
**SELEÇÃO DE BOMBA PARA TUBULAÇÃO EM UMA
DISTRIBUIDORA DE COMBUSTÍVEIS, APLICADO DIRETAMENTE
NO BIODIESEL**

Autor 1 – Dyogo Teylor Pereira

166481@upf.br

Autor 2 – Prof. Me. Auro Candido Marcolan

marcolan@upf.br

Comissão Examinadora – Rubens Stuginski, Willian Haupt

RESUMO

As distribuidoras de combustíveis possuem como função distribuir seus produtos prezando pela maior agilidade possível. Nesta função destacam-se as bombas dinâmicas que são as principais responsáveis por este requisito. Essa agilidade é representada pela transferência do combustível dentre os arranjos das tubulações e da seleção de equipamentos favoráveis, que deslocarão o fluido até o local de armazenagem desejado. Neste caso, as corretas seleções de bombas dinâmicas terão um grande impacto positivo para a operação. A vista disso, foi realizado um estudo na linha de movimentação do biodiesel com objetivo de elevar a sua vazão, pelo fato de sua atual configuração não estar se fazendo mais favorável desde o reajuste ocorrido na porcentagem volumétrica do biodiesel. A partir dos cálculos de perda de carga do fluido e dos dados das tubulações foi realizado a seleção de um novo arranjo de bombas que atenderão perfeitamente os requisitos solicitados para o processo, que será apresentado juntamente com todos os resultados deste aumento da vazão.

Palavras-chave: Combustível. Tubulações. Bombas hidráulicas. Biodiesel. Vazão.

1 INTRODUÇÃO

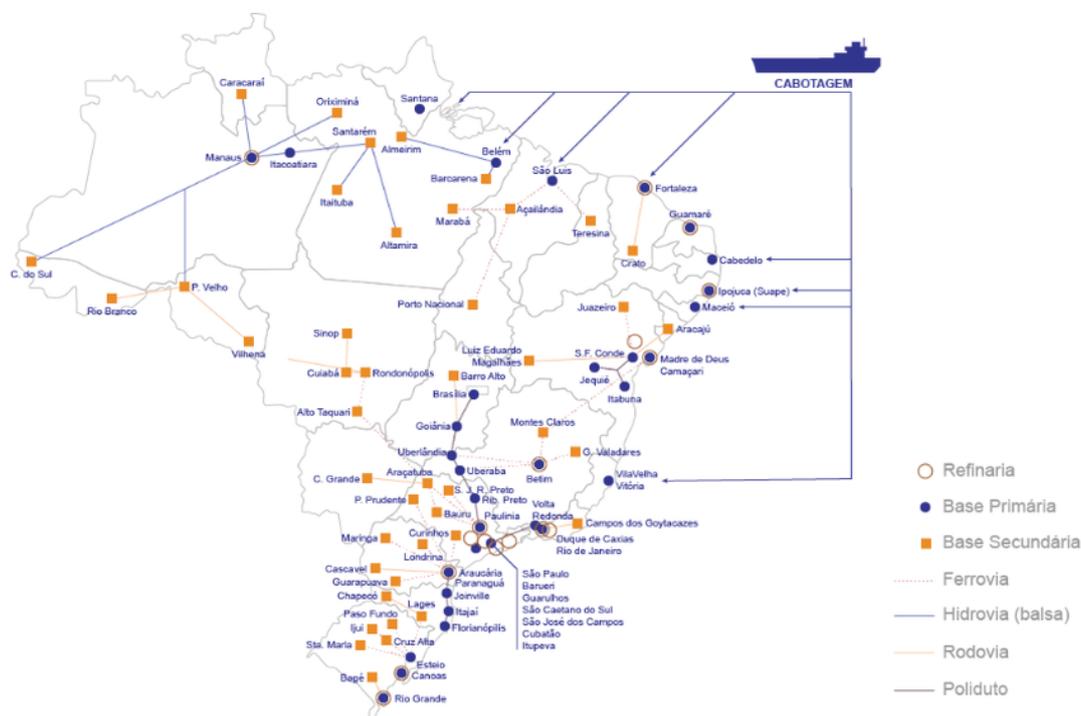
As bases distribuidoras de combustíveis possuem como função distribuir o combustível pronto para o uso, sendo para automóveis e máquinas motoras; passando por um processo que abrange desde as refinarias, usinas, até as bombas dos postos que estamos acostumados a ver abastecendo os veículos.

O processo feito para o deslocamento do produto até estes postos, é realizado por caminhões tanques que são carregados dentro da base, através de tubulações onde o fluido interno é impulsionado pela gravidade dos tanques de armazenamento que podem ultrapassar 5 milhões de litros, criando uma pressão razoável. Porém o principal criador da pressão para este carregamento são as bombas dinâmicas, que são instaladas rente as tubulações, fornecendo a vazão média estabelecida pela base, tal valor de vazão ajustado para influenciar positivamente a produtividade e a segurança; destacando que combustíveis são produtos altamente inflamáveis.

Por todo nosso território brasileiro podemos encontrar bases supridoras de

combustível, conforme Figura 1, tendo a maior concentração no sul e sudeste.

Figura 1 - Mapa das bases distribuidoras no Brasil



Fonte: Researchgate (2021)

O produto chega até elas através da rodovia com caminhões, ferrovia com vagões de trem, em que a região sul e sudeste se destaca nesse processo pelas várias malhas de ferro já construídas e distribuídas pelo território. Por hidroviás com balsas, onde o resto do Brasil principalmente o Norte se faz o uso deste recurso, e, oleoduto que se liga direto às refinarias caso a proximidade for favorável, onde normalmente estão localizadas no litoral, pelo fato de todo o processo que liga a retira do petróleo em alto mar e o desenvolvimento químico do produto para a criação do combustível ser próximo.

A produção em indústrias e qualquer ramo relacionado ao mercado de trabalho, preza pela agilidade e qualidade da fabricação do insumo, pelo simples fato da disputa comercial que atinge o mundo inteiro. Consequentemente a base distribuidora de combustível não poderia ficar para trás neste requisito, almejando uma maior produção dos seus serviços, em outras palavras, quanto mais caminhões tanques forem carregados em menor tempo, mais elevará sua produção; e para que isso seja possível, a bomba de sucção de fluido é a chave principal para agilizar o processo do bombeio do produto nas tubulações entre o tanque e o caminhão.

Existem vários tipos de bombas aplicáveis a este processo envolvendo produtos inflamáveis e viscosos, porém as bombas centrífugas são as mais utilizadas, pelo fato de serem ótimas com trabalhos de grande vazões e pressões moderadas, também, seu custo de manutenção é baixo comparado a outras, favorecendo ainda mais a sua escolha.

O produto puro da mistura de combustível que será abordado nesse texto, responsável por trabalhar em conjunto com a bomba e as tubulações da base é o biodiesel, substância que é misturada na hora do carregamento com o diesel puro para se obter o diesel consumível dos postos. Será utilizado a proporção do mês de maio de 2021, que foi de 13% de biodiesel, e a meta é que aumentem essa porcentagem.

Esta mistura, se dá pela razão que o biodiesel é um biocombustível de fonte de energia renovável, ao contrário dos de origem fósseis, sua produção vem a partir de fontes animais e vegetais, principalmente da soja considerando em volume produzido. Sendo classificado como um produto biodegradável possuindo baixo teor de poluente, porém sua viscosidade supera a dos outros combustíveis e da água, criando uma maior resistência ao escoamento.

A partir de todo esse cenário e com a intuição de elevar a velocidade do biodiesel nas

tubulações afim de diminuir o tempo de carregamento dos caminhões em uma base distribuidora de combustível, será apresentado todo fundamento por trás da mecânica do fluido e da escolha de uma configuração de bomba ideal que nutrirá as necessidades do carregamento, enriquecendo a produtividade em união com a segurança.

1.1 Objetivos Gerais e Específicos

Este trabalho possui como objetivo principal desenvolver e aplicar a seleção de uma bomba hidráulica para o biodiesel em uma base distribuidora de combustível brasileira, buscando uma maior vazão na linha de tubulações que efetuam o carregamento dos caminhões. Seleção que se dá pela intriga do biodiesel estar com a sua velocidade de escoamento limitada não conseguindo acompanhar a do diesel, desfavorecendo assim o tempo do carregamento, motivo pelo qual a percentagem de biodiesel na mistura tem aumentando.

Para que o objetivo geral possa ser concluído, os seguintes objetivos específicos serão trabalhados:

- Realizar uma pesquisa em campo na base distribuidora retirando as principais informações necessárias para o projeto.
- Representar as características do escoamento e tubulação presente no local.
- Verificar a velocidade do escoamento admissível para a tubulação.
- Realizar os cálculos da perda de carga no processo e energias solicitadas pela bomba
- Concretizar a seleção da bomba hidráulica a partir dos dados obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentadas todas definições dos principais parâmetros envolvidos em bombas dinâmicas, tubulações e mecânica dos fluidos, tomando como base principal os livros referentes à Mecânica dos fluidos e de Bombas Industriais, juntamente com alguns outros autores referenciados. Teremos início com a descrição dos fundamentos contidos no comportamento do escoamento do fluido, conceitos de tubulações e todo o envoltório sobre a mesma, por fim as bombas dinâmicas.

2.1 Conceito de fluidos

Um fluido pode ser definido como uma substância que se deforma continuamente, ou seja, escoar sob ação de uma força tangencial por menor que ela seja. Os fluidos podem ser definidos como líquidos e gases, porém a uma diferença em seu conceito, gases são substâncias que no momento que preenche o recipiente não forma superfície livre e nem volume definido, sendo facilmente compressível. Já os líquidos são substâncias que adquirem a forma do recipiente que a contem, possuindo o volume definido e, é praticamente, incompressível (Vilanova, 2011).

2.2 Mecânica dos fluidos

Mecânica dos fluidos se identifica no ramo da mecânica que estuda o comportamento físico dos fluidos e suas propriedades, sendo este comportamento em repouso ou movimento.

Os aspectos teóricos e práticos da mecânica dos fluidos são essenciais para a resolução de vários problemas comuns na engenharia, possuindo a principal aplicação no estudo de escoamento de líquidos e gases, máquinas hidráulicas, aplicações pneumáticas e hidráulicas

industriais, sistema de ventilação e ar condicionado. Além de diversas aplicações na área das aerodinâmicas voltadas para a indústria aeroespacial (Rodrigues, 2005).

Os conceitos de mecânica dos fluidos que terão mais relevância será os relacionados às bombas e tubulações, conceitos que estão presentes nos cálculos realizados no estudo de caso, e o entendimento de cada fundamento ajuda a entender melhor a situação apresentada e os fatores a serem considerados.

2.3 Massa específica

Massa específica é representada por uma propriedade física que resulta da divisão da massa de uma substância pelo volume que ela ocupa (Rodrigues, 2005). Sendo obtida pela seguinte equação:

$$\rho = \frac{M}{V}$$

(1)

ρ = massa específica [kg/m³];

M = massa [kg];

V = volume [m³].

