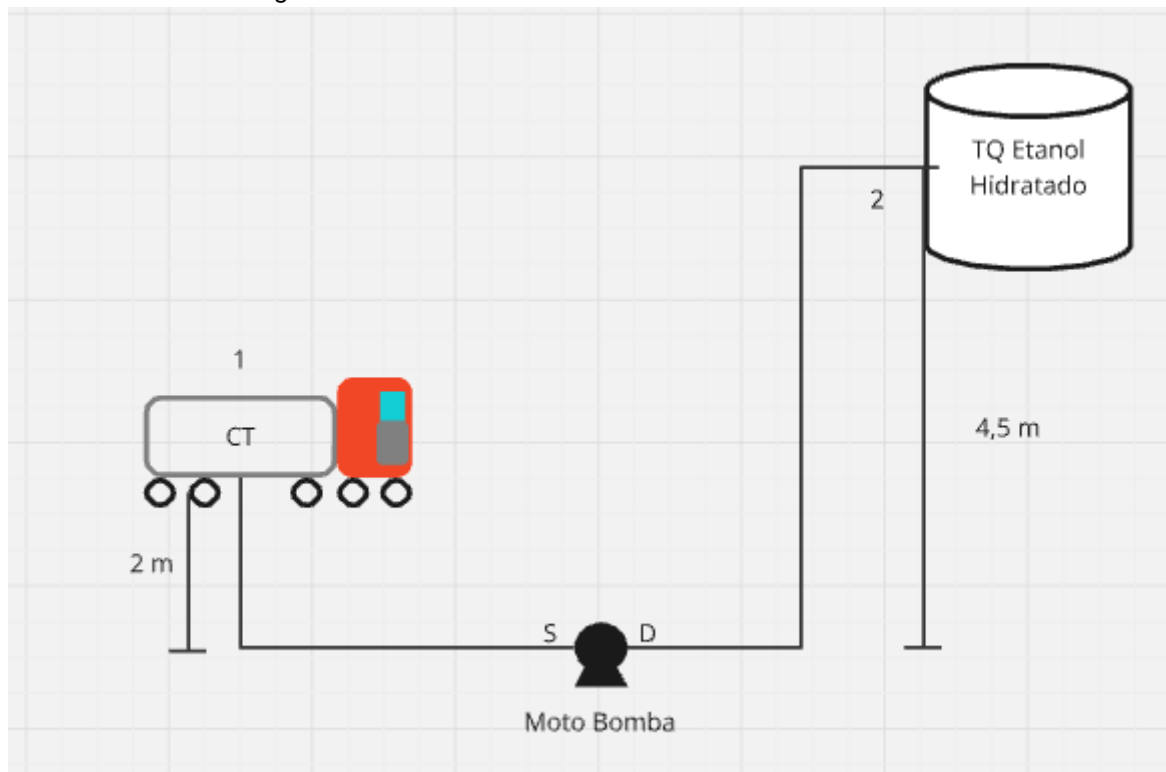
Então a partir disso Reynolds definiu também uma faixa de numeração adimensional que define cada tipo de escoamento como pode ser observado a seguir.

$Re < 2100$	Escoamento Laminar
$2100 < Re < 5000$	Escoamento de Transição
$Re > 5000$	Escoamento Turbulento

### 3.4. CÁLCULO DA ALTURA MANOMÉTRICA

Como citado anteriormente, a altura manométrica é um conceito muito importante para a escolha da bomba ideal ao sistema ou até mesmo para analisar se a bomba que está sendo utilizada está adequada. Ao observar a Figura 9, que demonstra o sistema de bombeamento, observa-se que do ponto 1 até o posto S não há bomba, então é possível calcular sua energia a partir da equação 5 a seguir.

Figura 9 - Sistema de Bombeamento de Etanol Hidratado



Fonte: Autoria própria

$$E_1 - E_S = (z_1 - z_S) + \frac{v_1^2 - v_S^2}{2 \cdot g} + \frac{P_1 - P_S}{\gamma} = lw_{1-S} \quad (5)$$

Onde, em todas as equações,  $lw$  é a perda de carga pelo atrito,  $z$  é a altura estática,  $\frac{P}{\gamma}$  é a energia de pressão por unidade de peso,  $\frac{v^2}{2 \cdot g}$  é a energia cinética por unidade de peso

Como o referencial é fixado no centro da bomba então  $z_S=0$  e sabendo que a energia em 1 tem que ser maior que em S para o fluido escorrer até a bomba, então a equação é rearranjada para:

$$E_S = \frac{v_S^2}{2 \cdot g} + \frac{P_S}{\gamma} = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + z_1 - lw_{1-S} \quad (6)$$

Onde  $E_s$  é a soma das energias na sucção da bomba.

