

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Bruno Satriani Brito
Pedro Nogueira Faulhaber**

**DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE TUBULAÇÃO PARA TRANSPORTE DE
BIODIESEL EM TERMINAL DE COMBUSTÍVEIS**

PROJETO FINAL

**RIO DE JANEIRO
2025**

**BRUNO SATRIANI BRITO
PEDRO NOGUEIRA FAULHABER**

**DIMENSIONAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE TUBULAÇÃO PARA TRANSPORTE DE
BIODIESEL EM TERMINAL DE COMBUSTÍVEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, da coordenação de Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Prof. Dr. Jonatas Motta Quirino

**RIO DE JANEIRO
2025**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

B862 Brito, Bruno Satriani
Dimensionamento e otimização de tubulação para transporte de biodiesel em terminal de combustíveis / Bruno Satriani Brito [e] Pedro Nogueira Faulhaber – 2025.
87f.: il. color. , enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2025.
Bibliografia: f. 84-87.
Orientador: Jonatas Motta Quirino.

1. Engenharia mecânica. 2. Tubulação. 3. Tubos – Projetos e construção. I. Faulhaber, Pedro Nogueira. II. Quirino, Jonatas Motta (Orient.). III. Título.

CDD 620.1

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes – CRB/7 nº 5281

RESUMO

BRITO, Bruno Satriani; FAULHABER, Pedro Nogueira. **Dimensionamento e Otimização de tubulação para transporte de Biodiesel em terminal de combustíveis**. 2025. 88 folhas. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Rio de Janeiro, 2025.

O escoamento de combustíveis por meio de tubulações devidamente dimensionadas e com base de cálculos bem robusta, conforme as normas técnicas aplicáveis, é essencial para garantir um funcionamento seguro, eficiente e durável, além de influenciar diretamente nos custos operacionais. Diante disso, este trabalho tem como objetivo analisar as perdas de carga trecho a trecho, através da utilização de fórmulas imprescindíveis para análise de fluídos e interpretando possíveis alterações com simulações de trechos do sistema de tubulação do terminal de combustíveis de São Luís – MA, onde o biodiesel é transportado da plataforma de descarga de caminhões-tanque até um reservatório com capacidade de 6.931 m³. A proposta visa otimizar o sistema, por meio da avaliação hidráulica e da proposição de melhorias que assegurem a integridade operacional, eficiência energética, facilidade de manutenção e viabilidade econômica do projeto de ampliação da linha de escoamento.

Palavras-chave: Biodiesel. Escoamento. Tubulação. Normas técnicas. Combustíveis.

ABSTRACT

FAULHABER, Pedro Nogueira; Brito, Bruno Satriani. **Sizing and optimization of piping for transporting Biodiesel in a fuel terminal**. 2025. 88 pages. Final Course Work – Celso Suckow da Fonseca Federal Center for Technological Education. Rio de Janeiro, 2025.

Fuel flow through properly sized pipelines, based on robust calculations and in accordance with applicable technical standards, is essential to ensure safe, efficient, and long-lasting operation, as well as to directly influence operating costs. This study aims to analyze head losses in each section of the system using fundamental fluid dynamics equations, and to evaluate potential improvements through simulations of pipeline segments at the fuel terminal in São Luís, Maranhão, where biodiesel is transported from the tanker truck unloading platform to a 6,931 m³ storage tank. The objective is to optimize the system by conducting a hydraulic assessment and proposing improvements that enhance operational integrity, energy efficiency, maintenance accessibility, and the overall economic viability of the pipeline expansion project.

Keywords: Biodiesel. Flow. Pipe. Technical standards. Fuels.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Imagem aérea do terreno onde será instalada a tubulação de aço carbono.....	13
Figura 2 – Caminhão-tanque estilo bitrem.....	16
Figura 3 – Fluxograma com esquemática do sistema da tubulação.....	19
Figura 4 – Vista superior do trecho de sucção da bomba.....	20
Figura 5 – Vista frontal do início do recalque.....	21
Figura 6 – Vista superior da continuação do recalque.....	22
Figura 7 – Vista do trecho tracejado da figura 6.....	23
Figura 8 – Vista superior da linha de 8 polegadas acima da estrutura metálica.....	24
Figura 9 – Vista lateral do trecho que chega ao reservatório.....	24
Figura 10 - Isométrica de montagem da tubulação.....	25
Figura 11 – Vista frontal do sistema de tubulação de biodiesel.....	28
Figura 12 – Tanque reservatório 2D.....	34
Figura 13 - Componentes de projeto de válvula de retenção 8" (pol.).....	39
Figura 14 - Corpo da válvula de retenção 8" (pol.).....	40
Figura 15 - Montagem de válvula gaveta 1 – 8" (pol.).....	42
Figura 16 - Corpo da válvula gaveta 1 de 8" (pol.).....	42
Figura 17 - Componentes de projeto de válvula gaveta 2 de 8" (pol.).....	43
Figura 18 - Montagem da válvula esfera de 6" (pol.) classe 150.....	45
Figura 19 - Solda de topo em ligação flangeada entre tubulações.....	47
Figura 20 – Ligação flangeada entre tubulações.....	47
Figura 21 - Esquemática de transição 2D de flanges e tubulações (4, 6 e 8 polegadas).....	49
Figura 22 - Medidor de vazão.....	50
Figura 23 – Ponto de operação da bomba.....	62
Figura 24 - Curva de rendimento e NPSH do modelo ME 3 100 da WD PUMPS.....	64
Figura 25 – Vistas da Bomba.....	65
Figura 26 - Tela de definição de propriedades dentro do fluid simulation Solidworks.....	67

Figura 27 - Rugosidade interna da tubulação selecionada para simulação (aço AISI 304).....	67
Figura 28 - Níveis de pressão do trecho 2 até reservatório.....	68
Figura 29 - Níveis de velocidade em relação eixo “X” em curvas presentes do trecho 2 até reservatório.....	68
Figura 30 - Níveis de velocidade em relação eixo “X” em curvas presentes o trecho 2 ao 5.....	69
Figura 31 - Comportamento de velocidade do fluido nas curvas do trecho 2 ao 5....	70
Figura 32 - Comportamento da velocidade no trecho final do sistema.....	71
Figura 33 - Corte de superfície com passe na pressão do sistema.....	71
Figura 34 - Superfície com base na pressão nas válvulas.....	72
Figura 35 - Refinamento de malha das válvulas com base na pressão.....	72
Figura 36 - Comportamento da pressão no trecho final do sistema.....	73
Figura 37 – Gráfico comparando perda de carga dos trechos com e sem válvulas.....	75
Figura 38 - Custo total inicial de acessórios por trechos	77
Figura 39 - Custo total de acessórios após retirada de duas válvulas por trechos.....	77
Figura 40 - Curva característica do sistema e da bomba com retirada de duas válvulas.....	78
Figura 41 - Perda de carga distribuída com relação a alteração de materiais da tubulação.....	78
Figura 42 - Análise econômica referente ao sistema de tubulação de aço inox 304.....	80
Figura 43 - Análise econômica referente ao sistema de tubulação de aço A53 com revestimento.....	81
Figura 44 - Curva característica do sistema e da bomba com A53.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades do Biodiesel	18
Tabela 2 – Propriedades físicas e químicas do aço AISI 304.....	29
Tabela 3 - Tabela de dimensões de tubulação para distribuição de Biodiesel em milímetros	31
Tabela 4 - Tabela de dimensões de tubulação para distribuição de Biodiesel em polegadas.....	31
Tabela 5 - Válvulas de bloqueio segundo pressão e temperatura.....	37
Tabela 6 - Válvulas de regulação segundo pressão e temperatura.....	37
Tabela 7 - Tipos de ligações diante dos diâmetros de tubulação.....	48
Tabela 8 - Dados para o cálculo de perda de carga localizada por trecho	58
Tabela 9 - Valores do coeficiente C em $m^{-5}.s^2$	60
Tabela 10 - Dados para o cálculo do fator de atrito utilizando o método de Churchill.....	60
Tabela 11 - Resultado dos valores de perda de carga distribuída por trecho.....	61
Tabela 12 - Dados para obtenção da curva do sistema.....	61
Tabela 13 - Dados para obtenção da curva da bomba.....	62
Tabela 14 - Modelo ME 3 da WDM PUMPS de acordo com diferentes alturas manométricas (m) e vazões (m ³ /h)	64
Tabela 15 - Relação de valores de acessórios por diâmetro.....	76
Tabela 16 - Custo de tubulações por metro.....	80

LISTA DE SIGLAS

ABNT Associação Brasileira das Normas Técnicas

NBR Norma Brasileira

v velocidade média do fluido (m/s)

Re Número de Reynolds

ϵ/D Rugosidade relativa

f fator de atrito de Darcy - Weisbach

d Densidade relativa

μ Viscosidade

P Pressão do fluido

G Aceleração da gravidade

H Altura do fluido em relação a um ponto de referência

I W Perda de massa após tempo de exposição

ρ Massa específica / densidade do aço

A Área exposta da amostra

t Tempo de exposição

K Constante

D Diâmetro Interno da Tubulação

L Comprimento do Trecho da Tubulação

Y Peso específico do fluido

V Velocidades do escoamento

H Cotas acima de um certo plano de referência

J Perda de carga total

g Aceleração da gravidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRANSPORTE DO BIODIESEL EM TERMINAL DE COMBUSTÍVEL.....	11
1.2 RELEVÂNCIA DO DIMENSIONAMENTO E SELEÇÃO DOS MATERIAIS.....	14
1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO	14
2 PROJETO DE TUBULAÇÃO	16
2.1 PREMISSAS DO PROJETO	16
2.2 FLUIDO	17
2.3 FLUXOGRAMA	18
2.4 PROJETO DE TUBULAÇÃO.....	19
2.5 SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA TUBULAÇÃO.....	28
2.6 DIMENSIONAMENTO DA TUBULAÇÃO	30
2.7 TANQUE RESERVATÓRIO	33
3 PROJETO DE VÁLVULAS E LIGAÇÕES	35
3.1 VÁLVULAS.....	35
3.1.1 Válvula de Retenção	38
3.1.2 Válvula Gaveta	40
3.1.3 Válvula Esfera	43
3.2 LIGAÇÕES SOLDADAS.....	45
3.3 LIGAÇÕES FLANGEADAS	46
3.4 MEDIDOR DE VAZÃO	50
4 TEORIA DE ESCOAMENTO E PERDA DE CARGA	51
4.1 CÁLCULO DE VELOCIDADE EM TUBULAÇÕES.....	51
4.2 EQUAÇÃO DE BERNOULLI.....	52
4.3 NÚMERO DE REYNOLDS	52
4.4 PERDA DE CARGA LOCALIZADA	53
4.5 PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA.....	54
5 RESULTADOS	56
5.1 VELOCIDADE.....	56
5.2 NÚMERO DE REYNOLDS	57
5.3 PERDA DE CARGA LOCALIZADA	58
5.4 PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA.....	60
5.5 BOMBA	61
6 DISCUSSÃO	66
6.1 SIMULAÇÃO	66
6.2 ANÁLISE DO TRECHO 2 ATÉ TRECHO 5.....	67
6.3 COMPORTAMENTO DAS CURVAS DO TRECHO 2 AO 5	69
6.4 COMPORTAMENTO DAS VELOCIDADES E PRESSÕES NO TRECHO FINAL (TRÊS VÁLVULAS).....	70
6.5 OTIMIZAÇÕES.....	74
6.5.1 Análise De Perda De Carga E Econômica Por Acessórios	74
6.5.2 Análise De Perda De Carga E Econômica Por Materiais	78
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
8 TRABALHOS FUTUROS.....	84
BIBLIOGRAFIA.....	85

1 INTRODUÇÃO

Este projeto contemplará a implantação de uma linha de tubulação para escoamento de biodiesel em terminal já existente, considerando limitações operacionais e estruturais do local. Serão observadas as normas para tubulações industriais, para equipamentos e acessórios e respectivas diretrizes. O projeto visa garantir segurança, compatibilidade hidráulica e conformidade técnica com os requisitos de transporte de biocombustíveis.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE BIODIESEL EM TERMINAL DE COMBUSTÍVEL

A presença de sistemas de tubulação é fundamental no setor industrial. A maior parte das plantas industriais contam com redes de tubulações com diferentes níveis de importância, sendo que, em grande parte dos casos, essas redes são indispensáveis para o funcionamento eficiente das operações. O que se torna ainda mais evidente nas chamadas indústrias de processo, responsáveis pelo transporte de fluidos entre equipamentos, unidades de processo e áreas de estocagem. — como vasos de pressão, tanques, reatores, bombas e trocadores de calor —, permitindo a circulação dos fluidos de processo e de utilidades. Nessas instalações, os sistemas de tubulação representam, em média, de 20% a 25% do custo total da planta industrial, enquanto sua montagem pode corresponder a cerca de 45% a 50% do custo total de instalação dos equipamentos, e o projeto da tubulação pode atingir até 20% do valor total do projeto da unidade (Silva Telles, 2012).

Segundo Silva Telles (2012), tubulações externas são aquelas instaladas fora das áreas de processo, compreendendo, por exemplo, as linhas localizadas em áreas de armazenagem de fluidos e as tubulações de interligação entre unidades de processo e sistemas de armazenamento. Essas redes, embora muitas vezes externas à área fabril principal, são fundamentais para garantir o funcionamento eficiente e seguro da planta industrial, principalmente em sistemas que envolvem carga e descarga de caminhões, além do armazenamento em tanques estacionários.

O desenvolvimento de um projeto de tubulação em um terminal de biodiesel

já em operação exige, inicialmente, uma análise criteriosa do espaço geográfico disponível, considerando as limitações físicas da infraestrutura existente, interferências com outras instalações e rotas operacionais de escoamento. Essa etapa é essencial para garantir a viabilidade da implementação sem comprometer a segurança e a funcionalidade do terminal. A elaboração do projeto deve seguir normas técnicas específicas, como a ASME B31.3, que trata do projeto de tubulações industriais, e diretrizes da Agência Nacional do Petróleo (ANP), além das normas brasileiras da ABNT aplicáveis à seleção de materiais, conexões e dispositivos de segurança.

Um dos principais desafios está na integração do novo sistema com as linhas operacionais já em funcionamento, exigindo planejamento para paradas técnicas, análises de risco (APR), e validação das condições hidráulicas para garantir compatibilidade com bombas, válvulas e reservatórios. A escolha adequada de válvulas, geometrias de curva, pontos de apoio e instrumentos de controle deve considerar tanto a resistência à corrosão provocada pelo biodiesel quanto a manutenção da qualidade do fluido, evitando contaminações ou perdas de carga garantir um sistema eficiente, seguro e compatível com as exigências operacionais e ambientais.

Alternativas energéticas são imprescindíveis e é nesse sentido que surge o biodiesel, se tratando de um combustível produzido através de fontes biológicas renováveis. Se trata de combustível renovável, biodegradável e ambientalmente correto, tendo sua composição formada por derivados de qualquer triglicerídeo, ésteres de ácidos graxos de cadeia longa e um álcool de baixo peso molecular (PARENTE, 2003).

Segundo o Ministério de Minas e energia, através da resenha energética brasileira 2024, que se refere a dados do ano de 2023, um dos principais tópicos a possuir destaque é do novo aumento da participação de fontes renováveis na matriz energética, alcançando 49,1%. A média global no ano de 2022 foi de 14%, segundo dados da agência internacional de energia. (BRASIL, 2024).



Figura 1 - Imagem aérea do terreno onde será instalada a tubulação de aço carbono
Fonte: Google Earth

Com base na imagem geográfica obtida por meio do Google Earth (GOOGLE EARTH, 2025), foi traçado o percurso da nova tubulação que conectará a área de descarga de caminhões na plataforma, que se trata do ponto de partida, ao novo reservatório de biodiesel em construção. A tubulação tem o objetivo de conduzir o biodiesel descarregado até o tanque destacado na imagem, localizado em uma nova bacia do Terminal de São Luís. Esse novo reservatório tem papel fundamental na otimização da logística de distribuição do biocombustível, ampliando a capacidade de armazenamento do terminal. O trajeto da tubulação foi definido buscando o melhor aproveitamento do espaço disponível, com foco em eficiência operacional e rendimento hidráulico no escoamento do produto.

A escala da sua imagem do Google Earth é aproximadamente:

$$Escala = \frac{Tamanho\ real}{Tamanho\ imagem} = \frac{10.000\ cm}{3\ cm} = 1:3.33$$

Ou seja, 1 cm na tela representa 33,33 metros na realidade.

1.2 RELEVÂNCIA DO DIMENSIONAMENTO E SELEÇÃO DOS MATERIAIS

O escoamento desse fluido em tubulações é influenciado por propriedades fluido mecânicas, como a viscosidade, densidade e compressibilidade e impactam seu transporte. Alguns aspectos precisam ser estudados a fundo a fim de entender seu comportamento para diferentes variáveis dentro do processo, como a viscosidade/resistência ao escoamento, rugosidade da parede interna, perda de carga, o número de Reynolds, temperatura, compatibilidade com materiais de tubulações, sedimentação e formação de resíduos, além de bombas/equipamentos de transporte.

A compreensão do escoamento transiente em tubulações é extremamente relevante dentro da engenharia. Quando ocorrem mudanças súbitas de velocidade no fluxo em um duto, uma onda de pressão é gerada, propagando-se à velocidade do som. Esse fenômeno, conhecido como golpe de aríete, pode ser causado por fatores como parada de bombas, fechamento de válvulas e vazamentos. Durante o transiente hidráulico, se a pressão cair até o ponto de vapor do líquido, o escoamento muda de monofásico (apenas líquido) para bifásico (líquido-gás), com o surgimento de bolhas. Esse fenômeno é chamado cavitação de vapor. A formação e o colapso dessas bolhas no líquido podem gerar ondas de pressão de amplitude ainda maior que as causadas pelo golpe de aríete. Esse fenômeno pode desencadear uma série de problemas estruturais e operacionais, como: carregamento assimétrico, vibração, ruído e em muitos casos danos irreparáveis a tubulação. (DIAS et al., 2022)

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

O presente trabalho tem como objetivo projetar uma nova linha de tubulação com seus respectivos acessórios com o intuito de viabilizar a ampliação de um terminal já existente destinado ao armazenamento e manuseio de biodiesel desde caminhão tanque até reservatório de 6.931 m³ de volume. Atualmente, o terminal opera com oito reservatórios e uma plataforma integrada em pleno funcionamento. Com o crescimento da demanda e a necessidade de otimização da capacidade operacional, faz-se necessária a inclusão de um nono reservatório ao sistema. Para

isso, será desenvolvido o projeto da tubulação de interligação, considerando aspectos como seleção de materiais, dimensionamento hidráulico, dispositivos de controle e segurança, e compatibilidade com a infraestrutura existente.

Portanto, através desta otimização em sistema já existente de biodiesel, projeto será desenvolvido como análise de parâmetros como velocidade, pressão e temperatura, além da curva de operação e do sistema da bomba selecionada. As mudanças serão respaldadas por fundamento teórico e através de cálculos, além de ser gerado simulação de fluídos em Solidworks para melhor visualização do escoamento e da influência dos parâmetros. A simulação será realizada com base e

um trecho selecionado da tubulação para que possamos evidenciar os detalhes do escoamento e com isso gerar gráficos de pressão e temperatura, observando com uma maior precisão nosso projeto na prática.

Com isso, no final do trabalho será entregue relatório técnico com lista de materiais e acessórios, selecionados com base em norma específica, além de cálculos elaborados, desenhos mecânicos de válvulas elaboradas e inseridas em sistema e simulação de fluidos.

2. PROJETO DE TUBULAÇÃO

Neste capítulo, o foco está na demonstração sobre a escolha do caminho, buscando a melhor opção para os cálculos elaborados. Nós não estivemos presencialmente no terminal para estudo das condições de montagem da tubulação. Desta forma, foi-se respeitado o trajeto original do projeto.

2.1 PREMISSAS DO PROJETO

Para o seguimento do projeto, importantes detalhes devem ser apresentados para atender às necessidades do terminal para o novo armazenamento de biodiesel.

O terminal de São Luís diariamente recebe diversos caminhões para descarregamento de produtos, e com a nova linha de biodiesel a ser projetada, esta previsão é que mantenha uma grande quantidade de caminhões-tanque para descarregar biodiesel no terminal. Desta forma, o modelo médio de caminhão-tanque considerado para cálculos é o bitrem. A figura 2 ilustra um modelo de bitrem.



Figura 2 - Caminhão-tanque estilo bitrem
Fonte: Magma Transportes

O modelo bitrem possui um volume máximo de 36.000 litros (36 m³) de armazenamento, e para que haja uma maior quantidade de caminhões-tanque descarregados durante o dia, o terminal define que o caminhão fique por volta de 30 minutos descarregando biodiesel na plataforma.

$$Q = \frac{36}{0,5} = 72 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q = \frac{36000}{1800} = 20 \text{ l/s}$$

Com esta informação, é possível determinar a vazão média necessária para que satisfaça a demanda necessária pelo terminal. Este valor será importante para o cálculo da bomba que irá satisfazer ao sistema, a ser calculada no final deste artigo.

2.2 FLUIDO

Embora seja tecnicamente possível que todos os líquidos, incluindo o biodiesel, apresentem alguma compressibilidade a pressões muito altas (como em condições extremas), para a maioria das aplicações práticas, o biodiesel pode ser tratado como incompressível, assim como outros líquidos. O biodiesel é um fluido incompressível em condições normais de temperatura e pressão, como ocorre com a maioria dos líquidos. Isso significa que a variação de volume do biodiesel sob a aplicação de pressões típicas é muito pequena, de modo que ele não sofre alterações significativas em seu volume quando exposto a pressões moderadas.

A viscosidade é uma das propriedades mais importantes para o escoamento do biodiesel. Ela mede a resistência interna ao fluxo. O biodiesel geralmente apresenta viscosidade maior que o diesel mineral, mas ainda dentro de limites adequados para sistemas de tubulações. Quando elevado, dificulta o bombeamento e pode causar queda de pressão ao longo da tubulação. A viscosidade aumenta em temperaturas baixas, podendo levar à cristalização parcial, o que não será o caso.

A densidade do biodiesel é ligeiramente superior à do diesel convencional, sendo que afeta o comportamento hidrodinâmico do fluido e a energia necessária para o bombeamento. Uma densidade maior pode influenciar o dimensionamento de bombas e tubulações.

Os dados a seguir que serão usados no projeto foram retirados da Ficha de Informações de Segurança e Produtos Químicos (FISPQ) da Petrobras:

Propriedade	Valor Típico	Unidade	Observações
Densidade (ρ)	900	kg/m ³	A 15–25 °C
Viscosidade dinâmica (μ)	4,5	mPa·s	A 40 °C
Viscosidade dinâmica (μ)	0,0045	Pa·s	Valor convertido para SolidWorks
Viscosidade	6	mm/s ²	Aproximado
Capacidade térmica específica (cp)	2000	J/kg·K	Valor médio
Condutividade térmica (k)	0,17	W/m·K	Aproximado
Ponto de ebulição	340	°C	Estimativa média
Ponto de fulgor	130	°C	Para referência de segurança
Temperatura de referência	25	°C	Usada como base para os dados

Tabela 1 – Propriedades do Biodiesel

Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. Especificação do Biodiesel (B100) – Resolução ANP nº 45/2014. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br>. Acesso em: 8 maio 2025.

Os dados obtidos acima foram utilizados em momento mais a frente de elaboração do escoamento do sistema projetado no Solidworks Flow Simulation, de modo que a simulação possa se aproximar ainda mais da realidade da operação.

2.3 FLUXOGRAMA

O sistema de tubulação instalado no terminal de São Luís - MA foi projetado para garantir o escoamento eficiente e seguro do biodiesel, desde a descarga até o armazenamento final. A configuração atende às normas técnicas vigentes, assegurando a integridade do fluido e a minimização de riscos operacionais. Essa infraestrutura contribui para a eficiência logística e a segurança ambiental do terminal, consolidando sua importância no fornecimento sustentável de biocombustíveis na região.