2.4 Pressão a vapor

Segundo Vilanova (2011) a pressão de vapor é uma medida da volatilidade de uma substância, substâncias com alta pressão de vapor são mais voláteis, enquanto que substância com baixa pressão de vapor são substância pouco voláteis.

2.5 Viscosidade absoluta ou dinâmica

Segundo Rodrigues (2005), A viscosidade absoluta ou dinâmica é caracterizada pelos termos da força requerida para mover uma unidade de área a uma unidade de distância, representando a resistência de um fluido a um escoamento.

Cada fluido possui essa resistência e comportamento diferente de outro, um bom exemplo são os fluidos nomeados como, dilatantes, newtonianos e pseudoplásticos, que reagem de forma divergente a um escoamento.

2.6 Escoamento de tubulações

Sendo o objeto de principal importância neste estudo, o escoamento em tubulações possui características relevantes, tais características devem ser analisadas e compreendidas para a seleção correta da bomba do sistema. Nas quais se destaca o fluxo de escoamento em dois tipos principais: fluxo laminar ou fluxo turbulento. Para determinar o estado do fluxo, usamos o Número de Reynolds, que também afeta o cálculo do fator de atrito. Esses conceitos são apresentados a seguir.

2.7 Número de Reynolds

O número de Reynolds é uma propriedade adimensional, sendo a proporção de forças de inércia para as forças viscosas, que se utiliza para obter a característica do escoamento de um fluido, ou seja, a natureza do escoamento em uma tubulação. Além disso, permite conclusões sobre os efeitos viscosos em um escoamento, que podem ser desprezados para valores elevados do Número de Reynolds ou serem dominantes para valores baixos. O número de Reynolds é definido como:

$$Re = \frac{\rho \times D \times v}{\mu}$$

(2)

Re = número de Reynolds [adimensional];
 ρ = densidade do fluido [kg/m^3];
D = diâmetro interno da tubulação [m];
v = velocidade de escoamento [m/s];
 μ = viscosidade dinâmica [Pas.s].

Através do cálculo do Número de Reynolds, foi determinada as seguintes referências para selecionar o tipo de escoamento em uma tubulação com seção transversal circular:

- $\text{Re} < 2.000$ = escoamento laminar
- $2.000 < \text{Re} < 4.000$ = escoamento transitório (zona crítica)
- $4.000 < \text{Re}$ = escoamento turbulento

2.8 Escoamento laminar e turbulento

Segundo Stuckenbruck (2012), o escoamento laminar é caracterizado pelo qual o fluido se move em camadas, ocorrendo somente troca de quantidade de movimento molecular, representando em um movimento com trajetórias bem definidas. Nesse regime de escoamento, não há mistura macroscópica de camadas adjacentes do líquido e a viscosidade do fluido tem ação de prevenir o surgimento de zonas de turbulência.

Escoamento turbulento se caracteriza quando pontos no fluido sofrem flutuações de velocidade em alta frequência, ocasionando a mistura de partículas de camadas adjacentes, apresentando movimento caótico macroscópico. Com isso não apresentam trajetórias definidas e sim irregulares e aleatórias com turbulência e redemoinhos. Definir vetores de distribuição de pressão, densidade e velocidade, fica difícil já que sofrem grandes alterações aleatórias no tempo para um mesmo ponto (Stuckenbruck 2012).

2.9 Vazão e velocidade de escoamento

A vazão de um sistema é definida pelo volume ou massa de um fluido que escoar por uma determinada seção ao longo do tempo. São denominadas vazão volumétrica ou vazão mássica. A vazão volumétrica é a razão entre o volume de um fluido que escoar por uma determinada seção e o tempo necessário para esse deslocamento, sendo determinada pela equação:

$$Q'(\text{volumétrico}) = \frac{V}{t}$$

(3)

Q' = vazão volumétrica [m^3/s];
V = volume [m^3];
t = tempo [s].

Já a vazão mássica é a razão entre a massa de um fluido que escoar por uma determinada seção e o tempo necessário para esse deslocamento, determinada pela equação:

$$m' = \frac{M}{t}$$

(4)

m' = vazão mássica [kg/s];
M = massa [kg];
t = tempo [s].

É possível relacionar as vazões volumétrica e mássica ao introduzir o termo de massa específica, visto que volume e massa podem ser convertidos conforme a equação:

$$M = V \times \rho$$

(5)

M = massa [kg];

V = volume [m³];

ρ = densidade do fluido [kg/m³].

A equação da vazão volumétrica também pode ser escrita relacionando a velocidade do escoamento do fluido e a área da seção transversal da tubulação pela qual escoo o fluido. A equação, nesse caso, é:

$$Q' = v \times A$$

(6)

Q' = vazão volumétrica [m³/s];

v = velocidade de escoamento [m/s];

A = área da seção reta da tubulação [m²].

Tem-se, portanto, a equação para a vazão volumétrica em um escoamento interno de uma tubulação de seção transversal circular:

$$Q' = \frac{v \times \pi \times D^2}{4}$$

(7)

Q' = vazão volumétrica [m³/s];

v = velocidade de escoamento [m/s];

D = diâmetro interno da tubulação [m].

É de parte fundamental do estudo de caso realizar a análise da vazão e da velocidade de escoamento do fluido na tubulação, onde a vazão está diretamente relacionada à produtividade da base de distribuição. A velocidade de escoamento do fluido, por sua vez, está relacionada a recomendações técnicas específicas para a movimentação de fluidos e ao cálculo de fatores importantes para a análise do sistema.

2.10 Altura manométrica total (AMT)

A altura manométrica total de uma bomba é representada pelo valor de ganho de energia de pressão do líquido entre a entrada e saída da bomba, ou seja, é a energia que a bomba deve transmitir para o fluido para o transporte de uma determinada vazão até o ponto final do sistema (Souza, 2014). No cálculo da altura manométrica total deve-se considerar a energia na linha de sucção e a energia na linha de descarga, cabendo à bomba o fornecimento da energia solicitada pelo sistema. Essa relação é resumida na equação abaixo:

$$AMT = H_d - H_s$$

(8)

O cálculo dos termos que compõem a altura manométrica se baseia na altura manométrica de descarga subtraindo a de sucção, dados que serão apresentados a seguir, derivado do Teorema de Bernoulli. O procedimento, no caso, permite o cálculo da demanda energética do sistema ainda no estágio de projeto, sem necessidade de instalar e operar o sistema físico para coleta de dados.

2.11 Teorema de Bernoulli

O teorema de Bernoulli é característico por apresentar um princípio da conservação de energia aplicada ao escoamento de fluidos em sistema fechados. A análise da energia total do fluido por unidade de peso compreende as energias de pressão, cinética e potencial gravitacional (Souza, 2014). Somadas, permitem o cálculo da energia existente em diferentes pontos do sistema.

O teorema de pode ser adaptado ao estudo de bombas para fornecer a energia disponível nos trechos da tubulação conforme equação abaixo.

$$AMT = z_d - z_s + \frac{p_d - p_s}{\gamma} + (h_{f_d} + h_{f_s})$$

(9)

AMT = altura manométrica total [m]

z_d = altura estática de descarga [m];

z_s = altura estática de sucção [m];

p_d = pressão de descarga [kgf/m²];

p_s = pressão de sucção [kgf/m²];

γ = densidade do fluido [kg/m³];

h_{f_s} = perda de carga no trecho de sucção [m];

h_{f_d} = perda de carga no trecho de descarga [m]

2.12 Perda de carga na tubulação

A perda de carga em uma tubulação se refere a energia por unidade de peso perdida em um dado trecho devido ao atrito da parede do tubo com o fluido, podendo ser também além dos tubos, válvulas e filtros. Conforme Schmidlin Júnior (2006), esta perda de carga é composta por duas parcelas, sendo a de carga nominal e de carga localizada. Que ao serem somadas resultam na totalidade, conforme equação a baixo.

$$h_f = h_{f_n} + h_{f_l}$$

(10)

A perda de carga normal representa a perda de energia por unidade de peso que ocorre em trechos retos da tubulação, enquanto a perda de carga localizada representa a perda de energia por unidade de peso em acessórios como válvulas e conexões (Schmidlin Júnior, 2006).

$$h_f = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2 \times g}$$

(11)

h_f = perda de carga total [m];

f = fator de atrito [adimensional];

L = comprimento da tubulação reta [m];

D = diâmetro interno da tubulação [m];

v = velocidade de escoamento [m/s];

g = aceleração da gravidade [m/s²];

2.13 Fator de atrito

Fator de atrito também conhecido como coeficiente de atrito, é obtido através de fórmulas teórico-experimentais ou gráficos como o *Ábaco Moody*, sendo função do número de Reynolds e da rugosidade relativa da tubulação. As fórmulas, nesse caso, consideram além do número de Reynolds também a rugosidade relativa, razão entre a rugosidade absoluta e o diâmetro de uma tubulação, e há diferentes equações propostas por estudiosos, porém a usada será a seguinte:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \times \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{Re \times \sqrt{f}} \right)$$

(12)

f = fator de atrito [adimensional];
 ε = rugosidade absoluta da tubulação [m];
D = diâmetro interno da tubulação [m];
Re = número de Reynolds [adimensional];

2.14 Método de comprimentos equivalente e método direto

O método de comprimentos equivalentes consiste em reproduzir as condições da perda de carga nos acessórios (filtros, curvas de níveis, válvulas...) em valores de comprimento reto de tubulação. A perda de carga é então calculada como se toda a tubulação fosse reta, sem acidentes ou desvios.

O método direto fornece somente a perda de carga localizada. Para o cálculo da perda de carga total é necessário somar a perda de carga normal à perda de carga localizada.

2.15 Conexões de tubulação

As conexões de uma tubulação podem ser diferentes com funções específicas. Na tubulação analisada no presente estudo, as principais conexões são de mudança de direção e mudanças de diâmetro, tais fatores que contribuem para as condições exigidas no processo e adequar às condições espaciais do local.

2.16 Filtros

Os filtros são equipamentos separadores com função de reter corpos estranhos em correntes de fluidos ou gases. Localizam-se próximo ao bocal de entrada de equipamentos como bombas para evitar uma possível entrada de sujeira que possam prejudicar os equipamentos ou principalmente o escoamento, sendo que filtros já são responsáveis por criar alta perda de carga do fluxo.