Seguindo de forma semelhante para realizar o balanço entre o ponto D que é descarga da bomba e ponto 2 que é o nível do tanque tem-se a equação 7 a seguir.

$$E_D - E_2 = (z_D - z_2) + \frac{v_D^2 - v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{P_D - P_2}{\gamma} = lW_{D-2} \quad (7)$$

Considerando novamente que o referencial está fixado no centro da bomba é possível concluir que  $z_d=0$ , sabendo também que a energia no ponto D deve ser maior que no ponto 2 e rearranjando a equação 7 tem-se:

$$E_D = \frac{v_D^2}{2 \cdot g} + \frac{P_D}{\gamma} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + z_2 + lW_{D-2} \quad (8)$$

Agora para que seja realizado o balanço entre o trecho S e D, ou seja, o trecho no qual a bomba está contida, percebe-se que a energia cinética depende do escoamento e conseqüentemente da altura manométrica do sistema ( $H_s$ ), trazendo uma equação própria de uma curva de sistema, sendo essa equação descrita por:

$$H_s = E_D - E_S \quad (9)$$

A partir de  $E_s$  e  $E_D$  calculados pelas equações 6 e 8 anteriormente e sabem que  $lW=lW_{D-2}+lW_{1-S}$ , é possível escrever  $H_s$  por:

$$H_s = \frac{v_D^2 - v_S^2}{2 \cdot g} + \frac{P_D - P_S}{\gamma} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g} + \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + (z_2 - z_1) + lW \quad (10)$$

Que simplificando tem-se:

$$H_s = \frac{\Delta P}{\gamma} + \frac{\Delta v^2}{2 \cdot g} + \Delta z + lW \quad (11)$$

Para o caso do presente trabalho será considerado que os tanques estão abertos (tanto CT quando TQ de armazenagem), tal consideração pode ser feita pois devido ao alívio de pressão das linhas sabe-se que a pressão é igual nos tanques e na atmosfera e que o nível dos tanques não se altera, ou seja  $\Delta P/\gamma$  é nulo e  $\Delta v^2/2 \cdot g$  é desprezível, ou seja:

$$H_s = \Delta z + lW \quad (12)$$

### 3.5. CÁLCULO DO NPSH DISPONÍVEL

Como o NPSH disponível é a carga positiva de sucção da bomba e depende das características do sistema de bombeamento é possível encontrar seu valor a partir da equação 13 a seguir que define a diferença entre a energia total absoluta na entrada da bomba e a pressão de vapor do líquido à temperatura do bombeamento em questão.

$$NPSH_d = \left( \frac{P_s}{\gamma} - \frac{P_v}{\gamma} + \frac{v_s^2}{2 \cdot g} \right) \quad (13)$$

Onde  $NPSH_d$  é a energia disponível no líquido no bocal de sucção da bomba,  $P_v$  é a pressão de vapor na temperatura do fluido em  $\text{kgf/m}^2$ ,  $P_s$  é a pressão absoluta

na entrada da bomba em  $\text{kgf/m}^2$ ,  $\gamma$  é o peso específico do fluido em  $\text{kgf/m}^3$ ,  $g$  é a aceleração da gravidade em  $\text{m/s}^2$  e  $v$  é a velocidade do fluido em  $\text{m/s}$ .

Para fins de aplicação em sistemas de bombeamento é necessário realizar um balanço entre o CT que irá descarregar o produto e o ponto final que é o tanque de armazenagem do mesmo.

Então, a partir da equação 13 do cálculo do  $\text{NPSH}_d$  e considerando a figura 9 é possível realizar o balanço entre os pontos 1 (CT) e o ponto S (sucção da bomba).

