

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

DISPERSÃO DE MELAÇO EM PELLETS DE RAÇÃO PARA EQUINOS/BOVINOS

por

Fausto Thomas Zamboni

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, março de 2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Thomas Zamboni, Fausto
DISPERSÃO DE MELAÇO EM PELLETS DE RAÇÃO PARA
EQUINOS/BOVINOS / Fausto Thomas Zamboni. -- 2023.
36 f.
Orientador: Guilherme Henrique Fiorot.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2023.

1. Manufatura. 2. Modelo Ostwald-De-Waele. 3.
Melaço. 4. Ração. 5. Dispersão. I. Fiorot, Guilherme
Henrique, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Fausto Thomas Zamboni

DISPERSÃO DE MELAÇO EM PELLETS DE RAÇÃO PARA EQUINOS/BOVINOS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Guilherme Henrique Fiorot

Comissão de Avaliação:

Prof. Guilherme Henrique Fiorot (Presidente)

Prof. Ignácio Iturrioz

Prof^a. Adriane Prisco Petry

Porto Alegre, março de 2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos neste trabalho de conclusão de curso. Em primeiro lugar, quero agradecer aos meus pais, Marinês Thomas Zamboni e Américo José Zamboni, e às minhas irmãs, Camila Zamboni e Raquel Zamboni, que sempre me incentivaram a buscar a independência e me apoiaram financeiramente e psicologicamente durante todo o curso. Sem o amor, encorajamento e apoio deles, este trabalho não teria sido possível.

Também gostaria de expressar minha gratidão ao Itamar Schmitt, que me apresentou a necessidade de uma solução para um problema real, que culminou neste projeto, proporcionando-me um aprendizado valioso.

Não posso deixar de agradecer ao corpo docente da UFRGS pelo excelente ensino prestado durante minha graduação. O conhecimento adquirido em sala de aula foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho e me preparou para os desafios que enfrentarei no futuro.

Em especial ao meu professor orientador, Guilherme Henrique Fiorot, pela sua orientação, paciência e contribuição para o sucesso deste trabalho. Suas sugestões, críticas construtivas e conhecimentos compartilhados foram fundamentais para o desenvolvimento deste projeto e para a minha formação como profissional. Agradeço por ter a oportunidade de aprender com um professor tão dedicado e competente.

Por fim, gostaria de agradecer a todos os amigos, colegas e familiares que me ajudaram de alguma forma nesta jornada acadêmica. Seus conselhos, incentivos e apoio foram essenciais para o meu sucesso.

T. Zamboni, Fausto. **Dispersão de Melaço em Pellets de Ração para Equinos/Bovinos**. 2023. 36 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo geral o projeto para a dispersão de melaço de cana em pellets de ração, com o propósito de enriquecer a ração e gerar processos manufatureiros. Será projetado um sistema para a dispersão do melaço na ração de forma efetiva e com baixo custo. Os objetivos específicos incluem a identificação dos fatores necessários para o projeto, o desenho de um sistema adequado, a lista de materiais e peças, e a estimativa do custo total. O estudo baseia-se na análise da reologia e propriedades do melaço, bem como em modelos de escoamento de fluidos viscosos. O resultado financeiro e técnico se mostraram favoráveis e indicam lucratividade, porém uma análise mais profunda sugere aperfeiçoamentos do projetado para aumentar a margem de lucro. A manufatura de ração é uma atividade econômica que pode se beneficiar de processos manufatureiros, auxiliando no enriquecimento da ração, melhorando a palatabilidade para os equinos/bovinos e trazendo ganhos econômicos para a região.

PALAVRAS-CHAVE: manufatura, modelo Ostwald-De-Waele, melaço, ração, dispersão.

T. Zamboni, Fausto. **Molasses Dispersion in Pellets of Feed for Horses/Cattle**. 2023. 36 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

ABSTRACT

This undergraduate thesis aims to design a system for the dispersion of sugarcane molasses in feed pellets, with the purpose of enriching the feed and generating manufacturing processes. A system will be designed to effectively disperse the molasses in the feed at low cost. Specific objectives include identifying the necessary factors for the project, designing an appropriate system, creating a list of materials and parts, and estimating the total cost. The study is based on the analysis of the rheology and properties of molasses, as well as models of flow of viscous fluids. The financial and technical results were favorable and indicate profitability, but a deeper analysis suggests improvements to the project to increase the profit margin. Feed manufacturing is an economic activity that can benefit from manufacturing processes, helping to enrich feed, improve palatability for equines/cattle, and bring economic gains to the region.

KEYWORDS: manufacturing, Ostwald-De-Waele model, molasses, feed, dispersion.

NOMENCLATURA

α	Coeficiente de energia cinética	[adimensional]
D	Diâmetro equivalente do duto	[m]
dA	Diferencial de área transversal do duto	[m ²]
$\frac{dp}{dx}$	Diferencial de pressão pelo comprimento	[Pa/m]
e	Energia específica	[J/kg]
f	Fator de atrito (Darcy)	[adimensional]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
h_l	Perdas maiores	[Pa]
h_{lm}	Perdas menores	[Pa]
h_{lT}	Perdas totais por atrito	[Pa]
H_{sg}	Altura de sucção geométrica	[m]
h_{ps}	Perda de carga na sucção	[m]
k	índice de consistência do fluido	[Pa·s]
K	Coeficiente de perda de carga	[adimensional]
K_f	Coeficiente de perda de carga para modelo da lei da potência em baixo $N_{Re,PL}$	[adimensional]
$(K_f)_{turbulento}$	Coeficiente de perda de carga modelo newtoniano turbulento	[adimensional]
L	Comprimento reto de duto	[m]
L_e	Comprimento equivalente de duto	[m]
η	Viscosidade aparente	[Pa·s]
n	Índice de comportamento do fluido	[adimensional]
$N_{Re,PL}$	Número de Reynolds para modelo Lei da Potência	[adimensional]
$(N_{Re,PL})_{critical}$	Número de Reynolds crítico para modelo Lei da Potência	[adimensional]
$NPSH_d$	Net Positive Suction Head (disponível)	[m]
$NPSH_b$	Net Positive Suction Head (requerida)	[m]
\dot{m}	Vazão mássica	[kg/s]
ρ	Massa específica	[kg/m ³]
p	Pressão	[N/m ²]
p_1 e p_2	Pressão estática nos pontos determinados	[Pa]
p_1	Pressão estática na entrada da canalização (normal. Atmosférica)	[Pa]
p_v	Pressão de vapor do fluido	[Pa]
Q	Vazão volumétrica	[m ³ /s]
r	Determinado comprimento de raio	[m]
R	Raio máximo	[m]
Re	Número de Reynolds	[adimensional]
τ	Tensão de cisalhamento	[Pa]

μ	Viscosidade dinâmica	[Pa*s]
V	Velocidade em um ponto do escoamento	[m/s]
\bar{V}	Velocidade média	[m/s]
$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação	[s ⁻¹]
z_1 e z_2	Cota de altura nos mesmos pontos de p_1 e p_2	[m]

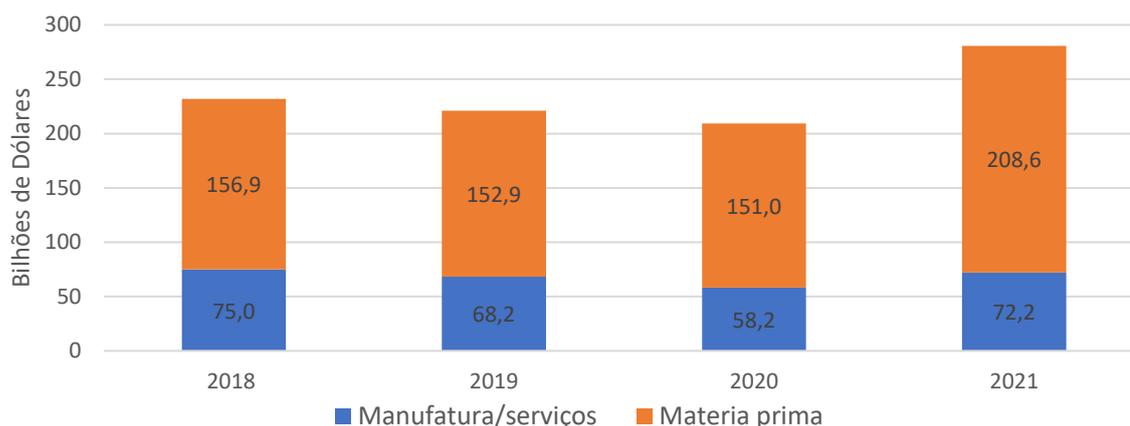
SUMÁRIO

NOMENCLATURA.....	7
1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Objetivo	11
2. FUNDAMENTAÇÃO.....	12
2.1 OPERAÇÕES UNITÁRIAS	12
2.2 ESCOAMENTO DE FLUIDOS ALTAMENTE VISCOSOS	13
2.2.1 Escoamento com fluido newtoniano.....	13
2.2.2 Escoamento com fluido não-newtoniano (modelo Ostwald-De-Waele).....	14
2.3 REOLOGIA E PROPRIEDADES DO MELAÇO	14
3. CASO DE ESTUDO	16
3.1 Especificações do Cliente e Parâmetros de Projeto.....	17
3.2 Organização do projeto.....	17
3.3 Etapas de Cálculo	18
3.3.1 NPSH.....	19
3.3.2 Estimativa de Perdas no Dispensor	20
3.3.3 Soma das Perdas	20
3.3.4 Bomba e Ponto de Operação	21
3.4 Desenhos finais.....	21
3.5 ANÁLISE FINANCEIRA DO PROJETO	22
3.5.1 Custo Estimado do Projeto	22
3.5.2 Ponto de Equilíbrio (<i>Breakeven</i>)	23
4. CONCLUSÃO.....	24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25
APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO E OUTRAS EQUAÇÕES.....	26
APÊNDICE B – BOMBA DE ENGRENAGEM E NPSH.....	30
APÊNDICE C – SCRIPT VBA EXECUTADO	31
C.1 Script para cálculo de taxa de cisalhamento em modelo lei da potência:.....	31
C.2 Script para cálculo de coeficiente de energia cinética para perfil de velocidade no modelo lei da potência:.....	32
APÊNDICE D – LISTA DE MATERIAIS	34

1. INTRODUÇÃO

Já é senso comum que o Brasil exporta e produz em razão maior matéria prima do que produtos de valor agregado (Fig.1), como aponta Lüders (2011) e Dall’Agnol (2019). O problema existente nesta situação é a perda econômica e perda de oportunidade para o país. A falta de industrialização, ou até mesmo um processo de desindustrialização precoce, gera um declínio de empregos e um enfraquecimento na economia com um todo, como detalha Rodrik (2016).

Figura 1: Valor Anual das Exportações no Brasil (Matéria prima vs. Manufatura/serviços).