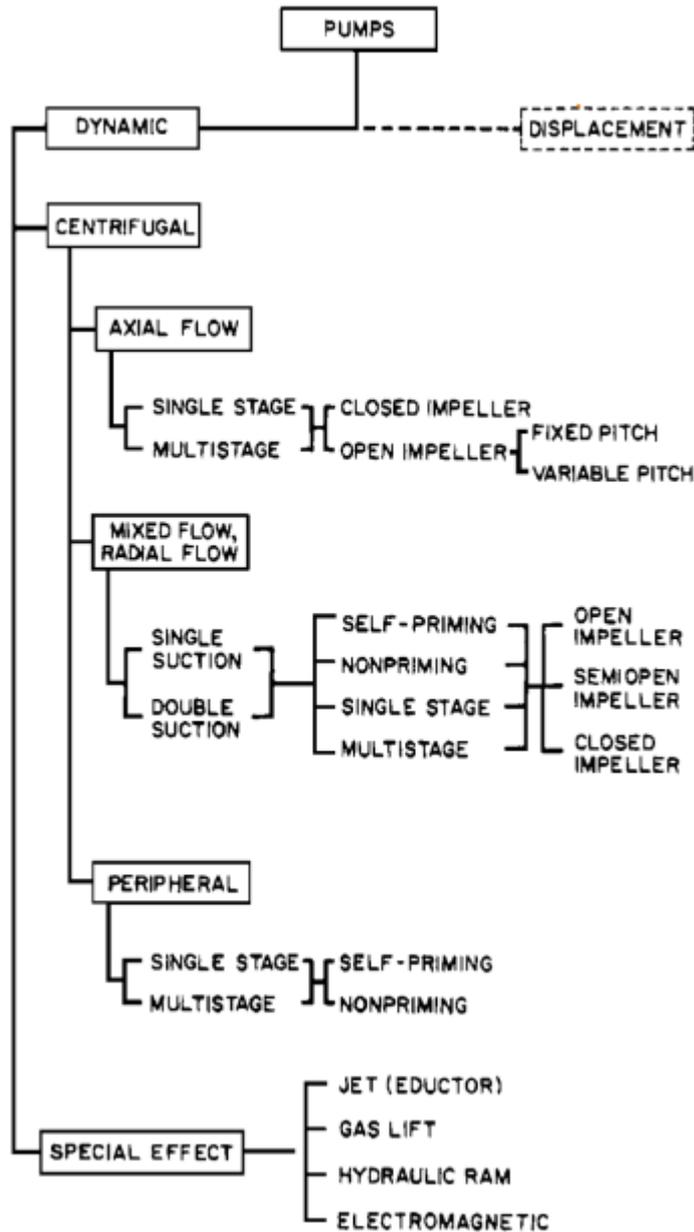
2.17 Bombas fluidodinâmicas

São definidas como equipamentos responsáveis por converter energia mecânica em energia hidráulica com o objetivo de aumentar a velocidade de fluidos e preservar seu deslocamento (Misquati, 2005). O entendimento dos conceitos aplicáveis a bombas possui grande grau de importância no processo de seleção da mesma. Uma categoria que iremos usar são as bombas centrífugas, onde a energia cedida ao fluido é originalmente da forma cinética e posteriormente convertida em energia de pressão na carcaça. A conversão de energia ocorre em consequência do aumento progressivo da área na carcaça, o corpo da bomba, e a criação de zonas de alta e baixa pressão gera um deslocamento do fluido em regime constante, caracterizando um fluxo contínuo de bombeamento.

2.18 Tipos de bombas

A melhor forma de iniciar a categorização de bombas diz respeito à forma como transformam trabalho mecânico em energia hidráulica e pela forma como a energia é cedida ao fluido. A Figura 2 apresenta as principais classificações de bomba aplicáveis a ao estudo de caso.

Figura 2: Classificação das bombas



Fonte: ronneprofessor.blogspot.com/ (acessado em 11/2021)

A bomba dinâmica mais especificamente centrífuga que teremos como foco possuem um elemento rotativo denominado rotor que é dotado de pás, responsável por exercer força sobre o fluido resultando na aceleração do mesmo.

As bombas centrífugas, onde a energia cedida ao fluido é originalmente da forma cinética e posteriormente convertida em energia de pressão na carcaça. A conversão de energia ocorre em consequência do aumento progressivo da área na carcaça, o corpo da bomba, e a criação de zonas de alta e baixa pressão gera um deslocamento do fluido em regime constante, caracterizando um fluxo contínuo de bombeamento.

2.19 NPSH disponível e NPSH requerido

Net Positive Suction Head (NPSH) disponível, segundo Henn (2006) que representa a energia por unidade de peso existente no flange de sucção da bomba, acima da pressão de vapor do líquido nas condições de bombeamento, afim de evitar a cavitação. Obtido pela subtração da pressão atmosférica pela pressão de vapor do fluido, dividido pela densidade também do fluido, somando o resultado com a altura manométrica de sucção.

$$NPSH_{disponível} = H_s + \frac{P_{atm} - P_{vapor}}{\gamma}$$

(13)

2.20 Cavitação

A cavitação acontece quando ocorre a vaporização do fluido na entrada da bomba e sua prevenção está diretamente ligada à energia disponibilizada pelo sistema e ao ponto de vapor do fluido. Dentre as principais consequências temos: ruído, vibrações indesejadas, erosão dos componentes da bomba e queda de performance. Para eliminar a cavitação em bombas, a perda de carga entre o flange de sucção e o olho do impelidor deve ser inferior à energia por unidade de peso que o sistema disponibiliza no flange de sucção acima da pressão de vapor, considerando-se também uma folga de segurança.

2.21 Método de desenvolvimento

O procedimento será realizado a partir da metodologia usada por Souza P. (2014), que dividiu os métodos de cálculos por tópicos seguindo uma sequência específica que se fazia necessária, iniciando com as características físicas do projeto em estudo partindo para o cálculo de vazão no escoamento, perdas de cargas, enfim finalizando com a seleção da bomba.

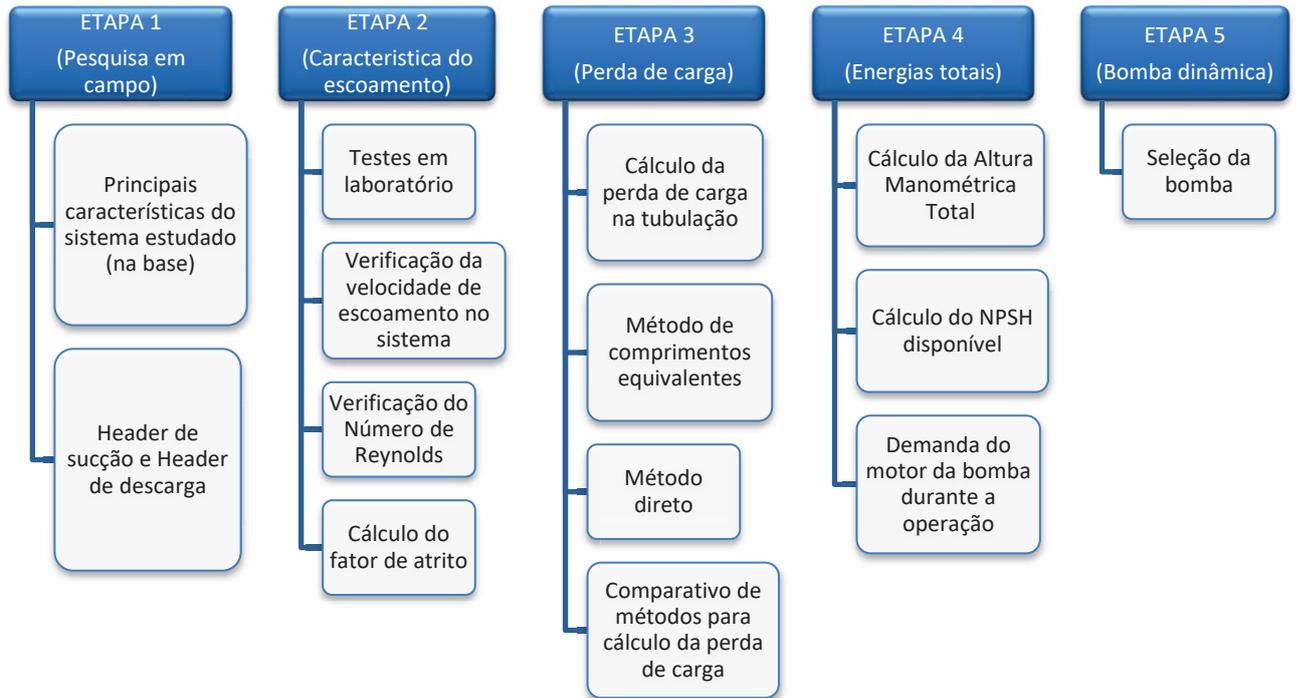
Atraves das informações da revisão bibliográfica que fortalecem os métodos de cálculos e conceitos, mais o método de desenvolvimento selecionado, se faz possível realizar o trabalho com equações específicas sobre o escoamento de um fluido na tubulação e todo o seu envoltório, e também, por procedimentos na seleção de bombas dinâmicas.

3 METODOLOGIA

Para realização do desenvolvimento na seleção de uma bomba para o biodiesel em uma distribuidora de combustíveis será usado o método citado de Souza P. (2014) foi desenvolvido o fluxograma da Figura 3 abaixo para selecionar a bomba do biodiesel. O fluxograma é dividido em 5 etapas em que cada uma possui tópicos específicos que precisam ser seguidos, pelo fato do tópico seguinte se fortalecer com os resultados do anterior.

Vale ressaltar que alguns métodos de cálculos e valores iniciais não estarão no nosso S.I. pelo fato dos dados das bombas e acessórios, serem oferecidos pelo fornecedor fabricante já no sistema internacional deles, porém, todos valores finais estarão convertidos para o nosso S.I.

