



PROJETO CONCEITUAL DE TRANSPORTADOR PNEUMÁTICO PARA CEVADA EM MALTARIA DE PEQUENO PORTE

Aluna – Marina Neuls

151995@upf.br

Professor Orientador – Prof. Me. Guilherme Reschke do Nascimento / Projeto Mecânico
guilhermenascimento@upf.br

Comissão Examinadora – Prof. Dr. Fábio Goedel / Prof. Dr. Gustavo Prates Mezzomo

RESUMO

No setor industrial, empresas de pequeno ou grande porte exigem algum tipo de transporte de particulados, sendo essa etapa economicamente e qualitativamente um diferencial na produção final, busca-se sistemas de transporte cada vez mais eficientes. Considerando a otimização de produção e a alta demanda do setor malteiro, este estudo propõe o desenvolvimento do projeto conceitual de um transportador pneumático para grãos de cevada em uma maltaria de pequeno porte. Aplicou-se metodologia de desenvolvimento de projetos, compreendendo as etapas de identificação, concepção, dimensionamento, análises, seleção e modelamento. Com a determinação de requisitos de projeto e *layout*, estabeleceu-se o conceito estrutural do sistema pneumático e seus componentes, para apresentação de um modelo 3D do equipamento, como proposta de novo *layout* de processamento de cevada em malte. Além da análise de implementação positiva do sistema, avaliando sua capacidade de trabalho e vantagens do mesmo perante sistemas de transporte convencionais em indústrias de malte, se dá o incentivo em prosperar com estudos do desenvolvimento tecnológico da indústria malteira, tendo em vista a importância econômica do setor.

Palavras-chave: Processo de maltagem; Transporte pneumático; Modelamento; *Layout*.

1 INTRODUÇÃO

No ramo industrial, processo é um conjunto de etapas que envolvem a transformação da matéria-prima em produto final. Cada etapa envolvida em um procedimento de modificação pode ser dividida e caracterizada.

A produção de malte, dentro das operações envolvidas, é um processo biotecnológico que permite ao cereal desenvolver e/ou ativar o complexo enzimático que irá degradar o amido em açúcares fermentescíveis usados na produção de cerveja.

No Brasil, segundo Albibi (2014) a malteação é a principal aplicação econômica da cevada. Do total produzido anualmente, 75% é para fabricação de malte, e 95% deste é destinado a produção de cerveja. Dessa forma, é de interesse econômico e tecnológico o desenvolvimento do setor, com estudos e implementações na indústria malteira.

O transporte de materiais constitui uma das principais etapas de fabricação, tornando-se foco de análise para o aumento do rendimento operacional. Neste contexto, o transporte pneumático passa a ser uma alternativa, em função do baixo custo de aquisição e manutenção comparado aos transportadores de correia, canecas e helicoidal.

Um sistema de transporte pneumático consiste na movimentação de materiais particulados em distâncias horizontais e verticais dentro de um sistema de tubulação através de uma corrente de ar (SCHEIBEL, 2018).

O presente estudo apresenta o desenvolvimento do conceito de um sistema de transporte pneumático a ser implementado em uma maltaria de pequeno porte, com o modelamento do sistema em *Software CAD 3D*, sendo constituído por ventilador centrífugo, válvulas e tubulações, operando em fase diluída com pressão positiva, visando a análise de implementação do equipamento em *layout* existente.

Um novo *layout* de operação industrial com sistema pneumático, para ser implementado deve ser desenvolvido, passar por análises, simulações e se possível, testes em escala piloto, sendo assim, o desenvolvimento deste projeto é um estudo de conceito.

1.1 Objetivo geral e objetivos específicos

O presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver o projeto conceitual e dimensionamento de um transportador pneumático para transporte de grãos de cevada a ser implementado em indústria de malte de pequeno porte.

Para o atendimento do objetivo geral, relacionam-se os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar *layout* de processamento de cevada em indústria de malte;
- Definir o melhor *design* para o transportador pneumático que atenda a sua demanda de trabalho;
- Dimensionar um sistema de transporte pneumático para grãos de cevada, definindo as variáveis de trabalho;
- Desenvolver modelo 3D do sistema;
- Analisar a viabilidade de implementação do sistema de transporte proposto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

