

DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE VÁCUO PARA UM CONJUNTO DE SELADORAS DE EMBALAGENS

Willian Devis Dalchiavon¹
Rodrigo Konrath²

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o dimensionamento um sistema de alimentação de um conjunto de seladoras. Para realização deste dimensionamento foram utilizadas equações e orientações baseadas em literaturas apresentadas no desenvolvimento do referencial teórico. Este conjunto de seladoras está localizado em um processo produtivo de uma agroindústria localizada no extremo oeste de Santa Catarina, onde foram coletados os dados utilizados para necessários para realização dos estudos para o projeto. Através da coleta dos dados e utilização dos métodos abordados nas literaturas apresentadas no decorrer do trabalho, foi desenvolvido uma rede de distribuição com um diâmetro de 5” e com um gerador de vácuo com uma capacidade de 480 m³/h.

Palavras-chave: Vácuo, Seladoras, Dimensionamento, Perda de carga.

1 INTRODUÇÃO

Os processos produtivos atuais vêm se desenvolvendo com o passar do tempo, sempre visando um aumento de produção. Porém, não deve ser deixado de lado os padrões de qualidade, nem as características dos produtos nos aspectos nutricionais e visuais. Tanto é que para uma garantia desses aspectos dos produtos devem seguir normas de fabricação e processamento (Sacomano et al., 2018).

Uma alternativa encontrada para atender as normas de fabricação e processamento de alimentos, mantendo os aspectos visuais e nutricionais é a utilização de vácuo no processo de embalagem, o processo de embalagem a vácuo, consiste na redução da pressão interna em uma câmara hermética, onde ocorre a retirada do ar existente e a selagem das embalagens, promovendo uma diferença de pressão entre a parte interna das embalagens e a atmosfera em seu exterior. Essa diferença de pressão faz com que as embalagens reduzam seu tamanho, outro fator muito importante é que através desse processo é possível a ampliação da do tempo de validade dos produtos. (Ahmed *et al.*, 2018).

O processo de embalagem a vácuo envolve a utilização de equipamentos em três áreas distintas: geração, distribuição e utilização. O setor de geração é composto por bombas, as quais

¹UCEFF Faculdades. Acadêmico do Curso de Engenharia Mecânica. E-mail: Willain-devis@hotmail.com

² UCEFF Faculdades. Mestre em Física. E-mail konrath@uceff.edu.br.

realizam um diferencial de pressão produzindo o vácuo, variando sua forma de construção conforme o propósito de aplicação. O sistema de distribuição é constituído por tubulações e válvulas que transportam e armazenam vácuo até o ponto de uso. Já os equipamentos para utilização de vácuo empregam sistemas automatizados ou manuais para retirar o ar e selar embalagens em câmaras. Esses equipamentos frequentemente possuem bombas e redes próprias, resultando em gasto de energia durante os ciclos de trabalho, mesmo quando estão em vazio (Cavalcanti; Chagas, 2006).

Para se obter um melhor ganho produtivo nos processos em indústrias frigoríficas, vem se otimizando continuamente os processos, como, por exemplo, o processo de embalagem onde os produtos se encontram em fase final de produção. Comumente são utilizadas seladoras automáticas para o processo de embalagem a vácuo. Em virtude das otimizações de processos esses equipamentos são realocados sem uma prévia avaliação em suas tubulações de alimentação, ocasionado assim um problema onde as máquinas perdem eficiência devido à modificação nas tubulações que dificultam o escoamento dos gases gerando perda de carga no sistema.

Como os equipamentos já estão alocados no processo da planta frigorífica da melhor forma possível, levando em consideração o fluxo de produtos, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o melhor traçado para a instalação da tubulação, dimensionamento adequado do diâmetro dos tubos e identificar qual o melhor gerador de vácuo para o processo. Para que o sistema em um todo possua uma boa eficiência com a mínima perda de carga possível, para um conjunto seladoras de embalagem de produtos in natura localizada no setor de cortes e embalagem, em uma planta frigorífica de uma agroindústria no oeste de Santa Catarina

Além disso, a escolha do gerador de vácuo apropriado é crucial para atender às demandas específicas do sistema, assegurando a máxima eficiência energética e operacional. Este processo conjunto resultará em um sistema de vácuo bem dimensionado, capaz de proporcionar um ótimo desempenho ao minimizar as perdas de carga nas tubulações.

A realização do trabalho abordando o dimensionamento de uma rede possui como justificativa o aumento da qualidade do produto final, pois os produtos alimentícios são muito sensíveis às condições de vácuo, sendo que com um sistema bem projetado melhoraria a qualidade final dos produtos.

Outro ponto a ser citado é a eficiência do sistema, pois com um sistema eficiente sem perdas consideráveis devido à tubulação promovem uma economia energética e uma redução de custos a longo prazo. Ao se dimensionar corretamente o sistema e sua bomba, é possível

redução de gastos em manutenção, pois com isso ocorre a redução dos desgastes dos equipamentos gerando uma manutenção menos frequente

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FUNDAMENTOS TERMODINÂMICOS

O estado de agregação da matéria depende da liberdade das partículas. No estado sólido, as partículas estão próximas e fortemente ligadas. Já no estado líquido, as partículas estão próximas, mas é possível ocorrer uma movimentação entre elas. Um fator que pode influenciar no estado da matéria é a variação de temperatura, podendo transformar um sólido em líquido. No estado gasoso, as partículas estão distantes e interagem por colisões. A densidade e energia das partículas afetam essas interações. Algumas substâncias já são gases em condições normais. A pressão do vapor aumenta com a temperatura, afetando as propriedades do estado gasoso. (Hablanian, 2017).