Fonte: o Autor.

A manufatura é um dos instrumentos do crescimento econômico de um país. Trata-se do setor mais básico para a transformação da matéria prima em algo de maior valor agregado. A manufatura é um setor dinâmico e normalmente tecnológico, em constantes modificações de seus processos e ferramentas. Diferente dos setores de mineração e financeiro, ele absorve uma parte considerável da mão de obra não qualificada disponível. Outra característica importante deste setor é que os produtos oriundos da manufatura são exportáveis, propiciando uma possível independência do mercado local quando este não se encontra favorável. A manufatura também pode continuar expandindo e absorvendo mão de obra mesmo que os outros setores não progridam tecnologicamente, possuindo certa independência. Juntando todos esses fatores como Rodrik (2016) argumenta, chega-se à conclusão de que a manufatura é essencial, principalmente para economias em desenvolvimento, sendo necessário evitar a desindustrialização precoce o máximo possível em países como o Brasil.

Uma das atividades econômicas que pode ainda se beneficiar de manufatura é a pecuária. O Brasil, por ser um dos maiores exportadores de carne, tem uma posição de destaque internacional. A pecuária no Brasil é considerada uma das mais produtivas em todo o mundo. O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) traz como exemplo a equinocultura, pois o cavalo continua sendo importante nas atividades agrícolas na grande maioria das propriedades produtivas nacionais. Ela estima que a atividade movimentava anualmente R\$ 16,15 bilhões e gera 610 mil empregos diretos e 2.430 mil empregos indiretos, sendo responsável, assim, por 3 milhões de postos de trabalho.

Considerando os dados fornecidos pelo Sindirações, em 2014 foram produzidas 610 toneladas de ração. Estimando o preço médio da ração em R\$ 0,80/kg, o volume dessa produção corresponde a R\$ 488 milhões. Entretanto, são apenas 31 as empresas vinculadas ao Sindirações. Outras 49 empresas não possuem vínculo com o Sindirações. Estima-se, conservadoramente, que o mercado de rações é 60% maior que o informado pelo Sindirações

(considerando as empresas não vinculadas). Assim, o mercado de rações para equinos movimentou R\$ 780,8 milhões. (MAPA, 2016)

Considerando os valores que o mercado de rações movimentou e aparentando não haver nenhum monopólio natural/forçado, surge a possibilidade de impacto regional relacionando manufatura com alimentação equina e bovina. Introduzindo mais tecnologia e eficiência na produção de ração, reduzindo assim os custos e preço do produto final, pode-se desbancar algumas das empresas deste mercado e conquistar uma posição confortável para a empresa.

Mais especificamente, sobre a alimentação destes animais herbívoros, sua dieta inclui a necessidade de água, sal mineral e plantas forrageiras para sua sobrevivência. As plantas forrageiras empregadas constituem o alimento chamado de “volumosos” e que contém uma quantidade de fibra maior que 18% da sua matéria seca. Esses alimentos, associados ao fornecimento de quantidades adequadas de nutrientes, permitem aos equinos desempenharem bem as funções a que se destinam.

Por outro lado, pode-se incluir um outro tipo de alimento, muito utilizado nas rações, chamado de “concentrado”. Ele é um alimento com menor teor de fibras do que o do volumoso devido a composição: grãos, farelos e aditivos que elevam a quantidade calórica do mesmo. Caracteristicamente, os alimentos concentrados apresentam mais de 60% de nutrientes digestivos totais, sendo divididos em proteicos e energéticos. Existe também a necessidade destes animais consumirem macro e microminerais, normalmente ingeridos na forma de sal mineral ou suplemento.

Para cavalos de esporte, que necessitam de mais energia, ou bovinos, tanto de corte como de leite, a suplementação com alimentos altamente calóricos (e.g. melaço) propiciam bons resultados, como debatem Filho et al. (1973) e Nussio (2005). No estudo de Filho et al. (1973), os autores apresentam uma diferença de quase 20% de ganho de peso nos bovinos entre o grupo de controle e o que teve suplementação com melaço, em que o melaço propiciou a engorda.

Assim, considerando que na região Sul tem-se a disponibilidade no mercado de melaço em diferentes volumes e preços, e que a ração equina/bovina é comumente processada em formato de pellets ou em grãos, é de interesse projetar um sistema para manufatura de ração aditivada de melaço para incorporação nas existentes linhas produção de ração, mantendo um baixo custo de implementação garantindo a qualidade, para favorecer a entrada dessas empresas no mercado de rações para equinos e bovinos.

1.1 Objetivo

O presente Trabalho de Conclusão de Curso tem então como objetivo geral o projeto para a dispersão de melaço de cana em pellets de ração, para promover o enriquecimento da ração, trazer maior palatabilidade para os equinos/bovinos e ainda auxiliar na geração de processos manufatureiros para a região.

Uma empresa, para sobreviver ao mercado cada vez mais competitivo e acelerado, precisa oferecer um produto de boa qualidade ao menor custo possível. No caso do tema proposto, para chegar ao objetivo geral é necessário considerar soluções já empregadas em operações unitárias similares buscando projetar um arranjo de melhor custo-benefício para o produtor.

Deve-se, através da análise bibliográfica/fundamentação e conhecimentos prévios do aluno, projetar um sistema para a dispersão do melaço na ração comum de equinos/bovinos da maneira mais efetiva do que a manual e de menor custo possível.

Após a escolha dos processos e desenvolvimento teórico do projeto é necessário analisar os resultados obtidos para decidir executar o projeto na prática, abandonar ou alterar parâmetros para justificar sua execução. É necessário o correto dimensionamento dos elementos constituintes do projeto, para que a tomada de decisão seja segura, sem prejudicar a cadeia de produção, algo que causaria prejuízos ao produtor.

Analisando o que foi mencionado, pode-se tomar como objetivos específicos: encontrar os fatores/condições/cálculos para o projeto, desenhar um sistema de dispersão adequado e simples, lista de materiais e peças, alcançar uma qualidade satisfatória a preço competitivo, chegar a uma estimativa do custo total do projeto.

2. FUNDAMENTAÇÃO

Em desenvolvimento de projetos em engenharia, várias são os requisitos para se chegar a um modelo final que atenda as especificações do cliente: desempenho, segurança, durabilidade, manutenção, e não menos importante, custo.

Por se tratar de um projeto que envolve a manipulação de um fluido altamente viscoso (e.g. melão), é necessário entender tanto a dinâmica dos processos mecânicos como as propriedades do fluido. Sendo então, dinâmica dos fluidos, canalizações e máquinas volumétricas os tópicos fundamentais para as etapas do projeto mecânico.

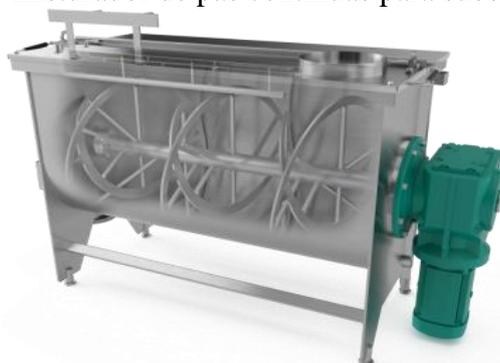
2.1 OPERAÇÕES UNITÁRIAS

Murzin (2015) relata que a operação unitária é um conceito importante na engenharia química, refletindo uma etapa básica no processo geral. Cada operação unitária segue as mesmas leis físicas, assim, a abordagem das operações unitárias permite classificar diferentes processos, como separação, filtração, cristalização etc. e quantificá-los com base nas leis físicas. Pode ser necessário muitas operações unitárias para obter o produto final desejado. Este caso em particular se baseia em processos hidromecânicos e de mistura, que inclui transporte de fluidos e mescla de sólidos e líquidos.

A mistura é uma operação unitária por si só. Ela força a distribuição aleatória de dois materiais diferentes (que podem estar em diferentes fases) através de algum meio mecânico. Então a mistura pode envolver gases, líquidos ou sólidos em qualquer combinação de dois ou mais componentes - dois líquidos diferentes, um líquido e um gás, um líquido e um sólido em pó ou dois sólidos diferentes ou iguais.

Como traz Gavhane (2015), um tipo de equipamento comumente usado para a operação de mistura é o misturador de pás (Fig. 2). Constituído de pás ligadas a um eixo que transpassa um semicilindro horizontal. As pás do misturador podem ser contínuas, formando algo similar a uma fita, ou podem também serem descontínuas. A movimentação das pás e o consequente movimento dos materiais dentro do semicilindro se apresentam em configurações de alta agitação, por vezes fortemente turbulento, o que promove a mistura destes materiais. Esses equipamentos podem ser operados de maneira contínua ou por batelada, sendo muito eficientes na mistura de massas finas e pó seco que não têm boa fluidez.

Figura 2: Ilustração de misturador de pás contínuas para substâncias secas/molhadas.



Fonte: Gpi De Gouwe¹.

¹ Disponível em: <<https://gpi-degouwe.com/products/ribbon-blender/>>. Acesso em: 15 nov. 2022.

2.2 ESCOAMENTO DE FLUIDOS ALTAMENTE VISCOSOS

Ainda como aponta Gavhane (2015), lidar com fluidos é mais simples e mais fácil do que lidar com sólidos, portanto é preferível escolher o uso de soluções, líquidos ou suspensões para transporte do material desejado. Nos processos industriais os principais componentes para o transporte de fluidos de um ponto até o outro são bombas, ventiladores, compressores, dutos, válvulas e acessórios.

Para o correto dimensionamento do sistema é necessário entender o comportamento do fluido no mesmo. Alguns fluidos, como a água, têm comportamento newtoniano, já o melão por exemplo, apresenta comportamento não-newtoniano, como aponta Bofo (2015).

2.2.1 escoamento com fluido newtoniano

Fox et al (2010) traz informações dos efeitos do atrito no escoamento viscoso através de tubos pela primeira lei da termodinâmica (equação da energia). Mostrando que na situação de escoamento viscoso uma parcela da energia mecânica se transforma de maneira irreversível em energia térmica não desejável. Energia que poderia estar auxiliando no recalçamento do fluido, entretanto acaba se desperdiçando em calor.

Para solucionar problemas de escoamento viscoso incompressível em mecânica dos fluidos a equação da energia é sintetizada pela (Eq. 1), considerando as perdas de carga devido ao atrito com o duto e nos acessórios.