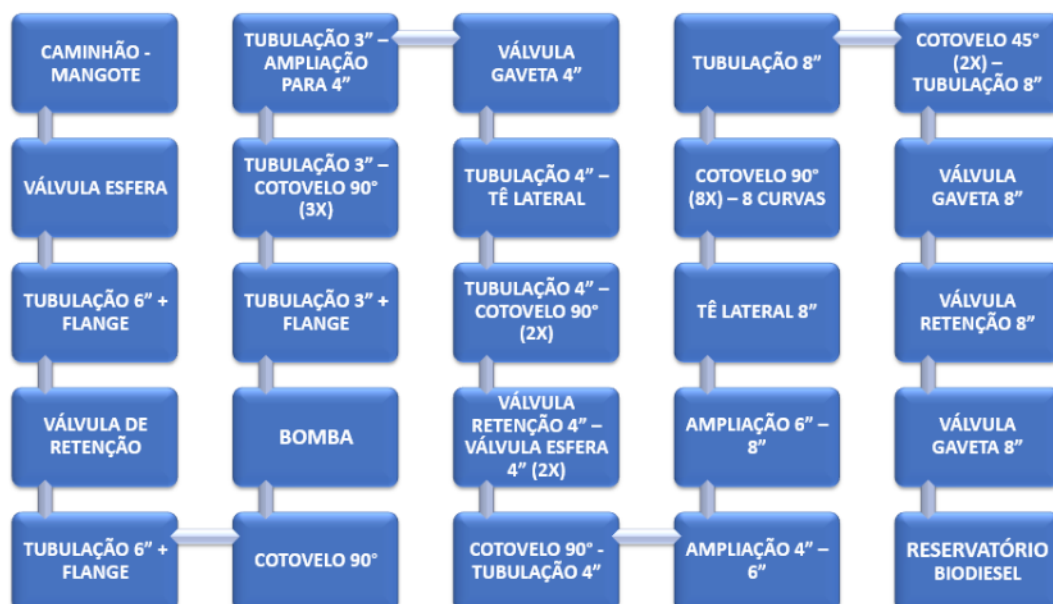


Figura 3 - Fluxograma com esquemática do sistema da tubulação

Fonte: autoria própria

O fluxograma apresentado, elaborado no PowerPoint, ilustra de forma clara e sequencial o percurso do biodiesel no sistema de tubulação do terminal. Ele destaca as principais etapas do processo, desde a descarga até o armazenamento, facilitando a visualização do fluxo do fluido e a compreensão da disposição dos componentes e equipamentos envolvidos.

O fluxograma é um documento utilizado pelos projetistas como uma representação gráfica, sem necessidade das dimensões reais, do caminho que será traçado pela tubulação, de onde sai até o seu destino.

2.4 PROJETO DE TUBULAÇÃO

Após a apresentação do fluxograma, iremos demonstrar graficamente o caminho escolhido para a ligação do descarregamento do caminhão-tanque até o reservatório. Visto que o caminho é longo entre estes dois pontos, o trecho inteiro será dividido em partes para uma melhor visualização geral, começando pela figura 4. As vistas dos trechos foram executadas no AutoCad 2026. As cotas estão em milímetro.

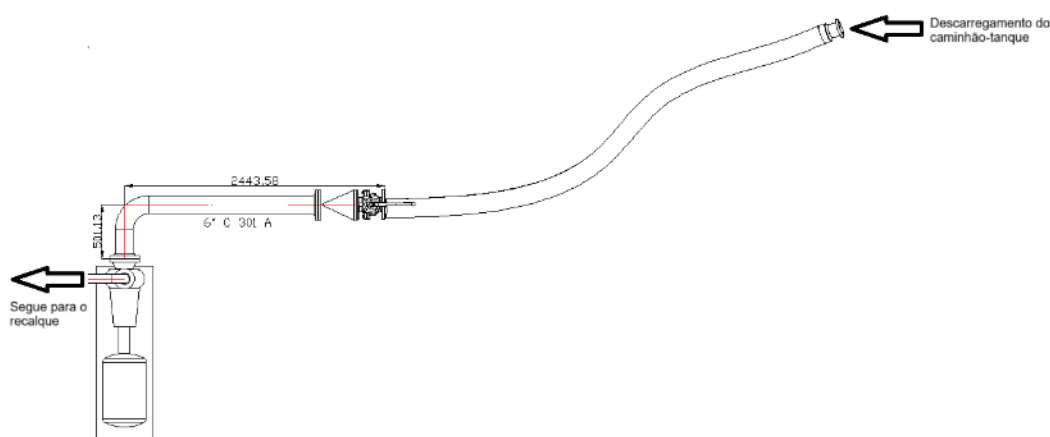


Figura 4 – Vista superior do trecho de sucção da bomba

Fonte: Autoria própria

Inicialmente, o caminhão-tanque descarrega o biodiesel pelo mangote de 6 polegadas. Após a entrada do produto pelo mangote, o escoamento passa por uma válvula esfera, posicionada na entrada da tubulação em caso de emergência com o operador próximo ao descarregamento. Caso ocorra algum problema com a pressão de entrada do produto na tubulação, esta válvula poderá ser acionada para que bloqueie o escoamento momentaneamente para um maior controle no momento do descarregamento no caminhão.

Para manter o escoamento constante após a entrada do biodiesel, sem que haja um contrafluxo em razão da alta pressão de entrada do fluido, projetamos uma válvula de retenção portinhola logo após a válvula esfera na entrada da tubulação.

Após 2 metros de tubo, exige uma curva de 90 para entrada na bomba. Seguindo com mais 50 centímetros de tubo, o trecho de sucção é finalizado com a entrada do fluido na bomba.

Com o encerramento do trecho de sucção, a figura 5 inicia o detalhamento do recalque da bomba com uma vista frontal do sistema.

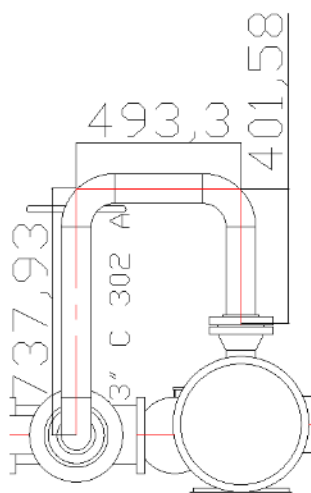


Figura 5 – Vista frontal do início do recalque
Fonte: Autoria própria

Nessa imagem, observa-se que a saída da bomba ocorre verticalmente, utilizando um trecho de 401 milímetros de um tubo de 3 polegadas.

Logo após esse segmento vertical, há uma curva de 90° projetada para afastar a tubulação da linha de centro da bomba. Esse novo trecho horizontal se estende por 493 milímetros, onde ocorre outra curva de 90°, desta vez para direcionar a tubulação para baixo, levando-a novamente ao nível da bomba.

Este trecho descendente tem 737 milímetros de comprimento. Ao final dele, uma terceira curva de 90° é inserida para dar continuidade ao escoamento. Essa curva está orientada para um eixo perpendicular ao plano da figura, motivo pelo qual sua continuidade está representada na figura 6.

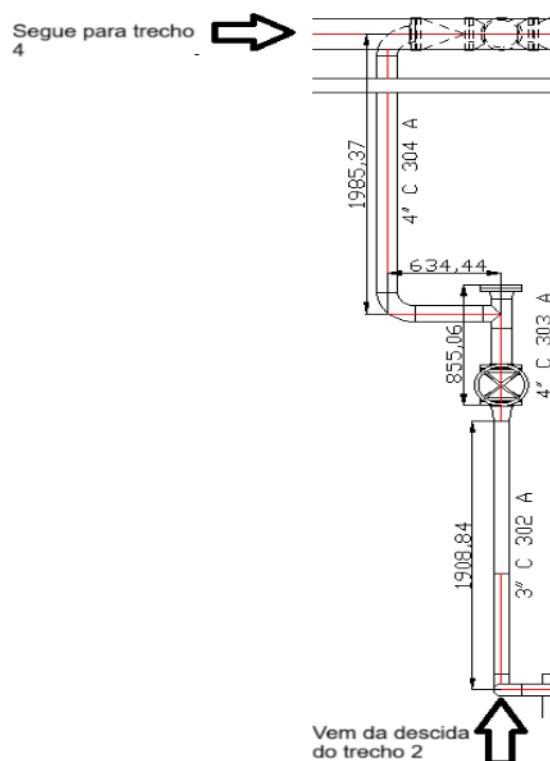


Figura 6 – Vista superior da continuação do recalque
Fonte: Autoria própria

Em continuação à figura 5, a figura 6 mostra o caminho da tubulação em direção à saída da plataforma de descarregamento. Após a descida do trecho próximo à bomba, acrescentamos 1 metro e 91 de tubo de 3 polegadas. Após esse tubo, temos uma expansão de 3 polegadas para 4 polegadas. Logo após essa expansão, colocamos mais uma válvula gaveta, presente em virtude da mudança de diâmetro. Como a válvula gaveta é responsável por bloquear o escoamento, em qualquer emergência próximo a esta mudança, o fluxo será interrompido rapidamente.

Após a válvula, será acrescentado mais 855 milímetros de trecho, que estará ligada a um flange cego, podendo ter mais alterações futuramente. Antes do flange cego, o escoamento estará ligado a um tê lateral para a continuação do escoamento. Este tê foi acrescentado visando a ligação do trecho de um mangote com um outro caminho vindo de outra laje da plataforma. Este tê dará início a um tubo de 634 milímetros, ligado a uma curva de 90 que continuará o escoamento para fora da plataforma.

Em consequência da curva, mais 2 metros de tubo será acrescentado até mais uma curva de 90, que levará o escoamento até a parte de tubulação que estará abaixo de um tubo de 8 acima de uma estrutura metálica que será apresentada

posteriormente. Este trecho invisível está demonstrado na figura 5 com as linhas tracejadas, e seu detalhamento poderá ser visto na figura 7.

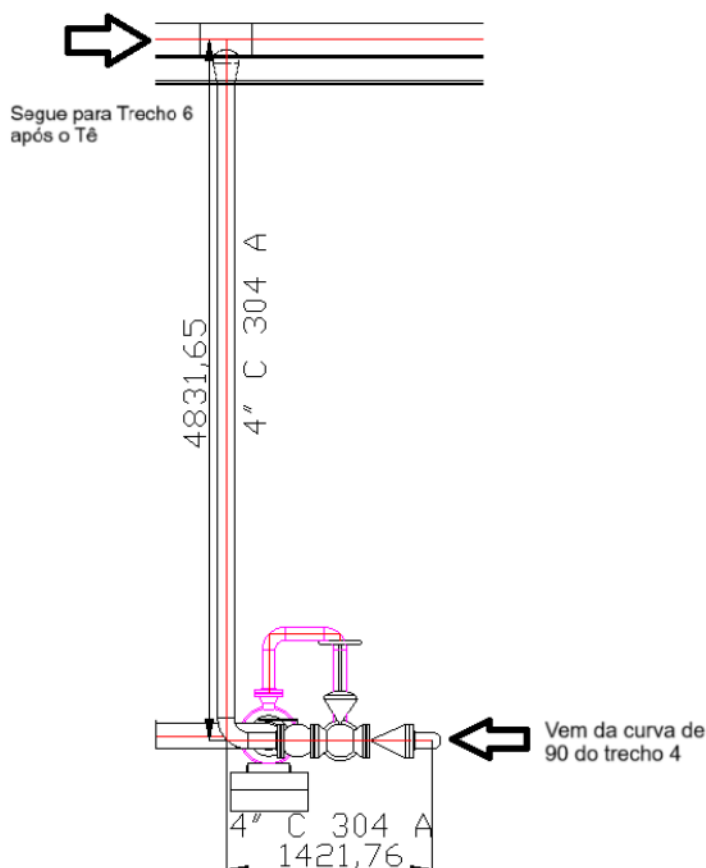


Figura 7 – Vista do trecho tracejado da figura 6

Fonte: Autoria própria

O trecho em magenta representa um trecho já estudado anteriormente. O plano de corte da figura 7 é paralelo ao plano de corte da figura 5, por este motivo o trecho desta imagem reaparece. Desta forma, a tubulação estudada está representada pela cor preta.

Após a curva de 90, inclui-se mais um tubo de 1,5 metro e 4 polegadas de diâmetro. Neste tubo, é encontrada uma válvula de retenção portinhola que tem a funcionalidade de manter o escoamento constante na mesma direção. Sua aplicabilidade é porque este trecho pode ser o qual será ligado mais um tubo vindo da outra laje da plataforma, em caso de simultaneidade de abastecimento na plataforma, que não é nosso caso estudado. Com simultaneidade de abastecimento, aumenta-se a vazão, podendo assim ocorrer interferências na tubulação, e desta forma a válvula de retenção fará essa função de manter o escoamento do biodiesel unidirecional.

Seguindo o mesmo tubo há duas válvulas esfera, uma por acionamento pneumático e outra por acionamento manual. Sendo uma válvula de bloqueio, as válvulas esferas são acionadas em caso de emergência, como estão próximas de uma mudança de direção do escoamento. Qualquer problema que possa ocorrer ao longo do escoamento, estas válvulas interrompem momentaneamente o escoamento para que a ocorrência seja acionada. Na ponta deste trecho de 1,5 metro, tem-se uma curva de 90 para enfim a tubulação se direcionar para fora da plataforma.

Com isso, um tubo de 5 metros de comprimento e 4 polegadas de diâmetro será adicionado perpendicularmente ao outro tubo após esta curva de 90, subindo a tubulação para uma estrutura metálica fora da plataforma. Na ponta deste tubo, é encontrada uma ampliação de 4 para 6 polegadas, e outra ampliação de 6 para 8 polegadas, sendo esta última incluída em um tê, com a responsabilidade de levar o fluxo para um tubo de 8 polegadas que estará em cima desta estrutura metálica.

Este tubo será detalhado na figura 8.

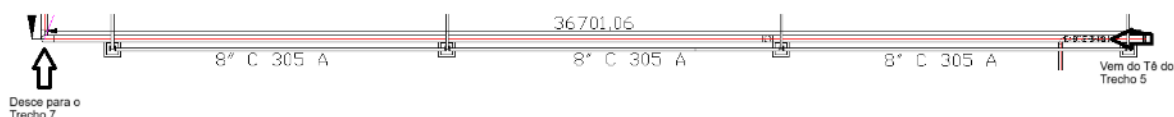


Figura 8 – vista superior da linha de 8 polegadas acima da estrutura metálica

Fonte: Autoria própria

A figura 8 é uma vista superior da linha de 8 polegadas que fica acima da estrutura metálica. Ela possui 37 metros de comprimento e desce para o nível da bacia. Por fim, a figura 9 a seguir demonstra o trecho na bacia que chega no reservatório.

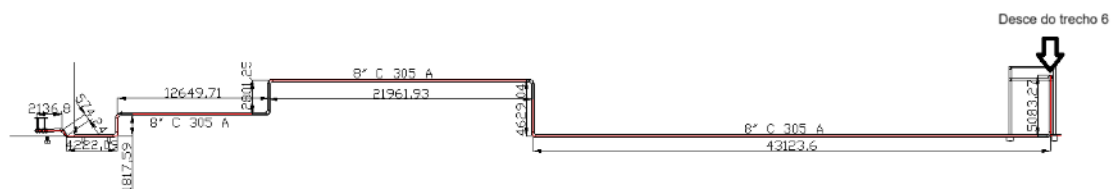


Figura 9 - Vista lateral do trecho que chega ao reservatório

Fonte: Autoria própria

Neste último trecho, as subidas e descidas estão destacadas, e seus comprimentos estão presentes nesta vista lateral da tubulação. No total, serão mais

99,90 metros de tubo de 8 polegadas até o reservatório, 7 curvas de 90 graus e mais 2 curvas de 45 graus. Além das curvas, projetamos na entrada do tanque mais 2 válvulas gaveta e uma válvula de retenção portinhola. As válvulas estão aplicadas por uma boa conduta de que todos os tanques possuem válvulas de bloqueio e válvula de retenção na entrada dos tanques. As suas funções são iguais às demais, sendo que a portinhola evita que o bocal de entrada do tanque sirva para outra função além da entrada do produto.

Com a apresentação da tubulação em 2D, outra forma de visualização clara do caminho estudado está na representação 3D representada pela figura 10.

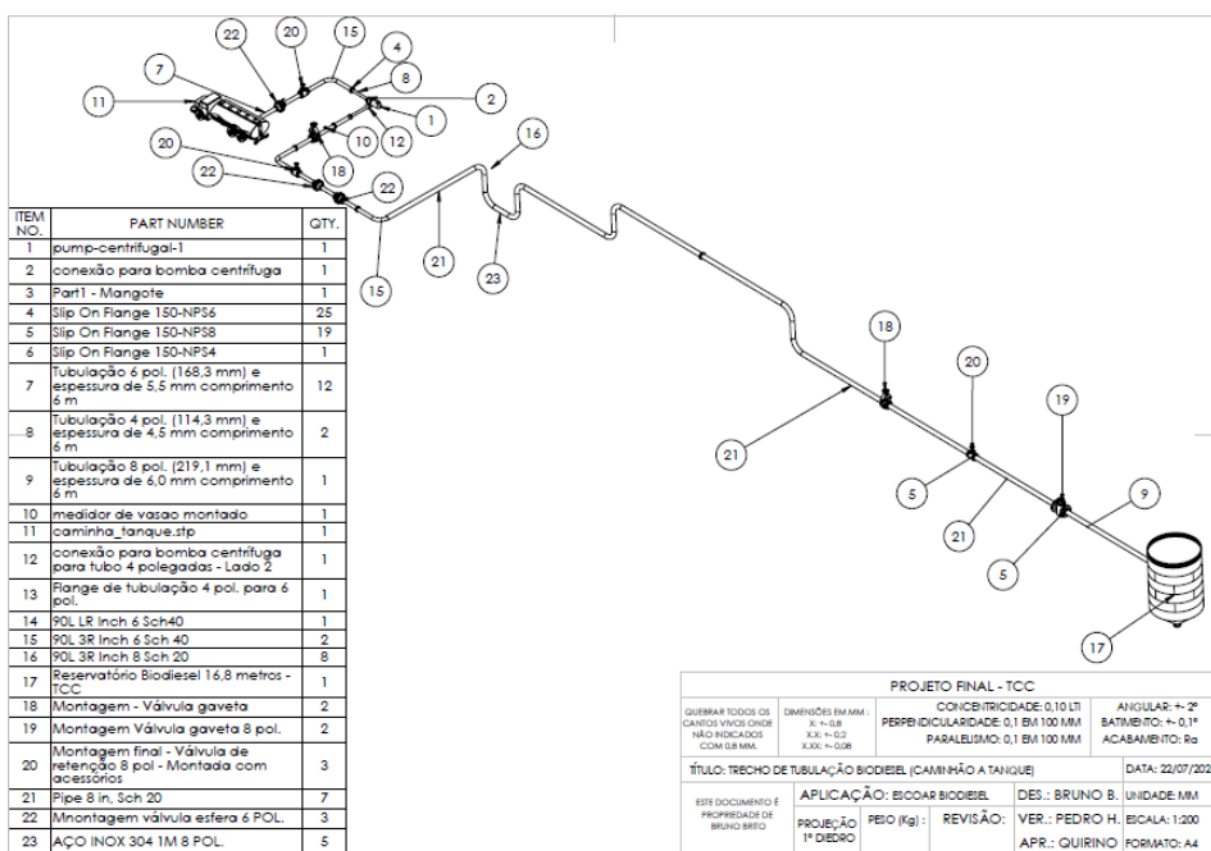


Figura 10 – Isométrica de montagem da tubulação

Fonte: Autoria própria

Verifica-se através da figura 10 o início da tubulação, quando o fluido escoar do tanque do caminhão através da conexão entre mangote e tubulação, até que chega a seu destino final, o reservatório, após passar por todos os equipamentos selecionados. Pode-se observar que os diâmetros de tubulações adotadas são de 4, 6 e 8 polegadas e tanto essas seleções quanto a de materiais serão explicitadas no decorrer do trabalho.

O primeiro trecho que pode ser observado é o escoamento que vai do mangote, tubulação de 6 polegadas (3x), onde há a presença de dois importantes equipamentos, que são válvula esfera e válvula de retenção.

A instalação da válvula esfera antes da válvula de retenção no trecho de escoamento de biodiesel, especialmente onde o fluido passa pelo mangote até a bomba, é essencial para garantir o controle e a segurança operacional do sistema. A válvula esfera atua como um dispositivo de bloqueio manual, permitindo ao operador interromper completamente o fluxo de biodiesel sempre que necessário, seja para manutenção, inspeção ou em situações de emergência. Essa posição estratégica permite isolar o sistema a montante da bomba, evitando derramamentos ou entrada de ar durante intervenções. Logo após a válvula esfera, instala-se a válvula de retenção, cuja função principal é impedir o refluxo do fluido em direção contrária ao fluxo normal. Essa proteção é fundamental para preservar a integridade da bomba, evitando problemas como cavitação, retorno de fluido e contaminação da linha. Juntas, essas válvulas formam uma sequência lógica e eficiente que assegura o bom funcionamento e a longevidade do sistema, prevenindo ainda ocorrências como golpe de aríete, entrada de ar na linha, cavitação na bomba e vazamentos ou contaminação do produto (API 594, 2018; API 598, 2016; API 610, 2019; ABNT NBR 13932, 2006; ASME B31.3, 2020; API RP 686, 2017).

Ao avançar da esquemática do trecho acima, há a sucção da bomba e ao fluido sair do equipamento hidráulico, verifica-se seu recalque. Na montagem da tubulação verifica-se a existência de um medidor de vazão e de duas válvulas esferas em série com válvula de retenção, após a passagem do fluido por um cotovelo a 90 graus. Essa configuração está a jusante da bomba.

Após a bomba instala-se o medidor de vazão na linha de recalque, em um trecho reto da tubulação, onde o fluido apresenta pressão estável e fluxo contínuo, condição ideal para medições precisas. Para garantir a exatidão da leitura, recomenda-se manter trechos retos antes e depois do medidor, evitando turbulências. Em seguida, são instaladas duas válvulas esfera em série com a tubulação, ou seja, alinhadas no mesmo trajeto do fluxo, permitindo que o fluido passe sequencialmente por ambas. Essa configuração proporciona isolamento redundante, permitindo manutenção segura do medidor ou de qualquer trecho posterior da linha, além de permitir testes de estanqueidade entre as válvulas. As válvulas devem ser do tipo passagem plena, para evitar perdas de carga e alterações no perfil de fluxo (API 14.3,

2017; ASME B31.3, 2020; API 6D, 2018; ISO 5167, 2022).

A escolha de instalar duas válvulas esfera e retenção em série e não em paralelo está relacionada à necessidade de garantir um isolamento seguro e confiável da tubulação para manutenção ou intervenção. Quando instaladas em série, as válvulas bloqueiam completamente o fluxo em sequência, proporcionando uma dupla barreira contra vazamentos e permitindo testar a estanqueidade entre elas. Por outro lado, instalar as válvulas em paralelo configuraria um sistema de bypass, onde o fluxo poderia ser desviado por um caminho alternativo, o que não atende à finalidade de isolamento total da linha. Utiliza-se em situações específicas para manter o fluxo enquanto um trecho é isolado, mas no caso de controle e segurança do medidor de vazão e demais equipamentos, a instalação em série assegura o fechamento absoluto do fluxo, evitando riscos operacionais (API 600, 2018).

Ao longo do percurso, o biodiesel escoar por trechos de tubulação que incluem cotovelos de 90 graus, cuja fabricação e instalação devem seguir normas específicas para tubulação de aço inox, garantindo raio de curvatura adequado para minimizar perdas de carga, evitar formação de depósitos e turbulência que possam comprometer a qualidade do combustível. Antes do fluido atingir o reservatório, é imprescindível a instalação de uma válvula gaveta certificada para uso em líquidos combustíveis, que assegura bloqueio absoluto e vedação eficiente em sistemas de escoamento de biodiesel. A válvula deve ser instalada em trecho reto da tubulação para garantir fechamento total e segurança operacional durante manutenções, prevenindo refluxo e vazamentos que poderiam comprometer a integridade do sistema e a qualidade do biodiesel armazenado. Essa configuração técnica assegura conformidade com normas e boas práticas para transporte e armazenamento de biocombustíveis, preservando a eficiência do processo e a segurança ambiental (ABNT NBR 5590, 1997; ASME B16.9, 2021; API 600, 2018; ANP, 2020).

A seleção da configuração com duas válvulas gaveta instaladas em série, intercaladas por uma válvula de retenção, foi determinada com base na necessidade de garantir máxima segurança operacional e controle do fluxo de biodiesel na linha de recalque, antes da chegada ao reservatório. A válvula de retenção, posicionada entre as duas gavetas, impede o retorno indesejado do fluido, protegendo o sistema contra refluxo e contaminações, enquanto as duas válvulas gaveta permitem isolamento redundante, facilitando a manutenção e testes de estanqueidade sem comprometer a integridade da linha. Essa estratégia oferece uma barreira dupla eficaz contra

vazamentos e garante a confiabilidade do sistema, especialmente em instalações críticas de armazenagem de biocombustíveis. (ASME B31.3, 2021; API 594/600, 2021)

Portanto, diante do que foi apresentado acima, é desta maneira que o sistema irá ser montado. A figura 11 demonstra uma visão sobre o sistema que foi descrito. A seguir será destrinchadas informações como a seleção de materiais para tubulações e equipamentos de acordo com classe 150 para tubulação, as propriedades que o Biodiesel apresenta e da seleção da bomba.