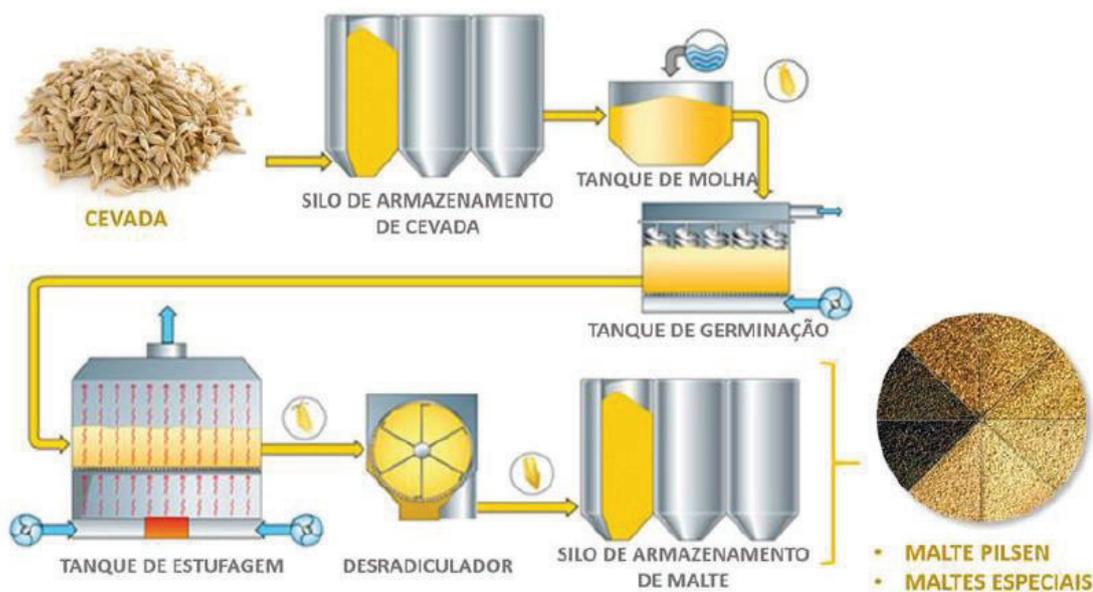
É de suma importância o entendimento de todos os fatores envolvidos no desenvolvimento de um projeto mecânico para assegurar todos os requisitos necessários do mesmo. Visando a elaboração de um *layout* de processamento de cevada em indústria de malte, com transporte pneumático, é necessário o estudo das características do grão transportado, suas etapas de produção, bem como o entendimento da funcionalidade, componentes e conceitos para o dimensionamento adequado do transportador, garantindo os parâmetros de projeto.

2.1 Processamento da cevada em malte

A Cevada é o principal cereal usado no fabrico de cerveja, sendo considerada o quarto cereal mais importante à escala mundial (OSÓRIO, 2016).

Na produção de cerveja, a cevada, passa previamente por um processo de conversão em malte, como mostra a Figura 1, para dissolver o amido contido nos grãos.

Figura 1 - Processo de maltagem: conversão de cevada em malte



Fonte: Osório (2016)

No processo de maltagem as etapas para a transformação da cevada em malte consistem em maceração (ou hidratação) onde a umidade do grão é elevada de 10% para 42-46%. Após o grão alcançar a umidade desejada, é realizada a germinação, onde o grão é submetido a condições de temperatura, que variam de acordo com o tipo de malte a ser produzido, e umidade controladas por 4 a 6 dias, para que haja a formação de enzimas que irão catalisar a hidrólise do amido, transformando-o em açúcares, e outras enzimas que irão degradar compostos indesejáveis no malte. Terminada a germinação, o agora malte verde é submetido a estufagem (secagem), que é realizada para cessar a germinação, garantir a estabilidade e posterior atividade das enzimas produzidas, fixando a composição química e formando cor, aroma e gosto ao malte (ALBIBI, 2014; OSÓRIO, 2016).

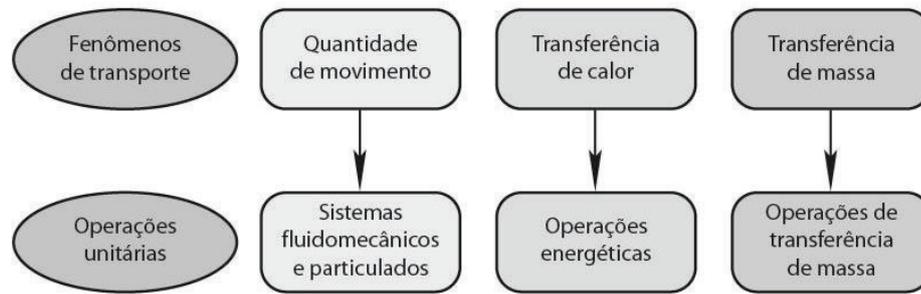
Com os grãos de cevada já ativados, o malte passa pelo processo de desradiculação, onde por meio de agitação mecânica as radículas formadas no processo de germinação são desprendidas dos grãos, finalizando a transformação da cevada. O malte finalizado é encaminhado ao silo de armazenamento para posterior expedição (OSÓRIO, 2016).