O lado esquerdo da equação estão os termos da pressão estática, dinâmica e potencial em dois pontos nomeados 1 e 2 (normalmente entrada e saída respectivamente). E as perdas de carga, como consta no lado direito da Equação 1, podem ser discriminadas em perdas maiores e menores. Onde as perdas maiores se devem basicamente aos efeitos do atrito durante o escoamento do fluido pelo tubo, enquanto a área se mantenha constante e sem acidentes ou acessórios. E as perdas menores são as outras perdas, devido aos acessórios, mudanças de geometria, separação do escoamento, etc.

$$\left(p_1 + \rho\alpha_1 \frac{\bar{v}_1^2}{2} + \rho g z_1\right) - \left(p_2 + \rho\alpha_2 \frac{\bar{v}_2^2}{2} + \rho g z_2\right) = h_{l_T} = h_l + h_{l_m} \quad (1)$$

Para as perdas de carga do tipo maior, a Equação 2 mostra o cálculo para os trechos retos, contínuos e com o mesmo diâmetro equivalente:

$$h_l = 32 \frac{L \mu \rho \bar{V}}{D \rho D} = \frac{L \rho \bar{V}^2}{D} \left(64 \frac{\mu}{\rho \bar{V} D}\right) = \left(\frac{64}{Re}\right) \frac{L \rho \bar{V}^2}{D} = f \frac{L \rho \bar{V}^2}{D} \quad (2)$$

Em escoamentos turbulentos a rugosidade da tubulação interfere no comportamento do escoamento, porém para o laminar, o fator de atrito não depende da rugosidade, mas sim do número de Reynolds apenas. Como aparece na equação acima, o fator de Darcy é computado como $f = 64/Re$ no regime laminar.

Difícilmente um sistema de canalização vai ser dotado apenas de um trecho reto de tubo. Normalmente existem curvas, acessórios, mudanças de áreas etc. que geram perdas adicionais de carga, principalmente através da separação do escoamento. São perdas menores (Eq. 3) ao se comparar com as perdas que ocorrem em acessórios ou longos trechos de tubulação e são calculadas da seguinte maneira:

$$h_{l_m} = \left(K + f \frac{L_e}{D}\right) \frac{\rho \bar{V}^2}{2} \quad (3)$$

O coeficiente de perda de carga é encontrado tabelado na literatura e *handbooks* de acordo com experimentos, assim como também é o caso do comprimento equivalente.

Tendo em vista o equacionamento acima, o cálculo de energia específica, mesma equação denominada curva característica do sistema, em J/kg que uma bomba deve entregar para atender aos critérios de vazão, altura e pressão é o apresentado na Equação 4.

$$e = \left(\frac{p_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{\bar{v}_2^2}{2} + g z_2 \right) + \frac{h_l}{\rho} + \frac{h_{lm}}{\rho} - \left(\frac{p_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{\bar{v}_1^2}{2} + g z_1 \right) \quad (4)$$

2.2.2 Escoamento com fluido não-newtoniano (modelo Ostwald-De-Waele)

Na prática vários fluidos não se comportam de acordo com o modelo newtoniano. Alguns, para iniciarem o escoamento, precisam que a tensão de cisalhamento ultrapasse um valor limite. Outros mudam a viscosidade aparente de acordo com variação da tensão de cisalhamento durante o escoamento.

Um dos modelos que se encaixam em uma ampla gama de fluidos não-newtonianos, de acordo com Bofo (2015), é o modelo Ostwald-de-Waele (também conhecido como Lei da Potência ou *Power Law*). O número de *Re* especificamente para um escoamento dentro de uma tubulação de um fluido deste tipo ($N_{Re,PL}$) é calculado na Equação 5.

$$N_{Re,PL} = \left(\frac{D^n (\bar{V})^{2-n} \rho}{8^{n-1} K} \right) \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^n \quad (5)$$

e, por consequência, de acordo com Hanks (1963), o valor limite para ocorrer o escoamento laminar acaba se tornando uma equação (Eq. 6), diferentemente de como é para os newtonianos, um valor fixo.

$$N_{Re,PL} < \frac{6464n(2+n)^{(2+n)/(1+n)}}{(1+3n)^2} = (N_{Re,PL})_{critical} \quad (6)$$

Pode-se imaginar que com essas alterações outras variáveis do escoamento podem também se alterar, como é o caso dos coeficientes de perda de carga. Steffe (1996) afirma que os dados de coeficiente de perda de carga em acessórios existentes na literatura são insuficientes para fluidos não-newtonianos, principalmente em se tratando do regime laminar de escoamento.

Para suprir a ausência desses dados esse autor indica, para esse tipo fluidos, a utilização das seguintes estimativas: Quando o número de Reynolds, característico do fluido não-newtoniano, encontra-se no intervalo entre 20 e 500, deve ser usada a Equação 7.

$$K_f = \frac{500(K_f)_{turbulento}}{N_{Re,PL}} \quad (7)$$

Já o comportamento da tensão de cisalhamento para fluidos não-newtonianos também muda, e de acordo com a Equação 8, Polizelli (2003) mostra que é possível comparar a viscosidade deles com a de fluidos newtonianos através da equação da viscosidade aparente (Eq. 9).

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (8)$$

$$\eta = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (9)$$

2.3 REOLOGIA E PROPRIEDADES DO MELAÇO

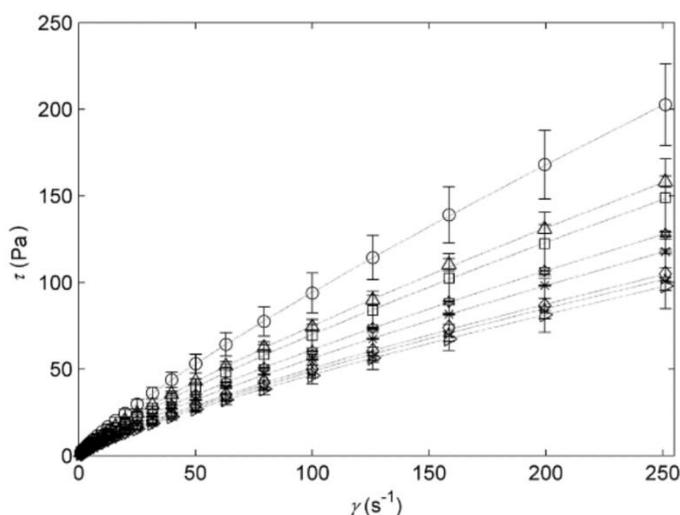
Muitas indústrias frequentemente trabalham com produtos pastosos ou viscosos (e.g. processamento de açúcar e etanol), o que faz necessário o conhecimento das características físicas-químicas-reológicas do material a ser trabalhado para o dimensionamento de bombas, tubulações, equipamentos, etc. Considerações inadequadas sobre o fluido podem repercutir seriamente nos custos e inviabilizar o funcionamento do sistema (Gabas et al., 2012).

O melaço de cana-de-açúcar é um subproduto da indústria da cana-de-açúcar. Sua viscosidade é afetada por variáveis como a temperatura, sólidos solúveis e insolúveis e sua composição. O aumento da pureza e da temperatura levam a uma redução da viscosidade aparente do melaço (Rouillard; Koenig, 1980).

Em soluções que contêm açúcar, a viscosidade aumenta rapidamente nas altas concentrações, devido às moléculas de sacarose formarem agregados hidratados em altas concentrações e baixas temperaturas, diminuindo a quantidade de água livre disponível. Com o aumento da temperatura, esses agregados são destruídos rapidamente, diminuindo de modo acentuado a viscosidade aparente. Assim, como resultado, a viscosidade varia bastante com a temperatura em altas concentrações, indicando uma alta energia de ativação, sendo maior quando a concentração diminui (Araújo, 2003).

A Figura 3 mostra um gráfico entre a tensão de cisalhamento τ e a taxa de deformação $\dot{\gamma}$ de uma amostra de melaço na concentração de sólidos de 70°Brix, em uma faixa de 21 a 98°C. Os valores de τ aumentam gradualmente de 0,014 – 202,667 Pa. Percebe-se o quão importante é a temperatura para a viscosidade aparente do melaço, a tensão de cisalhamento diminui de maneira significativa com o aumento da temperatura. (Bofo, 2015).

Figura 3: Curva de escoamento do melaço com 70°Brix.



21 (○), 32 (Δ), 43 (□), 54 (☆), 65 (⋄), 76 (◇), 87 (★) e 98 (▷) °C

Fonte: Bofo (2015).

Além da redução da viscosidade com o aumento da temperatura, nota-se também que a curva característica da relação $\tau \times \dot{\gamma}$ não é uma reta, mas sim uma curva, de equação com potência menor que a unidade. A equação de Newton não serve para descrever este fluido, demonstrando que ele é um fluido não-newtoniano que reduz sua viscosidade aparente quanto maior for a taxa de cisalhamento.

Bofo (2015) aponta que o modelo que melhor descreve o comportamento do melaço é o modelo de Ostwald-de-Waele e traz tabelado os valores do índice de comportamento do fluido e do índice de consistência do fluido para algumas condições do melaço na Tabela 1.

Tabela 1: Índice de comportamento do fluido e de consistência do fluido para o melaço.

Parâmetros	T (°C)	x (°Brix)					
		20	30	40	50	60	70
κ (Pa·s)	21	1,275E-2	3,566E-2	9,725E-2	0,265	0,707	2,030

	32	1,110E-2	3,197E-2	8,689E-2	0,241	0,655	1,786
	43	1,085E-2	2,794E-2	7,879E-2	0,213	0,603	1,624
	54	1,006E-2	2,757E-2	7,520E-2	0,204	0,566	1,517
	65	9,485E-3	2,619E-2	6,846E-2	0,191	0,526	1,379
	76	8,620E-3	2,348E-2	6,571E-2	0,185	0,492	1,287
	87	8,109E-3	2,137E-2	6,169E-2	0,162	0,447	1,224
	98	7,817E-3	2,112E-2	5,714E-2	0,156	0,412	1,156
n (-)	21	1,005	1,006	1,005	0,891	0,866	0,833
	32	0,996	0,996	0,997	0,872	0,846	0,811
	43	1,007	1,007	1,008	0,878	0,835	0,817
	54	0,992	0,992	1,001	0,851	0,823	0,802
	65	0,999	0,999	0,994	0,853	0,819	0,804
	76	0,993	0,993	0,993	0,838	0,822	0,796
	87	1,002	1,002	0,999	0,849	0,828	0,800
	98	1,003	1,003	0,990	0,826	0,826	0,803

Fonte: Adaptado de Bofo (2015).

Marinho et al. (2014) mostram que o caldo da cana de açúcar é um fluido corrosivo ao metal, devido, principalmente, seu pH próximo de 5,6. As indústrias açucareiras reportam perdas de equipamentos, suportes e estruturas por causa da corrosão gerada pelo ambiente agressivo ao aço. Porém, Iyasara e Ovri (2013) apontam que o melaço, diferente do simples caldo da cana, tem propriedades inibidoras de corrosão, sendo utilizado até mesmo como principal composto em alguns produtos inibidores de corrosão para metais. Entretanto é importante salientar que o melaço, por ser um composto de resíduos orgânicos, pode atrair microrganismos ou fungos que o transformem em um composto agressivo aos metais com o passar do tempo caso permaneça em condições propícias ao desenvolvimento deles.