A temperatura tem grande influência no estado dos gases, para definirmos um conceito de temperatura, podemos determinar uma velocidade média para o conjunto de moléculas, chamada de temperatura absoluta, definida em uma escala que é proporcional à energia cinética no centro de massa das moléculas, (Moutinho *et al.*, 1980).

A definição do conceito de pressão é definida pela força normal que um fluido exerce sobre uma determinada área. Este conceito pressão só é corretamente empregado quando se trata de fluidos. A pressão P pode ser definida pela Eq. 1: (Çengel, 2007).

$$P = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Onde:

P = Pressão [Pa];

F = Força [N];

A = Área [m²].

Logo o ar atmosférico é uma mistura de vários gases, sendo assim a pressão total é a soma das pressões parciais dos gases existentes (Massey, 2006).

Como o vácuo absoluto não é possível, a pressão é proporcional a densidade molecular dos gases. Onde sua pressão, volume e temperatura variam de uma forma não proporcional devido à presença de vários gases na atmosfera. Porém, existe a constante que relaciona todos os gases a qual possui mesmo valor em qualquer tipo de gás, a constante R , encontrada na

equação dos gases ideais, Eq. 2 (Menezes, 2009).

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (2)$$

Onde:

P = pressão [Pa];

V = volume [m³];

n = número de mols da amostra gasosa;

R = constante universal dos gases perfeitos;

T = temperatura [K].

Considerando um reservatório com uma única abertura onde o gás é bombeado, apresentando uma pressão P , em que a velocidade de bombeamento é definida como o volume de gás retirado por segundo, chamado de velocidade de bombeamento (S) e observado a partir da estrutura $S = \frac{\Delta V}{\Delta t}$. A quantidade de gás bombeada por unidade tempo, denominada de fluxo Q , é proporcional à pressão de gás na câmara, dado a partir da Eq.3 supondo-se que exista uma temperatura constante. Assim, a velocidade de bombeamento é mensurada em $l \cdot s^{-1}$ e o fluxo é medido em mbar (O'Hanlon, 2003).

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3)$$

Onde:

Q = Vazão volumétrica [m³/s]

V = volume da câmara [m³]

t = Tempo [s]

Em um sistema onde uma bomba está ligada em um reservatório, as tubulações até o reservatório apresentam uma resistência Z para o deslocamento de gás, onde é gerado uma diferença de pressão entre a bomba e o reservatório. Assim, a condutância C , igual ao inverso da resistência ($C = \frac{1}{Z}$), é a quantidade de gás que passa pelo tubo por unidade de tempo e unidade de diferença de pressão, expressando-se pela Eq. 4: (Andrade, 2014).

$$Q = C \cdot (p_1 - p_2) \quad (4)$$

Q = Vazão volumétrica [M³/h];

C = Condutância;

p1 = Pressão;

Os sistemas de vácuo podem ser estáticos ou dinâmicos. Em sistemas estáticos não ocorre desgaseificação, nele é realizado o vácuo e o mesmo é mantido, sim, alteração da pressão

com o tempo. Já nos sistemas dinâmicos, são sistemas onde é necessário o bombeamento contínuo para manter a pressão interna, o mais utilizado nas indústrias (Santos Junior, 2020).

2. 2 FUNDAMENTO DO ESCOAMENTO DE FLUIDOS

Para um bom funcionamento dos sistemas de vácuo, devem ser levados em consideração algumas condições, como regime de escoamento, tipo de fluxo, pressões e velocidade de escoamento dos fluidos transportados.

Em pressões mais elevadas o regime de escoamento é caracterizado por Reynolds (Re), onde valores que ultrapassem $Re = 2300$ são considerados turbulentos, e inferiores são considerados laminares (Simões, 2020).

Para construção de equação que nos fornece Re, possuem muitas variáveis que influenciam no cálculo, como fluido transportado, velocidade em que o fluido se desloca no interior da tubulação, rugosidade, geometria e temperatura da superfície da tubulação. Re é expresso pela Eq. 5, que nos fornece um resultado adimensional (Çengel, 2007).

$$Re = \frac{\rho \cdot D \cdot V_{méd.}}{\mu} \quad (5)$$

Onde:

Re = Reynolds;

ρ = Densidade do fluido em $[kg/m^3]$;

D = Diâmetro da tubulação [m];

$V_{méd.}$ = velocidade média de escoamento [m/s];

μ = viscosidade dinâmica $\left[\frac{Ns}{m^2}\right]$.

O dimensionamento mais adequado em uma tubulação, busca garantir a eficácia do sistema em atender às exigências do projeto e promover economia nos custos de instalação e operação. A escolha de diâmetros menores de tubulação pode reduzir os custos de instalação, porém pode possuir maiores custos de operação do sistema, especialmente devido ao aumento do consumo elétrico, uma vez que a potência instalada está relacionada à perda de carga, (Azevedo Netto; Fernández, 2015).

Para calcularmos o diâmetro econômico de uma tubulação podemos recorrer à equação de Bresse Eq.6.

$$D = k\sqrt{Q} \quad (6)$$

Onde:

D = Diâmetro da tubulação [m]

K = Valor tabelado (0,8 a 1,2)

Q = Vazão do sistema [m^3/s]

Em pressões mais baixas, o escoamento se caracteriza pelo livre percurso médio (λ) das moléculas de gás com relação a um comprimento do componente (como o diâmetro do tubo). Essa relação é traduzida pelo número adimensional de Knudsen (Kn), que apresenta diferentes valores entre regimes de fluxo a baixa pressão (Yang *et al.*, 2019). A Tabela 1 apresenta os diferentes valores observados.