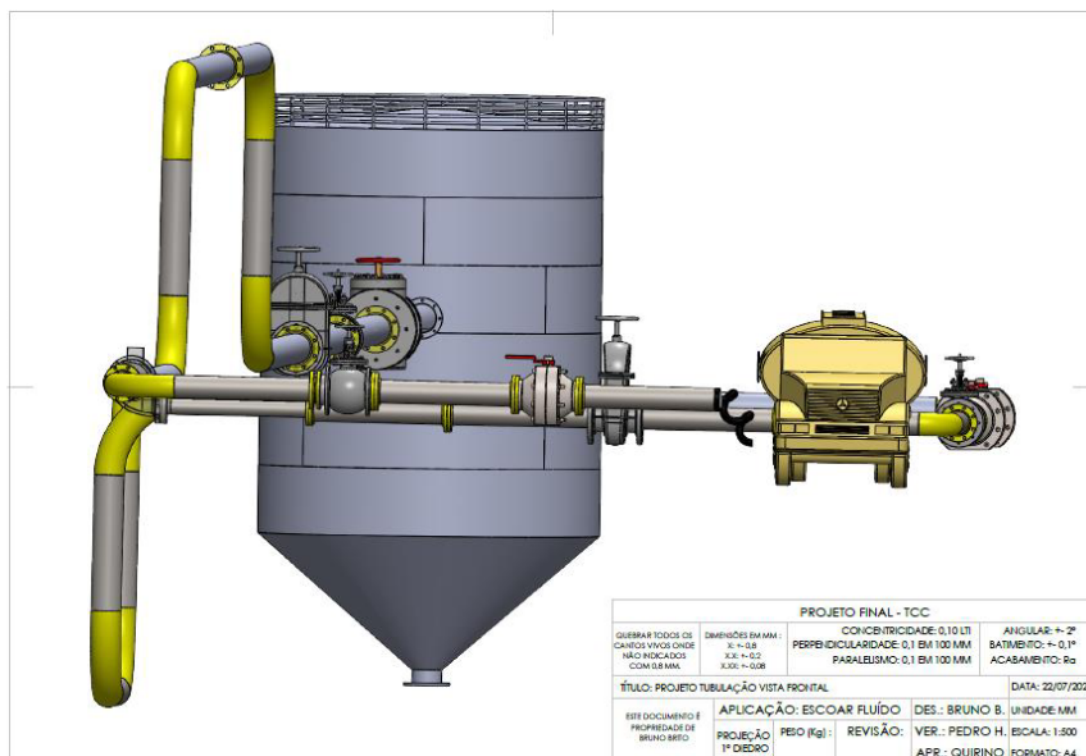


Figura 11 – Vista frontal do sistema de tubulação de biodiesel

Fonte: Autoria própria

2.5 SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA TUBULAÇÃO

O material utilizado nas tubulações industriais é majoritariamente aço devido à sua capacidade de resistir às altas pressões internas, alta resistência mecânica, segurança e confiabilidade. Por causa das condições de trabalho e do ambiente externo, a tubulação de aço fica suscetível a diversas fontes de cargas e a diferentes modos de falha, podendo experimentar, por exemplo, ruptura, vazamentos, redução de espessura, trincas e deformações (CALLISTER, 2007; SILVA TELLES, 2001; SHAMSUDDOHA et al., 2021).

Os aços inoxidáveis austenísticos apresentam extraordinária resistência a fluência a fluência e a oxidação, apresentam limite de temperatura bem elevado, exceto para os tipos de muito baixo carbono (aço 304 L e 316L). Possuem ótima soldabilidade e não necessitam de tratamento térmico. (SILVA TELLES, 2012)

Portanto, a seleção do aço inoxidável AISI 304, conforme especificado na norma ASTM A240, possui excelente resistência à corrosão, característica essencial para aplicações envolvendo o escoamento de biodiesel. Essa proteção se deve principalmente ao teor de cromo e níquel, que promove a formação de uma camada passiva resistente a ataques químicos.

No que se refere à fabricação das tubulações, o material pode ser fornecido em versões com ou sem costura. Tubos sem costura, fabricados por processos como extrusão ou laminação a quente, apresentam elevada integridade estrutural e são indicados para sistemas sujeitos a pressões internas mais elevadas. Apesar de não possuírem solda longitudinal, sua união por soldagem continua sendo viável, desde que sejam respeitados os procedimentos adequados de preparo e proteção da zona afetada pelo calor. De modo geral, o AISI 304 apresenta boa soldabilidade e conformabilidade, o que facilita sua aplicação em diferentes configurações de tubulação. A escolha técnica é vantajosa em sistemas que exigem durabilidade, resistência química e baixo risco de falhas, como é o caso de linhas que transportam biodiesel.

Propriedade	Descrição / Valor
Resistência à corrosão	Alta resistência a ambientes químicos agressivos, soluções salinas e atmosferas úmidas.
Resistência à oxidação	Boa resistência até aproximadamente 870 °C em uso contínuo.
Resistência à tração	515 MPa (valor típico)
Limite de escoamento	205 MPa (valor típico)
Dureza Brinell	180–200 HB
Ductilidade	Alta – fácil de conformar e soldar
Tenacidade	Alta – suporta impactos e vibrações sem fraturar
Temperatura de serviço	-196 °C a ~870 °C
Densidade	7,93 g/cm ³
Condutividade térmica	16,2 W/m·K a 100 °C
Capacidade calorífica	500 J/kg·K
Módulo de elasticidade	193 GPa

Tabela 2 – Propriedades físicas e químicas do aço AISI 304

Fonte: MULTINOX MG. Tubo inox 304: veja para que serve e suas principais aplicações. Disponível em: <https://multinoxmg.com.br/blog/tubo-inox-304-veja-para-que-serve-e-suas-principais-aplicacoes/>. Acesso em: jul. 2025.

A adoção do aço inoxidável AISI 304 como material da tubulação para o escoamento de biodiesel representa uma decisão tecnicamente sólida e compatível com os requisitos operacionais do sistema. Conforme demonstrado na tabela apresentada, esse material oferece elevada resistência à corrosão, mesmo em contato com fluidos orgânicos como o biodiesel, que podem ser agressivos a materiais metálicos convencionais. Além disso, o aço inox 304 possui alta resistência à tração (515 MPa), boa ductilidade e excelente tenacidade, características que asseguram estabilidade estrutural sob pressão e vibração. Sua superfície lisa e não porosa reduz o risco de incrustações ou contaminações, o que é fundamental para manter a integridade do biodiesel ao longo do escoamento. Soma-se a isso a facilidade de conformação e soldagem, bem como a baixa necessidade de manutenção, tornando o material particularmente vantajoso para sistemas que operam de forma contínua ou intermitente com fluidos sensíveis. Dessa forma, o uso do AISI 304 garante não apenas durabilidade e segurança, mas também confiabilidade química frente ao biodiesel, justificando sua seleção técnica para o projeto.

2.6 DIMENSIONAMENTO DA TUBULAÇÃO

Para determinar as dimensões da tubulação utilizada na distribuição de biodiesel é essencial consultar normas técnicas específicas que estabelecem os padrões e requisitos para esses sistemas. No Brasil, a ABNT NBR 17505 é a norma que aborda o armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis e incluem diretrizes relevantes para sistemas de tubulação.

A espessura mínima de parede e a classe de pressão de tubulações industriais podem ser determinadas pelas equações estabelecidas na norma ASME B31.3 – *Process Piping*, que garante a integridade estrutural da tubulação sob pressão interna e condições específicas de operação. Essa norma define critérios rigorosos para o projeto de tubulações, considerando pressão de projeto, temperatura de operação, propriedades mecânicas do material e fator de junta (em caso de soldas).

A equação geral para o cálculo da **espessura mínima da parede do tubo** é dada por:

$$t = \frac{P \times D}{(2 \times (S \times E + P \times Y))} \quad (1)$$

Onde:

- t: espessura mínima da parede (mm);
- P: pressão interna de projeto (MPa);
- D: diâmetro externo do tubo (mm);
- S: tensão admissível do material a temperatura de operação (MPa);
- E: eficiência da junta (adimensional, geralmente entre 0,85 e 1,0);
- Y: coeficiente de rendimento, função da temperatura (adimensional, tipicamente 0,4 para até 480 °C).

Apesar da possibilidade de realizar esses cálculos analiticamente, como será exemplificado posteriormente, para fins de projeto prático e compatibilidade com a documentação técnica do terminal, adota-se diretamente a **Tabela 3**, baseada na norma **ASME B36.10M**, que apresenta os diâmetros nominais, diâmetros externos, espessuras de parede e classes de pressão típicas para tubulações de aço carbono. Essas dimensões padronizadas são amplamente utilizadas em sistemas industriais de transporte de biodiesel.

Diâmetro Nominal (DN)	Diâmetro Externo (mm)	Espessura da Parede (mm)	Classe de Pressão (PN)
15 (½")	21.3	2.0 – 3.2	PN 10, 16, 25
20 (¾")	26.7	2.3 – 3.6	PN 10, 16, 25
25 (1")	33.4	2.3 – 4.0	PN 10, 16, 25
40 (1½")	48.3	2.6 – 4.5	PN 10, 16, 25
50 (2")	60.3	2.9 – 5.0	PN 10, 16, 25
80 (3")	88.9	3.4 – 5.6	PN 10, 16, 25
100 (4")	114.3	3.6 – 6.0	PN 10, 16, 25
150 (6")	168.3	4.0 – 7.1	PN 10, 16, 25
200 (8")	219.1	4.5 – 7.9	PN 10, 16, 25
250 (10")	273.0	5.0 – 8.3	PN 10, 16, 25
300 (12")	323.9	5.6 – 9.5	PN 10, 16, 25

Tabela 3 – Tabela de dimensões de tubulação para distribuição de Biodiesel em milímetros
Fonte: ASME B36.10M

Nominal		Espessura		Diâmetro	
DIA	DIA pol	SCH	valor em pol	Dia ext. pol	Dia int. pol
3"	3	sch 40	0,216	3,500	3,068
4"	4	sch 40	0,237	4,500	4,026
6"	6	sch 40	0,280	6,625	6,065
8 "	8	sch 20	0,250	8,625	8,125

Tabela 4 – Tabela de dimensões de tubulação para distribuição de Biodiesel em polegadas Fonte: ASME B36.10

Dentro do que foi apresentado na tabela acima, selecionam-se três diâmetros utilizados no sistema de distribuição com seus respectivos schedules. Seguem abaixo.

- **Tubulação de 8 polegadas:** utilizado em aplicações onde a pressão é baixa e se deseja reduzir peso e custo. Serão utilizadas com flanges ASME B16.5, certificando-se de que a face do flange (ex: RF ou FF) e a classe de pressão estejam compatíveis com a espessura e pressão de operação do sistema.

- Diâmetro Nominal (NPS): 8"
- Schedule: 20 (parede fina)
- Diâmetro Externo (OD): 8,625 pol. (219,08 mm)
- Espessura da Parede (SCH 20): aproximadamente 0,250 pol. (6,35 mm)
- Diâmetro Interno (ID): 8,125 pol. (206,38 mm)

- **Tubulação 6 polegadas:** a extremidade da tubulação pode ser soldada ou rosqueada. Suporta até 1.000 PSI em condições padrão.

- Diâmetro Nominal (NPS): 6"
- Diâmetro Externo (OD): 6,625 pol. (168,28 mm)
- Espessura da Parede: 0,280 pol. (7,11 mm)
- Diâmetro Interno (ID): 6,065 pol. (154,06 mm)

- **Tubulação 4 polegadas:** suporta de 800 a 1.000 PSI em condições padrão para aço carbono e compatíveis com flanges ASME B16.5. Tubulação também pode ser rosqueada ou soldada na extremidade.

- Diâmetro Nominal (NPS): 4"
- Diâmetro Externo (OD): 4,500 pol. (114,30 mm)

- Espessura da Parede: 0,237 pol. (6,02 mm)
- Diâmetro Interno (ID): 4,026 pol. (102,26 mm)

Nota-se que:

- Diâmetro Nominal (DN) é uma medida padrão utilizada para determinar o diâmetro de tubos e conexões.
- Diâmetro Externo (mm) refere-se ao tamanho externo real da tubulação.
- Espessura da Parede (mm) varia de acordo com a classe de pressão e o tipo de material utilizado.
- Classe de Pressão (PN) indica a capacidade máxima de pressão que a tubulação pode suportar com segurança. Os valores mais comuns são PN 10 (10 bar), PN 16 (16 bar), e PN 25 (25 bar), que são padrões utilizados na indústria.

Foi preciso levar em consideração estes fatores no momento do dimensionamento correto da tubulação, apresentado no item anterior, em “Fluxograma”.

As tubulações utilizadas para o escoamento de biodiesel devem atender à ABNT NBR 17505-3:2013, que define os requisitos para sistemas de líquidos combustíveis. A norma especifica critérios de seleção de materiais, métodos de união, proteção anticorrosiva e testes de estanqueidade, visando garantir a segurança e a compatibilidade com o fluido. Recomenda-se o uso de aço carbono com revestimento ou aço inoxidável, de acordo com as condições de operação (ABNT NBR 17505-3, 2013).

A ABNT NBR 15512:2008 estabelece requisitos para o armazenamento, manuseio e transporte do biodiesel, com foco na preservação de sua qualidade e segurança operacional. A norma orienta sobre a escolha de materiais compatíveis, como aço inoxidável ou aço carbono revestido, e trata de aspectos como controle de temperatura, estanqueidade e inspeção de sistemas, visando garantir a integridade do biodiesel e prevenir riscos ambientais (ABNT NBR 15512, 2008).

2.7 TANQUE RESERVATÓRIO

Na figura 12, visualiza-se em desenhos 3D e 2D o reservatório de 6.931 m³

que dará fim ao sistema de tubulação e acessórios estudado, com suas respectivas cotas e respectiva construção através de chapas metálicas de aço inoxidável AISI 316 devido à sua alta resistência e, conseqüentemente, otimização de manutenção. As chapas são cortadas, curvadas e soldadas para formar a estrutura do tanque, incluindo fundo, corpo e teto. O processo inclui testes de estanqueidade e, se necessário, tratamentos adicionais como jateamento ou passivação. A fabricação segue normas como a API 650 para tanques atmosféricos e pode envolver exigências da NR-13, dependendo das condições de operação.

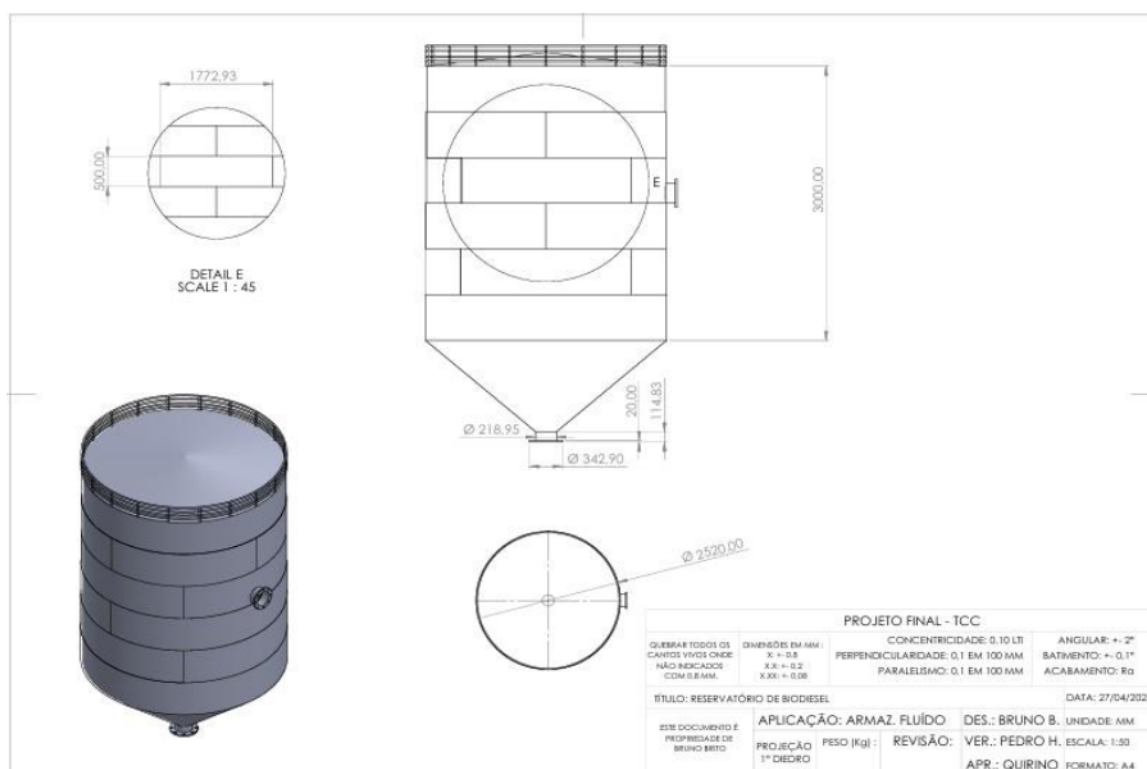


Figura 12 – Tanque reservatório 2D

Fonte: Autoria própria

3. PROJETO DAS VÁLVULAS E LIGAÇÕES

O projeto das válvulas consiste no desenvolvimento tanto do corpo quanto dos acessórios, de modo que ao final do trabalho possa ser realizada simulação do fluido trabalho e verificando a viabilidade dos mesmos. A linha de fabricação está descrita ao longo do capítulo, além da apresentação das ligações flangeadas e soldadas que estão distribuídas ao longo do projeto.

3.1 VÁLVULAS

As válvulas são equipamentos destinados a estabelecer, controlar e interromper o fluxo em uma tubulação. Em qualquer instalação deve haver sempre menor número possível de válvulas, compatível com o funcionamento da mesma, sendo equipamentos com preços elevados e passíveis de vazamento e que introduzem perda de carga, as vezes de grande valor.

Para uma válvula devidamente fabricada conforme norma é importante que passe por teste hidrostático e garanta estanquidade total durante período de tempo.

Porém, para o caso deste período passar e não ser realizada manutenção adequada ou haver falha interna em algum componente, por exemplo, por corrosão, há grande possibilidade de o equipamento vir a falhar.

A escolha de fundidos austeníticos para válvulas em sistemas que escoam biodiesel é fundamental devido às propriedades de resistência à corrosão e alta resistência mecânica desses materiais. Os fundidos austeníticos, como os especificados pela ASTM A351, são frequentemente empregados em aplicações que exigem desempenho em ambientes agressivos, como aqueles com presença de biodiesel. Essas ligas oferecem excelente resistência à oxidação e à corrosão em condições de alta temperatura, características essenciais para garantir a durabilidade e a integridade dos componentes em sistemas de transporte de biodiesel. Além disso, os fundidos austeníticos podem ser moldados de maneira complexa, permitindo a fabricação de válvulas e outros componentes com geometria específica, o que otimiza o escoamento e a vedação. A aplicação desses materiais contribui para a redução de custos com manutenção e substituição de componentes, assegurando a operação contínua e eficiente do sistema. A escolha de materiais para válvulas em sistemas de

biodiesel deve considerar a compatibilidade química com o fluido, a resistência à corrosão e a confiabilidade a longo prazo (PEREIRA et al., 2021).

Por outro lado, o aço inoxidável é particularmente vantajoso para as válvulas, pois oferece excelente resistência à corrosão, característica essencial em ambientes com biodiesel, que pode ser agressivo ao material. A resistência à oxidação e a durabilidade do aço inox garantem a longevidade e a confiabilidade das válvulas, além de reduzir a necessidade de manutenção frequente. Embora a combinação desses materiais possa gerar preocupações com corrosão galvânica devido à interação entre o aço carbono e o inox, essa questão pode ser mitigada com o uso de sistemas de proteção catódica ou isoladores, assegurando a integridade do sistema ao longo do tempo. Essa escolha equilibrada entre os materiais permite um sistema de escoamento eficiente e durável, com menor custo de manutenção e maior segurança operacional.

O AISI 316 é uma excelente escolha para válvulas em sistemas de escoamento de biodiesel, devido à sua alta resistência à corrosão e à oxidação. Composto por 16% de cromo, 10% de níquel e 2% de molibdênio, o aço inoxidável 316 oferece proteção superior contra cloretos e condições de alta umidade, comuns em ambientes de biodiesel. Sua durabilidade e estabilidade química garantem a integridade do sistema ao longo do tempo, tornando-o uma opção confiável e de baixo custo de manutenção para aplicações em ambientes agressivos. (METALINOX, 2023; ABM PROCEEDINGS, 2022).

É comum que, por conta da passagem do fluido no interno das válvulas, é frequente que os materiais sejam mais nobres e sua usinagem tenha acabamento mais aprimorado, de modo que a estanquidade possa ser garantida. Por exemplo, é necessário que a sede passe por usinagem com cota específica para usinagem, de retífica e de lapidação. (SILVA TELLES, 2012)

Na maioria das válvulas a haste atravessa o castelo, saindo do corpo da válvula, e para que se evite vazamentos, há necessidade de um sistema de vedação, seja com utilização de gaxetas ou para hastes rosqueadas, a rosca deve estar por fora da gaxeta para permitir lubrificação da rosca com válvula em operação, mantendo-a fora de contato com o fluido para evitar corrosão. (SILVA TELLES, 2012)

Tipo de válvula	Fluidos a que se destina	Fluidos muito corrosivos ou muito tóxicos?	Fluidos com sedimentos ou com sólidos?	Faixa de			Tem fechamento estanque?	Tem fechamento rápido?	Declina-se a operação frequente?	Pode ser à prova de fogo?	Perda de carga causada (quando aberta)	Custo	Espaço ocupado
				Pressão	Temperatura	Diâmetro							
Gaveta convencional	Líquidos em geral	Não	Não	Todos os valores			Não	Não	Não	Depende dos materiais	Muito baixa	Médio	Grande
Gaveta fecho rápido	Líquidos em geral	Não	Não	Baixa pressão	Temperatura moderada	Diâmetros pequenos	Não	Sim (*)	Sim	Depende dos materiais	Muito baixa	Baixo	Grande
Gaveta de Cunha Bipartida	Líquidos ou gases	Não	Não	Todos os valores	Temperatura moderada	3" a 60"	Sim	Não	Sim	Depende dos materiais	Muito baixa	Alto	Grande
Com-porta	Líquidos espessos ou sujos e pastas	Não	Sim (*)	Baixa pressão	Temperatura ambiente	Diâmetros médios e grandes	Não	Geralmente sim	Não	Não	Muito baixa	Muito baixo	Grande
Macho	Gases em geral	Não	Sim	Todos os valores			Pode ter	Pode ter	Sim	Depende dos materiais	Baixa	Médio	Pequeno
Esfera	Líquidos ou gases	Pode ser	Sim	Todos os valores	Temperatura moderada	Todos os valores	Pode ter	Pode ter	Sim	Depende dos materiais	Muito baixa (*)	Médio	Pequeno
Borboleta	Líquidos ou gases	Pode ser	Sim	Baixa pressão	Temperatura moderada	Todos os valores	Pode ter	Pode ter	Sim	Em geral não	Baixa	Baixo	Pequeno
Borboleta tri-excêntrica	Líquidos ou gases	Pode ser	Não	Todos os valores	Temperatura moderada	3" a 90"	Sim	Sim	Sim	Sim	Alta	Médio	Pequeno
Dia-fragma	Líquidos ou gases	Sim (*)	Sim	Baixa pressão	Temperatura moderada	Diâmetros pequenos e médios	Não	Não	Não	Não	Média	Alto	Pequeno

Tabela 5 – Válvulas de bloqueio segundo pressão e temperatura

Fonte: SILVA TELLES, 2012.