O melaço, por ser um subproduto de outro processo, normalmente tem variações de propriedades físicas por cada “lote” produzido. A massa específica tem uma variação mais determinada, podendo ser de 1300 a 1400 kg/m³. Já a pressão de vapor é uma característica mais difícil de precisar devido à grande quantidade de diferentes componentes não voláteis, mas solúveis. Não há tabelas ou gráficos correlacionando a pressão de vapor com temperatura. Todavia, Krauskopf (1910) afirmam que a dissolução de componentes não voláteis na água reduz a pressão de vapor da mesma.

Então o melaço de cana de açúcar, uma solução de açúcares e outros componentes não voláteis, tem pressão de vapor menor que a da água pura em mesma temperatura e pressão. Essa informação é relevante para cálculos envolvendo cavitação, em que levar em consideração o fluido como água pura ao invés de melaço levaria a um resultado mais conservador, não trazendo riscos ao sistema.

3. CASO DE ESTUDO

Para projetar o sistema é necessário primeiramente ter clareza das necessidades do cliente e parâmetros do processo. Em seguida caracteriza-se o comportamento do fluido, explorando bibliografias e análises reológicas; descobre-se se o fluido tem comportamento newtoniano ou não-newtoniano e se é turbulento ou laminar. Explora-se os coeficientes e perdas de carga. Assim se esboça um projeto de acordo com a sequência de processos necessários, espaço reservado e obstáculos existentes.

Deve-se dimensionar a canalização e a bomba considerando as perdas de carga e especificações dos acessórios. Verifica-se o dimensionamento, se o esboço inicial está

propiciando boas condições de funcionamento para o projeto. Caso o esboço não atenda os critérios, deve-se modificar o esboço e repetir o procedimento até que o sistema funcione adequadamente.

A perda de carga para certos componentes não é trivial ou tabelada, especialmente em escoamento de baixo Reynolds com fluido do tipo lei de potência, como é o caso do dispersor que será manufaturado especialmente para o projeto em questão. Para os demais componentes é possível aplicar uma correção no coeficiente de perda de carga extraídos de tabelas na literatura feitas a partir de experimentos com fluidos em regime turbulento, mais comumente achadas.

Com todas as etapas anteriores realizadas, é possível extrair lista de peças, potência de bomba, especificações da canalização, montagem do conjunto, etc., o que conduz consequentemente à necessidade de orçamento para verificar o custo-benefício do projeto.

O desenvolvimento abaixo foi elaborado com base nas especificações de um possível cliente no interior do estado do Rio Grande do Sul, onde já se produz ração para animais e há oportunidade para produção de ração com melaço

3.1 Especificações do Cliente e Parâmetros de Projeto

Levantou-se através de conversas informais, com pessoas do ramo, que algumas fábricas de ração misturam a ração com melaço de maneira manual e por bateladas, sem um controle detalhado do processo e sem auxílio de maquinário específico. Retomando os objetivos do seguinte trabalho, torna-se natural planejar um sistema que utilize equipamentos, que garanta uma qualidade adequada/constante e uma maior taxa de produção.

Os pressupostos e especificações do cliente para iniciar a análise e avaliação técnica são:

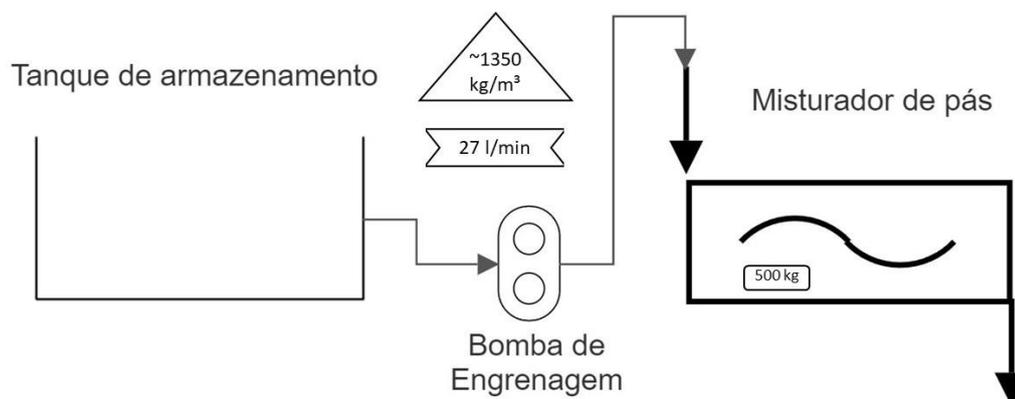
- 1- Os pellets de ração já estão produzidos.
- 2- Uma das medidas de qualidade da ração é a integridade dos pellets. Quanto menos quebrados, maior a qualidade da ração. Deste modo é necessário evitar demasiada movimentação ou agitação dos mesmos.
- 3- O equipamento para a mistura da ração com melaço será um misturador de pás. Definido na sede de implementação do projeto.²
- 4- Prediz-se que a melhor opção de fornecimento do melaço de cana de açúcar na região seja via *container ibc (Intermediate Bulk Container)* e de 70°Brix.
- 5- Pelos motivos citados no item 2.5 o modelo de bomba utilizada será a de engrenagem.
- 6- A área de instalação é interna, possibilitando imediato fornecimento de ração, energia e vapor de baixa pressão para a limpeza a vapor.
- 7- Poderá existir aquecimento no tanque ou na canalização, porém será considerado o caso de temperatura constante em 21°C para todo o sistema (incluindo o fluido).
- 8- Serão 54 l de melaço para cada 500 kg de ração no misturador. Considerando dois minutos como intervalo superior para dispersão do melaço na ração para evitar demasiada quebra.

3.2 Organização do projeto

O uso do misturador de pás dificulta o controle da mistura se o processo for contínuo. Opta-se pelo processo por bateladas: uma vez despejada uma quantidade definida de pellets de ração no misturador de pás, é necessário dispersar o melaço (proporção previamente definida) da maneira mais homogênea e rápida possível para que haja uma mistura adequada sem levar a demasiada quebra da ração. Como apresenta o fluxograma de processo do sistema (Fig.4).

² Este pressuposto vem do fato que o autor, caso os resultados do trabalho sejam favoráveis, terá a oportunidade de aplicá-lo em uma fábrica que já possui este equipamento disponível.

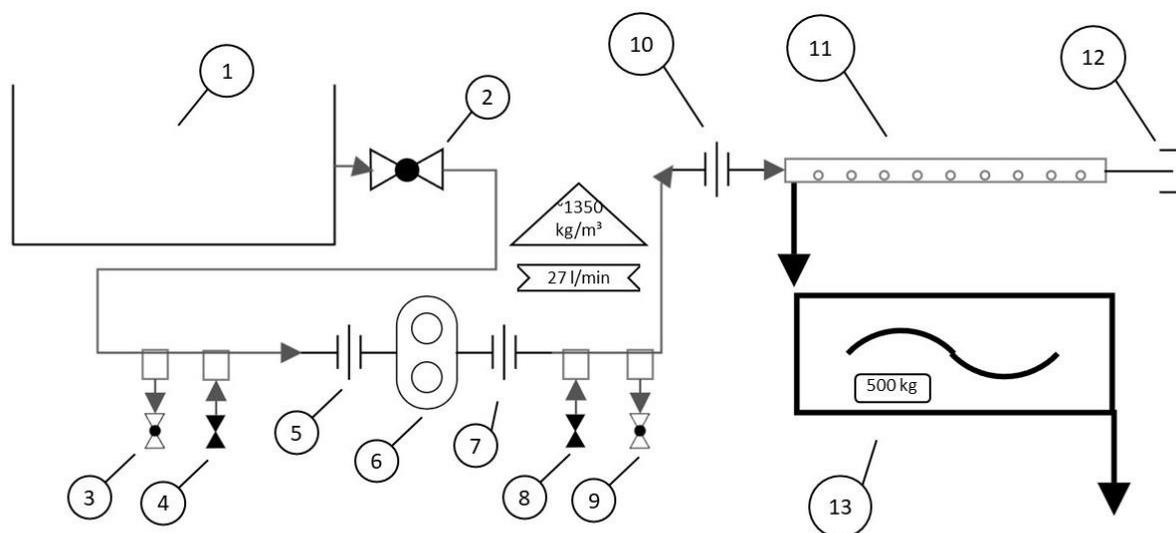
Figura 4: Fluxograma de processo para o sistema proposto.



Fonte: Autor.

Por ser um fluido, uma das maneiras mais adequadas de transportá-lo do tanque de armazenamento até o misturador é bombeando-o através de dutos. Para a dispersão, várias são as maneiras e acessórios que poderiam ser usados com este fim (e.g. bicos *spray*, acessórios como chuveiros, ranhuras no duto), entretanto, considerando-se os custos e possibilidade de uma maior facilidade de produção, o acessório mais adequado se torna um tubo que percorra o interior do misturador (parte superior), com as mesmas características dos tubos à jusante, porém com orifícios distribuídos ao longo do mesmo, direcionando o melaço de maneira a cobrirem uma área ampla dentro do misturador. Detalhado no fluxograma mecânico (Fig. 5).

Figura 5: Fluxograma mecânico para o sistema proposto.



Nº	Descrição	Nº	Descrição	Nº	Descrição
1	Tanque de Armazenamento	6	Bomba de engrenagem interna	11	Dispensor (dentro do misturador)
2	Válvula de esfera	7	União	12	Tampão
3	Meia luva + Válvula de esfera	8	Meia luva + Válvula globo	13	Misturador de pás
4	Meia luva + Válvula globo	9	Meia luva + Válvula de esfera		
5	União	10	União		

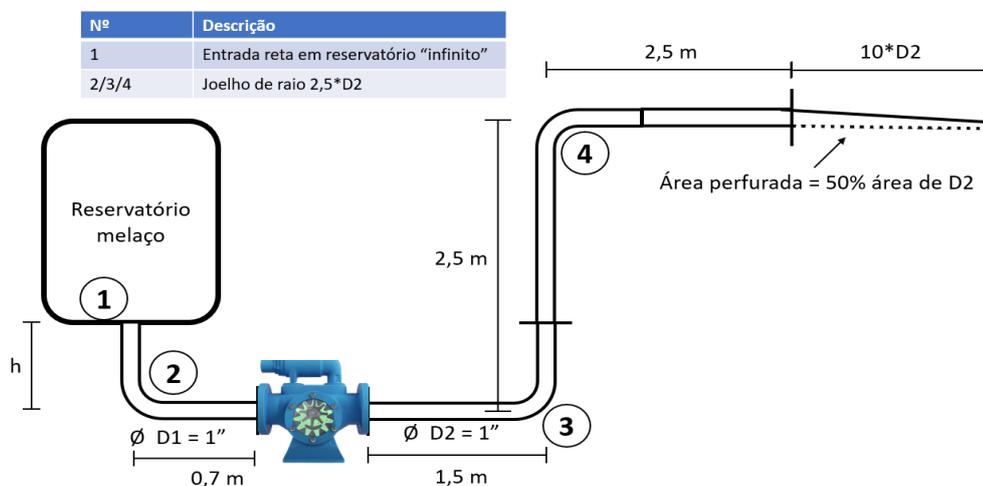
Fonte: Autor.