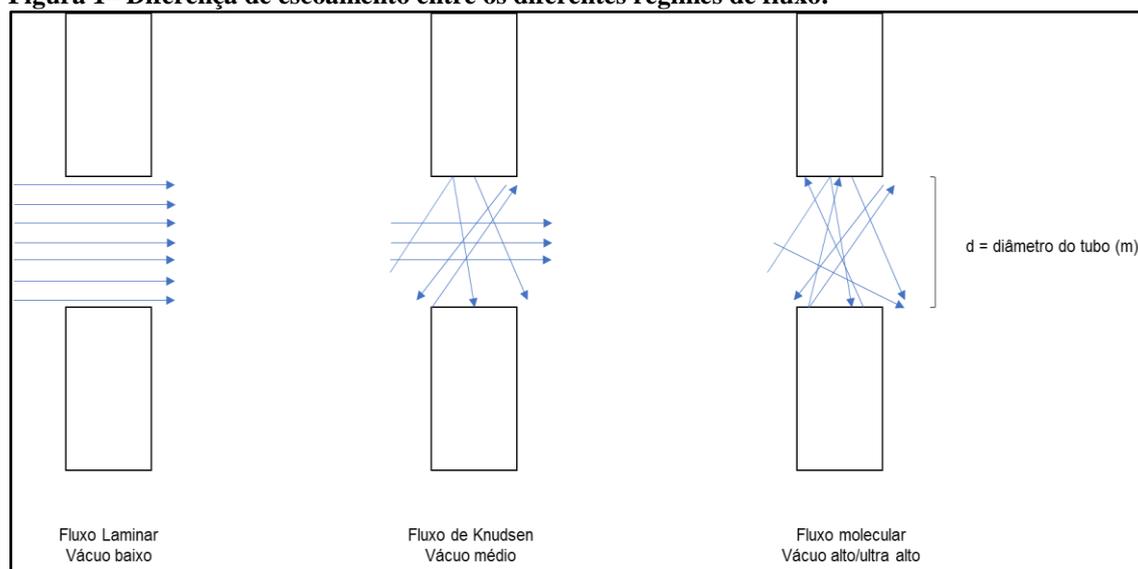
Tabela 1 – Valores de transição entre regimes de fluxo em baixa pressão.

Fluxo	Valores segundo Holland et al. (1974)	Valores segundo Pfeiffer Vacuum (2009)	Valores segundo Andrade (2014)
Fluxo Molecular	$Kn > 3$	$Kn > 1$	$Kn > 0,5$
Fluxo Intermédio ou de Knudsen	$0,01 > Kn > 3$	$0,01, Kn > 1$	$0,01 > Kn >$
Fluxo Viscoso	$Kn < 0,01$	$Kn < 0,01$	$Kn < 0,01$

Fonte: Holland et al (1974), Pfeiffer Vacuum (2009).

O escoamento nos fluxos, portanto, também são diferentes, tornando-se cada vez mais evidente à medida que o número Kn aumenta, uma vez que o número de colisões por escoamento com as paredes também aumenta. Esse processo é representado pela Figura 1.

Figura 1– Diferença de escoamento entre os diferentes regimes de fluxo.



Fonte: Pfeiffer Vacuum (2009).

No fluxo viscoso laminar, o gás se desloca em camadas sobrepostas, com a maior velocidade na parte central, havendo colisão quase nula com as paredes do tubo. No fluxo correspondente à faixa de transição, pode-se observar que ocorrem algumas colisões entre as

moléculas e as paredes da tubulação. Já o fluxo turbulento ocorre quando há grandes pressões e a velocidade é muito elevada provocando mudanças abruptas de direção e velocidade dos gases (Pfeiffer Vacuum, 2009).

Para a região onde ocorre o fluxo molecular não é possível definir a viscosidade, sendo assim não é possível utilizar Reynolds. Dessa forma, a condutância em um tubo em um fluxo molecular é definida a partir da geometria do tubo. Nessa condição, a avaliação do comportamento do gás deve observar o tubo que está sendo utilizado (Carneiro, 2018).

O fluxo de Knudsen, que é o intervalo de transição entre o fluxo viscoso e molecular, na faixa de média vácuo: $\lambda \approx d$. O produto da pressão P pelo diâmetro D de um determinado tubo para um determinado gás a uma determinada temperatura, pode ser usado como uma grandeza que caracteriza diversos tipos de fluxo (Leybold, 2023). Assim, no vácuo médio, o fluxo de Knudsen pode ser obtido por meio da Expressão 1:

$$\frac{d}{100} < \lambda < \frac{d}{2} \Leftrightarrow 6.0 \cdot 10^{-1} > P \cdot D > 1.3 \cdot 10^{-2} \text{ mbar} \cdot \text{cm} \quad (1)$$

Em um projeto de sistema a vácuo, o fluxo turbulento não é tão importante porque a quantidade de gás bombeado continuamente, em geral, $Q < 40 \text{ mbar L s}^{-1}$, apresentará um regime viscoso desde que o diâmetro D seja especificado conforme Expressão 2, onde Q representa o fluxo do gás que flui no tubo. Mas em grande maioria dos casos os diâmetros utilizados são superiores dos calculados (Carneiro, 2018).

$$D > \frac{Q}{120} = \frac{40}{120} \cong 0,3 \text{ cm} \quad (2)$$

Todos os fluidos ao passarem por tubulações sofrem uma queda de pressão devido as resistências impostas pelos condutos aos fluídos. Para vencer essas resistências, os fluídos desprendem energia a qual é convertida em calor e transferida para o ambiente (Silva Telles 2001). As resistências podem ser classificadas em dois conjuntos as resistências:

Externas: ocorre devido o atrito do fluído com as paredes da tubulação, mudanças de direção e acelerações.