Tipo de válvula	Fluidos a que se destina	Fluidos muito corrosivos ou muito tóxicos?	Fluidos com sedimentos ou com sólidos?	Faixa de			Tem fechamento estanque?	Declina-se a operação frequente?	Pode ser à prova de fogo?	Perda de carga causada	Permite comando remoto	Custo	Espaço ocupado
				Pressão	Temperatura	Diâmetro							
Globo	Líquidos e gases	Não	Não	Todos os valores			Sim	Não	Depende dos materiais	Muito elevada	Difícil-mente	Médio	Médio
Globo angular		Não	Pode ser	Baixa pressão	Temperatura moderada	Pequenos e médios	Não	Não		Elevada	Difícil-mente	Baixo	Médio
Globo em "Y"		Não	Pode ser	Todos os valores			Sim	Não		Média	Difícil-mente	Médio	Médio
Agulha		Pode ser	Não	Todos os valores			Sim	Não		Muito elevada	Difícil-mente	Alto	Pequeno
Controle		Pode ser	Não	Todos os valores			Não	Sim (*)		Muito elevada	Sim (*)	Muito alto	Grande
Borboleta		Pode ser	Sim	Baixa pressão	Temperatura moderada	Todos os valores	Pode ter	Sim		Em geral não	Muito Baixa	Baixo	Pequeno
Dia-fragma		Sim (*)	Sim	Baixa pressão	Temperatura moderada	Pequenos e médios	Não	Não		Média	Sim	Alto	Pequeno

Tabela 6 – Válvulas de regulação segundo pressão e temperatura

Fonte: SILVA TELLES, 2012.

A partir de interpretações das duas figuras acima, selecionou-se válvulas para o projeto, de modo que seja viável e compatível com o sistema e que o fluido vá do ponto inicial ao final, prevendo-se futuros bloqueios e impedindo o contra fluxo.

3.1.1 Válvula De Retenção

A válvula de retenção operará em tubulação de 6 e 8 polegadas, conforme Schedules 40 e 20, destinadas ao escoamento de biodiesel. Verifica-se sua presença tanto na sucção quanto no recalque. Sendo utilizada três vezes, uma na sucção antes da passagem pela bomba (próxima ao mangote), no recalque após a bomba e uma no trecho final em série com duas válvulas gavetas. Ambos os modelos são do tipo oscilante.

Sua fabricação deverá atender aos requisitos das normas ASME, aplicável a válvulas de aço e referente a materiais fundidos em aço inoxidável compatíveis com biodiesel. O corpo e os componentes internos serão confeccionados em aço inoxidável austenítico segundo a norma ASTM A351 Gr. CF8M, garantindo resistência à corrosão e compatibilidade química com o fluido. As extremidades serão flangeadas e de Classe 150 com sede metálica usinada. A vedação deverá assegurar estanqueidade conforme os critérios para ensaio de pressão. (ASME B16.34, 2020; ASTM A351, 2020; ASME B16.5, 2020; API 598, 2016).

O projeto também contemplará os requisitos de resistência à pressão e temperatura definidos pela norma, bem como atenderá às especificações sanitárias, quando aplicável. A superfície interna será acabada com rugosidade máxima de 1,6 μm (Ra), a fim de minimizar o acúmulo de resíduos de biodiesel. (ASME B31.3, 2020). É fundamental que a válvula de retenção seja especificada com classe de pressão 150, de modo a garantir segurança e confiabilidade da operação. Essa seleção assegura que a válvula suporte pressões de operação compatíveis com sistemas de bombeamento típicos de biodiesel, além de oferecer margem adequada para variações térmicas e picos de pressão que possam ocorrer durante o funcionamento.

Esta classe também padroniza as dimensões de face a face e as conexões flangeadas, facilitando a integração com tubulações. Além disso, a especificação correta da classe de pressão contribui para a durabilidade da válvula, reduzindo riscos de falhas, vazamentos e manutenção corretiva, essenciais para preservar a integridade do sistema de transporte de biodiesel. (ASME B16.5, 2020).

Portanto, diante do projeto apresentado pela figura 13, determina-se o projeto em desenho mecânico da válvula de retenção para ser inserida em linha, se localizando após recalque da bomba e tubulação de 8 polegadas.

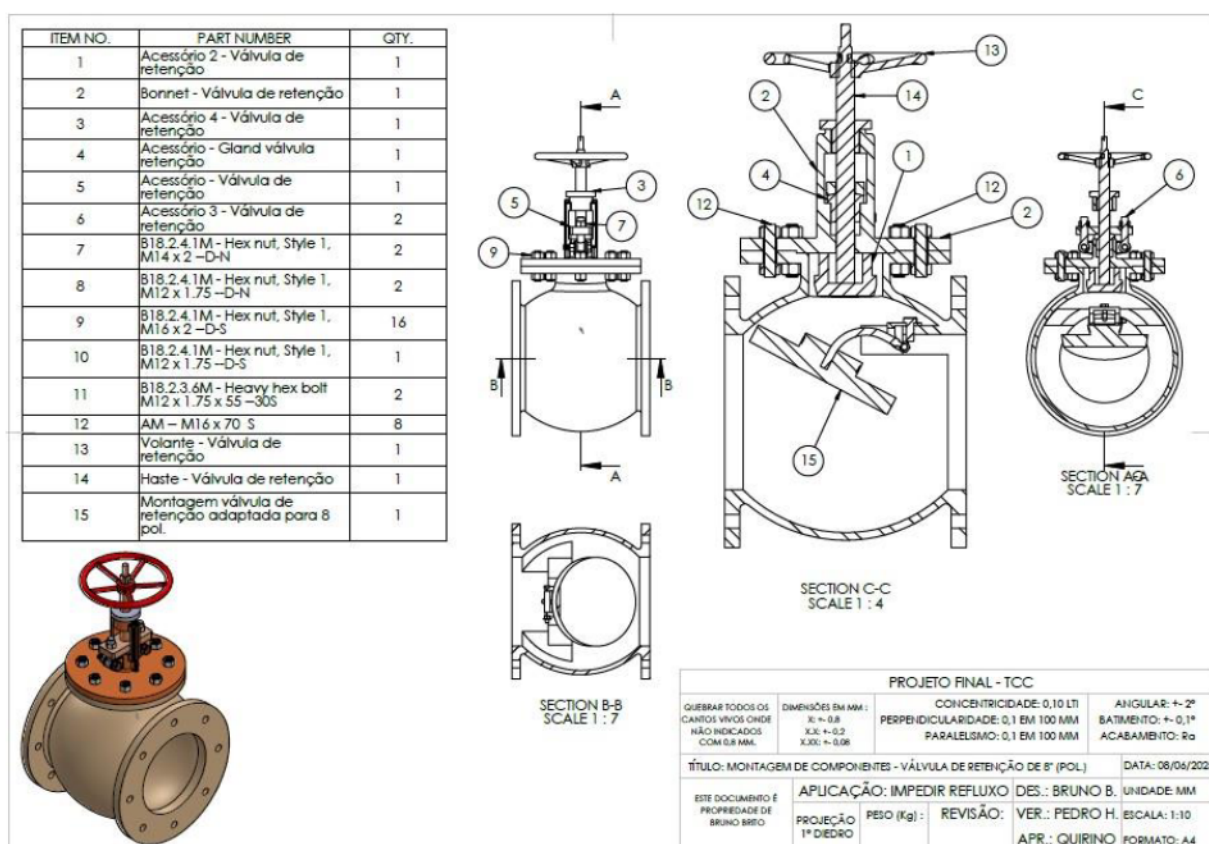


Figura 13 – Componentes de projeto de válvula de retenção 8" (pol.)
Fonte: Autoria própria

A válvula de retenção instalada após o tanque e a bomba tem a função de permitir o fluxo unidirecional do biodiesel, impedindo o retorno do fluido para o reservatório ou para a bomba quando o sistema é desligado ou em caso de variações de pressão. Essa proteção é essencial para evitar danos à bomba, que pode sofrer golpes hidráulicos ou funcionamento reverso, além de preservar a integridade das

linhas de recalque e dos equipamentos a jusante. Localizada estrategicamente no trecho de recalque, a válvula de retenção também contribui para manter o sistema pressurizado e para garantir a continuidade e a segurança da operação.

Pode ser observado acima detalhes do desenho de usinagem do corpo da válvula de retenção do tipo oscilante de 8 polegadas. Importante lembrar que também há válvula de retenção de 6 polegadas, na região de sucção da bomba e próxima ao caminhão tanque. O corpo e o bonnet deverão ser adquiridos a partir de material fundido diante de um desenho de blank (matéria bruta) para vir a ser usinado posteriormente em torno CNC, a fim de poder adquirir as medidas necessárias nas cotas com suas respectivas tolerâncias e acabamentos. Círculos de furação serão abertos em centro de usinagem e por fim o material passa por jateamento e pintura final.

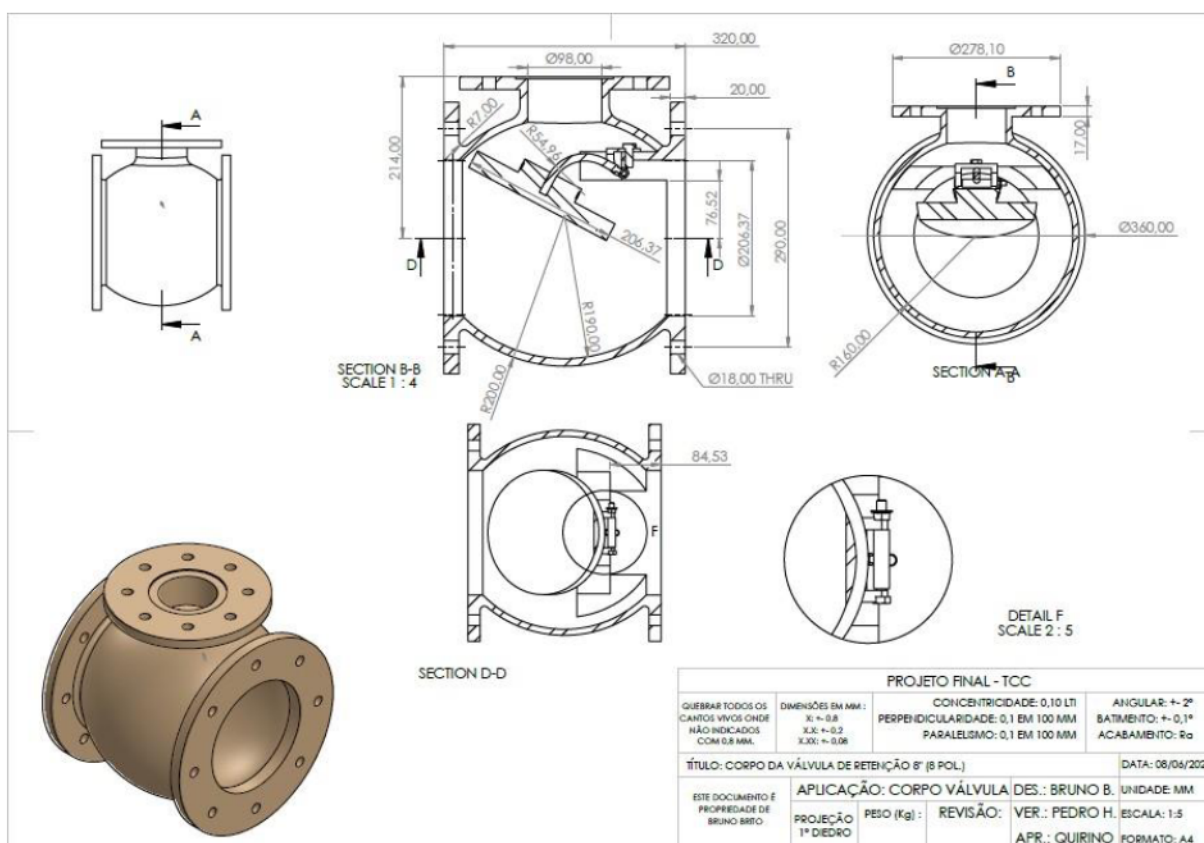


Figura 14 – Corpo da válvula de retenção 8" (pol.)
Fonte: Autoria própria

3.1.2 Válvula Gaveta

As válvulas gavetas apresentadas abaixo são instaladas tanto após a bomba quanto em série no trecho final de recalque, composta por tubulação de 8 polegadas, sendo três no total. Essa configuração é essencial para garantir a operação segura, manutenção eficiente do sistema de escoamento de biodiesel e do reservatório.

A fabricação também segue requisitos estabelecidos nas normas ASME B16.34 para válvulas de aço e a norma ASTM A351 para materiais fundidos em aço inoxidável, compatíveis com biodiesel.

O projeto da válvula também contempla os requisitos de resistência à pressão e temperatura definidos pela norma, bem como atende às especificações sanitárias, quando aplicável. A superfície interna é acabada com rugosidade máxima de 1,6 μm (Ra), a fim de minimizar o acúmulo de resíduos de biodiesel. (ASME B31.3, 2020).

Conforme descrito na seção 3.3, a adoção da Classe 150 também padroniza as dimensões de face a face e as conexões flangeadas. Sendo adequada para serviços de baixa pressão e possuindo a função principal de permitir o isolamento completo da linha, de modo que se possibilite intervenções e manutenções sem a necessidade de esvaziar todo o sistema. A especificação correta da classe de pressão contribui para vida útil do acessório e minimizando riscos de falhas, essenciais para preservar a integridade do sistema de transporte de biodiesel. (ASME B16.5, 2020)

Fica evidenciado na figura 15 a montagem de válvula gaveta número 1 e seus respectivos componentes do primeiro modelo utilizada em linha e localizada, como informado no último capítulo, logo antes do tanque reservatório.

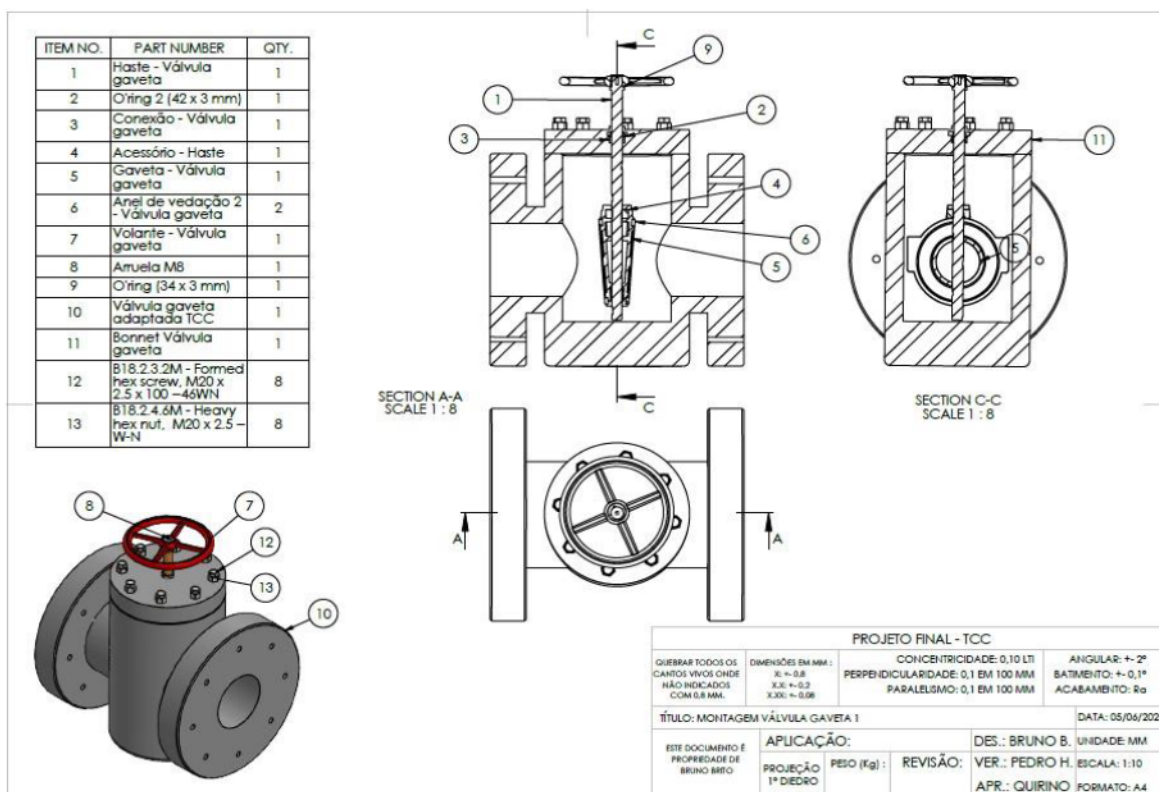


Figura 15 – Montagem de válvula gaveta 1 – 8” (pol.)
Fonte: Autoria própria

Pode-se visualizar na figura 16 desenho mecânico correspondente a usinagem do corpo interno da válvula gaveta com suas cotas correspondentes para correta usinagem.

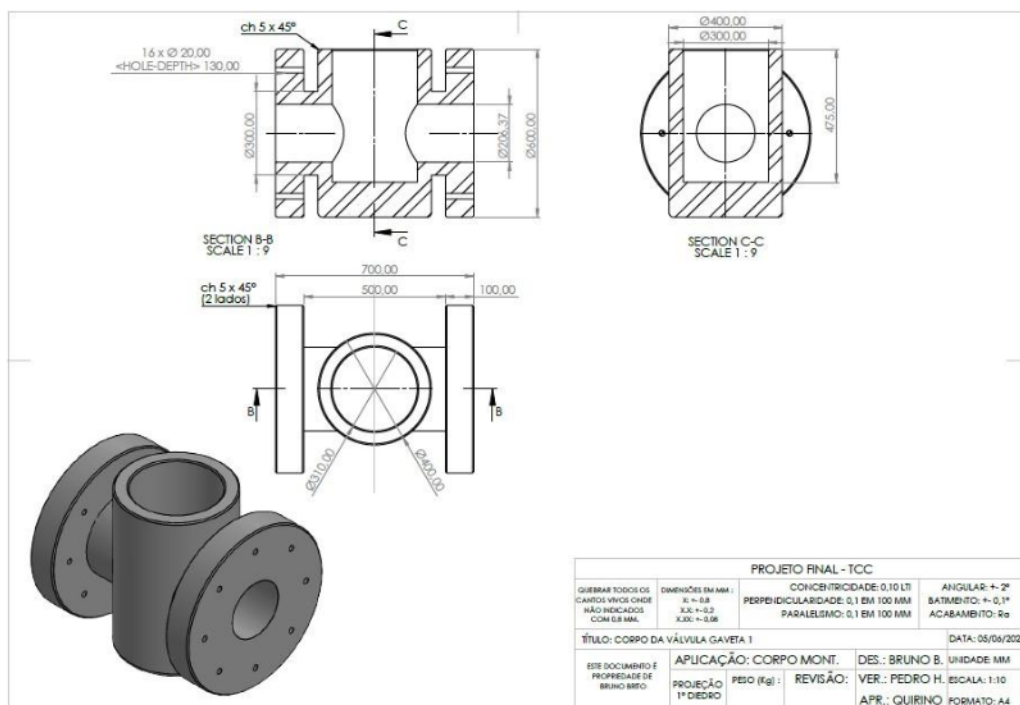


Figura 16 – Corpo da válvula gaveta 1 de 8” (pol.)

Fonte: Autoria própria

A fabricação se inicia após compra de material fundido de aço inox 316 com sobremetal a ser usinado e acabado em algumas cotas. Deve ser usinado em torno CNC com 3 lados a serem especificado em processo de fabricação. Tanto a usinagem em torno CNC quanto a abertura de círculos de furação serão abertos com respectivos programas CNC desenvolvidos em software ESPRIT. Será necessário se atentar aos requisitos de tolerância e de acabamento no interno das peças, onde ocorre a passagem do fluido. Círculos de furação serão abertos em centro de usinagem e por fim o material passa por jateamento e pintura final.

A haste e demais acessórios serão usinados a partir de matéria bruta em barra redonda laminada ou trefilada, dependendo da função e do diâmetro. Elementos de fixação como arruelas, porcas e parafusos serão adquiridos externamente.

Diante do elucidado na figura 17, são determinados os componentes necessários para fabricação e montagem de segunda válvula gaveta, para que ao final, possa ser inserida depois da bomba e em linha em série com a válvula gaveta 1.

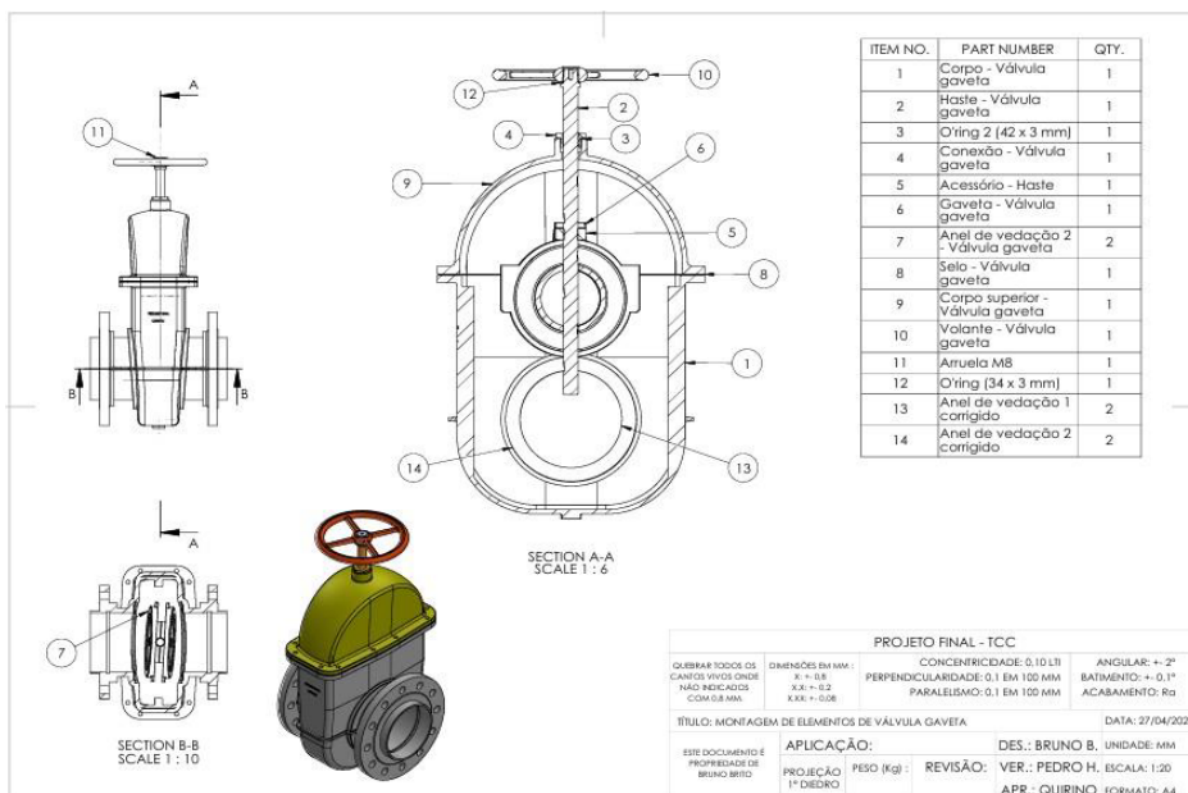


Figura 17 – Componentes de projeto de válvula gaveta 2 de 8" (pol.)

Fonte: Autoria própria

3.1.3 Válvula Esfera

A instalação de válvulas esferas no sistema se localizam no trecho inicial de 4 polegadas e no meio com tubulação de 6 polegadas, sendo utilizada três vezes. As duas com schedule 40.

A fabricação também seguirá requisitos estabelecidos nas normas ASME B16.34 para válvulas de aço e ASTM A351 para materiais fundidos em aço inoxidável, compatíveis com biodiesel. O corpo e os componentes internos serão em aço inoxidável austenítico ASTM A351 Gr. CF8M.

O projeto da esfera e do interno do corpo por onde a esfera gira $\frac{1}{4}$ de volta também contemplará os requisitos de resistência à pressão e temperatura definidos pela norma, bem como atenderá às especificações sanitárias, quando aplicável. A superfície interna será acabada com rugosidade máxima de $1,6 \mu\text{m}$ (Ra), a fim de minimizar o acúmulo de resíduos de biodiesel. (ASME B31.3, 2020).

A construção da válvula visa atender a Classe 150 e também padroniza as dimensões de face a face e as conexões flangeadas, conforme figura 18. Sendo adequada para serviços de baixa pressão e possuindo a função principal de permitir o isolamento completo da linha, de modo que se possibilite intervenções e manutenções sem a necessidade de esvaziar todo o sistema.