3.3 Etapas de Cálculo

O cálculo preliminar do projeto é feito a partir da definição da vazão ora estipulada na subseção 2.2.2 utilizando os parâmetros de projeto nas variáveis. Sendo assim necessário que a

bomba recalque a uma taxa de 27 l/min pelo esquema de proposta de envergadura da tubulação como mostra a Figura 6.

Figura 6: Proposta de projeto com envergadura da tubulação.



Fonte: Autor.

Várias etapas do cálculo dependem das características do melão na situação em que ele se encontra na tubulação. A primeira variável de interesse é a velocidade média de escoamento do dele pela canalização, sendo considerado o mesmo diâmetro da saída e entrada da bomba para o cálculo, o resultado utilizando a Equação A.2 é 0,394 m/s.

Encontra-se o Re corrigido do escoamento ($N_{Re,PL}$) com o auxílio do índice de comportamento do fluido e o índice de consistência do fluido pela Tabela 1, considerando a temperatura de projeto, resultando no valor 20,08.

Utilizando este parâmetro na Equação 6 atesta-se que o escoamento é definitivamente laminar e a rugosidade do tubo não afeta a perda de carga. Então usa-se o fator de atrito de Darcy com o Re corrigido, resultando em um fator de atrito igual a 3,19.

3.3.1 NPSH

Para o cálculo de NPSH é necessário saber os trechos da canalização, acessórios e condições de funcionamento do sistema a jusante da entrada da bomba. Como explicado no item 2.3, considera-se a pressão de vapor da água pura, que por consequência já traz certo coeficiente de segurança. No caso de estudo em questão esses valores estão sintetizados na Tabela 2, utilizando valores de perda de carga por Steffe (1996) e corrigindo pela Equação 7.

Tabela 2: Resumo das condições à jusante da bomba para o cálculo do NPSH.

Diâmetro nominal	0,038 m	Viscosidade aparente	1,08 Pa·s
Vazão	0,000450 m ³ /s	Velocidade média	0,39 m/s
Re (Lei da Potên.)	20,1	f (Lei da Potência)	3,19
NPSH(r)	5,0 mca (RZR-2.200-CVA)	Pressão vapor (21 °C)	2489 Pa
Acessório	Comprimento [m]	kf	A
Entrada borda reta	-	0,5	250
Tubo vertical	h	-	-
Curva longa	-	0,45	225
Tubo reto	0,7	-	-
Válvula de gaveta	-	0,17	85

Fonte: Autor.

Inicia-se pela perda de carga nos trechos retos (Eq. 2), em seguida nos acessórios e curvas (Eq. 3) para então entrar na equação de NPSH(a) (Eq. A.16). Considerar-se-á que o tanque está ligado diretamente à primeira curva antes da bomba. Calculando, nas condições acima, para que a pressão atmosférica somada à pressão causada pela gravidade seja maior que as perdas de carga é necessário que o reservatório fique posicionado a pelo menos 2,01 m de altura em relação à entrada da bomba (valor de h) para que se evite o fenômeno da cavitação.

3.3.2 Estimativa de Perdas no Dispensor

O dispensor é o acessório responsável pela distribuição adequada do fluido viscoso açucarado sobre a ração, facilitando a distribuição do melaço sobre os pellets e, consequentemente, a operação de revestimento pelo misturador de pás, reduzindo o tempo total de mistura.

O dispensor é constituído por uma tubulação de propriedades idênticas àquelas da qual os dutos do sistema hidráulico são feitos (material, diâmetro, espessura, etc.), com comprimento de 2200 mm, dotado de 58 orifícios feitos por broca de 5 mm de diâmetro, igualmente espaçados na parte inferior do duto. Também apresenta rosca externa NPT (*National Pipe Thread* - ASME/ANSI B1.20.1) em suas extremidades para que seja possível o encaixe com o sistema e seja fechado por tampão na outra extremidade.

O modelo de cálculo de perda de carga para um acessório como este, transportando um fluido não-newtoniano, não está tabelado em *handbooks*, sendo aqui aproximado pelo modelo apresentado por Liu et al (2017).

Eles mostram uma solução empregando as equações da continuidade e do momentum a partir de uma análise infinitesimal para cada orifício genérico da tubulação perfurada (dispensor), o que resulta em uma equação do momentum que relaciona gradiente de pressão, perda de carga e vazão em função da posição do orifício.

Com as informações do dispensor, as constantes e a equação final provida, de Euler, para escoamento laminar presentes no artigo de Liu et al (2017) já é possível calcular a perda de carga como estimativa aceitável. Para o projeto em questão, a perda de carga no dispensor é de $9716 Pa \sim 1 mca$.

3.3.3 Soma das Perdas

Utiliza-se a Eq. 4 para encontrar o ponto de operação na curva característica da tubulação, considerando todos os acessórios e dutos à jusante e a montante da bomba, como mostra a Tabela 3 com valores de perda de carga de Steffe (1996) corrigidos pela Equação 7. Assim encontra-se a pressão mínima que a bomba deve gerar para o adequado funcionamento do sistema.

Tabela 3: Resumo condições à montante da bomba.

Diâmetro nominal	0,038 m	Viscosidade aparente	1,08 Pa·s
Vazão	0,000450 m ³ /s	Velocidade média	0,39 m/s
Re	20,1	f (lei de potência)	3,19
Acessório	Comprimento [m]	kf	A
Tubo reto	1,5	-	-
Curva longa	-	0,45	225
Tubo vertical	2,5	-	-
Curva longa	-	0,45	225
Tubo reto	2,5	-	-
Dispensor	-	-	-

Fonte: Autor.

Diária da instalação ⁷	R\$ 123,04
TOTAL	R\$ 36.409,85

Fonte: Autor.

Resultando no valor de 36,4 mil reais para a execução do projeto. Para uma fábrica de médio porte, este valor pode ser considerado baixo quando comparado à folha de pagamento de um mês ou até mesmo a equipamentos como tulhas, normalmente presentes em fábricas deste tipo e porte. Dispensando assim análise de empréstimo de longo prazo e estimativa de valor futuro líquido do projeto, possibilitando até mesmo o uso do caixa da empresa para o custeio dele.

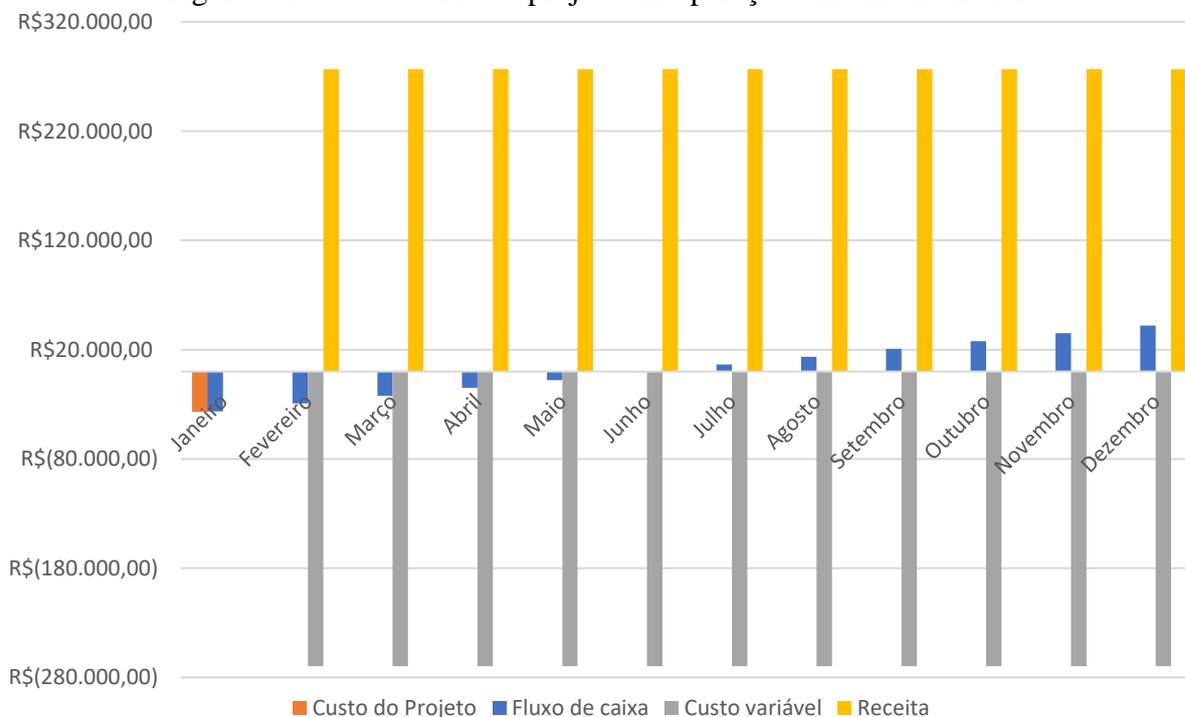
3.5.2 Ponto de Equilíbrio (*Breakeven*)

O ponto de equilíbrio ou *breakeven*, como mostra Atkinson (2000), é o nível de vendas em que os custos fixos e variáveis são cobertos pelas receitas, permitindo que a empresa comece a obter lucro. Analisar o ponto de equilíbrio é importante para determinar o esforço necessário para alcançá-lo e tomar decisões gerenciais sobre a viabilidade do empreendimento.

Consultando o possível cliente, estima-se que o custo de produção do kg da ração sem o melaço é de R\$ 1,30. A ração com melaço possui uma demanda média mensal estimada em 160 toneladas, e o custo variável de melaço e energia necessário para cada kg dessa ração está avaliado em R\$ 0,39⁸. Já um valor de venda razoável para a ração com melaço é R\$ 1,72/kg.

Esses valores mostram que se levaria aproximadamente 5 meses até que a receita seja superior aos custos do projeto e produção (sem considerar impostos). Mesmo que o fluxo de caixa se mostre positivo com os cálculos, fica claro, através a Figura 9, que a operação pode ser arriscada devido à ínfima diferença entre receitas e custos variáveis, traduzindo-se em baixa margem de lucro e em alto desafio para manter o processo rentável.

Figura 9: Fluxo de caixa do projeto em operação em um ano fictício.