Figura 3 – Metodologia de projeto



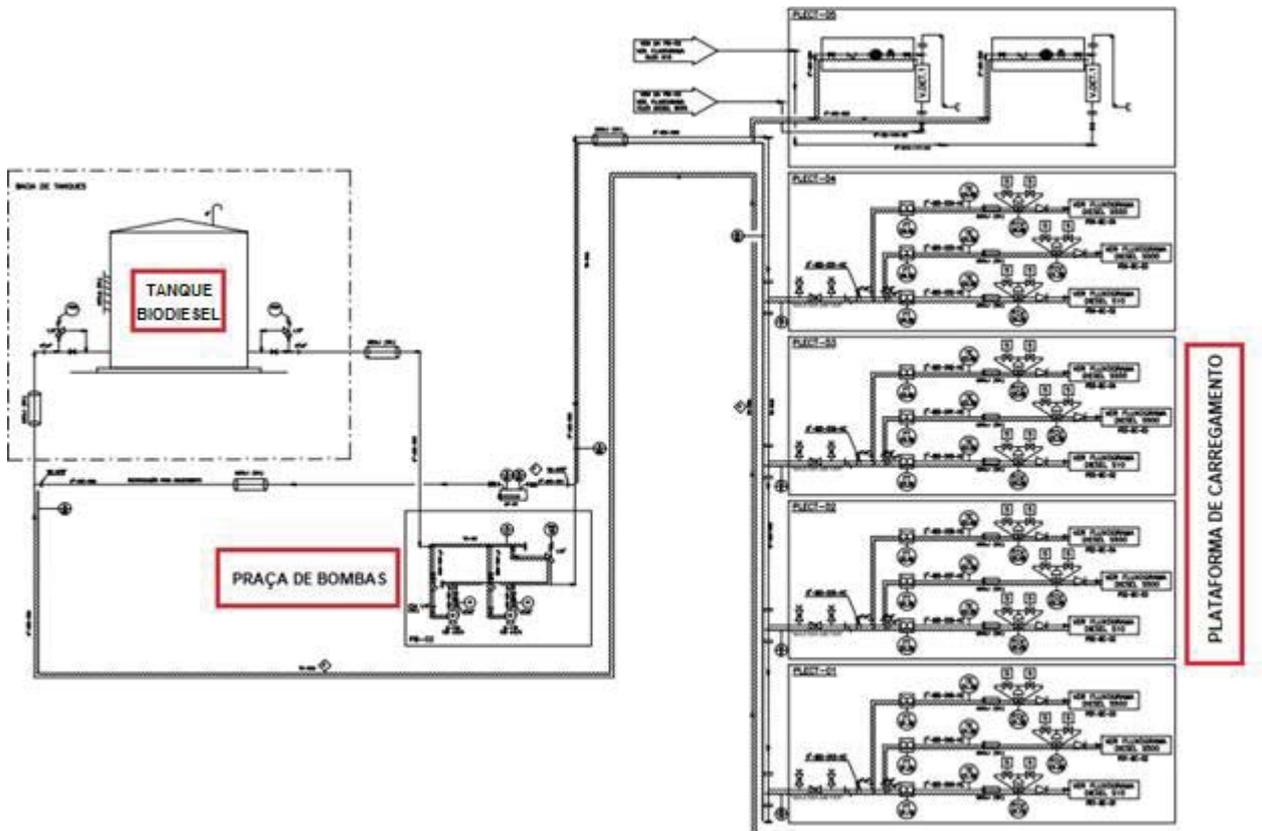
Fonte: Autor

A primeira etapa consiste em uma pesquisa em campo realizada na base distribuidora de combustível, retirando todas informações que serão de crucial importância para o desenvolvimento dos cálculos e a continuidade no fluxograma. A etapa 2 é as características do escoamento, iniciando com os dados químicos do biodiesel partindo para a verificação do escoamento no sistema. A etapa 3 tem como prioridade determinar a perda de carga do fluido na tubulação. Na quarta etapa será calculado principalmente as energias totais do sistema que serão solicitadas a bomba. Por fim temos a última etapa sendo ela de número 5, representando o foco principal do estudo de caso, a seleção da bomba ideal para a tubulação a partir de todos resultados obtidos até então.

3.1 Etapa 1: Pesquisa em campo

Iniciando com a pesquisa em campo feita na base, foi realizado uma planta hipotética do local de estudo, pelo fato da política de segurança da companhia. Essa planta contém a ilustração sobre a tubulação do biodiesel que tem início em um único tanque de armazenagem, passando em seguida na praça de bombas com destino final nos braços de carregamento nas plataformas, a figura 3.A abaixo nos apresenta esse esquema.

Figura 3.A: Planta hipotética da base



Fonte: Autor

A praça de bombas consta com 2 bombas atualmente que são direcionadas para o fluxo do produto em questão, porém como foi mencionado elas não se fazem suficientes com suas vazões de 30 m³/h. Os dados do tanque são apresentados pela Tabela 1 abaixo.

Tabela 1: Propriedades do tanque de biodiesel

| | |
|------------------------|--------------------|
| Produto no tanque | Biodiesel |
| Diâmetro nominal | 7,62 m |
| Altura nominal | 12,17 m |
| Altura operacional | 11,6 m |
| Capacidade Operacional | 529 m ³ |

Fonte: Autor

O carregamento é operado para ser realizado com o sistema bottom loading, onde a fluxo é realizado na parte de baixo dos compartimentos dos caminhões. Este método possui vantagens operacionais na forma em que a pessoa que esteja realizando o carregamento permaneça no nível do chão, sem ser preciso subir em cima do caminhão, também vantagens de segurança, principalmente nos vapores emanados pelos combustíveis que não são liberados ao ar livre já que a escotilha do caminhão irá permanecer fechada durante todo o processo. Sendo diferente do sistema Top loading em todos aspectos que o carregamento é realizado pela parte superior, representação pela **Figura 4** abaixo.

Figura 4: Carregamento Top Loading e Botton Loading



Fonte: Fabio Pestana (2018)

A plataforma de carregamento é dividida em 8 lajes, que possuem 10 braços direcionados para o fluxo do biodiesel distribuídos entre si. A vazão nominal máxima é controlada por motivos de segurança, representando 12m³/h, no momento que é ligado simultaneamente os 10 braços é relatado a queda de vazão no sistema, resultando em tempos maiores de carregamento. Com intuito de agilizar esse processo para beneficiar o desempenho da operação, uma nova configuração na praça de bombas será definida, a partir de duas novas bombas que fornecerão uma vazão de 60m³/h individualmente, pelo fato de ser necessário no somatório resultar a vazão desejada de 120m³/h para que os 10 braços funcionem simultaneamente.

3.1.1 Header de sucção e Header de descarga

A tubulação que sai do tanque e vai em direção até a bomba é chamada de header de sucção, enquanto o trecho da bomba até a plataforma de carregamento dos caminhões é chamado de header de descarga. A vazão para estes dois trechos é igual a soma das vazões das bombas da linha, de forma a considerar o pior cenário de operação de carregamento, que seria com todos braços em funcionamento simultâneo.

Nos trechos que possuem divisão da tubulação para cada bomba, assim como da tubulação de descarga para cada braço são chamados de derivações da linha. A vazão nas derivações de sucção e de descarga é definida igual à vazão da bomba em si, enquanto a vazão nas derivações da plataforma é considerada igual a vazão do braço de carregamento. Através destas informações foi criada a Tabela 2 abaixo contendo estes valores conforme projeto de expansão da base.

Tabela 2: Vazão em determinados diâmetros

| Trecho | Diâmetro da tubulação [pol] | Vazão [m ³ /h] |
|---|-----------------------------|---------------------------|
| Header de sucção | 8 | 120 |
| Header de descarga | 6 | 120 |
| Derivações de sucção e descarga das bombas | 4 | 60 |
| Derivações de descarga do braço de carregamento | 2 | 12 |

Fonte: Autor

3.2 Etapa 2: Características do escoamento

Para valores mais exatos dos cálculos foi retirado informações específicas do biodiesel da base em seu laboratório, através do método de ensaio IT7.5-011 seguindo a norma NBR 14065/10441 através da profissional química responsável. Os dados são apresentados na tabela 3 em sequência.

Tabela 3: Características do fluido e da tubulação

| | |
|-----------------------------|-------------------------|
| Fluido bombeado | Biodiesel |
| Viscosidade dinâmica | 0,0041 Pa.s |
| Densidade do fluido | 881 kg/m ³ |
| Material da tubulação | Aço carbono |
| Rugosidade absoluta do tubo | 4,56x10 ⁻⁵ m |

Fonte: Autor

3.2.1 Verificação da velocidade de escoamento no sistema

A verificação da velocidade de escoamento no sistema irá permitir avaliar se ela está dentro do limite recomendado para o biodiesel sujeito às novas condições de bombeamento. Para a linha de tubulação do biodiesel temos a recomendação da velocidade de no máximo 2,5 m/s recomendado pela base, em respeito a norma API 2003 RP, referente a geração de energia estática nos tubos durante o escoamento, evitando um futuro risco de ignição na linha de transmissão.

Para estimar a velocidade de escoamento temos:

$$v = \frac{4 \times Q}{3600 \times \pi \times D^2}$$

(14)

D = diâmetro interno da tubulação [m].

3600 = Valor para converter na unidade desejada m/s

v = velocidade de escoamento [m/s];

Q = vazão [m³/h];

Aproveitando será utilizado o Número de Reynolds para determinar o determinar o tipo de escoamento em cada trecho da tubulação, ajudando no cálculo de perda de carga no sistema. Também, o fator de atrito será definido para o escoamento resultante. Os dados são apresentados na Tabela 4 abaixo:

Tabela 4: Características do escoamento

| Diâmetro da tubulação [pol] | Vazão [m ³ /h] | Velocidade de escoamento [m/s] | Número de Reynolds | Fator de atrito |
|-----------------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------|-----------------|
| 8 | 120 | 1,03 | 44.973 | 0,02208904 |
| 6 | 120 | 1,83 | 59.927 | 0,021194483 |
| 4 | 60 | 2,06 | 43.379 | 0,023005596 |
| 2 | 12 | 1,64 | 17.901 | 0,028490819 |

Fonte: Autor

Nota-se que as velocidades não ultrapassam o valor máximo destinado ao produto que

é 2,5m/s como foi citado anteriormente. Sendo assim, o escoamento é definido como aceitável, por não gerar riscos em relação a geração de energia estática nas tubulações, segundo a norma API 2003 RP.

Já que todos valores do número de Reynolds ultrapassaram a referência de 4.000 sabemos que o escoamento está no regime turbulento em todos trechos da tubulação. Os valores do fator de atrito serão reservados para mais adiante serem aplicados nos cálculos de perda de carga.

3.3 Etapa 3: Perda de carga

A perda de carga na tubulação se refere à perda de energia que um fluido sofre em uma tubulação sob pressão, através de vários fatores como o atrito e a turbulência nas mudanças de sentido do fluxo. O método de cálculo usado será pela equação de Darcy-Weisbach:

$$H_s = f \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2 \times g}$$

(15)

hf = perda de carga [m];

f = fator de atrito [adimensional];

L = comprimento da tubulação reta [m];

D = diâmetro interno da tubulação [m];

v = velocidade de escoamento [m/s];

g = aceleração da gravidade [m/s²];

A partir dos dados das tubulações retirados da base foi criado a Tabela 5 abaixo contendo as informações dos trechos retos presentes, que foram organizados em dois grupos, trecho de sucção do tanque para a bomba e de descarga da bomba para o caminhão. Contendo no primeiro grupo o Header de sucção e Derivações de sucção. O segundo grupo possui Header de descarga, Derivações de descarga e Braços de carregamento.

Tabela 5: Comprimento da tubulação

| Grupo | Trecho | Diâmetro da tubulação [pol] | Comprimento do trecho reto (m) |
|-----------------------------------|------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Sucção do tanque para a bomba | Header de sucção | 8 | 72,64 |
| | Derivações de sucção | 4 | 7,8 |
| Descarga da bomba para o caminhão | Header de descarga | 6 | 91,7 |
| | Derivações de descarga | 4 | 9,6 |
| | Braços de carregamento | 2 | 9,8 |

Fonte: Autor

Porém, como a configuração da tubulação não se baseia somente em linha reta perfeita, havendo acessórios em seu trajeto que dificultarão o fluxo do fluido, estes serão destacados na Tabela 6 em sequência.