Balanço entre os pontos 1 e S:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + z_1 + H_s = \frac{P_s}{\gamma} + \frac{v_s^2}{2 \cdot g} + z_s + lw_{1-s} \quad (14)$$

Onde supondo o nível do CT e do tanque constantes devido ao tanque de armazenagem operar de forma pulmão (recebendo e expedindo produto ao mesmo tempo) e também ao fato de que assim que um CT está finalizando a descarga outro está iniciando, mantendo assim sem um nível constante, com isso tem-se que:

$$\frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{v_s^2}{2 \cdot g} = 0$$

Sendo o referencial fixado no centro da bomba é possível também considerar:

$$z_s = 0$$

Com isso tem-se que para o cálculo do  $\text{NPSH}$  disponível, de forma simplificada, é possível utilizar a equação 15 a seguir.

$$\text{NPSH}_d = \frac{P_s}{\gamma} + z_1 - lw_{1-s} - \frac{P_v}{\gamma} \quad (15)$$

### 3.6. METODOLOGIA DE CÁLCULOS

Para realização dos cálculos necessários as equações e os dados apresentados foram implementados em uma planilha do *Microsoft Excel* e a partir disso seguiu-se a ordem de estruturação do cálculo apresentado a seguir.

Primeiro foram calculados os valores da rugosidade relativa, calculada a partir do valor da rugosidade pelo diâmetro, e o valor do número de Reynolds e então a partir destes foi possível encontrar no diagrama de Moody o fator de atrito do sistema. Com o fator de atrito definido calculou-se a perda de carga total do sistema (do ponto 1 ao ponto 2), que possibilitou então que fosse calculada a altura manométrica do mesmo. De forma semelhante, utilizando o fator de atrito, porém agora considerando apenas o trecho de sucção, é possível calcular a perda de carga neste trecho e, posteriormente, o  $\text{NPSH}_d$ . Tendo a altura manométrica, o  $\text{NPSH}_d$  e sabendo a vazão do sistema é possível observar nos catálogos de fornecedores de bombas, a partir do gráfico de seleção e da curva característica da mesma, se a bomba utilizada neste trabalho está adequada ou não às características do sistema proposto.

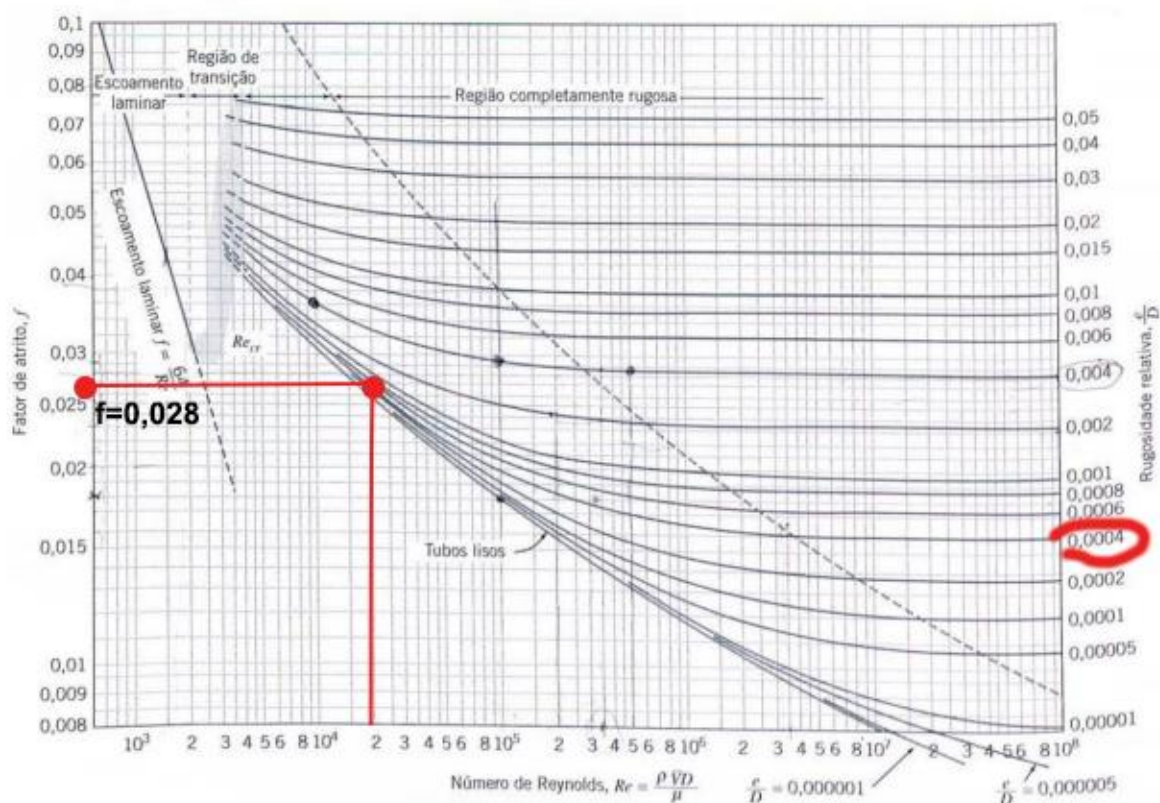
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. NÚMERO DE REYNOLDS E FATOR DE ATRITO

O número de Reynolds é utilizado para encontrar o tipo de escoamento no qual o sistema se encontra, então a partir da equação 4 e dos dados fornecidos, após a realização dos cálculos envolvidos tem-se o valor de  $Re=2,12E^{+05}$ , ou seja, o sistema se encontra em regime de escoamento turbulento, como era esperado considerando as vazões e características do sistema em questão.