Fonte: Autor

⁷ Cálculo com base no <https://br.talent.com/salary?job=mec%C3%A2nico+industrial> em 22/03/2023

⁸ Cálculo com base no orçamento da Melaço de Cana ECL Eireli de 17 IBC com frete de SP para o RS.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho de conclusão de curso apresenta o projeto de um sistema completo para a dispersão de melaço de cana em pellets de ração para equinos, apresentando desenhos, fluxogramas mecânico e de processo, lista de materiais, fundamentação teórica, cálculos e justificativas. O projeto apresentado traz à luz uma demanda local de produtores regionais e que visa enriquecer a ração animal e trazer maior palatabilidade para os equinos/bovinos, bem como auxiliar na geração de mais processos manufatureiros.

Revisando os objetivos do projeto, é importante ressaltar que há uma demanda inicial de que o sistema seja viável economicamente, demanda essa que se prova verdadeira na seção 3.5. um dos grandes desafios encontrado durante a execução do presente projeto se deu devido às particularidades do fluido não-newtoniano a ser utilizado no tratamento dos pellets, fluido este que, além de possuir alta viscosidade na temperatura de operação, apresenta também um comportamento não linear.

Relata-se aqui também a necessidade criada no escopo deste projeto de se projetar um dispersor de material fluido específico para a aplicação desejada, trabalho este não trivial, que exigiu um estudo aprofundado de materiais específicos que não fazem parte do conteúdo tradicional das disciplinas disponíveis para a graduação de bacharelado em Eng. Mecânica.

No caso específico deste trabalho, como a relação “pressão vezes volume” acumulado no sistema não chega ao limite especificado pela NR-13, e também não pretende chegar ao estado de vapor do fluido bombeado, o sistema não entra na classificação de vaso de pressão. Não apresentando risco aos funcionários ou à estrutura da fábrica mesmo que ocorra o entupimento dos orifícios do dispersor, pois a bomba considerada apresenta *by-pass* com válvula de segurança limitada à 15 bar, limitando a possibilidade de acidentes na tubulação.

Mesmo assim, observando que o sistema estará acima da pressão ambiente, parte importante dos cálculos estruturais da tubulação ficaram fora do escopo do trabalho, porém através da equação de Barlow mostra-se que 15 bar de pressão hidrostática para a tubulação projetada está bem abaixo do limite admissível. Para apresentar riscos, levando em conta um coeficiente de segurança de 2, tanto a válvula de segurança quanto 49 orifícios do dispersor precisariam entupir para que o sistema entre em uma faixa de pressão que apresente algum risco estrutural. Lembrando que é o caso do projeto em questão. Outros projetos, com diferentes desenhos ou acessórios podem apresentar faixas de risco distintas, sendo necessário realizar os cálculos estruturais para garantir a integridade do sistema.

Considerando todas as informações que foram geradas neste trabalho, sua execução na prática é possível. Seguindo a lista de materiais e definindo o espaço na fábrica, é necessário orçar e contratar os serviços de fabricação/compra e instalação dos equipamentos. Tendo em vista o volume de ração produzido, pode-se tornar interessante um acordo direto com indústrias açucareiras da região para baixar o preço do melaço e garantir um suprimento de maior volume e consequentemente elevar a margem de lucro.

Finalmente, este projeto preliminar poderia ainda ser otimizado e modificado. Primeiro, o dispersor, mesmo provendo uma dispersão mais homogênea do que seria o caso do processo manual, ele falha no fato de que os primeiros orifícios apresentam maior vazão que os últimos por questão de perda de carga (área constante do duto e dos orifícios). Motivando aprimoramento do projeto do dispersor para tornar a vazão e o espalhamento ainda mais homogêneos. Outra possibilidade de melhoria seria o desenvolvimento de um dispositivo de limpeza do dispersor que não esteja diretamente ligado a limpeza do misturador para que em caso de entupimentos não afete a ração se ela já se encontre dentro do misturador. Concluindo, o traçado já prevê fácil desmontagem, porém a manutenção não foi prevista ou calculada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araújo, B. M. M. **Influência de Impurezas na cinética de cristalização de sacarose avaliada através da reologia de solução de sacarose**. Dissertação (Mestrado Engenharia e Ciência de Alimentos). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. São José do Rio Preto. 2003.
- Atkinson, A. A.; Banker, R.D.; Kaplan, R.S.; Young, S.M. **Contabilidade gerencial**. São Paulo, Atlas. 2000.
- Bofo, Daniele C. dos S. **Reologia de fluidos envolvidos no processo de obtenção de bioetanol**. Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - São José do Rio Preto, 2015.
- Dall’Agnol, Amélio. **O Brasil exporta pouco, mas o agronegócio prospera**. Agrolink, 2019. Acesso em 11/08/2022: https://www.agrolink.com.br/colunistas/o-brasil-exporta-pouco--mas-o-agronegocio-prospera_426298.html
- Filho, N. C.; Wanderley, R. C.; Pires, C. B. **Suplementação de melão para gado em pastoreio no período de estiagem na zona da mata do estado de Pernambuco, Brasil**. Embrapa Pecuária Sudeste. Pernambuco, 1973.
- Fox, Robert W.; McDonald, Alan T.; Pritchard, Philip J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. LTC. Rio de Janeiro, 2010.
- Gabas, A. L.; Menezes, R. S.; Telis-Romero. J. **Reologia na indústria de biocombustíveis**. Lavras: INDI, 2012.
- Gavhane, K. A. **Unit Operations – I [Fluid Flow And Mechanical Operations]**. Nirali Prakashan. Satara, India 2015.
- Henks, R. W. **Laminar-turbulent transition of fluids with a yield stress**. AIChE J. 9:306-309, 1963.
- Henn, É. A. L. **Máquinas de Fluido**. Santa Maria-RS, Brasil: Ed. Da UFSM, 2006.
- Iyasara, A.C.; Ovri, J.E.O. **Corrosion Inhibition of Stainless Steel(314l) Using Molasses**. The International Journal Of Engineering And Science (IJES). Acesso em 13/08/2022: <https://www.theijes.com/papers/v2-i1/BB02103460352.pdf>
- Krauskopf, Francis C. **The Vapor Pressure of Water and Aqueous Solutions of Sodium Chloride, Potassium Chloride, and Sugar**. J. Phys. Chem., 1910.
- Lewis, M. J. **Propriedades Físicas de los alimentos y de los sistemas de procesado**. Zaragoza: Acribia, 1993.
- Liu, H.; Zong, Q.; Lv, H.; Jin, J. **Analytical equation for outflow along the flow in a perforated fluid distribution pipe**. PLoS ONE 12(10): e0185842, 2017.
- Lüders, Germano. **Brasil exporta menos produtos de valor agregado**. Exame.com, 2011. Acesso em 11/08/2022: <https://exame.com/economia/brasil-exporta-menos-produtos-de-valor-agregado/>
- Marinho, Alisson H. dos S.; da Silva Jr, José G.; Filho, Jorge F. da S. **Mapeamento de casos de corrosão em usinas de produção de açúcar e álcool**. Acesso em 14/08/2022: https://intercorr.com.br/anais/2014/INTERCORR2014_255.pdf
- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Revisão do Estudo do Complexo do Agronegócio do Cavalo**. Gov., 2016. Acesso em 11/08/2022: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-setoriais/equideocultura/anos-anteriores/revisao-do-estudo-do-complexo-do-agronegocio-do-cavalo>
- Murzin, Dmitry Yu. **Chemical Reaction Technology**. Berlin, München, Boston: De Gruyter, 2015.
- Nussio, Carla M. B. **Efeito da adição de melão em rações iniciais texturizadas no**

desenvolvimento do rúmen e desempenho de bezerros leiteiros. Milkpoint, 2005. Acesso em 11/08/2022: <https://www.milkpoint.com.br/colunas/carla-bittar/efeito-da-adicao-de-melacoem-racoes-iniciais-texturizadas-no-desenvolvimento-do-rumen-e-desempenho-de-bezerrosleiteiros-24995n.aspx>

Polizelli, M.A. **Coefficientes de Perda de Carga em Válvulas e Acessórios no escoamento de Fluidos Não-newtonianos Puramente Viscosos e Viscoelásticos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. São José do Rio Preto. 2003.

Rodrik, D. **Premature deindustrialization.** J Econ Growth 21, 1–33 (2016).

Rouillard, E. E. A.; Koenig, M. F. S. **The viscosity of molasses and massecuite.** Proc. S. Afr. Sug. Technol, n.54, p. 89-92. 1980.

Steffe, James F. **Rheological Methods In Food Process Engineering.** Freeman Press, Michigan-USA, 1996.

APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO E OUTRAS EQUAÇÕES

Coefficiente de energia cinética como traz Fox et al. (2010) na oitava edição do livro no capítulo 8.6:

$$\alpha = \frac{\int_A \rho V^3 dA}{\dot{m} \bar{V}^2} \quad (\text{A.1})$$

Para fluidos newtonianos em escoamentos turbulentos através de dutos, por causa da camada limite ser diferente do escoamento laminar, o valor de α costuma ficar entre 1,06 e 1,08. Já no escoamento laminar ele tem valor 2.

Velocidade média:

$$\bar{V} = \frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot D^2} \quad (\text{A.2})$$

Newtoniano:

Perfil de velocidades como traz Fox et al. (2010) na oitava edição do livro no capítulo 8.3 para escoamento newtoniano laminar:

Perfil de velocidade
$$V = -\frac{R^2}{4\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (\text{A.3})$$

Velocidade média
$$\bar{V} = -\frac{R^2}{8\mu} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (\text{A.4})$$

Isolando delta pressão
$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{8\mu \cdot \bar{V}}{R^2} \quad (\text{A.5})$$

Substituindo no perfil de vel.
$$V = 2 \cdot \bar{V} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (\text{A.6})$$

Taxa de cisalhamento como traz Steffe (1996) no capítulo 1.5.1:

$$\dot{\gamma} = \frac{d(V)}{dr} \quad (\text{A.7})$$

$$\dot{\gamma} = \frac{d(V)}{dr} = -4 \cdot \frac{\bar{V}}{R^2} \cdot r \quad (\text{A.8})$$

Integrando e usando o teorema do valor médio na equação da taxa de cisalhamento:

$$\dot{\gamma}_{\text{médio}} = \frac{1}{A_w - A_0} \int_0^{2\pi} \int_{r_0}^{r_w} \dot{\gamma} r dr d\theta = \frac{-4 \cdot \frac{\bar{V}}{R^2}}{A_w - A_0} \int_0^{2\pi} \int_{r_0}^{r_w} r^2 dr d\theta \quad (\text{A.9})$$

Configurando o coeficiente de energia cinética para fluido newtoniano:

$$\alpha = \frac{\int_A \rho \left(2 \cdot \bar{V} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \right)^3 dA}{\dot{m} \bar{V}^2} = \frac{8 \cdot \rho \cdot \bar{V} \int_0^{2\pi} \int_{r_0}^{r_w} \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right)^3 r dr d\theta}{\dot{m}} \quad (\text{A.10})$$