Tabela 6: Acessórios presentes no sistema

| Acessórios | Trecho do tanque até a bomba | | Trecho da bomba até o carregamento | | |
|-------------------------|------------------------------|-------|------------------------------------|-------|-------|
| | 8 pol | 4 pol | 6 pol | 4 pol | 2 pol |
| Curva 45° | 4 | 3 | 0 | 0 | 3 |
| Curva 90° | 1 | 1 | 5 | 4 | 3 |
| T reto | 0 | 2 | 9 | 0 | 0 |
| T ramal | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Válvula gaveta | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Válvula esfera | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Válvula retenção | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Válvula globo | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Filtro | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Saída | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Entrada | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |

Fonte: Autor

Para o cálculo de perda de carga localizada que se dá pelo fato da existência dos acessórios, foi utilizado dois métodos, método de comprimentos equivalente e método direto.

3.3.1 Método de comprimentos equivalentes

Esse método foi escolhido por se basear na perda de carga nos acessórios em valores de comprimento reto da tubulação. Usando o livro Bombas Industriais dos autores Edson Ezequiel de Mattos e Reinaldo de Falco, os seguintes valores de comprimentos equivalentes em metros de tubulação reta para os acessórios foram apontados na Tabela 7.

Tabela 7: Comprimentos equivalentes em metros sobre os acessórios

| Acessório/Diâmetro da tubulação | 8 pol | 6 pol | 4 pol | 2 pol |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| T reto | 4,27 | 3,05 | 2,13 | 1,07 |
| T ramal | 12,2 | 9,15 | 6,1 | 3,35 |
| Curva 90° | 3,35 | 2,59 | 1,68 | 0,91 |
| Curva 45° | 1,675 | 1,295 | 0,9 | 0,6 |
| Válvula gaveta | 2,74 | 1,98 | 1,37 | 0,69 |
| Válvula esfera | 3,96 | 3,05 | 1,98 | 1,07 |
| Válvula de retenção | 30,49 | 22,87 | 15,24 | 7,62 |
| Válvula globo | 70,12 | 53,35 | 36,59 | 18,29 |
| Entrada | 11,59 | 8,84 | 4,88 | 2,13 |
| Saída | 14,63 | 10,98 | 6,1 | 2,74 |

Fonte: DE MATTOS (1998) adaptado

Uma observação é que a perda de carga nos filtros não é especificada, porem ela será

considerada como 2 metros de forma conservadora, pelo fato dos filtros exigirem manutenção frequente já que os acúmulos de partículas neste acessório são comuns e irregulares.

Será multiplicado os valores da tabela acima pela quantidade de acessórios presentes conforme tabela 6, o resultado será somado com o comprimento de cada trecho da tubulação. Vale destacar que os trechos são importantes devido a diferença de velocidade de escoamento e todo envoltório sobre a mesma, como por exemplo o atrito.

Feito isso, a perda de carga será calculada pela equação de Darcy-Weisbach para cada um dos trechos, resultando nos valores da Tabela 8 abaixo.

Tabela 8: Perda de carga por comprimentos equivalentes

| Grupo | Trecho | Diametro (m) | velocidade de escoamento (m/s) | Fator de atrito | Comprimento total reto (m) | Perda de carga (m) |
|-----------------------------------|------------------------|--------------|--------------------------------|-----------------|----------------------------|--------------------|
| Sucção do tanque para a bomba | Header de sucção | 0,2032 | 1,03 | 0,02208904 | 100,06 | 0,588151329 |
| | Derivações de sucção | 0,1016 | 2,06 | 0,023005596 | 22,69 | 1,11124473 |
| Descarga da bomba para o caminhão | Header de descarga | 0,1524 | 1,83 | 0,021194483 | 143,23 | 3,399969558 |
| | Derivações de descarga | 0,1016 | 2,06 | 0,023005596 | 37,81 | 1,85174805 |
| | Braços de carregamento | 0,0508 | 1,64 | 0,028490819 | 26,45 | 2,033553445 |

Fonte: Autor

Agora agrupando os resultados da sucção do tanque para a bomba e descarga da bomba para o caminhão, mais a adição de 2 metros de perda de carga por filtro em ambos os trechos, foi criado a tabela 9 abaixo com o valor total da perda de carga.

Tabela 9: Perda de carga por comprimentos equivalentes

| Grupo | Perda de carga (m) |
|-----------------------------------|--------------------|
| Sucção do tanque para a bomba | 3,69939606 |
| Descarga da bomba para o caminhão | 9,285271053 |

Fonte: Autor

Com a conclusão do método de comprimentos equivalente temos os valores da perda de carga, em que esses valores serão comparados com os resultados do método direto para a definição da altura manométrica que será considerada para o sistema.

3.3.2 Método direto

O método direto se baseia no cálculo da perda de carga localizada com o uso do coeficiente experimental K, que é tabelado e fornecido pelo fabricante de cada acessório, destacados na tabela 10.

Tabela 10: Valores de K para cada acessório

| Acessórios | Valores de K |
|------------------|--------------|
| Curva 45° | 0,4 |
| Curva 90° | 0,9 |
| T reto | 1,8 |
| T ramal | 0,6 |
| Válvula gaveta | 0,2 |
| Válvula esfera | 5 |
| Válvula retenção | 2,5 |
| Válvula globo | 10 |
| Filtro | 0 |
| Saída | 1 |
| Entrada | 0,5 |

Fonte: DE MATTOS (1998) adaptado

Será multiplicado a quantidade de acessórios pelo seu respectivo K e com isso a equação de Darcy-Weisbach é modificada a fim de termos:

$$h_f = \sum K \times \frac{v^2}{2 \times g}$$

(16)

h_f = perda de carga [m];

K = coeficiente experimental tabelado [adimensional];

v = velocidade de escoamento [m/s];

g = aceleração da gravidade [m/s²].

Os valores após a aplicação dos cálculos se encontram na tabela 11.A:

Tabela 11.A: Perda de carga pelo método direto

| Grupo | Trecho | Diametro (m) | velocidade de escoamento (m/s) | Fator de atrito | Perda de carga (m) | Perda de carga agrupada + filtro (m) |
|----------------------------------|------------------------|--------------|--------------------------------|-----------------|--------------------|--------------------------------------|
| Sucção do tanque para a bomba | Header de sucção | 0,2032 | 1,03 | 0,02208904 | 0,2430316 | 3,589139653 |
| | Derivações de sucção | 0,1016 | 2,06 | 0,023005596 | 1,346108053 | |
| Descarga da bomba para o caminho | Header de descarga | 0,1524 | 1,83 | 0,021194483 | 3,669793578 | 8,691141182 |
| | Derivações de descarga | 0,1016 | 2,06 | 0,023005596 | 1,362623853 | |
| | Braços de carregamento | 0,0508 | 1,64 | 0,028490819 | 1,658723751 | |

Fonte: Autor

Foi escolhido dois métodos para o cálculo da perda de carga na tubulação, afim de comparar os seus valores e identificar a forma mais cautelosa para o dimensionamento das bombas dinâmicas, prezando minimizar o risco de subdimensionar os equipamentos. A partir disso será usado o método de comprimento equivalente pelo fato de oferecer dados mais elevados para a perda de carga no sistema, conforme tabela 11.B abaixo.

Tabela 11.B: Perda de carga pelo método direto

| Grupo | Comprimento equivalente | Método direto | Diferença (m) | Diferença (%) |
|---------------------------------|-------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Sucção do tanque para a bomba | 3,7 | 3,58 | 0,11 | 2,98% |
| Sucção da bomba para o caminhão | 9,28 | 8,69 | 0,59 | 6,39% |

Fonte: Autor

Notamos que a diferença entre os métodos é baixa, mesmo assim, seguiremos com os valores do comprimento equivalente como citado.

Após a aplicação de todos os cálculos e resultados obtidos, é encerrado a etapa 3 do fluxograma responsável por efetuar todas as análises referente a perda de carga na tubulação.

3.4 Etapa 4: Energias totais

Dando abertura a etapa 4 do estudo de caso responsável por computar as energias totais solicitadas pelo sistema, iniciamos com a sequência do cálculo da altura manométrica total, NPSH disponível e pôr fim a potência consumida pela bomba.

O cálculo da altura manométrica total que resulta na energia necessária para que a bomba transfira um fluido até o reservatório desejado. Sendo a diferença entre a linha de sucção e a linha de descarga, tendo as seguintes equações abaixo aplicadas para os trechos:

$$AMT = H_d - H_s \quad (17)$$

$$H_d = \frac{p_d}{\gamma} + Z_d + h_{fd} \quad (18)$$

$$H_s = \frac{p_s}{\gamma} + Z_s - h_{fs} \quad (19)$$

H_d = altura manométrica de descarga [m];

H_s = altura manométrica de sucção [m];

p = pressão [kgf/m²];

γ = densidade do fluido [kgf/m³];

z = altura estática de descarga [m];

h = perda de carga no trecho de descarga [m].

h_f = perda de carga no trecho indicado [m].

No cenário projetado, temos que a altura mínima de produto no tanque de armazenagem da base é zero, identificando o esgotamento do volume. Então, essa altura entre o nível do produto e a praça de bombas é igual a altura entre o fundo do tanque e as bombas. Com isso os dados para esses valores são:

$\gamma = 881,3 \text{ kgf/m}^3$ (densidade do biodiesel);

$z_d = 3$ metros (altura entre a praça de bombas e o nível máximo de líquido no caminhão);

$p_d = 2.000 \text{ kgf/m}^2$ (pressão no bocal de descarga nos caminhões);

$z_s = 5$ metros (altura entre o tanque e a praça de bombas);
 $p_s = 0 \text{ kgf/m}^2$ (a pressão é considerada igual à atmosférica dentro do tanque de armazenagem).

Os resultados após a aplicação do cálculo da altura manométrica total estão descritos na tabela 12 abaixo. Porém será adicionado 10% por questões de segurança.

Tabela 12: Perda de carga pelo método direto

| | |
|---------------------------|----------------|
| Trecho de descarga | 14,55 m |
| Trecho de sucção | 1,30 m |
| AMT | 13,25 m |
| AMT +10% | 14,58 m |

Fonte: Autor

3.4.1 NPSH disponível

Com intuito de verificar a possibilidade de cavitação na bomba verifica-se o NPSH disponível no sistema para depois afronta-lo ao NPSH requerido pela bomba selecionada. Lembrando que o valor do NPSH requerido é fornecido pelo fabricante do equipamento.