Internas: estas acontecem devido ao atrito entre as moléculas do fluido, este atrito é denominado como viscosidade.

As quedas de pressão externas podem ser localizadas, que consistem em postos específicos da rede de distribuição, sendo curvas, registros, reduções, derivações entre outras. Além das perdas localizadas existem as perdas contínuas que ocorrem em toda a tubulação devido ao atrito do fluido nas paredes dos condutos. A queda de pressão contínua pode ser expressada pela equação de Darcy-Weisbach Eq. 7 (Gomes, 2012)

$$hf = f \cdot \frac{L \cdot V^2}{2gD} \quad (7)$$

Onde:

hf = Perca de carga [m];

f = Coeficiente de atrito;

L = Comprimento da tubulação [m];

D = Diâmetro [m];

V = Velocidade $\left[\frac{m}{s}\right]$;

As perdas de cargas pontuais são ocasionadas por ligação de acessórios no sistema, sendo válvulas, curvas, registros, derivações, etc. A adição desses acessórios a rede promove uma alteração nos módulos de direção e velocidade dos sistemas, a Eq. 8 expressa essa perda de carga (Gomes, 2012).

$$hf_{loc} = k \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (8)$$

Onde:

hf_{loc} = Perda de carga localizada [m];

K = Valor experimental para cada acessório [tabela 2];

V = Velocidade do fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$;

g = Gravidade $\left[\frac{m}{s^2}\right]$;

Tabela 2 – Valores de k para acessórios.

Acessório	k	Acessório	k
Cotovelo de 90° raio curto	0,9	Válvula de ângulo aberta	5
Cotovelo de 90° raio longo	0,6	Válvula de globo aberta	10
Cotovelo de 45°	0,4	Válvula de pé com crivo	3
Curva de 90°, r/D=1	0,4	Válvula de retenção	2,5
Curva de 45	0,2	Curva de retorno, $\alpha=180^\circ$	2,2
Curva de 22 ½°	0,1	Válvula de bóia	6
Tê, passagem direta	0,9	Controlador de vazão	2,5
Tê, saída lateral.	2,0	Comporta aberta	1,0
Bocais	2,75	Existência de pequena derivação	0,03
Ampliação gradual	0,3	Medidor Venturi	2,5
Junção	0,4		
Redução gradual	0,15		

Fonte: Gomes (2012).

2. 3 ELEMENTOS DE UM SISTEMA A VÁCUO

Um sistema de vácuo pode ser construído de diversas formas, onde sua bomba de vácuo

pode ser instalada em sua câmara de utilização ou pode ser utilizado tubulações para transporte do vácuo até a câmara.

Tubulação é definida como um conjunto de tubos e seus acessórios, utilizados para transportar diversos tipos de materiais com capacidade de escoamento, desde gases até substâncias altamente viscosas. Essas tubulações podem lidar com pressões que variam de próximas ao vácuo absoluto até cerca de 100 kg/mm². No contexto industrial, as tubulações desempenham um papel crucial ao conduzir fluidos necessários nos processos de produção. Elas representam uma parcela significativa dos custos da instalação industrial, chegando a cerca de 25% do custo total, e a montagem das tubulações pode compor aproximadamente 45% do valor dos equipamentos, (Telles, 2001).

Telles (2001) ressalta importantes considerações a serem levadas em conta ao projetar tubulações internas. Aqui estão os principais pontos destacados por ele:

1. Listagem de Equipamentos Principais: Enumerar os principais equipamentos envolvidos no processo.
2. Disposição de Equipamentos: Posicionar os equipamentos alinhados em filas paralelas. Equipamentos maiores devem ficar no centro das edificações em fileiras.
3. Cotas de Elevação: Instalar equipamentos a uma altura mínima para facilitar operações e manutenção.
4. Faixas de Tráfego: Em áreas de circulação, podem ser construídas pontes elevadas de tubulações, preferencialmente no centro da edificação, respeitando larguras máximas.
5. Distâncias de Largura e Altura: Valores variáveis dependendo da natureza do projeto e práticas dos projetistas.
6. Facilidade de Instalação e Manutenção: Prever acesso para equipamentos de elevação e movimentação. Acessórios como registros e válvulas devem ser acessíveis do solo.
7. Drenagem: Separar a drenagem de fluidos inflamáveis ou contaminantes da pluvial. Incluir muretas de contenção em áreas de despejo.

Após traçar o layout das tubulações, o autor orienta quanto ao arranjo e detalhamento das linhas, considerando:

- Condições de Serviço: Compreender a finalidade da linha para considerar aspectos como aclives.
- Flexibilidade: Permitir que a linha absorva esforços de dilatação térmica.
- Transmissão de Esforços e Vibrações: Evitar que as tubulações sofram ou transmitam esforços e vibrações aos equipamentos.

- Acessibilidade: Garantir acesso para inspeção e manobra de acessórios como registros e válvulas.
- Construção e Manutenção: Planejar espaço para construção e futuras manutenções, incluindo pinturas.
- Segurança, Economia e Aparência: Considerar segurança, custos econômicos e estética ao escolher o traçado das tubulações.