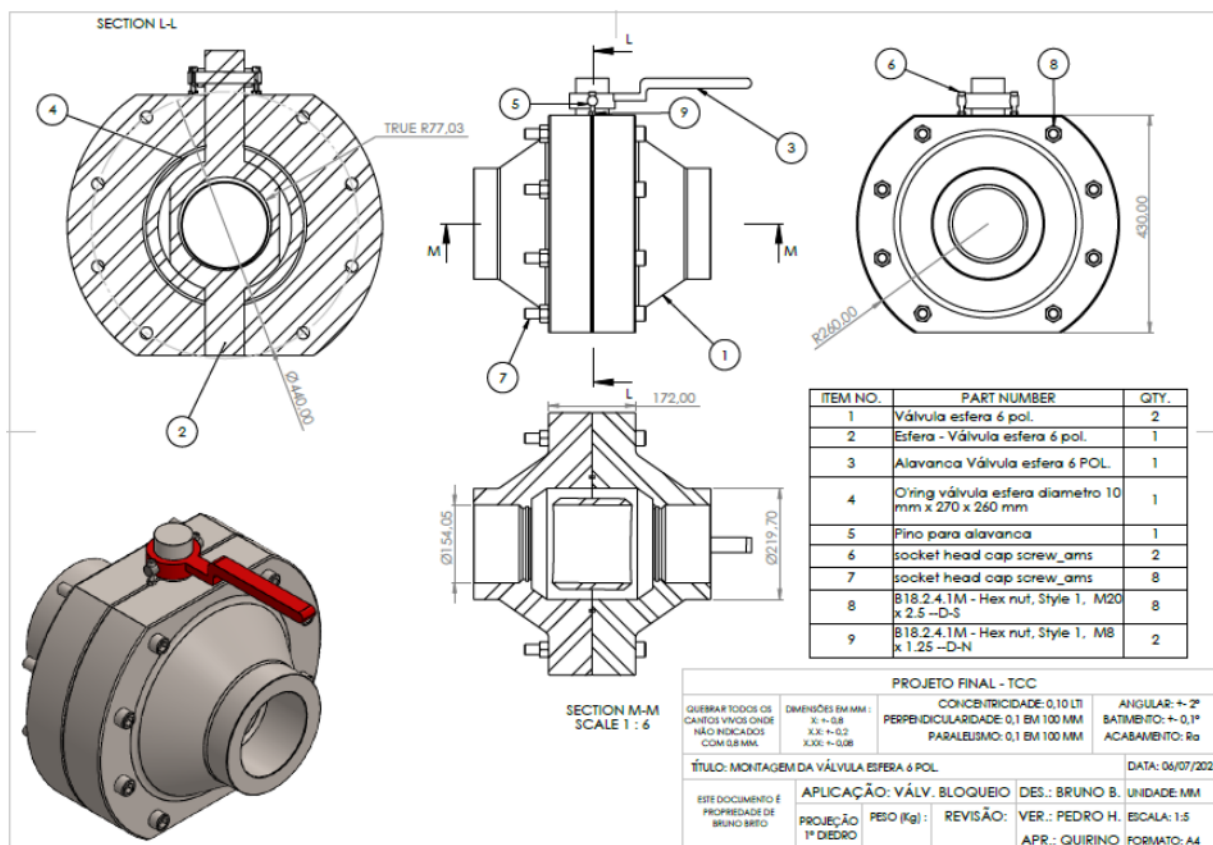


Figura 18 – Montagem da válvula esfera de 6" (pol.) classe 150

Fonte: autoria própria

Pode-se visualizar a construção da válvula esfera com relação a seus componentes. Ao efetuar o giro em $\frac{1}{4}$ de volta, com torque aplicado na alavanca, é realizado o bloqueio do fluido e vedação total realizada com o'ring, montado de maneira correta no canal projetado.

A esfera será provida de barra redonda de aço inox 316L por resistir mais a corrosão do que o 316. O material então é cortado próximo ao comprimento e tem usinagem iniciada em torno CNC. Usina-se dos dois lados, primeiro um e depois o outro, realizando o perfil da esfera e furando e usinando interno a passagem de 6 polegadas. Importante se atentar ao acabamento de 1.6. Desbastar e, em seguida, acabar cotas para obtenção das medidas finais, tanto no interno quanto no externo.

O corpo de aço inox 316 será obtido através de processo de fundição e, em seguida, seu interno e também parte do externo passarão por usinagem (desbaste e acabamento), com adequados insertos. O corpo já vem com furo realizado na fundição, por onde será a passagem do fluido e lá será realizado acabamento.

3.2 LIGAÇÕES SOLDADAS

Em tubulações industriais, a maior parte das ligações são soldadas, por meio de solda com fusão com adição do eletrodo, podendo vir a ser de topo ou de encaixe. As ligações passam a garantir boa resistência mecânica, estanqueidade perfeita e permanente, facilidades na aplicação de isolante térmico e pintura e sem a necessidade de manutenção. (SILVA TELLES, 2012)

A norma ASME B.31.3. permite o emprego de ligações soldadas, sem restrições quanto ao serviço, a pressão ou a temperatura, em tubos de qualquer material metálico para o qual seja possível qualificar devidamente um procedimento de soldagem aceitável. Ligações soldadas não são possíveis em tubulações galvanizadas, que não é o caso deste projeto. (SILVA TELLES, 2012)

A solda de topo é o sistema mais usado para as ligações entre de tubos de 2", ou maiores, quaisquer seja o aço. Portanto, aplicável no presente estudo. Pode ser aplicado para qualquer pressão e temperatura, inclusive para serviços severos.

Este processo é recomendado em tubulações de aço inoxidável e é tecnicamente adequada para o escoamento de biodiesel a 30 °C, oferecendo excelente vedação, resistência mecânica e proteção contra corrosão. Quando executada segundo os procedimentos corretos (especialmente com processo TIG), o que garante a durabilidade e confiabilidade do sistema de transporte do fluido.

Os tubos e demais acessórios para o uso com solda de topo devem ter as extremidades com chanfros para solda, de acordo com padrões da norma ASME.B.16.25. Para os tubos com espessura entre 3/16" e 3/4", devem ter chanfro em "V" com ângulo incluso de 75 graus. Enquanto a abertura da raiz da solda (fresta) dependerá da espessura da parede. (SILVA TELLES, 2012)

De acordo com a norma ASME B.31.3 há previsões com relação a soldagem de tubos, incluindo sequência de soldagem, tratamentos térmicos, testes de inspeção e aceitação.

Não é possível desmontar tubulação para realizar manutenção, mas isso não é um problema pelo fato de as manutenções serem realizadas nos trechos da linha com utilização do pig instrumentado, tanto para retirar detritos que se acumulam no interno, tanto para acompanhar como se encontra a parede interna destas tubulações e do avanço ou não dos processos de corrosão. (SILVA TELLES, 2012)

3.3 LIGAÇÕES FLANGEADAS

Uma ligação flangeada é composta por dois flanges, jogo de estojos com porcas e junta de vedação. Trechos com ligações flangeadas são facilmente desmontáveis. Os flanges podem ser rosqueados ou soldados com relação ao tubo.

Se optou por ter essa ligação soldada conforme figura 19, pelo fato de possuir maior estanqueidade. (SILVA TELLES, 2012)

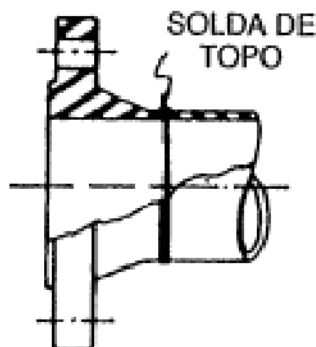


Figura 19 - Solda de topo em ligação flangeada entre tubulações.
Fonte: SILVA TELLES, 2012.

A ligação de tubos com as válvulas e os equipamentos (bombas, compressores, tanques, vasos, etc.), e em alguns pontos ao longo da tubulação, onde seja necessária a desmontagem, devido sedimentos e incrustações que se acumulam no interno, utiliza-se ligação flangeada, conforme figura 20. E isso fica bem claro pela necessidade de realização de futuras manutenção nos equipamentos e por isso não se utiliza ligações soldadas nestes pontos. Isso pôde ser observado na planta 3D do sistema.

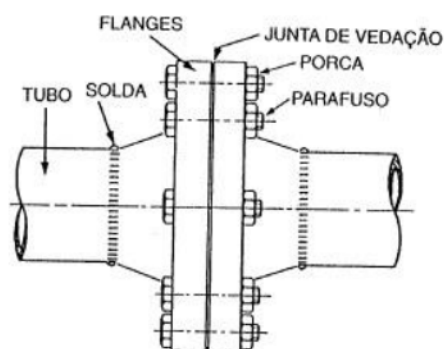


Figura 20 - Ligação flangeada entre tubulações.
Fonte: SILVA TELLES, 2012.

Ligações correntes ao longo da tubulação	Serviços de baixa responsabilidade, ou não-severos	Diâmetros até 4":	Ligações rosqueadas com luvas
		Diâmetros de 6" ou maiores:	Solda de topo
	Serviços severos	Diâmetros até 1½":	Ligações de solda de encaixe com luvas*
		Diâmetros de 2" ou maiores:	Solda de topo
Ligações nos extremos da tubulação, ou onde for exigida facilidade de desmontagem	Serviços de baixa responsabilidade, ou não-severos	Diâmetros até 4":	Ligações rosqueadas com uniões
		Diâmetros de 6" ou maiores:	Ligações flangeadas (flanges rosqueados ou sobrepostos)
	Serviços severos	Diâmetros até 1½":	Ligações de solda de encaixe com uniões
		Diâmetros de 2" ou maiores:	Ligações flangeadas (flanges de pescoço ou de tipo anel)

Tabela 7 – Tipos de ligações diante dos diâmetros de tubulação

Fonte: SILVA TELLES, 2012.

Recomenda-se a utilização de flanges na interligação entre tubulações e válvulas, sendo essencial a seleção adequada da classe de pressão para assegurar o escoamento eficiente e seguro do fluido no sistema. Essa norma abrange flanges fabricados para diâmetros nominais entre ½" e 24", sendo, portanto, aplicável aos diâmetros de 4", 6" e 8". A classe de pressão deve ser definida com base nas condições específicas de operação, como pressão e temperatura, podendo variar entre as classes padronizadas: 150, 300, 400, 600, 900, 1500 e 2500. (ASME B16.5, 2020).

Este tipo de ligação deve ser usado no menor número possível, pelo fato de ser ponto de possível vazamento, pois não garantem a estanqueidade igual as ligações soldadas.

No sistema de tubulação projetado para o escoamento de biodiesel a 30 °C, operando sob classe de pressão 150, adota-se a utilização de soldas de topo nos trechos contínuos da linha, uma vez que esta técnica proporciona continuidade mecânica e vedação eficiente, reduzindo riscos de vazamentos e perdas de carga. A soldagem de topo, especialmente quando executada por processo TIG, é amplamente recomendada para tubos de aço inoxidável AISI 304 devido à sua precisão e à baixa geração de contaminações. Por outro lado, em pontos estratégicos que requerem desmontagem para manutenção, inspeção ou substituição de componentes — como válvulas de retenção, esfera ou gaveta —, opta-se por conexões flangeadas. Essa abordagem técnica equilibra eficiência hidráulica, segurança operacional e facilidade

de manutenção, assegurando a integridade e a confiabilidade do sistema ao longo do tempo. A figura 21 ilustra a ideia de transição entre os flanges e a tubulação.

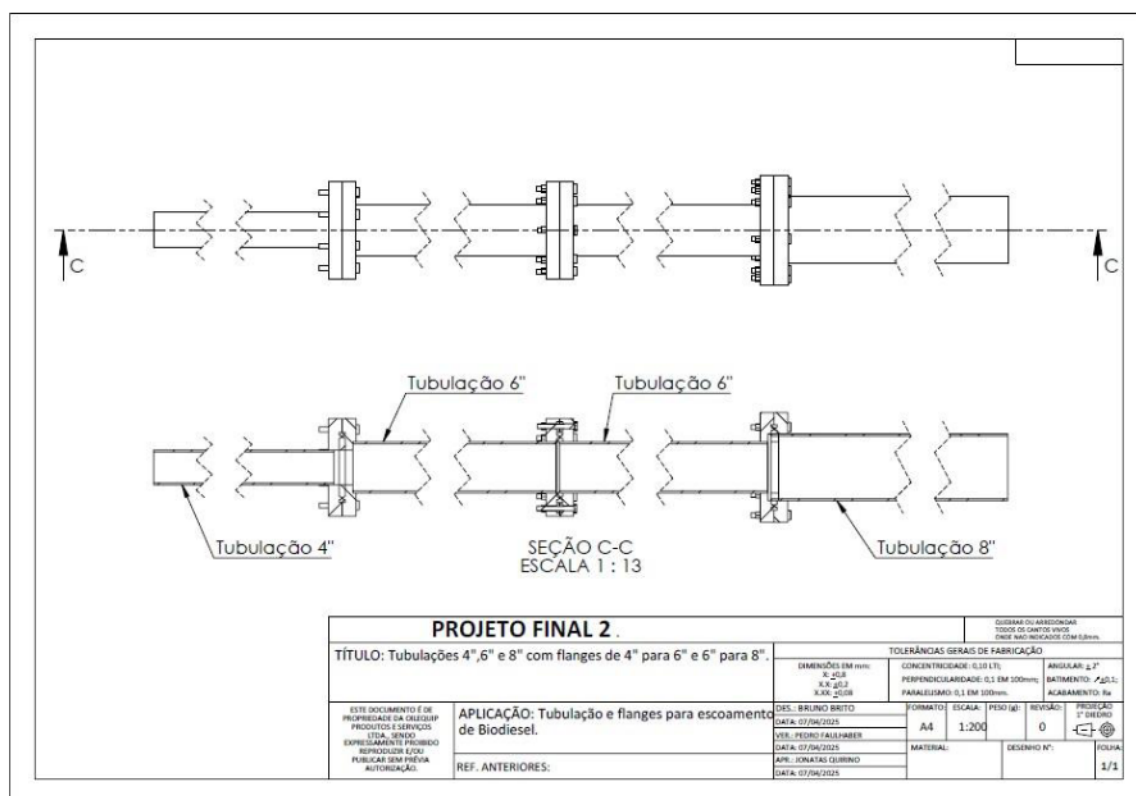


Figura 21 – Esquemática de transição 2D de flanges e tubulações (4, 6 e 8 polegadas)
Fonte – Autoria própria

Flanges de pescoço são o tipo mais utilizado em tubulações industriais para qualquer pressão e temperatura, sendo o diâmetro maior do que 2 polegadas. De todos os flanges não integrais é o mais resistente, com maior transmissão de esforços do flange para o tubo, que permite melhor aperto e que da menor origem a menores tensões residuais em consequência da soldagem e das diferenças de temperatura. Sendo ele ligado por solda de topo, sem descontinuidades que facilitem a concentração de esforços ou a corrosão. (SILVA TELLES, 2012)

Importante salientar que a ligação soldada entre tubulação e flanges de pescoço, a parte do tubo deve ser extremamente chanfrada para solda.

As válvulas industriais utilizadas nesse tipo de instalação geralmente já são fornecidas com extremidades flangeadas. Para garantir a compatibilidade entre os componentes e manter a integridade do sistema é essencial que as tubulações e conexões do reservatório também adotem o mesmo padrão de flangeamento.

3.4 MEDIDOR DE VAZÃO

No sistema de transferência de biodiesel entre caminhão-tanque e reservatório, a instalação de um medidor de vazão torna-se essencial para garantir o controle preciso da quantidade de fluido descarregada. Esse dispositivo é responsável por monitorar, em tempo real, o volume transferido, contribuindo para a rastreabilidade operacional, o controle de inventário e a prevenção de perdas ou extravasamentos. A sua instalação, preferencialmente após a bomba, se justifica pelo fato de que o escoamento nesse trecho ocorre de forma pressurizada e estável, favorecendo uma leitura precisa e contínua. Além disso, posicionar o medidor após a bomba evita problemas relacionados à entrada de ar ou cavitação, comuns em trechos sob sucção, garantindo maior confiabilidade na medição e na operação do sistema como um todo (ISO, 2003; ABNT, 2001; API, 2005).

Na figura 22 é possível visualizar as vistas e a isométrica do medidor de vazão projetado, onde montagem ocorre em trecho de linha reta do sistema em tubulação de 6 polegadas. O medidor de vazão do tipo Coriolis foi selecionado por sua alta precisão ($\pm 0,1$ a $0,25\%$) e capacidade de medir diretamente a vazão mássica, sendo ideal para o biodiesel, que possui variações de densidade. Apesar do custo elevado, é indicado para processos críticos e aplicações fiscais, oferecendo também dados de densidade e temperatura.

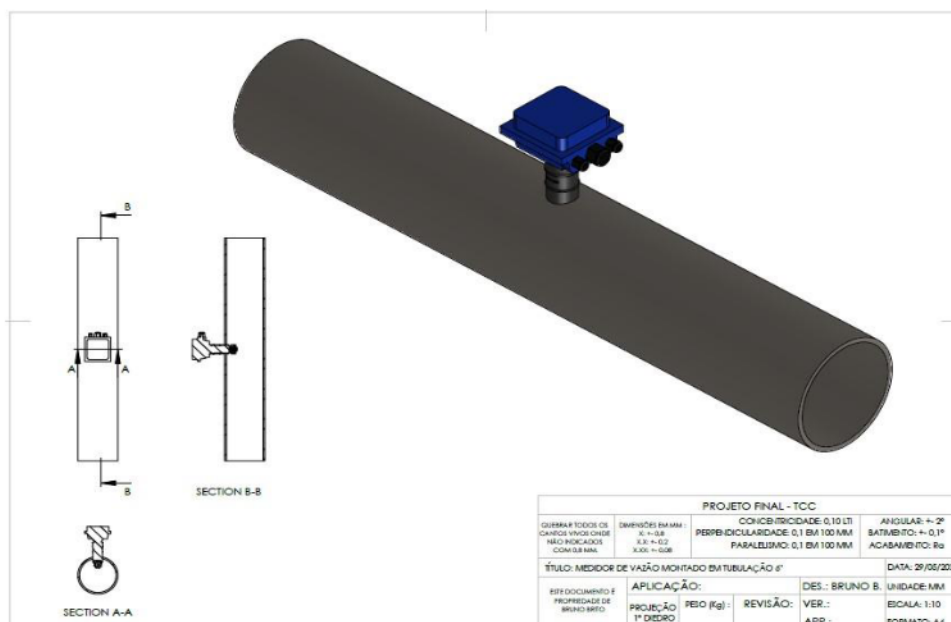


Figura 22– Medidor de vazão
Fonte: Autoria própria

4 ANÁLISE DA PERDA DE CARGA E RESULTADOS

Todos os fundamentos físicos são primordiais para os cálculos do projeto e é nisso em que o capítulo consiste, apresentar as equações que envolvem velocidade e perda de carga, a fim de servir de embasamento para simulações. A importância das abordagens técnicas estão atreladas ao nosso resultado.

O escoamento de qualquer fluido em uma tubulação resulta sempre em perda de energia ao longo que é percorrido seções longitudinais do sistema. Isso ocorre devido a resistências que se opõem ao escoamento, dissipadas na forma de calor. Podendo ser externas, devido ao atrito do fluido com a parede do tubo ou de mudanças de aceleração ou direções ou internas, devido ao atrito das moléculas do fluido uma com as outras. (SILVA TELLES, 2006).

Segundo (SILVA TELLES, 2006), o estudo da perda de carga nas tubulações utilizadas se baseia em dividir as redes de tubulações por trechos, de maneira não exista nenhum trecho de qualquer máquina capaz de de trocar trabalho com o exterior. Portanto, a única energia do fluido entre os pontos extremos de cada trecho da tubulação será decorrente das perdas de carga.

4.1 CÁLCULO DE VELOCIDADE EM TUBULAÇÕES

O cálculo da velocidade do fluido em uma tubulação é fundamental para o dimensionamento hidráulico de sistemas de transporte de líquidos e gases. A velocidade influencia diretamente a perda de carga, o regime de escoamento, a eficiência energética e a integridade dos componentes do sistema.

A equação básica que permite determinar a velocidade média do fluido (v) está descrita na Equação 2:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

A velocidade do fluido é um dos parâmetros mais relevantes no projeto hidráulico, pois influencia diretamente o desempenho e a durabilidade do sistema. Projetar com velocidades adequadas é essencial para garantir o equilíbrio entre eficiência hidráulica, economia e segurança operacional.

4.2 EQUAÇÃO DE BERNOULLI

A equação de Bernoulli é uma fórmula que descreve o comportamento de um fluido em movimento. Ela é baseada no princípio de conservação de energia. Ela implica que, ao longo do escoamento, a pressão do fluido diminui se a velocidade de escoamento aumenta. Ela é formulada para fluidos compressíveis e incompressíveis, e ela é muito utilizada para fluidos em tubulações ou condutos. A fórmula geral da equação de Bernoulli está descrita conforme a Equação 3.

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{constante} \quad (3)$$

4.3 NÚMERO DE REYNOLDS

O tipo de escoamento de um fluido em uma tubulação pode ser laminar ou turbulento, dependendo de várias condições, principalmente do Número de Reynolds, que permite diferenciar quantitativamente os escoamentos e se trata da razão entre a força de inércia e força viscosa. O Re é dado pela fórmula elaborada na Equação 4:

$$Re = \frac{\rho \times v \times D}{\eta} \quad (4)$$

No escoamento laminar, todos os filetes de líquido são paralelos entre si e as velocidades são invariáveis em direção e em grandeza. Enquanto no escoamento turbulento as partículas líquidas movem-se em todas as direções, com velocidades variáveis em direção e em grandeza de um ponto para outro. Para casos de velocidade excessivamente baixa, ocorre o laminar e na maioria dos casos ocorre o turbulento, como é o caso.

Para $2000 < Re < 4000$ o escoamento cai na região crítica e deve-se considerá-lo como turbulento, o que não é o caso. No caso de escoamentos turbulentos o número de Reynolds necessita ser maior do que 4000 e de que o fluido passa a apresentar uma mistura caótica e intensa, sendo sua perda de carga maior devido a dissipação de energia e sendo mais recorrente para altas velocidades ou em fluidos de baixa viscosidade.

4.4 PERDA DE CARGA LOCALIZADA

As perdas de carga localizadas ocorrem em pontos específicos do escoamento, como válvulas, curvas, entradas e saídas de tubulações, devido a perturbações no perfil de velocidade e turbulência geradas por alterações geométricas. Segundo Fox et al. (2014), essas perdas podem ser determinadas por duas abordagens principais:

- **Método do Comprimento Equivalente (L_e/D):** Nesse método, a perda de carga localizada é representada como um comprimento equivalente de tubo reto, considerando o fator de atrito de Darcy-Weisbach, demonstrado na Equação 5. Nosso estudo não fará uso deste método.

$$H_L = f \times \frac{L_e}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

- **Método do Coeficiente de perda (K):** Neste método, a perda localizada (H_L) será calculada pela Equação 6.

$$H_L = K \times \frac{v^2}{2g} \quad (6)$$

Neste trabalho, para o cálculo da perda de carga localizada, adotou-se o método do coeficiente de perda K, em vez do método do comprimento equivalente. Essa escolha se justifica por diversos fatores:

- Disponibilidade de dados: A maioria das tabelas técnicas, normas e catálogos de fabricantes fornece diretamente os valores de K para curvas, válvulas, entradas e outros elementos singulares. O método é amplamente consolidado em autores como Fox et al. (2014);
- Aplicabilidade universal: O coeficiente de perda pode ser utilizado independentemente do regime de escoamento e do fator de atrito da tubulação, o que simplifica a análise e evita depender do cálculo de f em cada caso;
- Precisão experimental: Os valores de K são geralmente obtidos por meio de ensaios laboratoriais padronizados e refletem diretamente o comportamento hidráulico de componentes reais, especialmente quando fornecidos por fabricantes.
- Simplicidade conceitual e computacional: O método com K resulta em uma

expressão direta da perda localizada em função da velocidade, facilitando sua implementação em planilhas, software ou modelagem manual.

Embora o método do comprimento equivalente seja também válido — e até útil em modelos que consideram apenas perdas distribuídas — ele exige a determinação do fator de atrito f , o que pode adicionar uma etapa a mais no cálculo. Por esse motivo, o método do coeficiente de perda K foi considerado mais direto e adequado aos objetivos deste trabalho.

4.5 PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA

A perda de carga distribuída é causada pelo atrito contínuo entre o fluido em escoamento e as paredes internas da tubulação. Essa perda está diretamente relacionada ao comprimento da tubulação, à velocidade do escoamento, ao diâmetro do tubo e às propriedades do fluido. O cálculo é normalmente feito pela equação de Darcy-Weisbach mostrada na Equação 7.

$$H_f = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad (7)$$

O fator de atrito f depende do número de Reynolds e da rugosidade relativa da tubulação. Uma forma precisa e prática de obtê-lo é utilizando a equação proposta por Churchill (1977), válida para qualquer regime de escoamento, seja laminar, transicional ou turbulento. O fator de atrito é calculado pela Equação 8.

$$f = 8 \times \left[\left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + (A + B)^{-1,5} \right]^{\frac{1}{12}} \quad (8)$$

Com,

$$A = \left(2,457 \times \ln \left[\left(\frac{7}{Re} \right)^{0,9} + 0,27 \times \frac{\varepsilon}{D} \right] \right)^{16}$$

e

$$B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16}$$

A equação de Churchill apresenta excelente desempenho em termos de precisão, com erro inferior a 2% quando comparada a métodos tradicionais, além de se aplicar tanto a escoamentos em tubos lisos quanto rugosos, e em toda faixa de número de Reynolds, inclusive na região de transição.