Lei da potência:

Perfil velocidade no modelo da lei da potência, como traz Polizelli (2003) no capítulo 2.4.2.1.1:

$$V = \frac{n}{n+1} \left(\frac{dp}{dz} \frac{1}{2K} \right)^{\frac{1}{n}} \left(R^{\frac{n+1}{n}} - r^{\frac{n+1}{n}} \right) \quad (\text{A.11})$$

Passos para a substituição do termo de pressão (com teorema do valor médio):

$$\bar{V} = \frac{Q}{A}$$

$$\begin{aligned} \bar{V} = \frac{Q}{A} &= \frac{n}{n+1} \left(\frac{dp}{dz} \frac{1}{2K} \right)^{\frac{1}{n}} \frac{1}{A_w - A_0} \int_0^{2\pi} \int_{r_0}^{r_w} \left(R^{\frac{n+1}{n}} - r^{\frac{n+1}{n}} \right) r dr d\theta \\ \left(\frac{dp}{dz} \frac{1}{2K} \right)^{\frac{1}{n}} &= Q \cdot \frac{n+1}{n} \left(2\pi \int_{r_0}^{r_w} \left(R^{\frac{n+1}{n}} - r^{\frac{n+1}{n}} \right) r dr \right)^{-1} \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

Perfil velocidade na Lei da Potência sem o termo da pressão:

$$V = Q \cdot \left(2\pi \int_{r_0}^{r_w} \left(R^{\frac{n+1}{n}} - r^{\frac{n+1}{n}} \right) r dr \right)^{-1} \left(R^{\frac{n+1}{n}} - r^{\frac{n+1}{n}} \right) \quad (\text{A.13})$$

Integrando e usando o teorema do valor médio na equação da taxa de cisalhamento:

$$\begin{aligned} \dot{\gamma} = \frac{d(V)}{dr} &= \frac{n}{n+1} \left(\frac{dp}{dz} \frac{1}{2K} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \left(-\frac{n+1}{n} \cdot r^{\frac{n+1}{n}-1} \right) = - \left(\frac{dp}{dz} \frac{1}{2K} \right)^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{1}{r} \\ \dot{\gamma}_{\text{médio}} &= \frac{1}{A_w - A_0} \int_{A_0}^{A_w} \dot{\gamma} dA = \frac{1}{A_w - A_0} \int_0^{2\pi} \int_{r_0}^{r_w} \dot{\gamma} r dr d\theta \\ &= \frac{1}{A_w - A_0} \left(\frac{dp}{dz} \frac{1}{2K} \right)^{\frac{1}{n}} \int_0^{2\pi} \int_{r_0}^{r_w} r^{\frac{n+1}{n}} dr d\theta \end{aligned}$$

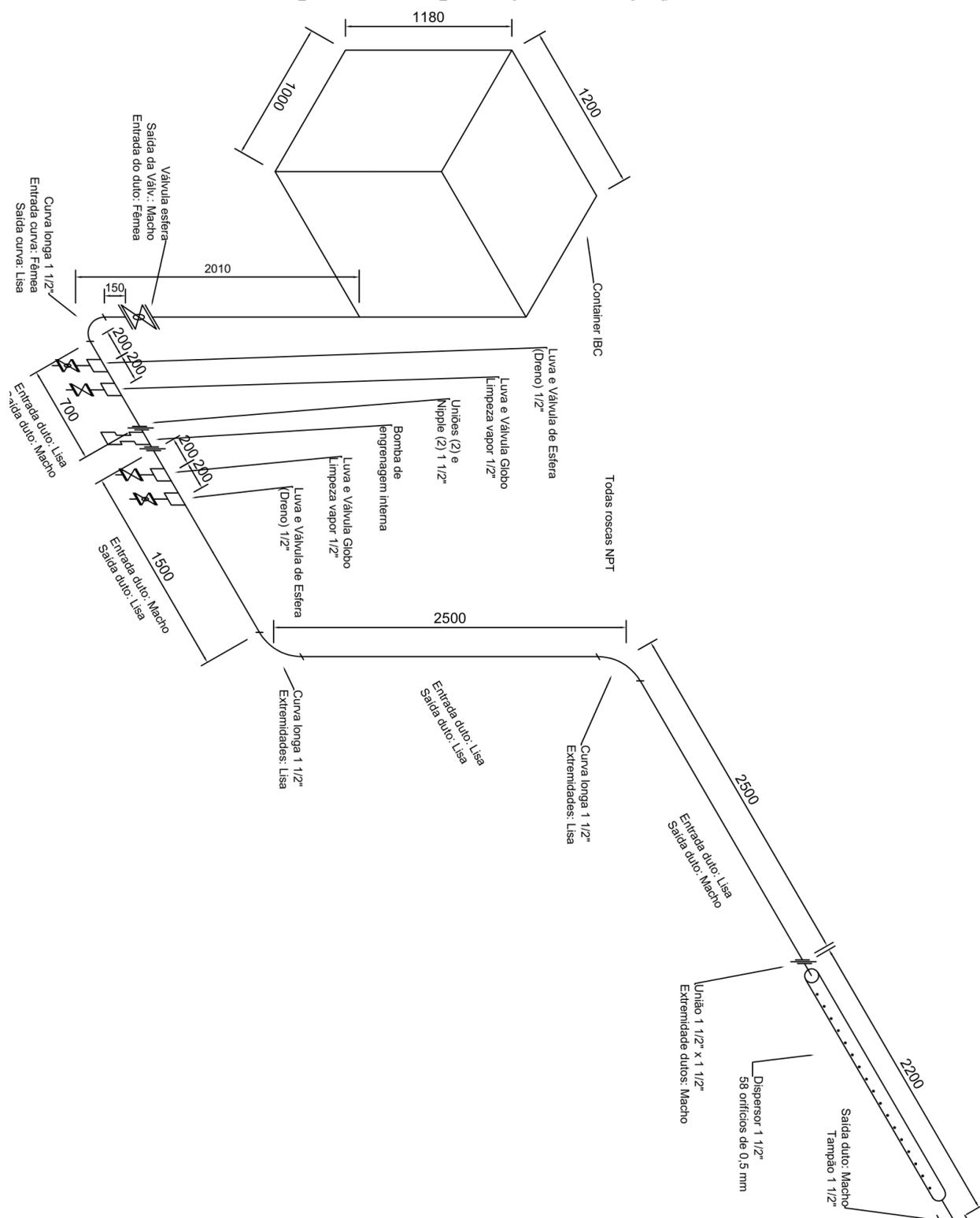
$$\dot{Y}_{m\u00e9dio} = \frac{Q}{A_w - A_0} \cdot \frac{n+1}{n} \left(2\pi \int_{r_0}^{r_w} \left(R^{\frac{n+1}{n}} - r^{\frac{n+1}{n}} \right) r dr \right)^{-1} \int_0^{2\pi} \int_{r_0}^{r_w} r^{\frac{n+1}{n}} dr d\theta \quad (\text{A.14})$$

Configurando o coeficiente de energia cin\u00e9tica para fluido Lei da Pot\u00eancia:

$$\alpha = \frac{\int_A \rho \left(Q \left(2\pi \int_{r_0}^{r_w} \left(R^{\frac{n+1}{n}} - r^{\frac{n+1}{n}} \right) r dr \right)^{-1} \left(R^{\frac{n+1}{n}} - r^{\frac{n+1}{n}} \right) \right)^3 dA}{\dot{m} \bar{V}^2} \quad (\text{A.15})$$

$$= \frac{\rho \left(Q \left(2\pi \int_{r_0}^{r_w} \left(R^{\frac{n+1}{n}} - r^{\frac{n+1}{n}} \right) r dr \right)^{-1} \right)^3 \int_0^{2\pi} \int_{r_0}^{r_w} \left(R^{\frac{n+1}{n}} - r^{\frac{n+1}{n}} \right)^3 r dr d\theta}{\dot{m} \bar{V}^2}$$

Figura A.1: Imagem expandida do projeto

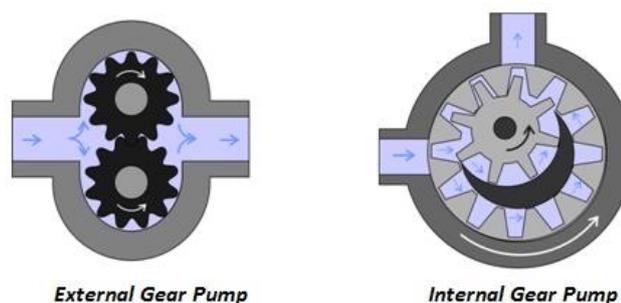


Fonte: Autor.

APÊNDICE B – BOMBA DE ENGRENAGEM E NPSH

Henn (2006) traz que uma bomba de engrenagem (Fig. 3) entrega a energia ao fluido através do confinamento dele entre as câmaras, movimentando de maneira rotativa, variando assim o volume das mesmas e isolando a admissão da descarga para que não haja retorno do fluido. Esse tipo de máquina oferece uma boa relação potência/peso, tem poucas peças em movimento (não precisa de válvulas), reduzindo o desgaste. não necessita de lubrificantes e evita contaminação no fluido.

Figura A.210: Ilustração de bombas de engrenagem.



Fonte: Michael Smith Engineers (2022)⁹

Diferentemente de bombas volumétrica de pistão simples ou similares, em que a o gráfico da vazão sobre o tempo se aparenta mais com uma senoidal, as bombas de engrenagem normalmente apresentam uma curva muito próxima a de uma constante. Isso se deve à sua geometria específica e velocidade de rotação, em que as câmaras que se formam entre os dentes estão separadas por um intervalo físico pequeno e a um intervalo de tempo curto entre a abertura de cada câmara à saída.

Outra propriedade interessante dessas bombas volumétricas é que, quanto menor forem as tolerâncias de fabricação, menor é a influência da pressão característica do sistema sobre a vazão. Podendo considerar que a vazão desse tipo de bomba depende apenas da rotação entregue à ela.

É uma bomba simples, com boa aceitação pelo mercado e admite bombeamento de fluidos altamente viscosos. Deve ser instalada “afogada”, abaixo do nível do reservatório, pois não é auto escorvante. É necessário o uso de válvula de segurança ou by-pass, pois em caso de entupimento ela irá facilmente exceder a própria pressão admissível ou da tubulação.

Além do controle de vazão através do controle da rotação do acionamento, pode-se também controlá-la através de um by-pass em que se permita o retorno de parte do fluido ao reservatório, porém assim existe em perda de eficiência por gasto energético do atrito com a tubulação.