Os problemas que a cavitação causa no equipamento são notórias, por esse fator ela deve ser verificada para minimizar o máximo possível, estes problemas se dão pela formação de bolhas de vapor a partir da redução da pressão durante o movimento de suas hélices, prejudicando a performance da bomba até a sua parada crítica. Com isso é necessário verificar a energia disponível no olho do impelidor, através da equação:

$$NPSH_{disponivel} = H_s + \frac{P_{atm} - P_{vapor}}{\gamma} \quad (20)$$

H_s = altura manométrica de sucção [m];

P_{atm} = pressão atmosférica [kgf/m^2];

P_{vapor} = pressão de vapor [kgf/m^2];

γ = densidade do fluido [kgf/m^3].

Substituindo os valores temos como resultado a tabela abaixo 12.A.

Tabela 12.A: NPSH disponível

| |
|------------------------|
| NPSH disponível |
| 13,0 |

Fonte: Autor.

Esse valor será comparado posteriormente ao NPSH requerido por bombas hidráulicas pra guiar a seleção do equipamento.

3.4.2 Potência consumida pela bomba

O cálculo para identificar a potência que a bomba irá consumir, é representada pela potência demandada pelo motor elétrico durante a operação. Dependendo do produto que será trabalhado o valor varia devido a diferença de massa específica fluido. Com estimativas nas etapas iniciais do projeto que estabelecem referências desse parâmetro, precisando ser atendido pela instalação.

Temos como a estimativa para a potência da bomba, a equação:

$$POT = \frac{\rho \times g \times Q \times AMT}{\eta}$$

(21)

Pot = potência [kW];

ρ = massa específica [kg/m³];

g = aceleração da gravidade [m/s²];

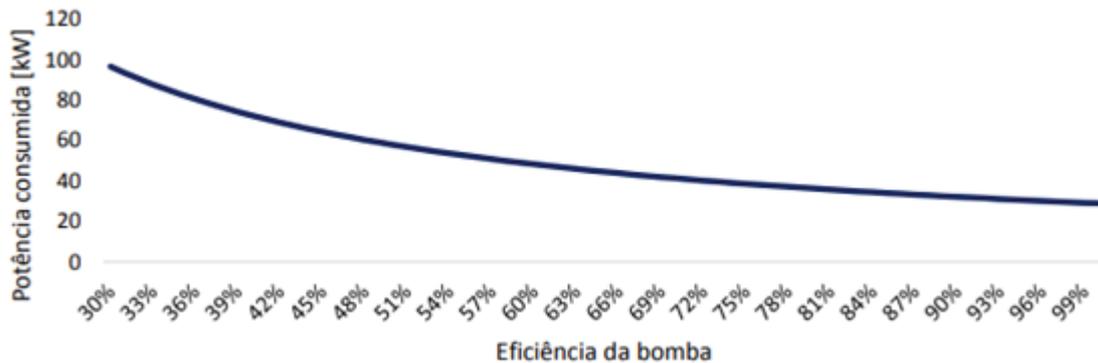
Q = vazão [m³/s];

AMT = altura manométrica total, considerando a folga aplicada [m];

η = eficiência da bomba [%].

Como foi mencionado, a eficiência das bombas interfere diretamente na potência consumida pela mesma. Um esboço de um gráfico a Figura 5, foi projetado abaixo para exemplificar melhor esse parâmetro, com embasamento em referências da literatura e de mercado.

Figura 5 – Eficiência da bomba



Fonte: autor

Como pode ser observado a potência consumida pela bomba tende a aumentar a partir da diminuição da eficiência da bomba. Para estimativas iniciais deste estudo vamos considerar a eficiência da bomba como 75%, valor facilmente alcançado pelos novos equipamentos. Sendo assim:

$$POT = \frac{881,13 \times 9,81 \times 0,0166667 \times 14,58}{0,75} = 2,8 \text{ kW} = 3,8 \text{ CV}$$

O resultado da referência de potência consumida pelo motor elétrico é de aproximadamente 3,8 CV. Porém o valor não é exato, ele depende da seleção da bomba dinâmica, sendo detalhado nas curvas características do equipamento, corrigidas para o fluido que estará em trabalho conforme orientação do fabricante.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Etapa 5: Seleção da bomba centrífuga

Para realizar a movimentação do biodiesel no sistema é necessário que a bomba seja centrífuga com motores elétricos, não sendo possível a utilização de motores com combustão interna, pelo fato do risco de explosão. A partir de todas informações apresentadas foi realizada a pesquisa em catálogos de fabricantes de bombas dinâmicas, tendo como escolha o fabricante KSB, por dois motivos: serem renomeados na linha de bombas centrífugas e todas as bombas presentes na base já serem desse fabricante.

Dentre os equipamentos comercializados na linha de bombas centrífugas temos como destaque a série MEGA, modelo Megachem de 1.750 rpm, produto fabricado especialmente para o setor de óleo de gás, atendendo todas exigências solicitadas pelo sistema. Na **figura 6** abaixo temos a ilustração deste modelo.

Figura 6: Bomba KSB Megachem



Fonte: <http://www.ksb.com.br/> (acessado em 11/2021)

Com um manual extenso contendo todas as informações e características do equipamento em questão, que detalham o tamanho ideal para cada relação entre vazão e altura manométrica, tanto quanto o NPSH requerido pelas bombas, potência, eficiência...

Apresentamos alguns dados dessa linha de produção pela figura 7:

Figura 7: Dados de operação da linha de bombas Megachem KSB

| Dados de Operação | |
|--------------------------|-----------------------------|
| Tamanhos | - DN 32 até 150 |
| Vazões | - até 700 m ³ /h |
| Elevações | - até 140 m |
| Temperaturas | - até 350°C |
| Pressão máxima de sucção | - 10 bar |
| Pressão de operação | - até 24 bar |
| Rotação máxima | - 3.500 rpm |

Fonte: <http://www.ksb.com.br/> (acessado em 11/2021)

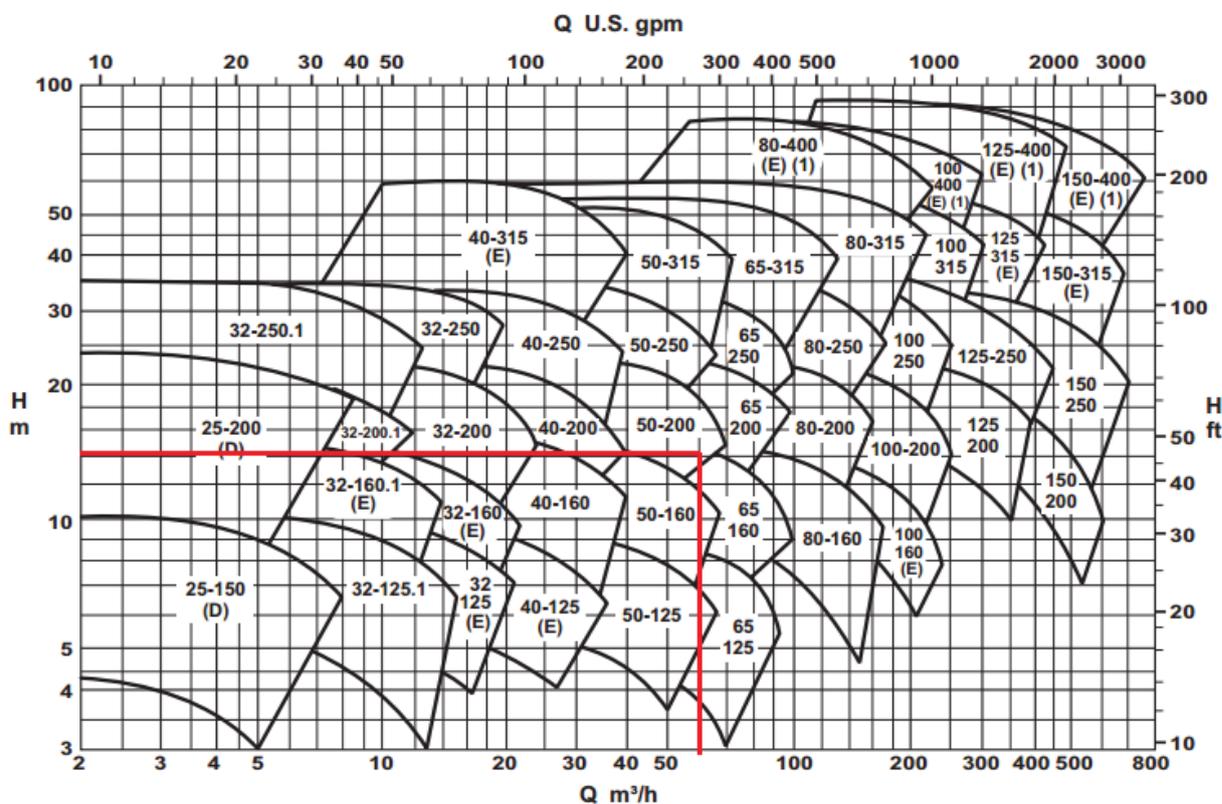
A seleção da bomba acontecerá a partir de dois cenários de simulação, sendo através da diferença do nível de produto no tanque de armazenagem buscando diminuir a altura manométrica total do sistema. Os dois cenários são descritos a seguir.

4.2 Cenário I

No primeiro cenário projetado será considerado que todo o volume do tanque poderá ser utilizado, ou seja, a altura manométrica total do sistema é calculada sem um nível mínimo de produto no tanque, o resultado desse fator é a representação do uso ótimo do volume armazenado, já que a manutenção de um nível mínimo causa um volume ocioso de produto.

Fazendo referência aos dados já apresentados anteriormente, sendo eles a altura manométrica total de 14,58 m e a vazão da bomba solicitada de 60m³/h, valores que ajudaram na seleção da bomba através do ábaco de cobertura do fabricante KSB.

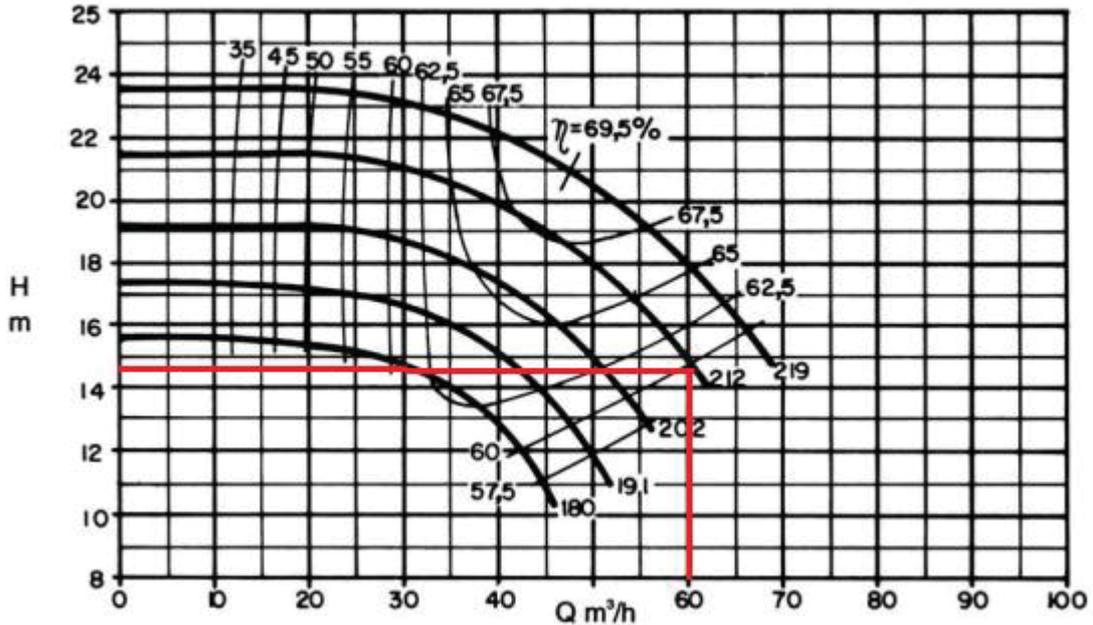
Figura 8: Ábaco para seleção da bomba KSB Megachem 1.750 rpm



Fonte: <http://www.ksb.com.br/> (acessado em 11/2021)

Podemos observar na figura 8 acima que ao cruzar a vazão da bomba desejada com a altura manométrica solicitada pelo sistema teremos a configuração 50-200 do modelo Megachem. Modelo que tem sua curva característica apresentado na figura 9 abaixo, os ajustes para diferentes diâmetros de impelidor.