O autor destaca a importância de uma abordagem criteriosa na fase de planejamento, garantindo a funcionalidade, segurança, acessibilidade e eficiência das tubulações industriais

Antes de iniciar um projeto de tubulações industriais, é fundamental identificar todas as atividades que ocorrerão na instalação. Embora não seja necessária uma descrição minuciosa, é importante que nenhuma atividade seja esquecida. Além disso, é crucial calcular a área necessária para cada atividade e considerar a circulação dos materiais na planta. O planejamento das linhas de tubulações deve ser feito para não dificultar o acesso aos locais de trabalho (Telles, 2001)

2.4 ELEMENTOS DE UM SISTEMA DE VÁCUO

Os sistemas de vácuo possuem diversas formas construtivas, as quais são projetadas conforme as necessidades de utilização do empreendimento. Entre esses diversos modelos, a principal equação para modelagem de um sistema é representada pela Eq. 9, a qual caracteriza um processo de bombeamento (Degasperi, 2022).

$$V_{CV} \frac{dp_{CV}(t)}{dt} = -S_{ef} p_{CV}(t) + \sum_{i=1}^n Q_i \quad (9)$$

Onde:

V_{CV} = volume da câmara de vácuo;

p_{CV} = pressão na câmara de vácuo;

S_{ef} = velocidade efetiva de bombeamento;

$\sum_{i=1}^n Q_i$ = soma das vazões das possíveis fontes de gases e vapores no sistema, multiplicado por kT

A velocidade efetiva do bombeamento (S_{ef}) é função da C_{Total} (condutância total) e de S_{bv} (velocidade de bombeamento da bomba de vácuo), conforme determina a Eq. 10:

$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{S_{bv}} + \frac{1}{C_{total}} \quad (10)$$

Em projetos simplificados de redes de vácuo, é considerada constante a pressão final da câmara de vácuo, sendo assim uma vez determinada a condutância total da rede podemos definir a velocidade de bombeamento através da Eq. 11. Sendo assim podemos adicionar uma ou mais bombas ao sistema conforme a necessidade para conseguir a pressão e eficiência requerida (Degasperi, 2022).

$$\frac{1}{S_{ef}} = \frac{1}{S_{bv}} + \frac{1}{C_{total}} \Rightarrow S_{bv} = \frac{S_{ef} C_{total}}{C_{total} - S_{ef}} \quad (11)$$

Um dos aspectos centrais do fluxo de gases é sua natureza e que ela pode variar consideravelmente a depender da pressão e da geometria, tanto da câmara de vácuo, quanto da tubulação na qual o gás se move. De modo geral, quanto mais longa a tubulação e menor seu diâmetro, maiores seriam as perdas, isto é, menor é a eficiência de evacuação da bomba para a câmara (Menezes, 2009).

2.5 BOMBAS DE VÁCUO

As bombas de vácuo são equipamentos que promovem o deslocamento de gás, assim gerado um diferencial de pressão. Existem diversos tipos e modelos de bombas de vácuo, mas seu princípio de funcionamento se baseia em dois grupos (Moutinho *et al.* 1980)

Bombas de deslocamento volumétrico, são bombas que trabalham através da rotação de um motor acoplado a sistemas mecânicos que realizam um diferencial de pressão entre a admissão e escape do equipamento. Alguns exemplos são bombas de palhetas, roots, anel líquido, etc. (Gama, 2002).

Em aplicações onde é necessário a geração de uma grande pressão de vácuo, são utilizadas bombas de fixação, onde estas bombas retêm os gases em seu interior. Devido ao seu princípio de funcionamento essas bombas possuem um alto valor de aquisição e são utilizadas em sua maioria em aplicações laboratoriais (Gama, 2002).

Para seleção correta de equipamentos geradores de vácuo mesmo com diferentes formas construtivas e princípios de funcionamento, devemos levar em consideração a pressão de trabalho e a vazão, pode se recorrer a Eq. 12 para determinar a vazão aproximada da bomba. Após isso podemos selecionar o modelo e princípio de funcionamento de acordo com catálogo de fabricantes (Moutinho *et al.* 1984).

$$S = 2,3 \cdot \frac{V}{t_2 - t_1} \cdot \log \frac{p_1 - p_0}{p_2 - p_0} \quad (12)$$

Onde:

S = Vazão [l/s]

V = Volume da câmara de vácuo [l]

t_2-t_1 = Tempo de produção de vácuo [s]

p_1-p_0 = Pressão inicial atmosférica [mbar]

p_2-p_0 = Pressão final absoluta [mbar]

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido em uma agroindústria localizada no extremo oeste de Santa Catarina que atua no ramo do setor frigorífico com o abate, cortes e embalagens de aves, para desenvolvimento de uma rede de vácuo para um conjunto de seladoras de embalagem.

Com base nos dados da literatura e no aporte bibliográfico, desenvolveram-se relativas às perdas de cargas impostas em um sistema de transporte de fluidos. Para utilização destas equações foi necessária a coleta de informações do atual sistema da planta agroindustrial.

Com base em visita *in-loco* foi realizada a coleta de informações sobre o sistema e processo produtivo. Onde com o auxílio de instrumentos de medição foram coletados os dados necessários para realizar um estudo e direcionamento adequado da tubulação de transporte de vácuo.

Na visita ao local foram coletados dados dos equipamentos como tempos de vácuo que as máquinas executam a cada ciclo de funcionamento, tempo total dos ciclos. Esses dados foram obtidos através da consulta da IHM (interface homem Máquina) dos equipamentos.

Foram avaliados diversos casos, sendo que o utilizado foi o ciclo no qual possui um maior “tempo de vácuo”, o tempo de vácuo é a parte do processo de selagem onde ocorre a abertura da válvula que aciona o vácuo e o ar é retirado da câmara de vácuo da máquina.