Esta formulação evita o uso de gráficos (como o diagrama de Moody) e elimina a necessidade de métodos iterativos, como ocorre com a equação de Colebrook-White. Por isso, a equação de Churchill é especialmente útil para aplicações computacionais e para sistemas com transições de regime de escoamento.

5 RESULTADOS

Para maior entendimento na elaboração dos cálculos realizados neste capítulo, é importante destacar a premissa que estará presente em todas as etapas de construção dos resultados.

Inicialmente, a tubulação completa será dividida em 5 trechos para efeito dos cálculos:

- O trecho 1 é o caminho da tubulação de 6 polegadas do mangote até a curva de 90 antes de entrar na sucção da bomba;
- O trecho 2 é o caminho de recalque da bomba de 4 polegadas até chegar ao trecho de 8;
- O trecho 3 é o tubo de entrada da bomba de 6 polegadas, logo após o trecho 1;
- O trecho 4 é o tubo de 3 polegadas da saída da bomba até chegar a ampliação para 4 polegadas, o qual começará o trecho 2;
- O trecho 5 é o maior comprimento de 8 polegadas, que será o caminho que chegará até o reservatório.

5.1 VELOCIDADE

Após a apresentação dos trechos usados para os cálculos, o resultado começa com a determinação da velocidade de escoamento em todos os trechos da tubulação. Considerando a vazão necessária de 0,020 m³/s:

$$v_1 = \frac{0,020}{\frac{\pi \times 0,15^2}{4}}$$

Para o trecho 1, a velocidade será de 1,13 m/s.

$$v_2 = \frac{0,020}{\frac{\pi \times 0,10^2}{4}}$$

Para o trecho 2, a velocidade será de 2,55 m/s.

$$v_3 = \frac{0,020}{\frac{\pi \times 0,15^2}{4}}$$

Para o trecho 3, a velocidade será de 1,13 m/s.

$$v_4 = \frac{0,020}{\frac{\pi \times 0,075^2}{4}}$$

Para o trecho 4, a velocidade será de 4,53 m/s.

$$v_5 = \frac{0,020}{\frac{\pi \times 0,20^2}{4}}$$

Para o trecho 5, a velocidade será de 0,64 m/s.

5.2 NÚMERO DE REYNOLDS

Com base nos valores de velocidade obtidos para cada trecho da tubulação, torna-se possível, em sequência, o cálculo do número de Reynolds, parâmetro fundamental para a caracterização do regime de escoamento.

$$Re_1 = \frac{1,13 \times 0,15}{0,000006}$$

Para o trecho 1, o número de Reynolds será 28294.

$$Re_2 = \frac{2,55 \times 0,1}{0,000006}$$

Para o trecho 2, o número de Reynolds será 42441.

$$Re_3 = \frac{1,13 \times 0,15}{0,000006}$$

Para o trecho 3, o número de Reynolds será 28294.

$$Re_4 = \frac{4,53 \times 0,075}{0,000006}$$

Para o trecho 4, o número de Reynolds será 56588.

$$Re_5 = \frac{0,64 \times 0,20}{0,000006}$$

Para o trecho 5, o número de Reynolds será 21221.

5.3 PERDA DE CARGA LOCALIZADA

Após o cálculo do número de Reynolds, inicia-se o cálculo da perda de carga. Seguindo os trechos citados anteriormente, contam-se as peças para cada trecho, para ter o somatório dos Ks de cada peça. Desta forma, os resultados estão mostrados na Tabela 8 abaixo:

Trecho	Peça	Quantidade	K	K x Qtd
Trecho 1	Válvula de Retenção	1	2,5	2,5
	Válvula Esfera	1	0,05	0,05
			ΣK	2,55
Trecho 2	Curva 90	3	0,4	1,2
	Ampliação	2	0,3	0,6
	Válvula Gaveta	1	0,2	0,2
	Tê de saída lateral	1	1,8	1,8
	Válvula de Retenção	1	2,5	2,5
	Válvula Esfera	2	0,05	0,1
			ΣK	6,4
Trecho 3	Curva 90	1	0,4	0,4
			ΣK	0,4
Trecho 4	Curva 90	2	0,4	0,8
	Ampliação	1	0,3	0,3
			ΣK	1,1
Trecho 5	Curva 90	8	0,4	3,2
	Curva 45	2	0,2	0,4
	Válvula Gaveta	2	0,2	0,4
	Tê de passagem direta	1	0,6	0,6
	Válvula de Retenção	1	2,5	2,5
			ΣK	7,1

Tabela 8– Dados para o cálculo de perda de carga localizada por trecho
Fonte: Autoria Própria

Com os valores de K dados na tabela 9 acima, os resultados de perda de carga localizada são calculados.

$$H_{L1} = 2,55 \times \frac{1,13^2}{2 \times 9,81}$$

Para o trecho 1, a perda de carga localizada será de 0,17 metros.

$$H_{L2} = 6,4 \times \frac{2,55^2}{2 \times 9,81}$$

Para o trecho 2, a perda de carga localizada será de 2,12 metros.

$$H_{L3} = 0,4 \times \frac{1,13^2}{2 \times 9,81}$$

Para o trecho 3, a perda de carga localizada será de 0,026 metros.

$$H_{L4} = 1,1 \times \frac{4,53^2}{2 \times 9,81}$$

Para o trecho 4, a perda de carga localizada será de 1,15 metros.

$$H_{L5} = 7,1 \times \frac{0,64^2}{2 \times 9,81}$$

Para o trecho 5, a perda de carga localizada será de 0,15 metros.

Estes valores são os resultados referentes à perda localizada por trecho, porém para a perda de carga geral ser calculada a fim de inclusão na curva do sistema, um coeficiente C é calculado para ser multiplicado pelo valor da vazão ao quadrado. O valor de C é calculado pela Equação 9.

$$C = 8 \times \frac{\sum K}{g \times \pi^2 \times D^2} \quad (9)$$

e seus resultados estão descritos na tabela 9 abaixo:

hL1	hL2	hL3	hL4	hL5
416,19	5288,12	65,29	2872,56	366,66

Tabela 9 – Valores do coeficiente C em m⁻⁵.s²

Fonte: Autoria própria

5.4 PERDA DE CARGA DISTRIBUÍDA

Para o cálculo de perda de carga distribuída e utilizando o Método de Churchill, a tabela 10 abaixo mostra os resultados do fator de atrito f para cada trecho. No caso de tubulações fabricadas com chapas de aço inoxidável conforme a norma ASTM A240 — com acabamento interno comercial típico (como 2B ou BA) — a rugosidade absoluta pode ser assumida como 0,0015 mm, valor característico de superfícies metálicas lisas obtidas por laminação a frio.

Trecho	Reynolds (Re)	e/D	A	B	f (fator de atrito)
Trecho 1	28294,21	0,00001	1,66E+20	91,811	0,023753
Trecho 2	42441,32	0,000015	3,51E+20	0,1398	0,021622
Trecho 3	28294,21	0,00001	1,66E+20	91,811	0,023753
Trecho 4	56588,42	0,00002	5,83E+20	0,0014	0,020297
Trecho 5	21220,66	0,0000075	9,46E+19	9160,4	0,025475

Tabela 10 – Dados para o cálculo do fator de atrito utilizando o método de Churchill

Fonte: Autoria própria

Por fim, estes valores de fator de atrito por trecho são utilizados na equação de Darcy-Weisbach para o cálculo de perda de carga distribuída, e os resultados são encontrados na tabela 11 abaixo.

hf1	63,06289	*Q^2
hf2	1738,318	*Q^2
hf3	12,92272	*Q^2
hf4	2508,819	*Q^2
hf5	877,1082	*Q^2

Tabela 11 – Resultado dos valores de perda de carga distribuída por trecho
Fonte: Autoria própria

Esta tabela demonstra o valor de C em $m^{-5}.s^2$, que é um coeficiente que multiplica a vazão ao quadrado, para transformar este valor em perda de carga distribuída total, e a partir disto montar uma curva ao sistema. Seu valor é encontrado pela Equação 10.

$$C = f \times 8 \times \frac{L}{\pi^2 \times g \times D^5} \quad (10)$$

5.5 BOMBA

O dimensionamento da bomba foi inicialmente direcionado para operação com água como fluido, porém, é necessário alterar parâmetros que correspondam ao biodiesel, como. Isso ocorre pelo fato da viscosidade do fluido que se encontrará em operação ser maior do que o da água, além da densidade também ser menor e isso influencia ligeiramente na curva gerada.

Importante se ater a vazão de 20 l/s encontrada em premissas do projeto (2.1).

Considerando os dados obtidos abaixo para Q (vazão) e H (altura manométrica), temos:

Para a curva do sistema:

SISTEMA						
Q (m³/h)	0	10	20	30	40	50
H (m)	2	3,650424	8,601695	16,85381	28,40678	43,2606

Tabela 12- Dados para obtenção da curva do sistema
Fonte: dados obtidos através de análise das plantas

$$H = 2 - 0 \text{ m} = 2\text{m}$$

A partir deste ponto, os próximos valores de altura manométrica são encontrados com base em:

$$hf = 5623,569 \, m^{-5} x \, s^2 \text{ e } hL = 10880,67 m^{-5} x \, s^2$$

$$H = 2m + (hf + hL) * Q^2$$

Para a curva da bomba:

BOMBA										
Q (m³/h)	53,4596	50,7163	50,0862	48,8017	45,0811	43,649	41,791	30,864	26,431	0
H (m)	9,9558	10,4428	10,9072	11,2017	11,779	12,458	13,251	14,52	15,256	16,196

Tabela 13– Dados para obtenção da curva da bomba
Fonte: dados obtidos através de análise das plantas

Portanto, diante dos valores de parâmetros apresentados acima foi gerado gráfico com curva do sistema e curva da bomba ilustrados na figura 23, de modo que ao localizar o ponto que existe interseção entre elas, encontra-se o ponto de operação da bomba.

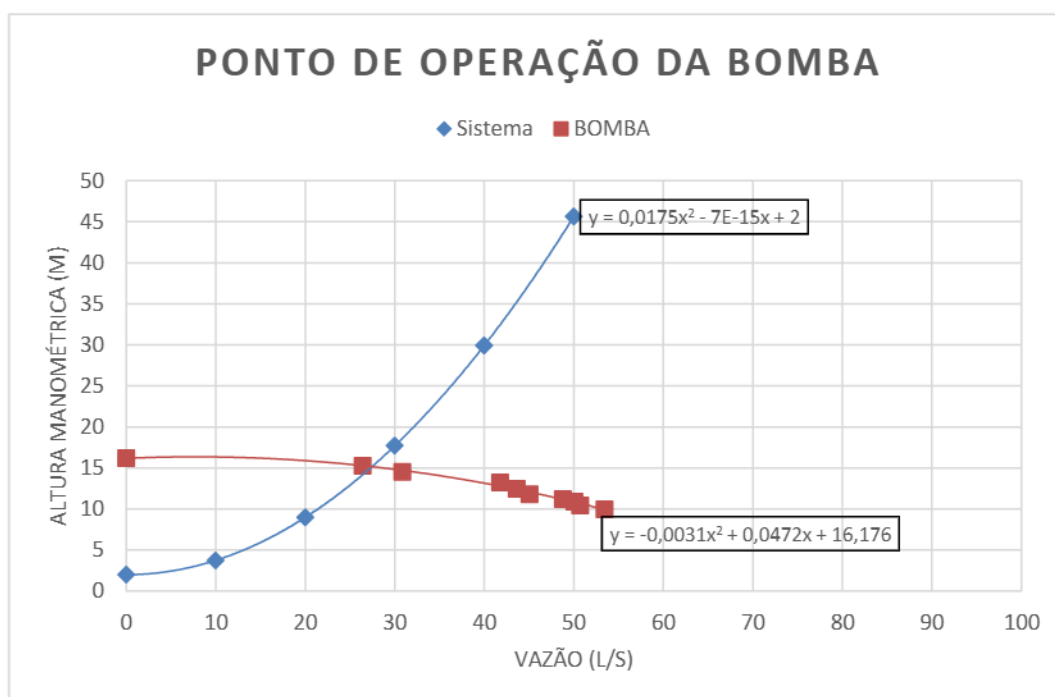


Figura 23 – Ponto de operação da bomba
Fonte: dados obtidos através de análises da planta

É possível visualizar que a equação que rege a curva do sistema é

$$H = 0,0175 \cdot x^2 - 7xE - 15 \cdot x + 2.$$

Sendo que o eixo X corresponde aos valores de vazão, como pode-se visualizar acima. Portanto, a curva mostra que a altura aumenta com o quadrado da vazão, típico de algumas curvas ajustadas experimentalmente ou de sistemas hidráulicos.

Enquanto também é possível visualizar que a curva que rege a curva da bomba é $H = -0,0031x^2 + 0,0472x + 16,176$. E partindo do princípio que o eixo X corresponde aos valores de vazão, o coeficiente indica que, à medida que a vazão aumenta, a altura fornecida pela bomba diminui, o que é o comportamento esperado para a maioria das bombas centrífugas.

Igulando as duas equações tem-se que:

$$X = Vazão = 24,4 \text{ l/s}$$

$$Y = 15,14 \text{ m}$$

Porém, utilizar-se-á região a esquerda do ponto de operação, que são valores seguros para se selecionar a bomba, obtendo-se:

$$H = 14,0\text{m}$$

$$Vazão (Q) = 25,8 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 92,88 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$Q = \frac{92,88}{3600} = 0,0258 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Encontrando a potência para operar Biodiesel:

$$P_{hid} = 900 \cdot 9,81 \cdot 0,0258 \cdot 14,0 \approx 3,189 \text{ kW}$$

Portanto, a potência no eixo da bomba é de:

$$P_{mec} \approx 4,335 \text{ cv}$$

Assumindo rendimento da bomba de 70%, tem-se:

$$P_{bomba} = \frac{\eta}{P_{hid}} = \frac{4,335}{0,7} = 6,19 \text{ cv}$$

Portanto, é necessário uma bomba com potência mínima de 6,19 cv, que opere com 25,8 l/s e 14 m de altura manométrica, com eficiência de ~70%. Visando garantir uma margem técnica de segurança, é selecionada bomba de 7,5 cv para operar o sistema.

Essa prática é recomendada para compensar variações operacionais, perdas mecânicas adicionais, eventual redução de eficiência da bomba ao longo do tempo e

para evitar o acionamento constante de dispositivos de proteção térmica. Além disso, a margem de potência proporciona maior robustez ao sistema e flexibilidade para futuras alterações nas condições de operação.

Sendo que esta bomba entrega seguinte pressão:

$$P = \rho \cdot g \cdot H = 900 \cdot 9,81 \cdot 14 = 123606 \text{ Pa} = 1,23 \text{ bar}$$

Portanto, diante dos cálculos apresentados acima, seleciona-se a seguinte bomba para realização da operação de toda a tubulação:

FAMÍLIA	MODELO	CV	ROTOR (mm)	ROSCA SUÇÃO BSP	ROSCA RECALQUE BSP	ALTURA MANOMETRICA (m.c.a.)																ALTURA MÁXIMA m.c.a.
						6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	
						VAZÃO (m³/h)																
ME 3	ME 3 60	6,0	119	3"	3"	120,2	111,4	103,2	86,5	77,8	61,1	52,2	0,0									21
	ME 3 75	7,5	128	3"	3"		124,8	115,2	112,1	104,7	89,4	79,5	70,8	60,1	44,2	0,0						25
	ME 3 100	10,0	135	3"	3"		129,3	126,1	121,7	114,8	105,2	99,5	88,3	74,4	61,2	50,3	0,0					28
	ME 3 125	12,5	140	3"	3"			131,8	128,1	125,4	118,5	109,2	99,7	86,6	77,1	65,2	52,8	0,0				30

Tabela 14 - Modelo ME 3 da WDM PUMPS de acordo com diferentes alturas manométricas (m) e vazões (m³/h)

Fonte: Catálogo WDM PUMPS

De acordo com a tabela acima, para bomba de 7,5 cv, é selecionado o modelo ME 3 75, com altura manométrica de 14m e vazão em 104,7 m³/h ou 29,08L/s. Valores acima do ponto de operação que encontramos no gráfico do valor definido da vazão (72 m³/h) em premissas do projeto (2.1).

Portanto, de acordo com interpretações do gráfico da curva de rendimento da bomba selecionada na figura 24 e de seu respectivo NPSH, selecionamos o modelo ME 3 75 e apresentamos vistas na figura 25 para melhor visualização da bomba que será utilizada na utilização do biodiesel. Este modelo de bomba é destinado a indústrias, em geral e em indústria química e petroquímica.

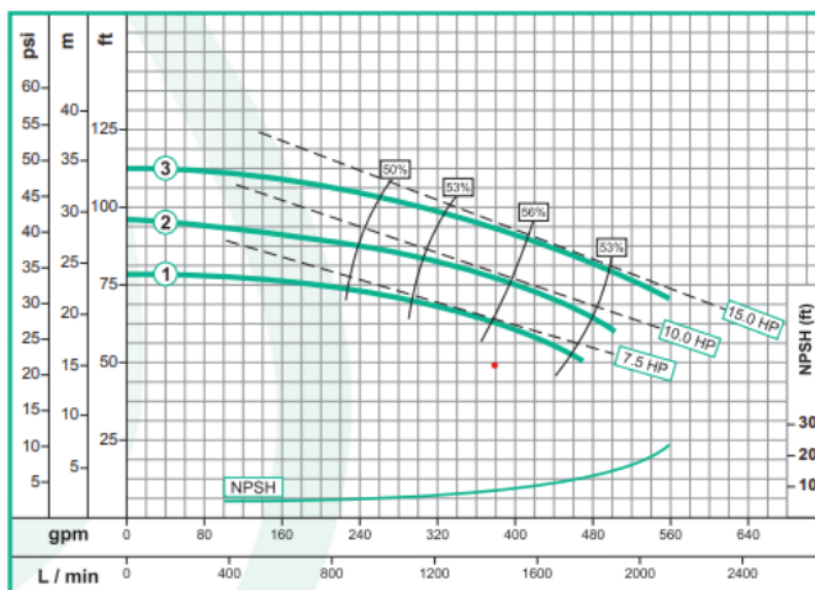


Figura 24 – Curva de rendimento e NPSH do modelo ME 3 75 da WD PUMPS
Fonte: Catálogo WDM PUMPS



Figura 25 – Vistas da bomba
Fonte: catálogo WDM PUMPS

6. DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentadas a simulação do escoamento de trechos específicos do projeto, além das otimizações elaboradas diante de análises de parâmetros do escoamento e de análises econômicas.

6.1 SIMULAÇÃO

O trecho final da tubulação (5) é o mais crítico, pelo fato de apresentar oito curvas a 90°, além da presença de três válvulas em série, tendendo a gerar maior perda de carga ao sistema do que os outros trechos. Portanto, é neste que será o sistema será analisado e, conseqüentemente, otimizado. Além do trecho 2 que também será simulado por ser o recalque, saída da bomba.

A simulação de escoamento de fluidos realizada no SolidWorks Flow Simulation baseia-se na solução numérica das equações fundamentais da mecânica dos fluidos, em especial as equações de Navier-Stokes para regime compressível ou incompressível, acopladas às equações de conservação de massa e energia. O software utiliza o método dos volumes finitos (FVM) como principal técnica de discretização espacial, permitindo a resolução das equações diferenciais parciais sobre uma malha tridimensional do domínio fluido.

As equações resolvidas incluem: conservação da massa, conservação do momento linear e conservação de energia. O Flow Simulation aplica ainda modelos de turbulência, como o $k-\epsilon$ padrão, para representar com precisão os efeitos de instabilidades e redemoinhos em regimes não laminares.

Embora o método de elementos finitos (FEM) seja tradicionalmente mais utilizado em análises estruturais, ele está presente no SolidWorks para estudos acoplados, como transferência de calor em sólidos e interação fluido-estrutura (FSI). Nestes casos, os resultados obtidos da simulação de fluxo podem ser utilizados como cargas térmicas ou de pressão sobre componentes estruturais, permitindo análises conjugadas de engenharia. A integração entre os métodos numéricos e o ambiente CAD possibilita simulações realistas em geometrias complexas, contribuindo para a validação de projetos, dimensionamento de componentes e otimização do escoamento interno em tubulações, reservatórios e válvulas.

É através das propriedades apresentadas na figura 26, onde algumas foram utilizadas como input nos cálculos realizados em capítulo anterior, como a densidade do biodiesel, que se realizou a simulação do escoamento do fluido no interno da tubulação no trecho 5.

Property	Value
Name	Biodiesel
Comments	
Density	900 kg/m ³
Dynamic viscosity	0.0049 Pa*s
Specific heat (Cp)	1970 J/(kg*K)
Thermal conductivity	0.17 W/(m*K)
Cavitation effect	☒
Molar mass	0.292 kg/mol
Temperature	303.15 K
Saturation pressure	1.75 Pa

Figura 26 – Tela de definição de propriedades dentro do fluid simulation Solidworks
Fonte: Autoria própria

6.2 ANÁLISE DE TRECHO 2 ATÉ TRECHO 5

No primeiro momento se dará o estudo que parte do ponto após a localização das duas válvulas esferas até a chegada do fluido no reservatório, passando por algumas quedas e também por três válvulas (duas gavetas e uma retenção). Como a bomba dimensionada possui pressão de 1.41 bar.

Para simulação, deve-se introduzir o valor de rugosidade da tubulação, conforme descrito na figura 27.

Parameter	Value
Roughness	0.015 micrometer

Figura 27 – Rugosidade interna da tubulação selecionada para simulação (aço AISI 304)
Fonte: Autoria própria

Selecionada a rugosidade interna do material e as condições de contorno para operação são obtidos os seguintes resultados.

Levando em consideração que a bomba selecionada de 7,5 cv, possui altura manométrica de 14m e vazão em 104,7 m³/h. Tem-se que:

$$P = 900 \cdot 9,81 \cdot 16 = 141,264 \text{ Pa} = 1,41 \text{ bar}$$

Porém, o trecho simulado corre após há bomba, onde já houve perda de carga, e para tal, é considerado valor arbitrário de pressão de entrada de 1.35 bar para escoar dentro da tubulação.

A simulação conforme figura 28 apresentou uma distribuição de pressão condizente com o esperado para escoamento interno de biodiesel em regime estável. Observou-se uma pressão máxima de 1,35 bar na entrada e mínima de 1,292 bar na saída, resultando em uma perda de carga total de aproximadamente 6 kPa. A variação contínua e suave da pressão indica um escoamento controlado, com ausência de instabilidades ou fenômenos de cavitação ao longo do percurso.

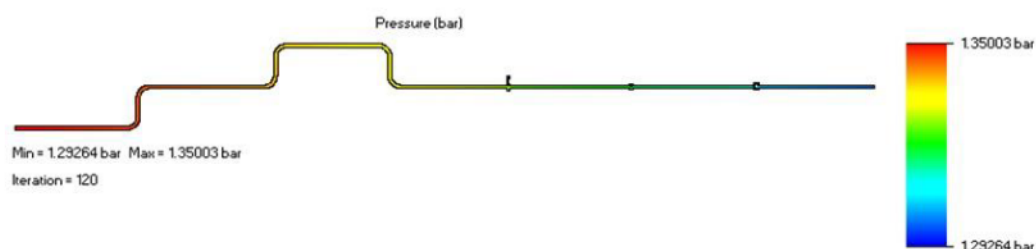


Figura 28 - Níveis de pressão do trecho 2 até reservatório
Fonte: Autoria própria

$$\Delta P = 1,350\text{bar} - 1,292\text{bar} = 0,058\text{bar} = 5,8\text{ Kpa}$$

É possível observar na figura 29 o comportamento da velocidade durante o escoamento, possuindo mínimo de -0.5039 m/s e máxima de 1.925 m/s. As maiores velocidades ocorreram no trecho reto principal, representando o escoamento forçado gerado pela condição de entrada. Notou-se, porém, a presença de regiões com velocidade negativa próximas às mudanças abruptas de direção, indicando recirculações locais causadas por separação de fluxo. Essas zonas podem gerar áreas de baixa renovação do fluido, impactando a eficiência hidráulica e exigindo atenção no projeto de conexões e curvas.