Ademais é possível estabelecer qual o fator de atrito do sistema a partir do número de Reynolds encontrando e já conhecendo previamente a rugosidade relativa do material, que sendo está a divisão da rugosidade pelo diâmetro apresenta o valor de 0,0004. Tendo estes dois valores definidos foi consultado o diagrama de Moody para encontrar o fator de atrito, valor este que se encontra a partir do ponto definido pela rugosidade relativa e pelo número de Reynolds. Seguindo isto, encontra-se que o fator de atrito é de 0,028.

Figura 10 - Fator de Atrito pelo Diagrama de Moody



Fonte: adaptado de Fox, 2010.

### 4.2. PERDA DE CARGA TOTAL DO SISTEMA E ALTURA MANOMÉTRICA

A perda de carga e a altura manométrica são ferramentas essenciais para analisar se a bomba utilizada no sistema está adequada ou não. Deve-se saber que quanto maior a perda de carga, conseqüentemente maior será a altura manométrica requerida pelo sistema e ainda que a mesma será relacionada com a vazão do sistema para fins de comparação quanto a adequação do tipo de bomba utilizado.

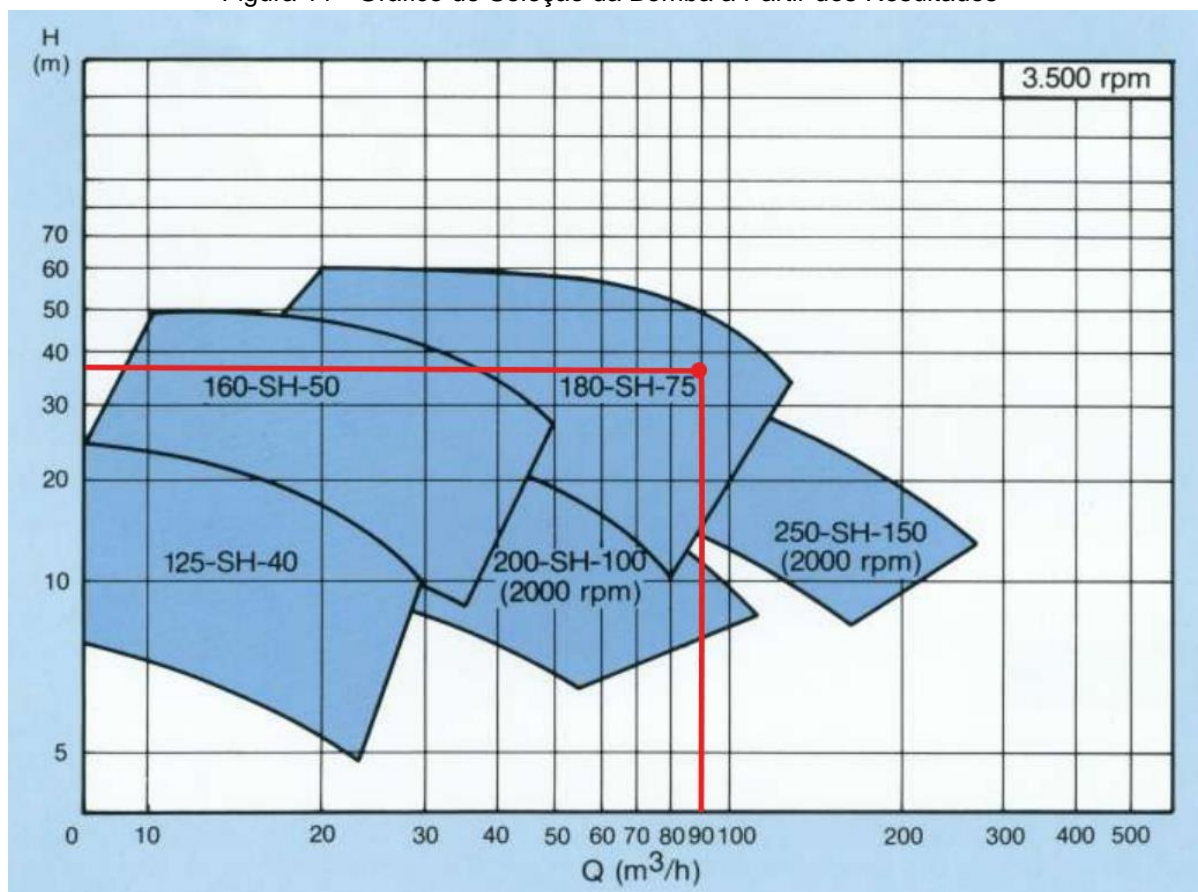
Tendo do tópico anterior o valor do fator de atrito de 0,028, considerando os dados fornecidos para o valor do diâmetro (D) de 4", o valor da aceleração da gravidade (g) de 9,81 m/s<sup>2</sup>, o comprimento total da linha (L) de 274,21 m e o valor calculado para a velocidade do sistema de 3,08 m/s, foi então aplicada a equação 3 é encontrado o valor da perda de carga total do sistema de  $l_w=36,66$  m. Esse valor é condizente com o esperado visto a grande dimensão do comprimento total da linha.