Também foram avaliados a quantidade média de ciclos que o equipamento executa por hora, neste caso foi realizado o acompanhamento da máquina durante períodos do dia aleatórios onde foi avaliada a quantidade de ciclos realizados em intervalos de 5 minutos durante o período de 3 dias, realizando uma média dos ciclos executados por hora.

Foi realizada a coleta de dados dos equipamentos nos manuais fornecidos pelos fabricantes para obter informações como volume da câmara de vácuo dos equipamentos, vazão de projeto do equipamento, pressões de vácuo recomendadas.

Após a coleta dos dados pode ter uma base da perda de carga aceitável das tubulações para que a máquina execute seus ciclos com uma boa eficiência e alta produtividade.

Com a análise do local e posicionamento dos equipamentos no processo produtivo, foi possível realizar uma estimativa do percurso que a tubulação deve seguir.

Tendo em vista que se trata de um processo que possui por finalidade a produção de alimentos por exigências sanitárias, as bombas de vácuo não devem permanecer na parte onde ocorre o processo de cortes e embalagens dos produtos, bem como todos os equipamentos e tubulações devem ser construídos de aço inoxidável. Sendo assim foi desenvolvido um percurso com a menor distância possível e com a instalação da menor quantidade de acessórios na rede para reduzir a perda de carga.

Após determinado o percurso da rede, foi possível mensurar qual o comprimento da rede e quantos acessórios serão necessários utilizar para transporte do vácuo de suas unidades geradoras até a unidade consumidora.

Com o levantamento de dados concluído foi possível realizar os cálculos para ter uma estimativa de perda de carga que ocorrem nas tubulações, e também o consumo necessário para realizar o processo.

Com as perdas de cargas e vazão mínima necessária dos equipamentos possível realizar o cálculo para dimensionamento de uma bomba de vácuo para este conjunto de seladora, levando em consideração também a melhor forma construtiva e custo benéfico do equipamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta etapa serão apresentados métodos utilizados para elaboração onde serão apresentados dados coletados no processo e equações utilizadas para o dimensionamento da tubulação de vácuo.

Na Tabela 3 são apresentados dados dos equipamentos presentes no processo, sendo duas seladoras, se tratam de dois equipamentos do fabricante Selovac. Uma seladora modelo Duplavac 2-110 e uma Steravac 750. Sendo que esses dados foram coletados no local onde os equipamentos estão alocados, e no manual dos equipamentos.

Tabela 3 – dados dos equipamentos .

Equipamento	Volume da câmara de vácuo (m ³)	Pressão de final de vácuo (Pa)	Pressão atmosférica (Pa)	Tempo total de ciclo (s)	Tempo médio de vácuo (s)	Velocidade bombeamento (m/s)
Steravac 750	0,101 m ³	87992,8 Pa	101325 Pa	16	9 s	13,1 m/s
Duplavac 2-110	0,224 m ³	87992,8 Pa	101325 Pa	20	18 s	10,7 m/s

Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 1 – Steravac 750.

Fonte: Selovac, manual de operação da IHM steravac 750, (2014).

Figura 2 – Duplavec 2-110

Fonte: Selovac, manual do usuário (2010).

4.1 VAZÃO REQUERIDA DO SISTEMA

Com a utilização dos dados coletados, e utilização das equações citadas no referencial teórico podemos iniciar os cálculos começando pelo cálculo da vazão teórica dos equipamentos:

- Vazão steravac

$$Q1 = \frac{V}{T}$$

$$Q1 = \frac{0,101.}{9}$$

$$Q1 = 0,0112 \frac{m^3}{s}$$

- Vazão Duplavec

$$Q2 = \frac{V}{T}$$

$$Q2 = \frac{0,224}{18}$$

$$Q2 = 0,0124 \frac{m^3}{s}$$

- Vazão total de sistema

$$Qt = Q1 + Q2$$

$$Qt = 0,0112 + 0,0124$$

$$Qt = 0,0236 \frac{m^3}{s}$$

4.2 TUBULAÇÃO

- Diâmetro mínimo da tubulação

$$D = k\sqrt{Q}$$

$$D = 0,9 \cdot \sqrt{0,0236}$$

$$D = 0,138 \text{ m}$$

$$D = 138,2 \text{ mm}$$

Será utilizado uma tubulação de 5 polegadas por se tratar da mais próxima da medida calculada onde essa tubulação apresenta medida de 127 mm de diâmetro

- Regime de escoamento

$$Re = \frac{\rho \cdot D \cdot V_{méd.}}{\mu}$$

$$Re = \frac{1,2 \cdot 0,127 \cdot 13,1}{1,72 \cdot 10^{-5}}$$

$$Re = 116072,95$$

Tabela 4 – Dados das tubulações.

Comprimento de tubulação	Quantidade de acessório	Tipo de acessório	Material da tubulação
41 m	4	Curva 90°	Aço Inox AISI 316
	1	Te saída lateral	Aço Inox AISI 316

Fonte: Elaboração própria (2023).

- Perda de carga pelos dutos

$$hl_{tub} = f \cdot \frac{L \cdot V^2}{2gD}$$

$$hl_{tub} = 0,022 \cdot \frac{41 \cdot 13,1^2}{2 \cdot 9,80,127}$$

$$hl_{tub} = 62,1 \text{ m}$$

Tabela 5 – Acessórios da rede.

Tipo de acessório	Quantidade de acessório	Valor experimental para cada acessório
Curva 90°	4	0,9
Te saída lateral	1	2
		K total = 5,6

Fonte: Elaboração própria (2023).