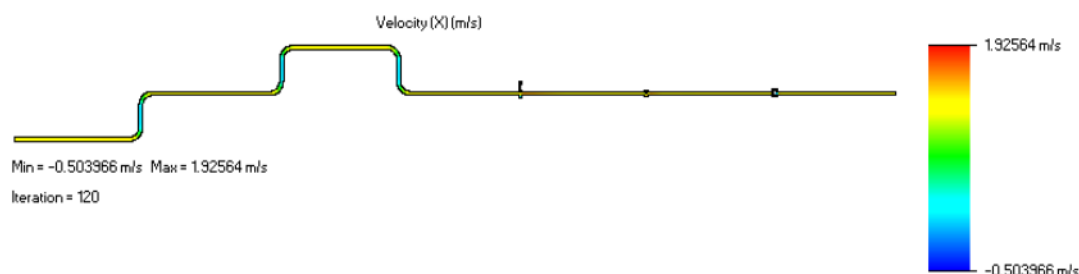


Figura 29 - Níveis de velocidade em relação eixo "X" em curvas presentes do trecho 2 até reservatório
Fonte: Autoria própria

6.3 COMPORTAMENTO DAS CURVAS DO TRECHO 2 AO 5

Nas curvas, observa-se uma redução da velocidade do fluido, conforme figura 30, particularmente na região interna da curvatura (representada por tons de azul e verde). Este fenômeno é atribuído à ação de forças centrífugas que deslocam o fluxo para a parede externa, gerando um gradiente de pressão transversal. Consequentemente, há a formação de fluxos secundários, como os vórtices de Dean, que promovem a dissipação de energia e a redistribuição do perfil de velocidade. Essa redistribuição resulta em zonas de baixa velocidade e, em casos extremos, em recirculação ou separação do fluxo, onde a componente de velocidade na direção principal pode ser nula ou negativa. As perdas de carga localizadas inerentes às mudanças de direção contribuem significativamente para a diminuição da velocidade média do escoamento.

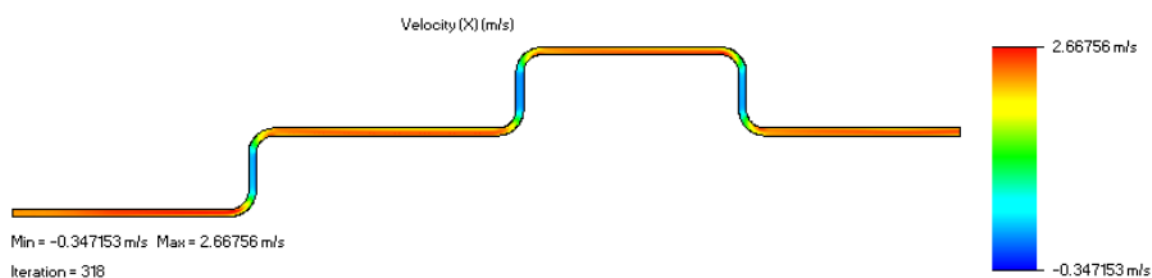


Figura 30 - Níveis de velocidade em relação eixo "X" em curvas presentes do trecho 2 ao 5

Fonte: Autoria própria

Em seções de queda (verticais descendentes), o gráfico indica uma diminuição da velocidade do fluido (tons de azul e verde). Embora a gravidade atue no sentido do fluxo, o comportamento da velocidade em sistemas de tubulação fechados é predominantemente influenciado pelas perdas de energia. As perdas de carga menores, associadas a conexões e mudanças de direção adjacentes, somadas às perdas de carga maiores por atrito ao longo do comprimento da tubulação, dissipam a energia mecânica do sistema. Em tubulações de diâmetro constante e sem adição de energia externa, essa dissipação se manifesta como uma redução da velocidade. A ocorrência de velocidades negativas nessas regiões sugere a presença de fenômenos complexos de fluxo, como separação e recirculação, que podem ser acentuados pela geometria da tubulação. Na figura 31 é possível visualizar o comportamento desta velocidade ao longo do escoamento.

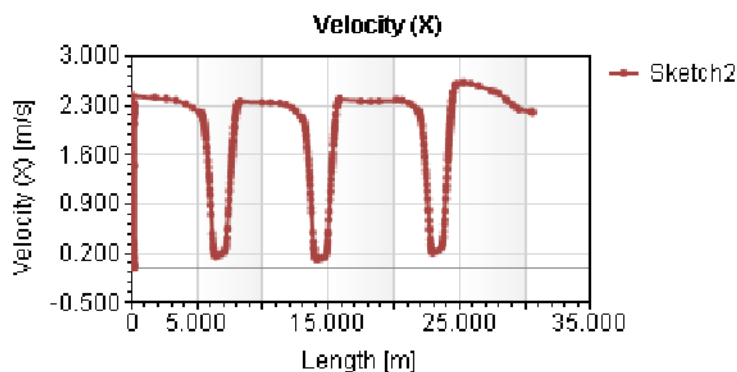


Figura 31 - Comportamento de velocidade do fluido nas curvas do trecho 2 ao 5
Fonte: Autoria própria

As velocidades tendem a aumentar no gráfico nas seções contínuas da tubulação e voltam a cair quando o fluido passa pelos cotovelos a 90 graus e pelas quedas já apresentadas. Para realizar esta medição foi utilizada o recurso “XY Plots”, traçando uma reta no interno da tubulação.

6.4 COMPORTAMENTO DAS VELOCIDADES E PRESSÕES NO TRECHO FINAL (TRÊS VÁLVULAS)

O objetivo desta análise de fluidos é de observar a perda de carga sofrida nos três últimos acessórios da tubulação, sendo todas válvulas. Este trecho vem logo a seguir do estudado acima, também do trecho 5. De modo que, caso necessário, possam sofrer algum tipo de alteração na estrutura ou se manterem em linha.

Nas linhas contínuas (seções retas), a velocidade do fluido é consistentemente mais elevada e uniforme (tons de laranja e vermelho). Nestas seções, o fluxo tende a se desenvolver plenamente, e as perdas de energia são primariamente atribuídas ao atrito da parede. A ausência de perturbações geométricas abruptas minimiza as perdas de carga localizadas e os efeitos de separação do fluxo. A velocidade máxima do escoamento é tipicamente observada nessas regiões.

É possível verificar na figura 32 que as variações bruscas de velocidade no gráfico são causadas pela presença das três válvulas ao longo do trajeto, que atuam como restrições internas ao fluxo, gerando zonas de aceleração, recirculação e dissipação de energia cinética, já esperado em simulações de fluidos com válvulas internas, especialmente válvulas de retenção.

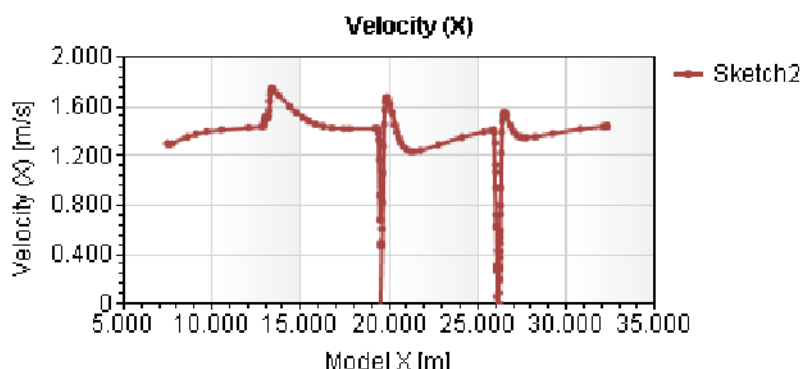


Figura 32 – Comportamento da velocidade no trecho final do sistema
Fonte: Autoria própria

Porém, se verifica que não há presença de linhas contínuas como na figura 31 em que são apresentadas as velocidades das curvas durante o sistema. Diante disto, se parte para um refinamento maior desta malha ou para um novo sketch em “XY plots”, pois as geometrias dessas passagens são bem complexas e isso pode ter causado algum tipo de erro no resultado. No caso desta mudança também não atender a anomalia identificada, pode ser resolvida com a retirada de válvula gaveta no mesmo trecho.

A primeira válvula gaveta apresenta queda de velocidade bem discreta se comparado a segunda válvula gaveta. São dois modelos diferentes, com corpos construídos de maneira que a passagem desta provavelmente deve estar mais obstrutiva no modelo.

Apresentado na figura 33 o panorama geral do comportamento da pressão durante o escoamento com diferentes cores, visualiza-se na figura 34 trecho referente somente as válvulas.

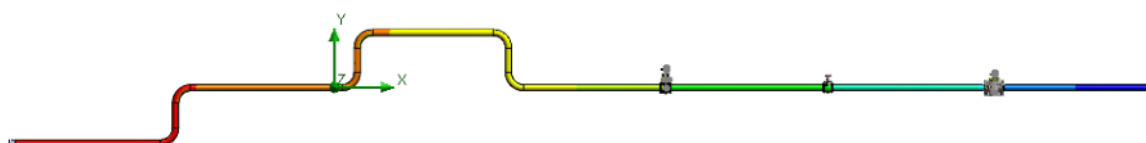


Figura 33 – Corte de superfície com passe na pressão do sistema
Fonte: Autoria própria

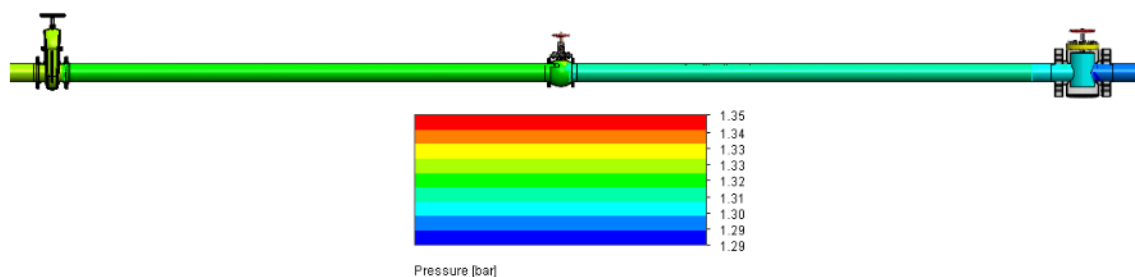


Figura 34 – Superfície com base na pressão nas válvulas
Fonte: Autoria própria

Visualiza-se acima superfície escoando por dentro da tubulação e no interno da passagem das válvulas.

A figura 35 evidencia o refinamento aplicado por meio de uma escala de cores, onde o nível 0 (azul) representa elementos de malha mais grosseiros e os níveis mais altos, como 2 e 3 (verde, amarelo e vermelho), indicam regiões com maior densidade de elementos. Nas passagens internas das válvulas, especialmente em áreas com geometria complexa, como na válvula de retenção (centro) e a válvula gaveta (direita), observa-se predominância de refinamento em nível 3 (vermelho), garantindo maior precisão na captura dos efeitos locais de turbulência, separação de fluxo e variação de pressão. Esse refinamento local é essencial para a acurácia da solução, sobretudo em simulações que envolvem obstáculos internos como sedes de válvulas, discos e regiões de recirculação.

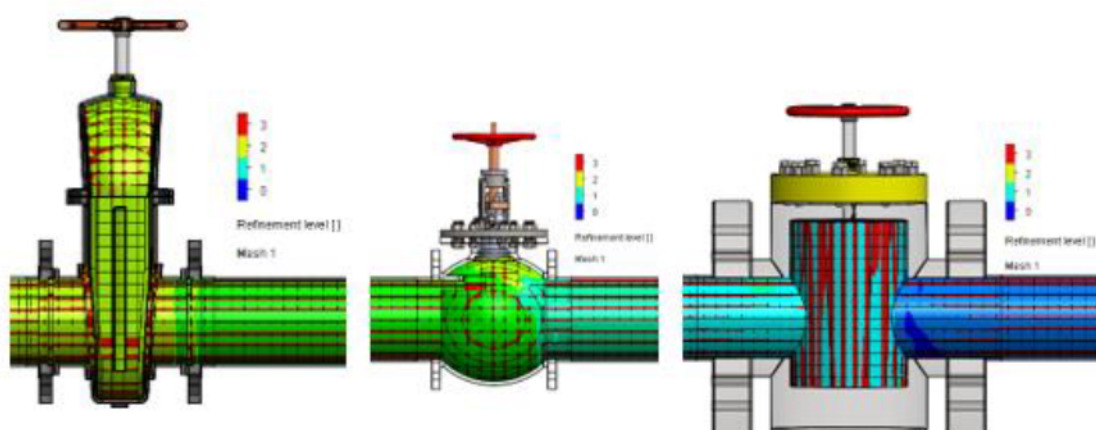


Figura 35 – Refinamento de malha das válvulas com base na pressão
Fonte: Autoria própria

Esse refino da malha divide a geometria em volumes menores (células) a fim de obter resultados mais preciso, sendo imprescindível para regiões com variações

bruscas de gradientes de pressão, velocidade ou temperatura, como é o caso. A malha influencia porque a equação de Navier-stokes, que governa o escoamento dos fluidos são resolvidas numericamente em cada célula da malha.

Através do gráfico de pressão x comprimento da tubulação na figura 36, é possível observar o comportamento da perda de carga dos três acessórios que se encontram neste trecho. É possível perceber que a válvula gaveta da direita gera a maior perda de carga na simulação realizada, seguida da válvula de retenção. Pode-se notar também que as quedas abruptas na pressão indicam perdas de cargas localizadas causadas pelos acessórios (válvulas).

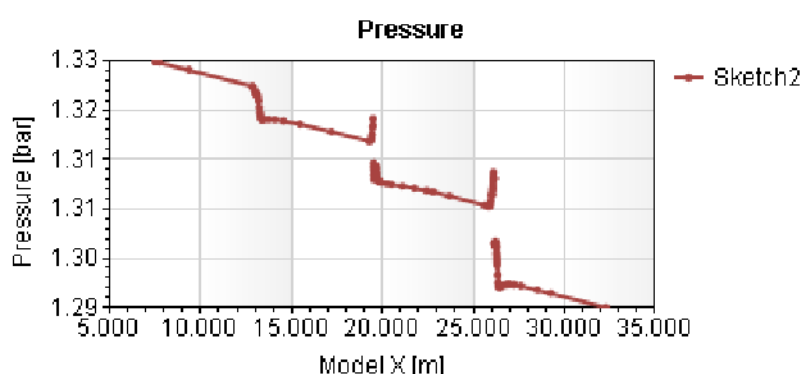


Figura 36 – Comportamento da pressão no trecho final do sistema
Fonte: Autoria própria

O gráfico evidencia três quedas abruptas e verticais da pressão, seguidas por recuperação parcial e, me seguida, nova queda gradual. Representam perdas de carga localizadas que ocorrem em cada válvula devido a dissipação de energia. É típico de sistemas onde válvulas gavetas geram perdas de carga discretas, típicas de componentes com caminho reto quando abertas. Em contraste, a válvula de retenção tende a apresentar uma queda de pressão muito mais significativa, devido à sua geometria interna complexa e à função de bloqueio automático de fluxo reverso. Isso confirma que válvulas de retenção devem ser bem dimensionadas para não comprometer o desempenho hidráulico do sistema.

Quando o fluido encontra uma válvula, ocorre o seguinte processo:

➤ **Restrição do Fluxo:** A válvula, mesmo quando totalmente aberta, atua como uma restrição ao fluxo. Isso causa um aumento na velocidade do fluido na seção mais estreita da válvula e, conseqüentemente, uma queda na pressão estática devido ao princípio de Bernoulli. No entanto, a perda de carga localizada é mais complexa do

que uma simples aplicação do princípio de Bernoulli para um fluxo ideal, pois envolve a dissipação de energia devido à turbulência e à formação de vórtices.

➤ **Turbulência e Dissipação de Energia:** A mudança brusca na área da seção transversal e a alteração na direção do fluxo dentro da válvula geram intensa turbulência. Essa turbulência dissipa a energia do fluido em forma de calor, resultando em uma perda irreversível de pressão. É essa dissipação de energia que é representada pelas quedas verticais no seu gráfico.

➤ **Recuperação de Pressão (Parcial):** Após passar pela restrição da válvula, o fluido entra novamente em uma seção de tubulação com maior área. Isso pode levar a uma pequena recuperação de pressão, como visto nas pequenas elevações após as quedas abruptas. No entanto, essa recuperação nunca é total, pois parte da energia foi irreversivelmente perdida devido à turbulência.

Isso ocorre pelo fato da válvula de retenção gerar perda de carga significativa. É projetada para permitir o fluxo em apenas uma direção e sua construção interna cria maior restrição ao fluxo em comparação a válvula gaveta, que possui passagem totalmente aberta, tendo assim uma perda de carga muito menor.

Portanto, diante do fato da válvula de retenção ser imprescindível ao trecho final do sistema e possuir alta perda de carga como esperado e da válvula gaveta da direita apresentar alta perda de carga por inconsistência do projeto, como visualizados no gráfico acima e na imagem da malha pela coloração vermelha da malha, apesar de válvula gavetas, teoricamente, apresentarem baixas perdas de carga com passagem aberta, decide-se subtrair válvula gaveta direita do trecho 5, diminuindo o custo final do projeto, levando em conta análise financeira que será realizada a seguir. A da esquerda será posicionada para o lugar dela, logo antes do reservatório.

6.5 OTIMIZAÇÕES

Este capítulo busca encontrar soluções para o foco principal deste trabalho de otimizar o projeto de tubulação estudado. A ideia central é minimizar o custo de produção da tubulação, assim como diminuir a perda de carga do sistema, e o resultado será mostrado a seguir.

6.5.1 Análise De Perda De Carga E Econômica Por Acessórios

Esta seção irá mostrar o efeito da redução do número de válvulas ao longo do trajeto da tubulação. O estudo será feito desmontando uma válvula gaveta no trecho 5 de entrada no tanque, a qual se encontra em série com uma válvula igual no pé do tanque. Além deste acessório, encontra-se no trecho 2 mais uma série de válvulas esfera. A análise na desmontagem de uma delas está em razão destas válvulas estarem juntas e terem a mesma função. Na Figura 37, são apresentados os valores do coeficiente C (em $\text{m}^{-5} \cdot \text{s}^2$) para os trechos hl2 e hl5, comparando as condições com e sem válvula.

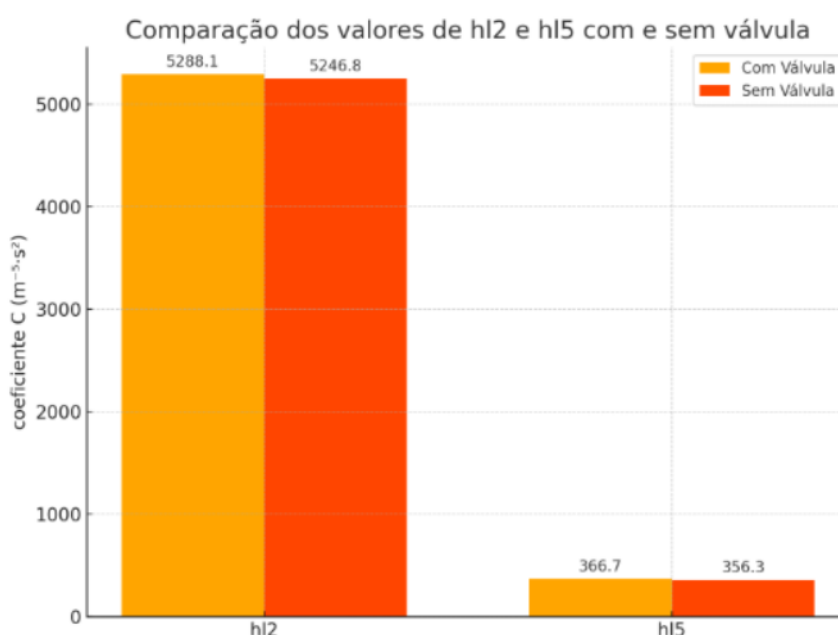


Figura 37 – Gráfico comparando perda de carga dos trechos com e sem válvulas
Fonte: Autoria própria

No trecho hl2, a remoção de uma válvula esfera resultou em uma redução do coeficiente de 5288,1 para 5246,8, representando uma diminuição de aproximadamente 0,78%. Já no trecho hl5, onde foi desmontada uma válvula gaveta, o valor caiu de 366,7 para 356,3, o que corresponde a uma redução de cerca de 2,84%.

A variação observada nos valores pode ser atribuída ao tipo e às características hidráulicas das válvulas removidas. A válvula esfera, quando totalmente aberta, apresenta um escoamento praticamente reto, com perdas localizadas pequenas. Por isso, sua retirada gerou apenas uma leve melhora no desempenho hidráulico.

Em contrapartida, no trecho hl5, a retirada da válvula gaveta produziu um impacto mais significativo, indicando que essa válvula impunha uma resistência maior ao escoamento, possivelmente devido a irregularidades internas, desgaste ou

obstruções parciais.

Baseado em tabela com valores de acessórios de acordo valor de mercado e com respectivos diâmetros é realizada análise de custos iniciais e finais, com redução de duas válvulas.

Acessório	Ø3"	Ø4"	Ø6"	Ø8"
Curva 90°	R\$ 120	R\$ 180	R\$ 250	R\$ 350
Curva 45°	R\$ 90	R\$ 140	R\$ 200	R\$ 300
Ampliação	R\$ 100	R\$ 150	R\$ 220	R\$ 320
Válvula gaveta	R\$ 1.200	R\$ 1.800	R\$ 2.600	R\$ 3.900
Válvula esfera	R\$ 800	R\$ 1.200	R\$ 1.600	R\$ 2.200
Válvula retenção	R\$ 1.000	R\$ 1.500	R\$ 2.200	R\$ 3.200
Tê de saída unilateral	R\$ 300	R\$ 450	R\$ 600	R\$ 800
Tê de passagem direta	R\$ 280	R\$ 420	R\$ 580	R\$ 750

Tabela 15 – Relação de valores de acessórios por diâmetro
Fonte: Varpotec

De maneira geral, os resultados confirmam que a presença de válvulas, mesmo em condição aberta, contribui para perdas localizadas. A retirada desses componentes promoveu uma leve redução nas perdas de carga distribuídas, refletida na diminuição do coeficiente C.

É possível visualizar na figura 38 o custo inicial total de acordo com acessórios em seus respectivos trechos. Os trechos 2 e 5 são os que possuem os custos mais altos, R\$6540,00 e R\$12510,00, respectivamente, e são justamente elas onde foram retirados equipamentos visando diminuir a perda de carga e, conseqüentemente, os custos finais do projeto. É importante lembrar que as válvulas são construídas em aço inox pelo fato de resistir por mais tempo contra corrosão.

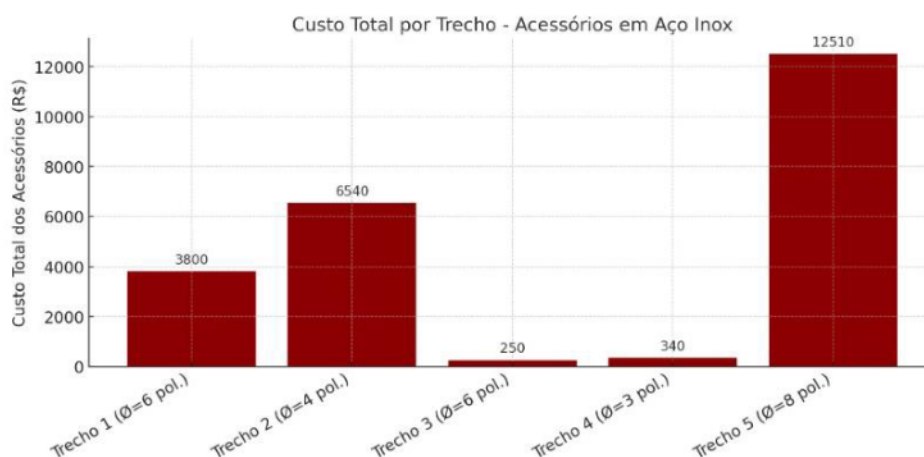


Figura 38 – Custo total inicial de acessórios por trechos
Fonte – Autoria própria

Por fim, após a retirada dos acessórios nos trechos 2 e 5, respectivamente, é percebido que se gerou uma economia de R\$1.200,00 no segundo trecho e de R\$3.900,00 no quinto trecho, segundo a figura 39. E com isso é obtida uma menor perda de carga ao final do escoamento, atendendo a estes dois primordiais requisitos.