Com o valor da perda de carga do sistema e sabendo os valores de  $z_1=2$  e  $z_2=4,5$  vistos na figura 9, calcula-se, a partir da equação 12, a altura manométrica do sistema obtendo-se o valor de  $H_s=39,16$  m. Então essa é a energia por unidade de peso que a bomba deve fornecer para transportar o fluido do caminhão-tanque até o tanque de armazenagem.

#### 4.2.1. Análise da Bomba Utilizada

A partir da altura manométrica calculada e sabendo que a vazão do sistema, quando em estado pleno, é de 90 m<sup>3</sup>/h é possível analisar no gráfico de seleção da bomba (figura 7) se a mesma está adequada às características deste sistema.

Figura 11 - Gráfico de Seleção da Bomba a Partir dos Resultados



Fonte: Catálogo Weir do Brasil.

Com isso é possível observar que quando avaliada a seleção da bomba em relação a altura manométrica versus a vazão a bomba Heroás modelo 180SH75 está

sim adequada ao sistema proposto, porém outras avaliações ainda serão feitas para fins de maior garantia da adequabilidade do equipamento.

#### 4.3. PERDA DE CARGA DO TRECHO DE SUÇÇÃO

Apesar de ser calculada a perda de carga total do sistema é importante também avaliar esta perda apenas no trecho de sucção, para garantir que o fluido chegue até o bocal de entrada da bomba com energia suficiente para que não ocorra cavitação.

De forma semelhante ao realizado anteriormente é utilizada a equação 3 para calcular a perda de carga no trecho de sucção ( $l_{ws}$ ), porém agora em vez do comprimento total do sistema será utilizado apenas o comprimento do trecho de sucção, apresentado no quadro 2, que possui um valor de 35,58 m. Com isso é calculado o valor de 4,76 m de perda de carga no trecho de sucção. O valor é pequeno quando comparado ao valor da perda de carga total do sistema, mas se justifica pelo fato da bomba estar bem próxima a baía de descarga de CT.