Figura 9: Curva da bomba Megachem para 50-200 de 1.750 rpm

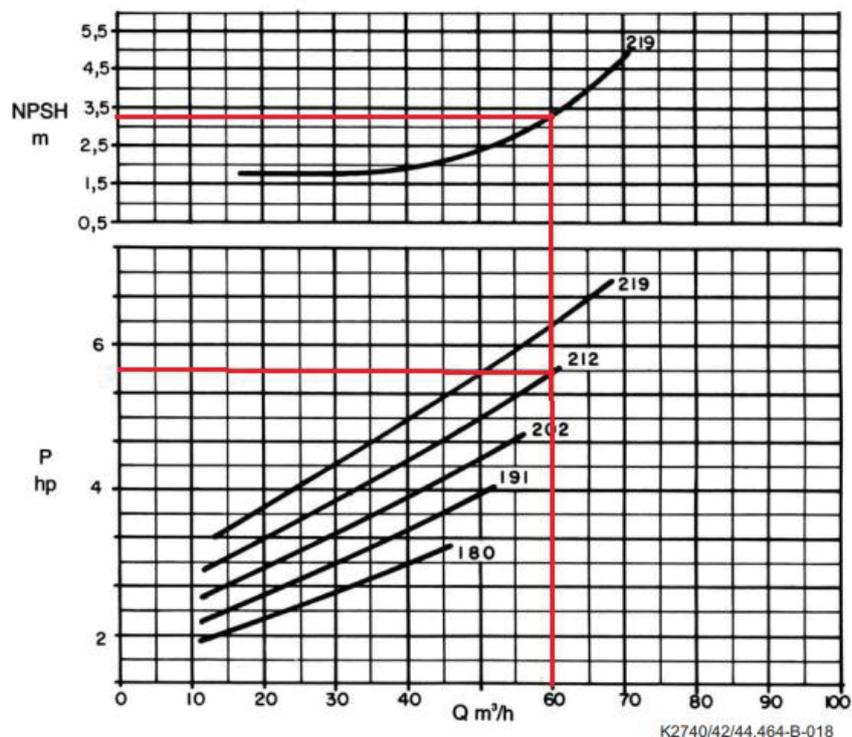


Fonte: <http://www.ksb.com.br/> (acessado em 11/2021)

Através da ligação dos valores da figura 9 temos os dados para a seleção da bomba, iniciando com o diâmetro do impelidor sendo destacado por 212 milímetros. Para essa seleção temos que a eficiência será de aproximadamente 60%.

A próxima curva a ser analisado carrega informações sobre o HPSH requerido mais a potência necessária como função da vazão do produto desejado, pela figura 10.

Figura 10: Curva de NPSH requerido e potência da bomba KSB Megachem 50-200



Fonte: <http://www.ksb.com.br/> (acessado em 11/2021)

Então, temos que para a vazão desejada o valor do NPSH será de 3,2 metros. Porém por recomendações do fabricante de se adicionar 0,5m por motivos de segurança, resultará em 3,7 metros. A análise do risco de cavitação é apresentada na tabela 13.

$$\text{HPSH disponível} > \text{NPSH requerido} + 0,5 \text{ metros}$$

Tabela 13: Valores para HPSH do sistema

| | |
|---------------------------|------|
| HPSH disponível | 13,0 |
| HPSH requerido | 3,7 |
| Risco de cavitação | Não |

Fonte: Autor

Temos que a potência indicada para o impelidor selecionado é de 5,6 CV, conforme a figura 12 acima. Já que o biodiesel é menos denso que a água a potência da bomba deverá ser ajustada de acordo com a orientação do fabricante, que prescreve multiplicar a potência encontrada no gráfico pela densidade relativa do fluido bombeado. Sendo este 0,88 g/cm³.

$$5,6 * 0,88 = 4,92 \sim 5,00 \text{ CV}$$

Após encerrar o ajuste de potência, temos como completo a seleção da bomba centrífuga para o primeiro cenário simulado. Na tabela 14 abaixo estão as informações do equipamento em si, já ajustadas para realizar o bombeio de biodiesel sem a restrição de uso do volume disponível no tanque de armazenagem.

Tabela 14: Bomba selecionada

| | |
|------------------------------|----------------------|
| Fabricante | KSB |
| Série | Mega |
| Modelo | Megachem |
| Tamanho | 50-200 |
| Rotação | 1750 rpm |
| Vazão | 60 m ³ /h |
| Diâmetro do impelidor | 212 mm |
| Eficiência | 60 % |
| Potência já ajustada | 5,00 CV |

Fonte: Autor

4.3 Cenário II

A estratégia do segundo cenário é diminuir o tamanho da bomba e a potência consumida pelo equipamento, para isso temos a sugestão de um nível mínimo de operação no tanque, que irá alternar a altura manométrica total do sistema ao diminuir a perda de carga na sucção da bomba sem influenciar a perda de carga na descarga.

A partir disso foi criado a tabela 15 abaixo com os valores da perda de carga, altura manométrica total e NPSH disponível, para cada 1 metro do tanque tendo como limite 6 metros, sendo a metade da altura máxima de operação suportada pelo tanque. Supondo que a base mantenha seu estoque alto, não deixando diminuir dos 6 metros.

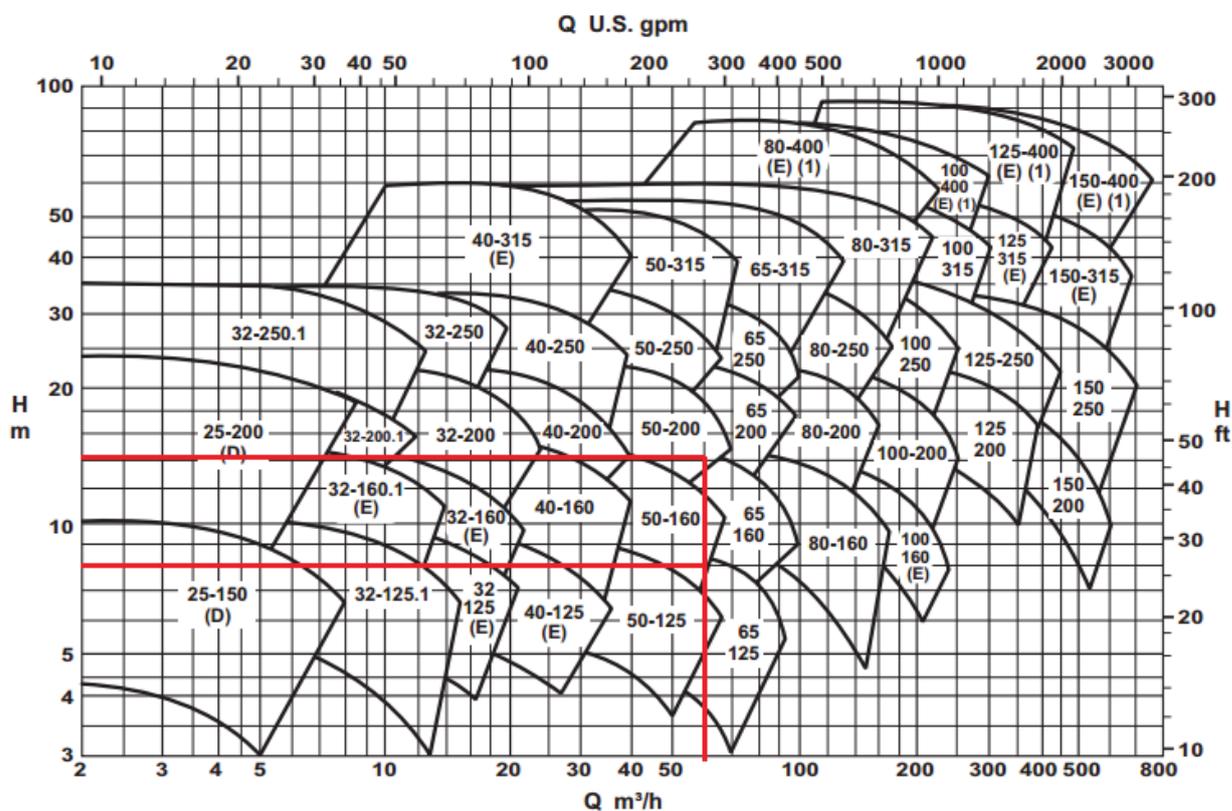
Tabela 15: Valores para a simulação com nível mínimo do produto no tanque

| Altura de líquido no tanque(m) | Perda de carga na sucção (m) | Perda de carga na descarga (m) | AMT + 10% | NPSH disponível |
|--------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-----------|-----------------|
| 0 | 1,3 | 14,55 | 14,58 | 13,01 |
| 1 | 2,3 | 14,55 | 13,48 | 14,01 |
| 2 | 3,3 | 14,55 | 12,38 | 15,01 |
| 3 | 4,3 | 14,55 | 11,28 | 16,01 |
| 4 | 5,3 | 14,55 | 10,18 | 17,01 |
| 5 | 6,3 | 14,55 | 9,08 | 18,01 |
| 6 | 7,3 | 14,55 | 7,98 | 19,01 |

Fonte: Autor

Dando seqüência a figura 11 abaixo mostra os diferentes tamanhos de bombas possíveis.