Nesta, como para qualquer outro tipo de bomba, é necessário garantir que não ocorra cavitação na tubulação de sucção, pois esse fenômeno com o passar do tempo degrada componentes, equipamentos e tubulação. Para evitar a cavitação é necessário que a pressão logo à jusante da bomba [$NPSH(a)$ (*Net Positive Suction Head (available)*)] seja maior do que a pressão indicada pelo fabricante como $NPSH(r)$ (*Net Positive Suction Head (required)*), que é a pressão mínima necessária para o funcionamento adequado da bomba (Eq. 9 e 10).

$$NPSH(a) > NPSH(r) \quad (A.16)$$

⁹ Disponível em: < <https://www.michael-smith-engineers.co.uk/resources/useful-info/external-gear-pumps> >. Acesso em: 15 out. 2022.

$$NPSH(a) = \frac{p_1}{\rho g} - \frac{p_v}{\rho g} + H_{sg} - \frac{h_{LT}}{\rho g} \text{ (sucção apenas)} \quad (\text{A.17})$$

APÊNDICE C – SCRIPT VBA EXECUTADO

C.1 Script para cálculo de taxa de cisalhamento em modelo lei da potência:

```
Sub TaxaCisPowerLaw()
```

```
'Declarando variáveis e dimensões auxiliares
```

```
Dim i, aux As Integer
```

```
Dim r0, rw, r, n, q, u, dpdz, k, iter, integ, dr, drpasso, passo, equacao, substitinteg,
substit As Double
```

```
'Obtenção de valores de certas variáveis a partir de tabela do Excel
```

```
rw = ThisWorkbook.Sheets("Cisalhamento").Range("b9").Value
```

```
r0 = ThisWorkbook.Sheets("Cisalhamento").Range("b10").Value
```

```
n = ThisWorkbook.Sheets("Cisalhamento").Range("b11").Value
```

```
dpdz = ThisWorkbook.Sheets("Cisalhamento").Range("b12").Value
```

```
k = ThisWorkbook.Sheets("Cisalhamento").Range("b13").Value
```

```
u = ThisWorkbook.Sheets("Cisalhamento").Range("b14").Value
```

```
q = ThisWorkbook.Sheets("Cisalhamento").Range("b15").Value
```

```
r = r0
```

```
'Configurando quantidades de passos para cálculo da integral
```

```
passo = 500000
```

```
drpasso = (rw - r0) / passo
```

```
substitinteg = 0
```

```
'Loop da integral da substituição do termo de pressão
```

```
For i = 1 To passo
```

```
iter = (rw ^ ((n + 1) / n) - r ^ ((n + 1) / n)) * r * drpasso
```

```
r = r + drpasso
```

```
substitinteg = substitinteg + iter
```

```
Next i
```

```
'Multiplicando por outras constantes da equação
```

```
substit = ((n + 1) / n) * q / (2 * Application.WorksheetFunction.Pi()) * substitinteg
```

```
'Loop do cálculo da integral do cisalhamento
```

```
r = r0
```

```
integ = 0
```

```
For i = 1 To passo
```

```
iter = (r ^ ((n + 1) / n)) * drpasso
```

```
r = r + drpasso
```

```
integ = integ + iter
```

```
Next i
```

'Finalizando o cálculo da equação

```
equacao = (-1 / (Application.WorksheetFunction.Pi() * (rw ^ 2 - r0 ^ 2))) * (substit) * 2  
* Application.WorksheetFunction.Pi() * integ)
```

'Transferindo o valor para o uma célula do Excel

```
ThisWorkbook.Sheets("Cisalhamento").Range("f8") = equacao
```

```
End Sub
```

C.2 Script para cálculo de coeficiente de energia cinética para perfil de velocidade no modelo lei da potência:

```
Sub coefcinetPL()
```

'Declarando variáveis e dimensões auxiliares

```
Dim i, aux As Integer
```

```
Dim r0, rw, r, n, q, umed, k, iter, integ, dr, drpasso, passo, equacao, substitinteg,  
substit, rho, mponto As Double
```

'Obtenção de valores de certas variáveis a partir de tabela do Excel

```
umed = ThisWorkbook.Sheets("Cisalhamento").Range("b14").Value
```

```
rw = ThisWorkbook.Sheets("Cisalhamento").Range("b9").Value
```

```
r0 = ThisWorkbook.Sheets("Cisalhamento").Range("b10").Value
```

```
n = ThisWorkbook.Sheets("Cisalhamento").Range("b11").Value
```

```
k = ThisWorkbook.Sheets("Cisalhamento").Range("b13").Value
```

```
umed = ThisWorkbook.Sheets("Cisalhamento").Range("b14").Value
```

```
q = ThisWorkbook.Sheets("Cisalhamento").Range("b15").Value
```

```
rho = ThisWorkbook.Sheets("CálculosSaída").Range("g3").Value
```

```
r = r0
```

```
mponto = q * rho
```

'Configurando quantidades de passos para cálculo da integral

```
passo = 500000
```

```
drpasso = (rw - r0) / passo
```

```
substitinteg = 0
```

'Loop da integral da substituição do termo de pressão

```
For i = 1 To passo
```

```
iter = (rw ^ ((n + 1) / n) - r ^ ((n + 1) / n)) * r * drpasso
```

```
r = r + drpasso
```

```
substitinteg = substitinteg + iter
```

```
Next i
```

'Multiplicando por outras constantes da equação

```
substit = q / (2 * Application.WorksheetFunction.Pi() * substitinteg)
```

'Loop do cálculo da integral do coeficiente de energia cinética

```
r = r0
```

```
integ = 0
```

```
For i = 1 To passo
```

```
iter = (rw ^ ((n + 1) / n) - r ^ ((n + 1) / n)) ^ 3 * r * drpasso
```

```
r = r + drpasso
```

```
integ = integ + iter
```

```
Next i
```

'Finalizando o cálculo da equação

```
equacao = rho * (substit ^ 3) * 2 * Application.WorksheetFunction.Pi() * integ /  
(mponto * umed ^ 2)
```

'Transferindo o valor para o uma célula do Excel

```
ThisWorkbook.Sheets("CálculosSaída").Range("f22") = equacao
```

```
End Sub
```

APÊNDICE D – LISTA DE MATERIAIS

Caso 1:			
Tubulação inteira da bomba ao dispersor, dobrado para formar joelhos.			
Classe de Fluido:		Melaço de cana - Alta viscosidade	
Faixa de Variação de Pressão e Temperatura		Mpa	0,1 1
		C°	20 65
Material básico		Aço-Carbono	
Tubo 1	Diâmetro Nominal	1 1/2"	
	Material	NBR 5590 Gr. A	
	Fabricação	Preto com ou sem costura	
	Espessura	Sch. 40 (STD)	
	Comprimento	2010 mm	
	Extremidades (entrada) Extremidades (saída)	Fêmea (depende do IBC) Macho NPT	
Tubo 2	Diâmetro Nominal	1 1/2"	
	Material	NBR 5590 Gr. A	
	Fabricação	Preto com ou sem costura	
	Espessura	Sch. 40 (STD)	
	Comprimento	700 mm	
	Extremidades (entrada) Extremidades (saída)	Lisa (solda) Macho NPT	
Tubo 3	Diâmetro Nominal	1 1/2"	
	Material	NBR 5590 Gr. A	
	Fabricação	Preto com ou sem costura	
	Espessura	Sch. 40 (STD)	
	Comprimento	1500 mm	
	Extremidades (entrada) Extremidades (saída)	Macho NPT Lisa (solda)	
Tubo 4	Diâmetro Nominal	1 1/2"	
	Material	NBR 5590 Gr. A	
	Fabricação	Preto com ou sem costura	
	Espessura	Sch. 40 (STD)	
	Comprimento	2500 mm	
	Extremidades (entrada) Extremidades (saída)	Lisa (solda) Lisa (solda)	
Tubo 5	Diâmetro Nominal	1 1/2"	
	Material	NBR 5590 Gr. A	
	Fabricação	Preto com ou sem costura	
	Espessura	Sch. 40 (STD)	
	Comprimento	2500 mm	
	Extremidades (entrada)	Lisa (solda)	

	Extremidades (saída)	Lisa (solda)
Tubo 6	Diâmetro Nominal Material Fabricação Espessura Comprimento Extremidades (entrada) Extremidades (saída)	1 1/2" NBR 5590 Gr. A Preto com ou sem costura Sch. 40 (STD) 2500 mm Lisa (solda) Macho NPT
Tubo 7 (Dispersor)	Diâmetro Nominal Material Fabricação Espessura Comprimento Extremidades (entrada) Extremidades (saída)	1 1/2" NBR 5590 Gr. A Preto com ou sem costura Sch. 40 (STD) 2200 mm Macho NPT Macho NPT
Curva Raio Longo	Diâmetro Nominal Material Fabricação Espessura Raio mínimo Extremidades Quantidade (un.)	1 1/2" NBR 5590 Gr. A Preto com ou sem costura Sch. 40 (STD) 200 mm Lisa (solda) 3
Acessório 1	Tipo Diâmetro Nominal Material Classe de pressão Extremidades (entrada) Extremidades (saída) Quantidade (un.)	União 1 1/2" Igual ou superior aos tubos Igual ou superior aos tubos Fêmea NPT Fêmea NPT 3
Acessório 2	Tipo Diâmetro Nominal Material Classe de pressão Extremidades (entrada) Extremidades (saída) Quantidade (un.)	Tampão 1 1/2" Igual ou superior aos tubos Igual ou superior aos tubos Fêmea NPT - 1
Acessório 3	Tipo Diâmetro Nominal Material Classe de pressão Extremidades (entrada) Extremidades (saída) Quantidade (un.)	Meia Luva 1/2" Igual ou superior aos tubos Igual ou superior aos tubos Fêmea NPT Lisa (solda) 4
Ac ess óri	Tipo	Bujão

	Diâmetro Nominal Material Classe de pressão Extremidades (entrada) Extremidades (saída) Quantidade (un.)	1/2" Igual ou superior aos tubos Igual ou superior aos tubos Macho NPT - 4
Acessório 5	Tipo Diâmetro Nominal Material Classe de pressão Extremidades (entrada) Extremidades (saída) Quantidade (un.)	Nipple 1 1/2" Igual ou superior aos tubos Igual ou superior aos tubos Macho NPT Macho NPT 2
Válvula 1 (Acompanha o IBC)	Tipo Diâmetro Nominal Material Classe de pressão Extremidades (entrada) Extremidades (saída) Quantidade (un.)	- - - - - - 1
Válvula 2 (Drenos)	Tipo Diâmetro Nominal Material Classe de pressão Extremidades (entrada) Extremidades (saída) Quantidade (un.)	Válvula de esfera 1/2" Igual ou superior aos tubos Igual ou superior aos tubos Macho NPT - 2
Válvula 3 (Limpeza Vapor)	Tipo Diâmetro Nominal Material Classe de pressão Extremidades (entrada) Extremidades (saída) Quantidade (un.)	Válvula Globo 1/2" Igual ou superior aos tubos Igual ou superior aos tubos Macho NPT - 2