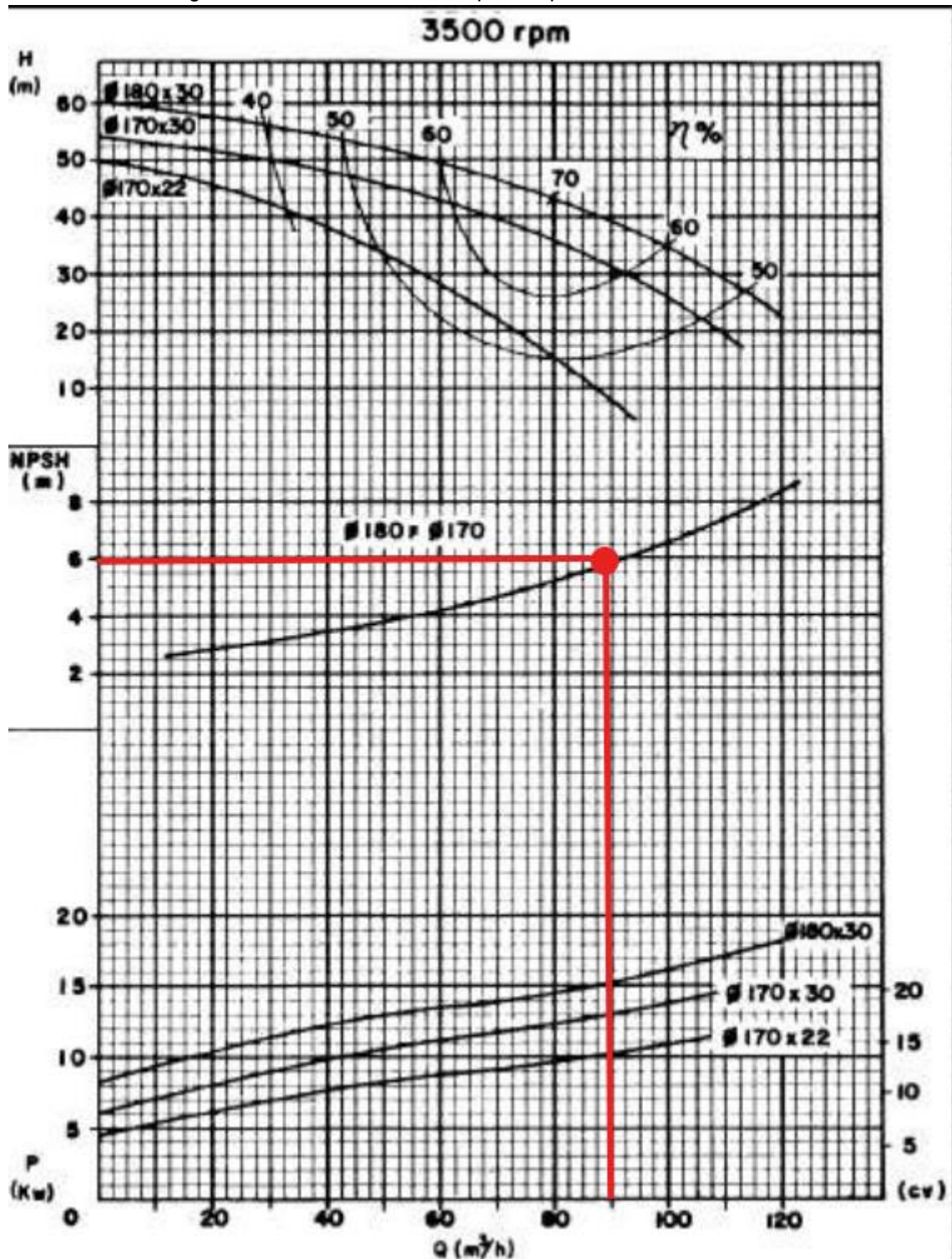
##### 4.3.1. NPSH Disponível e Requerido

Como citado anteriormente o NPSH é um conceito muito importante para garantir que o fluido possua energia suficiente para não sofrer evaporação ao passar do bocal de sucção da bomba para as pás do rotor e assim não causar cavitação na bomba.

O NPSH disponível pode ser calculado pela equação 15 demonstrada anteriormente, que depende da perda de carga no trecho de sucção (calculada no tópico anterior), das pressões de vapor do fluido e no bocal de sucção, do peso específico do fluido e da altura estática entre o CT e o centro da bomba. Com isso é possível obter o valor de 4,9 m de NPSH disponível no sistema.

Em contrapartida, o NPSH requerido é fornecido pelos fabricantes de bombas e a curva que relaciona o  $NPSH_r$  e a vazão da bomba utilizada no sistema deste trabalho é observado na figura 8 apresentada anteriormente. Na mesma é possível observar o valor ideal para o funcionamento da bomba de acordo com a vazão do sistema.

Figura 12 - Valor do NPSH Requerido para a Vazão do Sistema



Fonte: Catálogo Weir do Brasil

Ao analisar a curva na figura 12 percebe-se que na vazão de 90  $m^3/h$  em que se encontra o sistema o  $NPSH_r$  deve ser maior ou igual a 6 m para evitar a cavitação da bomba, porém o  $NPSH_d$  está abaixo desse valor (4,9 m), o que significa que ao longo do tempo e do estresse do uso contínuo da bomba a mesma sofrerá cavitação se seguido o cenário atual.

#### 4.4. ANÁLISES DE MELHORIA NO SISTEMA

Como visto anteriormente com o sistema funcionando da forma proposta a bomba sofrerá cavitação, para evitá-la é necessário que sejam realizadas uma ou mais modificações no sistema. visando a princípio resolver o problema de forma simples, barata e eficiente e em último caso se aprofundando em soluções mais complexas e demoradas.