- Perda de carga pelos acessórios

$$hl_{loc} = k \cdot \frac{V^2}{2g}$$

$$hl_{loc} = 5,6 \cdot \frac{13,1^2}{2g}$$

$$hl_{loc} = 49,6 \text{ m}$$

- Perda de carga total

$$hl = hl_{tub} + hl_{loc}$$

$$hl = 62,1 + 49,6$$

$$hl = 111,78 \text{ m}$$

- Calculo vazão da bomba necessária

$$S = 2,3 \cdot \frac{V}{t_2 - t_1} \cdot \log \frac{p_1 - p_0}{p_2 - p_0}$$

$$S = 2,3 \cdot \frac{(294,84 + 232,5)}{9} \cdot \log \frac{1013,25}{213}$$

$$S = 91,07 \text{ l/s}$$

$$S = 327,85 \text{ m}^3/\text{h}$$

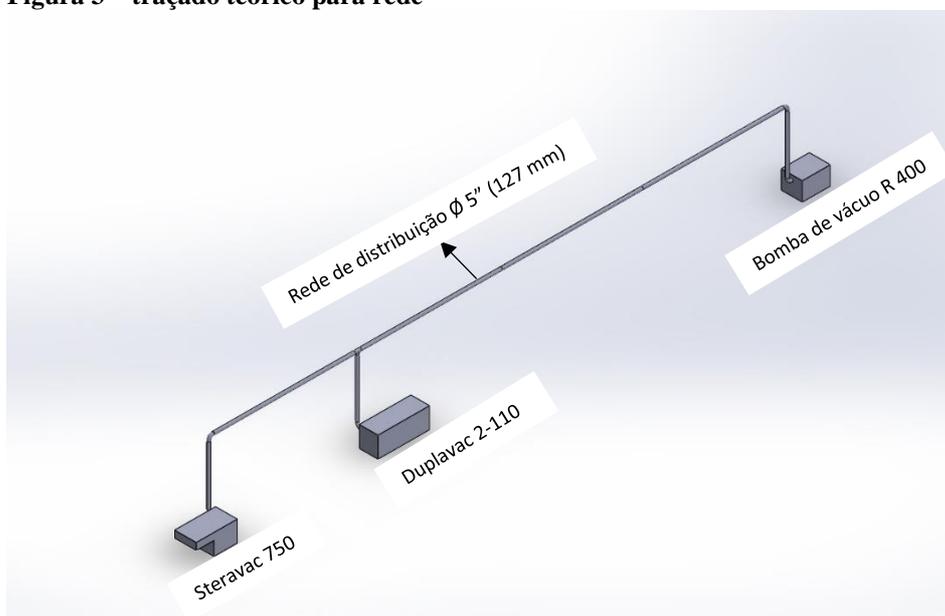
Partindo da vazão calculada foi avaliado o catalogo de produtos da fabricante Busch, levando em consideração a pressão de trabalho, o ambiente em que o equipamento está trabalhando e relacionando com o referencial teórico anteriormente citado foi escolhida uma bomba de palhetas rotativas R5 RA 0400 C, a Tabela 6 apresenta dados técnicos do equipamento

Tabela 6 – Dados técnicos bomba R5 RA 0400c.

Capacidade nominal de bombeamento	410 / 480 m ³ /h (50 / 60 Hz)
Pressão final	0,1 hPa (mbar) (50 / 60 Hz)
Potência nominal do motor	11 / 15 kW (50 / 60 Hz)
Velocidade nominal do motor	1000 / 1200 rpm (50 / 60 Hz)
Consumo de energia a 100 mbar	8,2 / 10,0 kW (50 / 60 Hz)
Consumo de energia na pressão fina	4,7 / 5,6 kW (50 / 60 Hz)
Nível de ruído (ISO 2151)	77 / 79 dB(A) (50 / 60 Hz)
Capacidade de óleo	12 l
Peso aprox.	435 kg
Dimensões (L x W x H)	1309 x 862 x 711 mm
Entrada de gás / saída	G 3" / G 3"

Fonte: Adaptado de Busch Vacuum Solutions (2021).

Para traçado do percurso da tubulação proposta para alimentação das máquinas, foi realizado um esboço representado pela Figura 3 somente para fins demonstrativos do percurso. Onde o equipamento gerador de vácuo está instalado na área externa da indústria. As máquinas foram posicionadas em linha para diminuir a perda de carga ocasionada por acessórios, também foi utilizada uma única tubulação para alimentação para diminuir as perdas geradas pela tubulação e também para utilização de uma única central geradora de vácuo.

Figura 3 – traçado teórico para rede

Fonte: Elaboração própria (2023).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através dos itens abordados no referencial teórico, e visita no local onde ocorre o processo produtivo. Foi realizado a coleta de dados dos equipamentos e avaliação do processo

produtivo da indústria e fluxo de produtos no local. Para o dimensionamento de uma rede de vácuo.

Por meio de cálculos foi proposta uma rede com diâmetro de cinco polegadas (aprox. 12,7cm) para atender o consumo dos equipamentos.

Para suprir o consumo total dos equipamentos foi proposta uma bomba com capacidade de produção de 480m³/h, sendo ela uma bomba de palhetas rotativas, a seleção deste equipamento teve como base a utilização de equações citadas no referencial e busca por meio de catálogos de fabricante um equipamento com uma vazão próxima do calculado para atender o processo levado em consideração a utilização de toda a capacidade produtiva das máquinas.

Com a conclusão podemos observar que é possível realizar algumas alterações no sistema podendo ter ganhos na produtividade e diminuição do custo de operação, sendo assim será apresentada a proposta para os gestores do local onde foi realizado a avaliação para discutir a proposta.