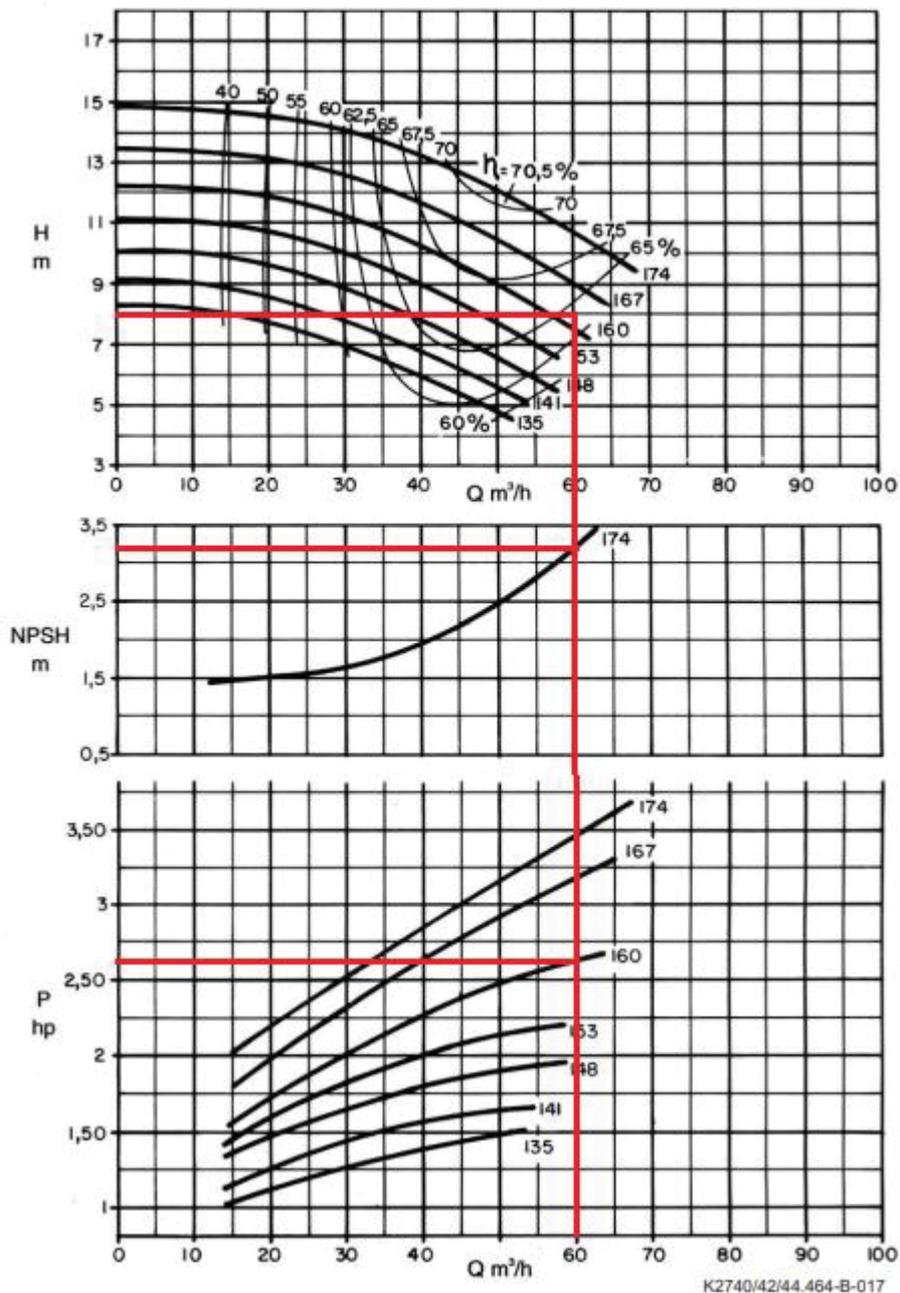
Figura 11: Ábaco para seleção da bomba KSB Megachem 1.750 rpm



Fonte: <http://www.ksb.com.br/> (acessado em 11/2021)

Após o cruzamento dos dados de 60 m³/h e a altura manométrica de 7,98m no abaco de 1.750 rpm, temos o modelo KSB 50-160 para o nível médio de produto em tanque.

Figura 12: Curva de NPSH requerido e potência da bomba KSB Megachem 50-160



Fonte:

A partir do gráfico da Figura 12 temos que o tamanho do impelidor é de 160mm com uma estimativa de 65% de eficiência. O NPSH requerido é de 3,2m tendo mais os 0,5m de somatório recomendados pelo fabricante, resultando em 3,7m.

Para analisar o risco de cavitação o NPSH disponível (19,01) deve ser maior que o NPSH requerido (3,7), afirmando essa diferença se conclui o não risco de cavitação.

A potência indicada pelo gráfico para o impelidor é de aproximadamente 2,62 CV, porém como o fluido bombeado é menos denso que a água, o fabricante recomenda-se multiplicar a potência pela densidade do produto (0,88). Resultando em 2,3 CV e arredondando 3 CV.

Na tabela 16 abaixo temos a bomba selecionado:

Tabela 16: Bomba selecionada no segundo cenário

| | |
|------------------------------|----------------------|
| Fabricante | KSB |
| Série | Mega |
| Modelo | Megachem |
| Tamanho | 50-160 |
| Rotação | 1750 rpm |
| Vazão | 60 m ³ /h |
| Diâmetro do impelidor | 160 mm |
| Eficiência | 65% |
| Potência já ajustada | 3,00 CV |

Fonte: Autor

Após a análise de uma operação com um nível mínimo de produto sendo a metade da altura do tanque, para o bombeio do biodiesel, a bomba selecionada conta com suas informações acima.

5. CONCLUSÕES

A partir dos conceitos e cálculos apresentados neste projeto foi possível dimensionar a nova bomba dinâmica nas restrições operacionais de dois cenários de simulação, os fundamentos sobre a conclusão da seleção da bomba serão descritos a seguir.

Para o bombeamento do biodiesel com início no tanque e destino no reservatório do caminhão, contou com dois cenários, nos ambos foi possível permanecer com a configuração atual da base de distribuição de combustível e o aumento da vazão, a principal diferença foi a limitação de um nível mínimo do produto no tanque.

Caso a opção seja permitir o início da operação sem definir uma altura mínima de líquido no tanque, diminuindo a possibilidade de se complicar futuramente, deve-se optar pela bomba KSB modelo 50-200, tendo o diâmetro do impelidor de 212 milímetros e potência 5 CV, não tendo risco de cavitação.

Dependendo da logística da base que pode trabalhar operacionalmente com um nível mínimo de produto no tanque, mantendo sempre seus estoques cheios, temos outros modelos de bomba que poderiam ser selecionados, em especial caso a opção seja manter o nível para 6 metros, sendo ele a metade da altura do tanque, a seleção passa a ser à bomba KSB modelo 50-160. Com o diâmetro do impelidor de 160 milímetros e potência 3 CV, tendo economia de energia de aproximadamente 40%.

Porém prevalecerá a opção que tem melhor performance de operação, que nutrirá a demanda quando for preciso de todo volume de biodiesel disponível no tanque, através da bomba modelo KSB 50-200. Com isso, os impactos da falta de produto não irão danificar esse tipo de processo por não haver volume ocioso.

As recomendações para que a instalação da nova bomba fique dentro opções solicitadas pela base, que é não suspender a operação, terá como procedimento interromper o funcionamento de uma derivação na praça de bombas de modo a isolar um único equipamento, removendo ele e instalando o novo equipamento. Durante essa substituição será possível manter a operação com um nível desacelerado de bombeio do fluido. Após as trocas estiverem completas já é possível iniciar a operação e, se necessário, de todos braços de carregamento com um total de 120 m³/h distribuídos entre si.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARENHARDT, Celso. **Definição da velocidade ótima para bombas de fluxo em sistemas de abastecimento**. São Leopoldo, 2008, 83 p. Trabalho de Conclusão de Curso Engenharia Mecânica – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo.

CARVALHO, Luiz Fernando Fiatte. **Física Aplicada**. 1ºed. Curitiba: UnicenP, 2002.

DE MATTOS, E.E., DE FALCO, R., **Bombas Industriais**, 2ª Ed., Rio de Janeiro, Editora Interciência, 1998.

FOX, R.W., PRITCHARD, P.J., MCDONALD, A.T., **Introdução à Mecânica dos Fluidos**, 6ª edição, Rio de Janeiro, LTC Editora, 2006.

HENN, Érico Antônio Lopes. **Máquinas de fluido**. 2.ed. Santa Maria, RS: Editora da UFSM, 2006. 474 p.

MACINTYRE, Archibald Joseph. **Bombas e instalações de bombeamento**. 2.ed. rev. Rio de Janeiro: LTC, 1997. 782 p.

MISQUIATI, Daniel Lopes. **Análise das condições operacionais de bombas hidráulicas de fluxo radial de grande porte**. São Paulo, 2005. 86f. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) Universidade de São Paulo, 2005.

OLIVEIRA, Yuri Lemos Pinto. **Simuladores para cálculo do fator de atrito para fluidos lei de potência em dutos circulares e anulares**. Rio de Janeiro. 2016. 73f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

PESTANA, Fabio Alberto Chung Campos. **Análise de perigos e pontos críticos de controle na indústria de combustíveis**. São Francisco, 2018, 121 f. Trabalho de conclusão de curso Engenharia Química, Universidade de São Francisco. 2018.

RESEARCHGATE. Disponível em: <https://www.researchgate.net/>. Acesso em 31 maio 2021.

RODRIGUES, Luiz Eduardo Miranda Junior. **Mecânica dos Fluidos**. 1ºed. São Paulo: MSc livros, 2005.

SCHMIDLIN, Junior. **Operação do conjunto bomba centrífuga, motor de indução trifásico e conversor de frequência visando a eficiência no uso de energia elétrica**. Fortaleza, 2006. 139f. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

SOUZA, Pedro Henrique A. I. **Apresentação dos cálculos para seleção de bomba para sistema de reaproveitamento de água de poços artesianos**. Rio de Janeiro, 2014. 76f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

STUCKENBRUCK, Sidney. **Escoamento de líquidos e gases em tubos**. Porto Alegre: Olympus, 2012

VILANOVA, Luciano Caldeira. **Mecânica dos Fluidos**. 1º ed. Santa Maria: e-Tec Brasil, 2011.

**TERMO DE ENTREGA ARTIGO TÉCNICO MEC041 – TRABALHO
FINAL DE GRADUAÇÃO II**

**TÍTULO DO TRABALHO: SELEÇÃO DE BOMBA PARA TUBULAÇÃO
EM UMA DISTRIBUIDORA DE COMBUSTÍVEIS, APLICADO
DIRETAMENTE NO BIODIESEL**

ALUNO: DYOGO TEYLOR PEREIRA

PROFESSOR ORIENTADOR: AURO CÂNDIDO MARCOLAN

ÁREA: MECÂNICA DOS FLUÍDOS

Após a revisão do trabalho, com respeito a estrutura e os conteúdos desenvolvidos, informo que o trabalho está apto a ser submetido à banca examinadora para avaliação.

Data: 25 / 11 / 2021



Professor Orientador