Ao analisar o gráfico NPSH versus vazão (figura 12) observa-se que o aumento do NPSH requerido é proporcional ao aumento da vazão do sistema, então uma forma simples e eficiente de evitar a cavitação é reduzir a vazão do sistema de 90 m<sup>3</sup>/h para algo entre 65 e 70 m<sup>3</sup>/h, o que pode ser facilmente aplicado reduzindo a abertura das válvulas presentes na linha de sucção. Essa técnica é de certa forma um estrangulamento mecânico no sistema, que apesar de prática, barata e eficiente, deve ser antes bem estudada pois pode gerar novas perdas de carga no sistema. Outra forma de reduzir a vazão pode ser por meio da instalação de um variador de frequência, mas tal técnica costuma não ser aprovada devido ao custo adicional e o conhecimento técnico necessários para a aplicação, sendo então o estrangulamento mecânico a técnica mais comumente utilizada. Porém, outro ponto a ser considerado ao reduzir a vazão do sistema é a eficiência em relação ao tempo, pois o CT de 62 m<sup>3</sup> que antes descarregava em torno de 40 minutos agora descarrega em um tempo de aproximadamente 1 hora. Tal redução de vazão não deve exceder esse limite inferior de 65 m<sup>3</sup>/h, mantendo assim uma margem de segurança considerando que a vazão estará mais baixa que isso os começos e finais das descargas, pois abaixo disso a bomba 180SH75 não é mais adequada.

Pela equação do cálculo do NPSH<sub>d</sub> nota-se que, ao aumentar a altura estática da baía de descarga do CT em relação ao centro da bomba, ocorre um aumento na energia disponível, então reposicionar em cerca de 2 metros a praça de bombas ou a a baía de descarga ou ambas em 1 metro cada, pode fazer com que o NPSH<sub>d</sub> fique igual ou maior o NPSH requerido, garantindo assim que a bomba não sofra mais cavitação. Tal solução exige uma grande demanda financeira e de tempo, não sendo a mais viável.

Uma última solução que pode ser levada em consideração é a troca da bomba por uma que se adeque melhor ao cenário. Dentro da própria marca HERO existem outras bombas igualmente adequadas ao trabalho que podem ser estudadas para substituir a bomba atual.

## 5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos pela análise hidráulica realizada no sistema de bombeamento do etanol hidratado carburante do CT para o tanque de armazenagem do produto observa-se que, como esperado, o sistema trabalha em regime de escoamento turbulento devido às características como diâmetro da tubulação e acessórios e a vazão de trabalho. Tal regime de escoamento juntamente ao tipo de material utilizado no sistema são as variáveis que influenciam no fator de atrito encontrado, estando todos os valores dentro da normalidade para sistemas operacionais do tipo.

Além disso, após partir da perda de carga do sistema para encontrar a altura manométrica, a análise do gráfico de seleção da bomba relacionando a altura manométrica com a vazão, revelou que, se olhando por essa análise, a seleção da bomba em questão para o presente sistema está correta e dentro do esperado. Isso significa que, seguindo por esses critérios, a bomba possui energia para vencer a altura manométrica necessária para levar o fluido do CT para o tanque e ainda assim manter a vazão proposta.

Porém, quando realizada a análise do NPSH disponível, avaliando as perdas de carga apenas no trecho de sucção da linha revelou-se este valor é inferior ao NPSH requerido, sendo assim a bomba sofrerá cavitação pois o fluido não chega no bocal de descarga com energia suficiente para não sofrer evaporação. Por demandar um NPSH disponível mais elevado para suprir a demanda especificada pelo fabricante da bomba, algumas melhorias são sugeridas para resolver o problema com base nas variáveis utilizadas nas equações envolvidas. Dentre elas está a proposta de diminuir a vazão do sistema dentro de um limite que respeite o gráfico de seleção da bomba, mas que diminua as perdas de carga no trecho de sucção e conseqüentemente aumente o NPSH disponível para um valor que supra as demandas do sistema, porém podendo gerar um aumento no tempo de descarga. Outra melhoria a ser estudada é a mudança na altura estática entre a baía de descarga do CT e a praça de bombas, onde se aumentada esta variável contribui para o aumento da energia disponível no fluido, que apesar de ser uma boa solução demanda um custo e tempo elevados. Por último pode-se pensar até na troca da bomba por outra mais adequada ao sistema, onde não seja necessário que se realizem mudanças na vazão ou na estrutura física da linha, mas traz também um custo elevado.