Acredita-se que com o objetivo foi cumprido, que eram: o dimensionamento do diâmetro para uma rede de vácuo, avaliação do melhor traçado para a tubulação percorrer para alimentação dos equipamentos e identificação do gerador de vácuo para atender o processo.

REFERÊNCIAS

AHMED, Ishfaq et al. An overview of smart packaging technologies for monitoring safety and quality of meat and meat products. **Packaging Technology and Science**, v. 31, n. 7, p. 449-471, 2018.

ANDRADE, José R. F. **Projeto de Rede de Produção e Distribuição de Vácuo Usado na Vulcanização de Pneus**. 2014, 184 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Porto, Porto, 2014. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/89611/2/31887.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2023.

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNÁNDEZ, M. F. Manual de hidráulica. 9. ed. São Paulo: Blucher, 2015

BUSCH VACUUM SOLUTIONS. **Bombas de vácuo de palhetas rotativas lubrificadas a óleo**. 1. ed. rev. [S. l.: s. n.], 2021. 2 p. Disponível em: https://www.buschvacuum.com/br/assets/9441/1/Product%20Leaflet%20R5%20RA%200400%E2%80%9330630%20C_Brazil_Web_pt-br.pdf. Acesso em: 16 nov. 2023.

CARNEIRO, Joaquim A. O. **Tecnologia de Vácuo**. 2018. Publicação pedagógica. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/58933>. Acesso em: 28 abr. 2023.

CAVALCANTI, Pedro; CHAGAS, Carmo. **História da embalagem no Brasil**. São Paulo: Griffo, 2006.

ÇENGEL, Y.A.; CIMBALA, J.M. **Mecânica dos Fluidos – Fundamentos e Aplicações**, 1ª Edição, Editora McGrawHill, 2007.

DEGASPERI, Francisco T. Vazamento Virtual: modelagem e solução analítica. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, Campinas, v. 37, n. 4, p. 145-155, dez. 2018.

GAMA, Sergio. **Introdução à Ciência e Tecnologia de Vácuo**. 1. ed. Campinas - SP: [s. n.], 2002. 248 p. v. 1.

GOMES, Maria Helena Rodrigues. **APOSTILA DE MECÂNICA DOS FLUIDOS**. 1. ed. Juiz de fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2012. 79 p. v. 1.

HABLANIAN, Marsbed H. **High-vacuum technology: a practical guide**. London: Routledge, 2017.

LEYBOLD. **Como calcular a taxa de fluxo e os tipos de fluxo na física do vácuo**, fev. 2023. Disponível em: https://www.leybold.com/pt_br/knowledge/vacuum-fundamentals/fundamental-physics-of-vacuum/flow-rate-and-types-of-flow. Acesso em: 28 abr. 2023.

MOUTINHO, Augusto *et al.* **Tecnologia de vácuo: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES**. 1ª Edição em português. ed. Portugal: UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA, 1980. 216 p. v. 1.

MASSEY, Bernard S. **Mecânica dos Fluidos**. 18. ed. Abingdon: Taylor & Francis, 2006. *E-book*. Disponível em: <https://dokumen.tips/engineering/massey-libro-mecanica-de-fluidos.html?page=4>. Acesso em: 26 abr. 2023.

MENEZES, Cristian A. S. **gestão de Projetos: recomendações de procedimentos para o desenvolvimento, projeto, simulação, construção, montagem e caracterização de sistemas pré-vácuo**. 2009, 225 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2009. Disponível em: <http://www.pos.cps.sp.gov.br/files/dissertacoes/file/222/2336bba344d6ec2e00b1af273248e779.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2023.

O'HANLON, John F. **A User's Guide to Vacuum Technology**. London: John Wiley & Sons, Inc., 2003. *E-book*. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/0471467162>. Acesso em: 26 abr. 2023.

PFEIFFER VACCUUM. **Vacuum Technology - Know How**. Headquarters/Germany: Pfeiffer Vacuum GmbH, 2009. *E-book*. Disponível em: https://www.triumf.ca/sites/default/files/lecture_vac_Pfeiffer-Vacuum-Technology-KnowHow.pdf. Acesso em: 26 abr. 2023.

SANTOS JUNIOR, David R. dos. **Projeto de uma Estação de Sistema de Vácuo**. 2020, 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2020.

SACOMANO, José B. et al. **Indústria 4.0: Conceitos e Fundamentos**. São Paulo: Blucher, 2018. 182 p.

SELOVAC *et al.* **MANUAL DO USUÁRIO**: Duovac 2-55, Duplavac 2-62, Duplavac 2-84, Duplavac 2-110. Rev.07.10 CRA. ed. rev. São Paulo: Selovac, 2010. 22 p.

SELOVAC *et al.* **MANUAL DE OPERAÇÃO DA IHM STERAVAC 750**. 1. ed. rev. São Paulo: Selovac, 2014. 37 p.

SIMÕES, F. F. G. D. **Escoamento de um fluido newtoniano em torno de feixes de tubos a baixos números de Reynolds**: Um estudo numérico. 2020, 95 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia) – Universidade do Porto, Porto, 2020. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/129826/2/427332.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2023.

TELLES, Pedro C. Silva. **Tubulações industriais**: Materiais, Projeto, Montagem. 10^a. ed. São Paulo: Cromosete, 2001. 252 p.

YANG, Lim Y. et al. An improved three-dimensional implicit discrete velocity method on unstructured meshes for all Knudsen number flows. **Journal of Computational Physics**, v. 396, n. 1, p. 738-760, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021999119304863>. Acesso em: 28 abr. 2023.