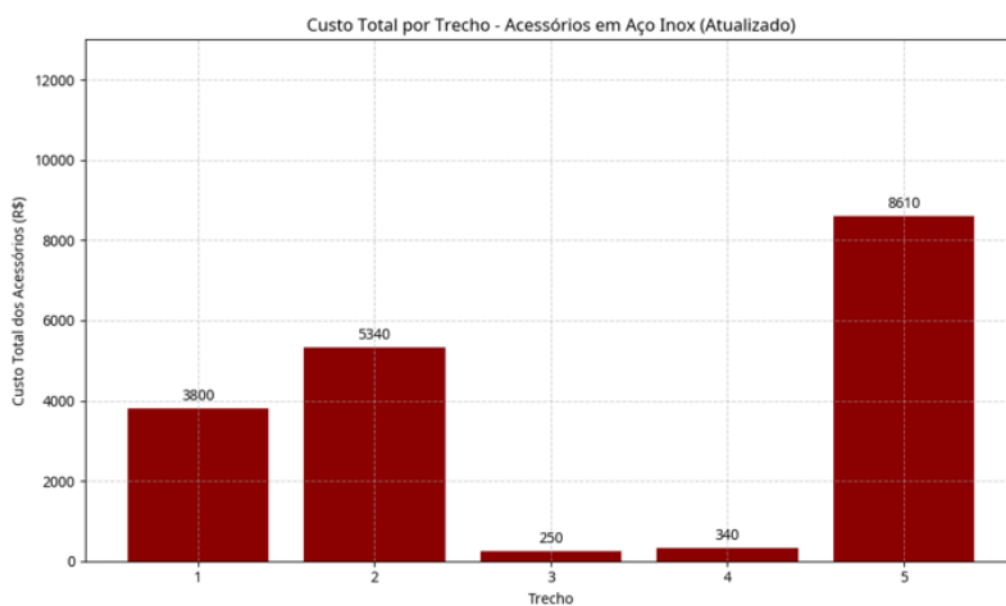


Figura 39 – Custo total de acessórios após retirada de duas válvulas por trechos
Fonte – Autoria própria

De acordo com o ponto de operação da bomba na figura 40, é possível que a retirada de duas válvulas do sistema não influencia, como previsto, na operação do sistema. Pelo contrário, facilitou ainda mais a operação da bomba, exigindo potência menor para escoar o biodiesel.

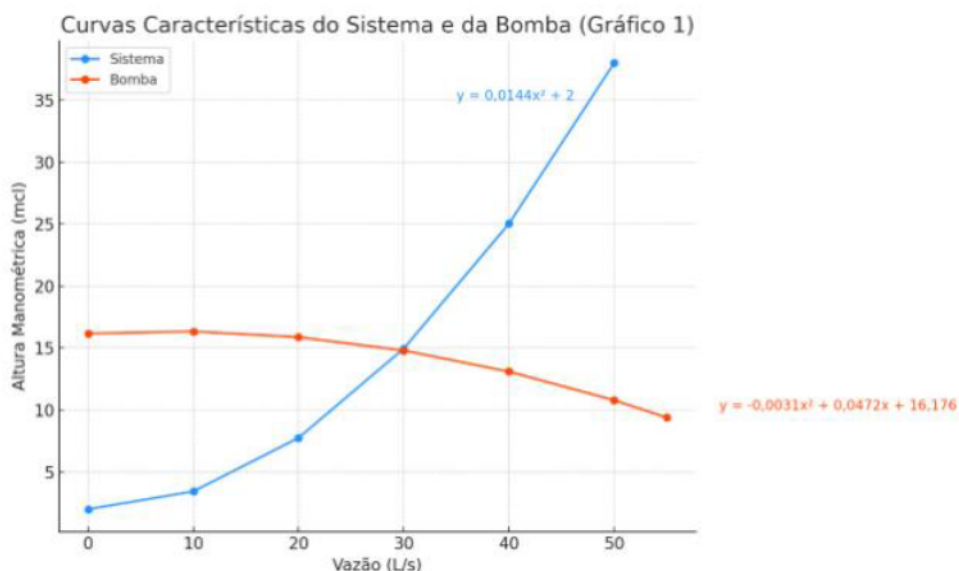


Figura 40 – Curva característica do sistema e da bomba com a retirada de duas válvulas
Fonte: Autoria própria

6.5.2 Análise De Perda De Carga E Econômica Por Materiais

Esta seção tem a finalidade de buscar alternativas de materiais com relação a perda de carga, realizando análise entre quatro materiais, sendo dois aços carbono A63 e A106, um aço inoxidável austenítico AISI 304 e um aço inoxidável ferrítico AISI 405. Os resultados para perda de carga estão presentes na figura 41.

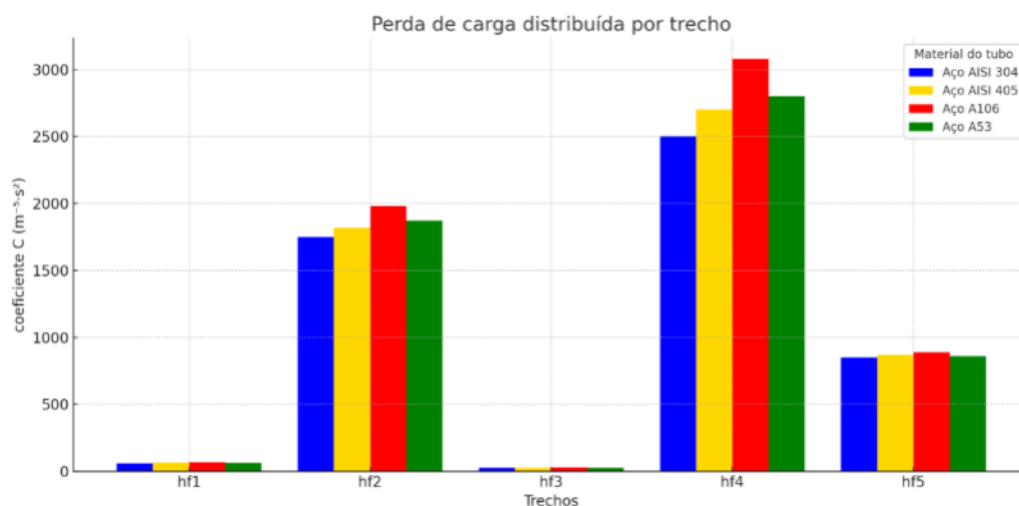


Figura 41 – Perda de carga distribuída com relação a alteração de materiais da tubulação
Fonte: Autoria própria

Em razão da modificação do material, a diferença está na perda de carga

distribuída em razão das diferentes rugosidades dos materiais estudados. Por possuir rugosidades maiores, os aços carbono A53 e A106.

O gráfico acima mostra o coeficiente C que será multiplicado pela vazão ao quadrado para os resultados da perda de carga distribuída. Por serem fatores ligados diretamente a uma mesma variável em todos os trechos, é possível concluir que as maiores perdas de carga estarão localizadas nos maiores coeficientes C encontrados no gráfico.

A análise da perda de carga distribuída foi realizada para um sistema de escoamento com cinco trechos, considerando quatro materiais diferentes: Aço AISI 304, Aço AISI 405, Aço A106 e Aço A53. Os resultados estão representados graficamente para facilitar a comparação entre os materiais.

É possível visualizar que a perda de carga distribuída nos trechos 1 e 3 se encontram bem baixas pelo fato destes trechos se localizarem na sucção da bomba e por serem trechos bem curtos.

De forma geral, observou-se que a perda de carga distribuída varia levemente entre os materiais, principalmente devido às diferenças na rugosidade absoluta e características físicas de cada tipo de aço. O Aço A106 apresentou as maiores perdas ao longo de todos os trechos, enquanto o Aço AISI 304 e o Aço AISI 405 apresentaram os menores valores.

Para os cálculos de perda de carga, adotaram-se os valores de rugosidade absoluta apresentados por FOX et al. (2021). Sendo assim, tubos de aço carbono ASTM A53 apresentam rugosidade de até 0,15 mm, enquanto os de aço carbono ASTM A106 chegam a 0,10 mm devido à sua superfície mais regular. Já os tubos de aço inoxidável AISI 316L possuem valores significativamente menores, com rugosidade máxima em torno de 0,020 mm, graças à sua superfície lisa, ideal para escoamento de fluidos limpos. O aço inoxidável AISI 405, por sua vez, apresenta rugosidade máxima da ordem de 0,030 mm, sendo comparável ao 316L, porém com menor nobreza.

O aço A53 apresenta perda de carga próxima as demais, principalmente no trecho 5 e isso será determinante.

Ao comparar os resultados, nota-se que a diferença entre os materiais é mais pronunciada nos trechos mais longos ou com maior vazão, o que reforça a importância da seleção adequada do material da tubulação em projetos que envolvem grandes distâncias ou fluidos com alta viscosidade.

Diâmetro (mm)	Aço A53 + Epóxi	Aço Inox 304
75	R\$ 230/m	R\$ 780/m
100	R\$ 280/m	R\$ 890/m
150	R\$ 350/m	R\$ 1050/m
200	R\$ 480/m	R\$ 1350/m

Tabela 16 – Custo de tubulações por metro

Fonte: <https://compraco.com.br>

Assim, do ponto de vista técnico e hidráulico, o Aço AISI 304 e o Aço AISI 405 mostraram-se vantajosos por apresentarem menor resistência ao escoamento, o que pode resultar em menor exigência energética para bombeamento ao longo do tempo.

Para além da análise da perda de carga, a análise econômica é importante para a empresa decidir sobre o material que será instalada sua tubulação. Isso começa a ser estudado na figura 42.

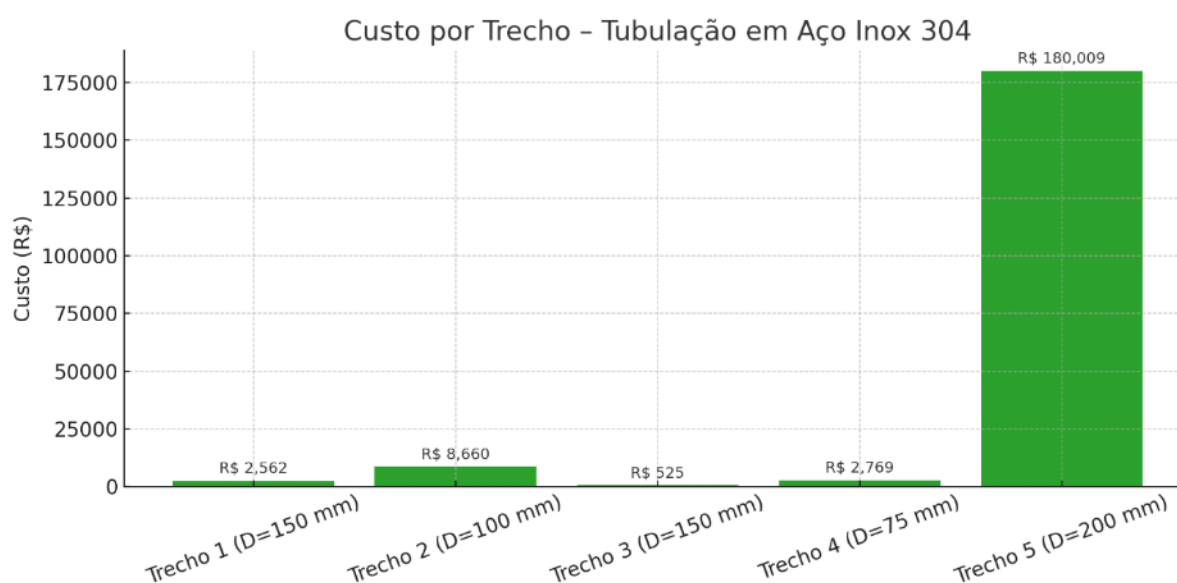


Figura 42 – Análise econômica referente ao sistema de tubulação de aço inox 304

Fonte: Autoria própria

É possível visualizar que os custos com tubulação se concentram no trecho 5 e, como já esperado, seus custos são bem elevados. Isso deve e será levado em consideração adiante, apesar de serem mais vantajosos com relação aos outros três materiais por apresentarem menor resistência ao escoamento, o que resultaria em menor perda de carga e, conseqüentemente, menor exigência energética para

bombeamento ao longo do tempo. A diferença de custo da tubulação de aço Inox AISI 304 para outros é evidenciado na figura 43.

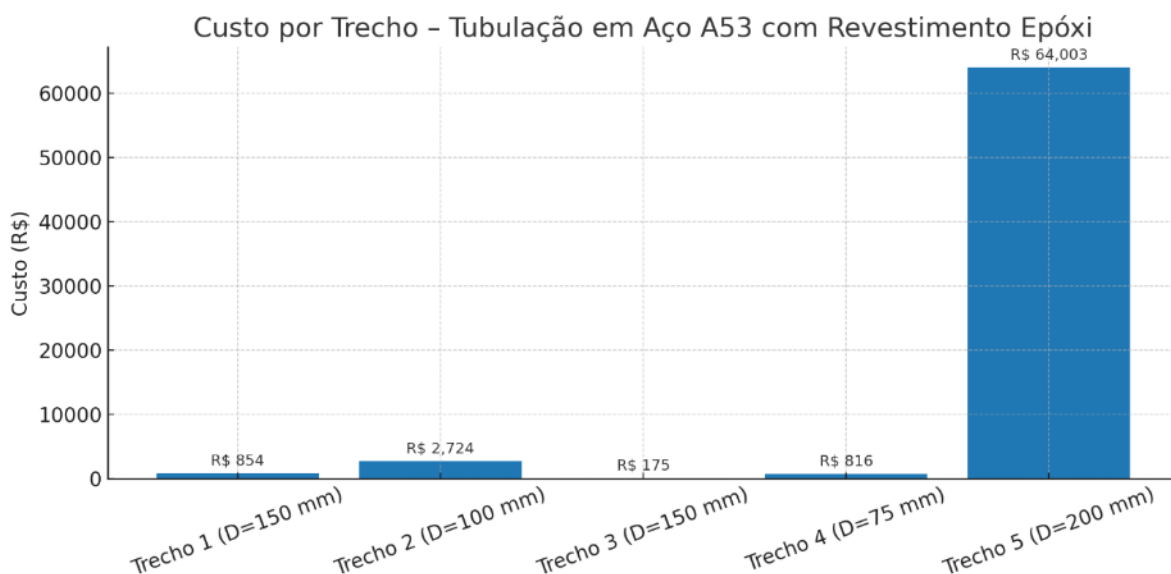


Figura 43 – Análise econômica referente ao sistema de tubulação de aço A53 com revestimento
Fonte: Autoria própria

Diante do elucidado acima, é possível visualizar que os custos caem significativamente, cerca de 3x para uma seleção de tubulação de aço A53 grau A, já levando em consideração revestimento interno de EPOXI para resistir mais contra a corrosão que virá por causa do atrito do fluido com o interno, bloqueando o contato direto do fluido com o metal.

Portanto, diante da análise econômica impactar diretamente os custos para o projeto, é tomada a decisão de alterar o material para A53, mesmo aumentando a perda de carga, quando comparado ao aço inox.

Além do aspecto econômico, a escolha do aço carbono ASTM A53 grau A com revestimento epóxi também se justifica pela facilidade de fabricação, montagem e disponibilidade no mercado, sendo amplamente utilizado em sistemas industriais e de condução de fluidos. Sua compatibilidade com processos comuns de soldagem e flangeamento, bem como a ampla oferta de conexões e acessórios, facilita a padronização e redução de custos logísticos e de manutenção.

Outro ponto relevante é a facilidade de inspeção e manutenção ao longo do tempo: sistemas revestidos internamente com epóxi permitem avaliações periódicas por ultrassom e possibilitam a reaplicação do revestimento, caso haja degradação localizada, o que contribui para a extensão da vida útil da tubulação sem a necessidade de substituições completas. Enquanto a inspeção do aço inox 304 é mais complexa, tendo maior espalhamento do sinal e menor velocidade de propagação da onda acústica.

Mesmo com a alteração realizada em material com maior perda de carga do que o aço inox 304, que é o caso do aço A53, é verificado que o escoamento vem a ocorrer dentro do ponto de operação da bomba, segundo figura 44. A mudança não causa tanta diferença no gráfico pelo fato das rugosidades serem bem próximas. Ou seja, a alteração tem grande viabilidade.

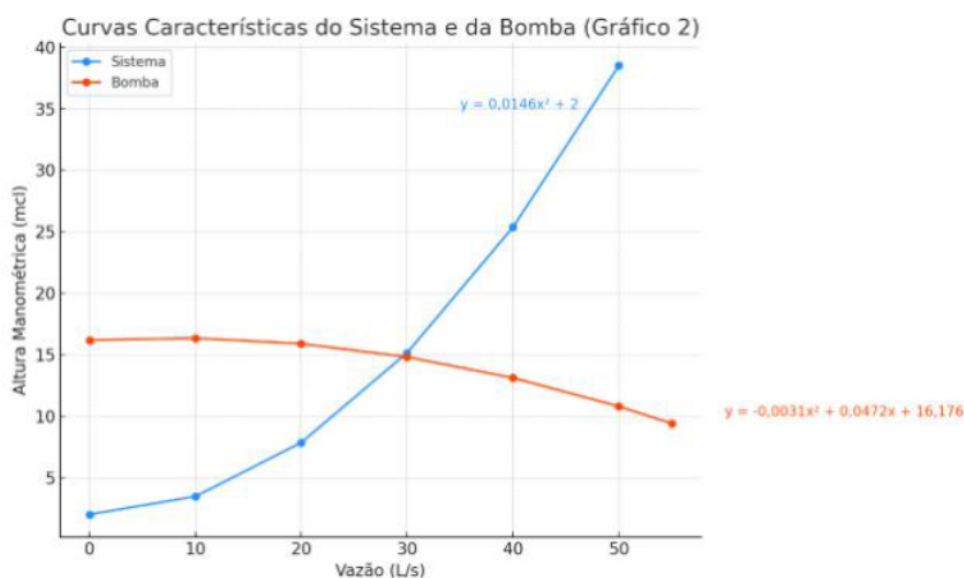


Figura 44 – Curva característica do sistema e da bomba com A53
Fonte: Autoria própria

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos das perdas de cargas localizadas nos trechos 2 e 5, juntamente com a análise realizada de acordo com a simulação, foi tomada decisão retirar dois acessórios, diminuindo perda de carga e custo final do projeto. Por fim, se optou pela troca de material que apresentou o mais baixo custo final de operação (aço A53).

As retiradas das válvulas equivalem a uma redução de 0,78% na perda de carga localizada no trecho 2, enquanto uma redução de 2,84% na perda de carga do trecho 5. Ademais a este benefício, o terminal economizaria 21,76% no custo de produção da tubulação sem contar com a válvula esfera no trecho 2 e válvula gaveta no trecho 5.

No caso da mudança de material na tubulação para o aço carbono A53, embora resulte em um aumento máximo de 11,12% na perda de carga distribuída no trecho 4, o custo de produção reduziria um valor de 64,77% do que seria gasto para uma tubulação de Aço inox.

Ambas mudanças atenderam nossos requisitos de projeto, visto que a vazão de 20 L/s necessária para descarregar o caminhão está dentro da margem aceitável da bomba com o sistema, sendo satisfatório para atender a demanda necessitada pelo terminal combustível de São Luís.

8. TRABALHOS FUTUROS

Embora os objetivos propostos neste trabalho tenham sido alcançados, ainda há diversas possibilidades de continuidade e aprofundamento da pesquisa. Algumas limitações e escolhas metodológicas adotadas ao longo do desenvolvimento indicam caminhos relevantes para estudos futuros, com potencial para ampliar a compreensão do sistema analisado e otimizar seu desempenho. Dentre as propostas de continuidade, destacam-se:

- Estudo mais amplo das espessuras de parede consideradas no trabalho;
- Simulação de modelos bipartidos de válvula esfera em escoamento de biodiesel;
- Simulação do trecho completo entre o descarregamento do caminhão-tanque até o reservatório;
- Alteração no produto de distribuição para a mesma tubulação;
- Estudo de perda de carga para diferentes diâmetros.

Essas sugestões visam não apenas refinar os resultados obtidos, mas também explorar novos cenários de aplicação que podem trazer contribuições significativas tanto do ponto de vista técnico quanto operacional.

BIBLIOGRAFIA

ABM PROCEEDINGS. *Resistência à corrosão de aços austeníticos utilizados em uma planta de produção de biodiesel*. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/download-pdf/resistncia-corroso-de-aos-austenticos-utilizados-em-uma-planta-de-produo-de-biodiesel>.

ABNT NBR 15512:2008. *Biodiesel – Requisitos para o armazenamento, manuseio e transporte*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.

ABNT NBR 17505-3:2013. *Instalações para transporte de líquidos combustíveis - Parte 3: Tubulações para líquidos combustíveis*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.

ABNT NBR 17505-3:2013. *Instalações para transporte de líquidos combustíveis - Parte 3: Tubulações para líquidos combustíveis*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013.

AMBROZIN, et al. **Corrosão metálica associada ao uso de combustíveis e biocombustíveis**. 2009.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API MPMS: Manual of Petroleum Measurement Standards – Chapter 5: Metering. Washington, D.C., 2005.

API 598:2016. *Valve Inspection and Testing*. Washington, D.C.: American Petroleum Institute, 2016.

ASME B16.34:2020. *Valves – Flanged, Threaded, and Welding End*. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2020.

ASME B16.5:2020. *Pipe Flanges and Flanged Fittings: NPS ½ Through NPS 24 Metric/Inch Standard*. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14610: editores mássicos do tipo Coriolis para líquidos condutivos e não condutivos – Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2001.

ASTM A351:2020. *Standard Specification for Castings, Austenitic, for Pressure-Containing Parts*. West Conshohocken: ASTM International, 2020.

ASTM A519:2020. *Standard Specification for Seamless Carbon and Alloy Steel Mechanical Tubing*. West Conshohocken: ASTM International, 2020.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. *Resenha Energética Brasileira: Exercício de 2023 / Ano-base 2022*. Brasília: MME, 2024. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/publicacoes/resenha-energetica-brasileira/resenhas/re_2024_v6_vf.pdf. Acesso em: 29 maio 2025.

CALHEIROS, Higor Oliveira Leal; SILVA, Diogo Lima. **Dimensionamento de reparo de tubulações industriais de aço carbono utilizando materiais compósitos**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

CALLISTER, William D. **Materials Science and Engineering**: An Introduction. 7ª edição. EUA: John Wiley & Sons, Inc. 975 p. 2007.

CHURCHILL, S. W. **Friction factor equation spans all fluid-flow regimes**. *Chemical Engineering*, v. 84, n. 24, p. 91–92, 1977.

DIAS, Elias do Carmo. **Escoamento de biocombustível com cavitação em dutos**. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.vibraenergia.com.br/sites/default/files/2021-08/seguranca-biodiesel-B100.pdf>

FOX, R. W.; McDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. *Introdução à mecânica*

dos fluidos. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

GOOGLE EARTH. Imagem do Terminal de São Luís – MA, 2025. Disponível em: <https://earth.google.com>. Acesso em: 01 jun. 2025.

ISO. ISO 5167-1: Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 1: General principles and requirements. Geneva: International Organization for Standardization, 2003.

PEREIRA, Amanda Petronilha; SILVA, Layane Isabelli da; TORRES, Carlos Eduardo de Almeida Souza; LINS, Vanessa de Freitas Cunha; CASTRO, Maria das Mercês Reis de. **Resistência à corrosão de aços austeníticos utilizados em uma planta de produção de biodiesel**. ABM, 2013.

PETROBRÁS. Ficha de Segurança de Produto Químico - FISPQ de Biodiesel.

ROTAVA. **Aplicações práticas de escoamento de fluídos. Cálculo de tubulações, válvulas de controle e bombas centrífugas**. 2012.

SHAMSUDDOHA, M., Manalo, A., Aravinthan, T., Mainul Islam, M., & Djukic, L. Failure analysis and design of grouted fibre-composite repair system for corroded steel pipes. *Engineering Failure Analysis*, 119, 104979. 2021.

SILVA TELLES, João Augusto. **Tubulações industriais: projeto, materiais e montagem**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

SILVA TELLES, José Carlos Vieira da. **Tubulações industriais: cálculo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.

MULTINOX MG. Tubo inox 304: veja para que serve e suas principais aplicações. Disponível em: <https://multinoxmg.com.br/blog/tubo-inox-304-veja-para-que-serve-e-suas-principais-aplicacoes/>. Acesso em: jul. 2025.

WDM BRASIL. **Catálogo técnico de bombas centrífugas**. [S.l.]: WDM Pumps, 2021. Disponível em: <https://wdmpumps.net/br/wp-content/uploads/2021/11/WDM-Brasil-Catalogo-V10_compressed.pdf>. Acesso em: 3 jul. 2025.