Por fim conclui-se que, todas as características de uma bomba devem ser levadas em consideração para a escolha correta da mesma em relação ao sistema ao qual ela será empregada. Caso esses critérios não sejam atendidos, como no caso do presente trabalho, é necessário que sejam realizados estudos aprofundados sobre possíveis melhorias que gerem um maior custo benefício em relação ao desgaste de um equipamento funcionando irregularmente.

## REFERÊNCIAS

ANNUAL Ethanol Production: **U.S and World ethanol Production**. 17 set. 2021. Disponível em: <https://ethanolrfa.org/markets-and-statistics/annual-ethanol-production>. Acesso em: 15 jul. 2024.

ANP. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo e do Gás Natural**, 2021. Rio de Janeiro, 2022. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP.

ARAÚJO, Alex Maurício. **Mecânica dos Fluidos 2**. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, PE.

**BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL**. Brasília: MME, 2010.

ETANOL HIDRATADO COMBUSTÍVEL - EHC. **FISPQ N°BR:0029**: numeração progressiva. Rio de Janeiro, 01/09/2021. 14 p.

**ETANOL**, 13 jul. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/etanol>. Acesso em: 31 maio 2024.

**FORMAÇÃO do preço de etanol hidratado no Estado de São Paulo e sua relação com os mercados de açúcar e gasolina**. 2012. 141 p. Tese (Doutorado em Ciências Econômicas) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012. DOI <https://doi.org/10.11606/T.11.2012.tde-14082012-094235>. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11132/tde-14082012-094235/pt-br.php#:~:text=O%20principal%20objetivo%20deste%20estudo%20foi%20estimar%20um,nos%20mercados%20dom%C3%A9stico%20e%20internacional%20e%20a%20renda>. Acesso em: 25 jun. 2024.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. A. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: AMGH, 2012.

GNANSOUNOU, E.; DAURIAT, A. **Ethanol fuel from biomass: A review**. Journal of Scientific & Industrial Research, v. 64, p. 809–821, nov. 2005.

GOMES, G. A. P. M. **Seleção de bomba centrífuga vertical para operação em um sistema de transferência de enxofre líquido**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Mecânica. Rio de Janeiro – RJ. 2013.

LOPES, S. S. **Bombas e Instalações Hidráulicas**. São Paulo: LTCE, 2007.

MUNSON, Bruce R; OKIISHI, Theodore H.; HUEBSCH, Wade W.; ROTHMAYER, Alric P. (2013). **Fundamentals of fluid mechanics** 7th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

NETTO, Azevedo; FERNÁNDEZ, Miguel Fernández Y. **MANUAL DA HIDRÁULICA**. 2015. 632 p. ISBN 9788521205005.

PACCINI, H. **Biocombustíveis de segunda geração**. Estocolmo: Royal Institute of Technology, 2008

PÉREZ, E. P.; CARVALHO JR, J. A. de, CARROCCI, L.R. **Substituição do óleo diesel por álcool etílico hidratado na queima direta, uma comparação**. Artigo. Encontro de Energia no Meio Rural. An. 6, vol 2. 2006.

PORTO, R. de M. (2004). **Hidráulica Básica**. 3ª edição, EESC-USP, São Carlos, 519p.

SCHNEIDER, **Motobombas. Manual Técnico**, tabela 7 – perda de carga em acessórios. Disponível em < [http://www.escoladavida.eng.br/mecflubasica/perdas\\_de\\_carga\\_em\\_acessorios.pdf](http://www.escoladavida.eng.br/mecflubasica/perdas_de_carga_em_acessorios.pdf) >. Acesso em 13 de junho de 2024.

Silva, Rosineide Gomes da; **Transporte de fluidos**. São Carlos: EdUFSCar, 2010. 147 p.

SMITH, J. M. **Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química** / J. M. Smith, H. C. Van Ness, M. M. Abbor; tradução Eduardo Mach Queiroz, Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. – [Reimpr.]. – Rio de Janeiro: LTC, 2013.

VANZELLA, Edson. **ESTUDO DE PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DO ETANOL HIDRATADO COM ADIÇÃO DE BIODIESEL PARA USO EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA CICLO OTTO**. 2015. 64 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia e Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2015.

WEIR DO BRASIL. **Tabela de seleção de bombas e motobombas**. São Paulo: Soluções em Bombeamento, 2024.

Wu, Hong Kwong; **Fenômenos de transportes: mecânica dos fluidos**. São Carlos:EdUFSCar, 2010. 153 p.