2.2 Operações unitárias

As operações unitárias, como comenta Sheibel (2018), são fundamentalmente operações físicas, embora possam envolver excepcionalmente reações químicas. Cada uma das etapas sequenciais de uma linha de produção industrial, sendo etapas intermediárias entre matéria-prima e produto final, é, portanto, uma operação unitária.

É de grande importância conhecer o fenômeno físico na qual determinada operação unitária se baseia. Segundo Cremasco (2018), qualquer que seja o processo pode ser caracterizado por diversas etapas, sendo estas de natureza física e/ou química, uma vez que este ramo tecnológico fomenta a investigação e aplicação de conceitos voltados a fenômenos de transporte, os quais fundamentam as bases científico-tecnológicas de operações e processos à aplicação de projetos técnicos, conforme mostra fluxograma da Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma de relação entre fenômenos de transporte e operações unitárias



Fonte: Cremasco (2018)

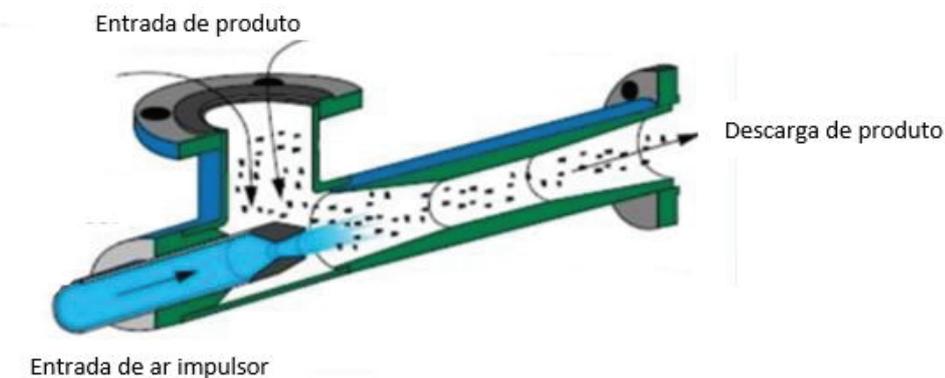
2.2.1 Sistemas fluidomecânicos e particulados

As operações unitárias que envolvem o transporte de fluidos, de sólidos, misturas de gases e líquidos, e mistura de sólidos e fluidos, levando em consideração a interação física entre fluido-fluido, fluido-sólido e sólido-sólido em sistemas de transporte, separação, mistura e/ou modificação de tamanho de partículas, são chamadas operações unitárias de quantidade de movimento. Enquadram-se na categoria de sistemas fluidomecânicos e particulados (SCHEIBEL, 2018).

Segundo Cremasco (2018), em sistemas particulados, é necessário conhecer a interação sólido-sólido e sólido-fluido, com ou sem o efeito de máquinas de fluidos. As operações unitárias ligadas a este tipo de sistema são mistura, transporte e cominuição da partícula, separação, centrifugação sólido-líquido, escoamento de fluidos através de leitos móveis e fixos de particulados, transporte hidráulico e pneumático de sólidos, entre outros.

Para máquinas de fluido normalmente o deslocamento do fluido ocorre dentro de tubulações, como mostra a Figura 3, muitas vezes é indispensável a utilização de sopradores, (*Blower*), ventiladores e compressores, equipamentos que promovendo a energia necessária para tal escoamento, por impulsionar o ar para a tubulação.

Figura 3 - Deslocamento de ar em máquina de fluido



Fonte: Adaptado de Geldart (1973)

Para dimensionamento, é imprescindível conhecer a distância total que o fluido irá percorrer, os materiais e acessórios que compõem a tubulação (cotovelos, curvas, medidores de vazão e demais acessórios), as propriedades do fluido, bem como a perda de carga gerada.

2.2.2 Transporte de sólidos

O transporte de sólidos é uma operação unitária que tem como objetivo movimentar sólidos granulares em regimes contínuos bem definidos no interior de áreas de produção.

Segundo Gomide (1983), fatores que implicam na seleção de um sistema de transporte são a substituição contínua de maquinários por outros mais sofisticados que não exijam grande número de operadores, variedade de sólidos, incluindo a viabilidade, capacidade, espaço e condições de transporte.

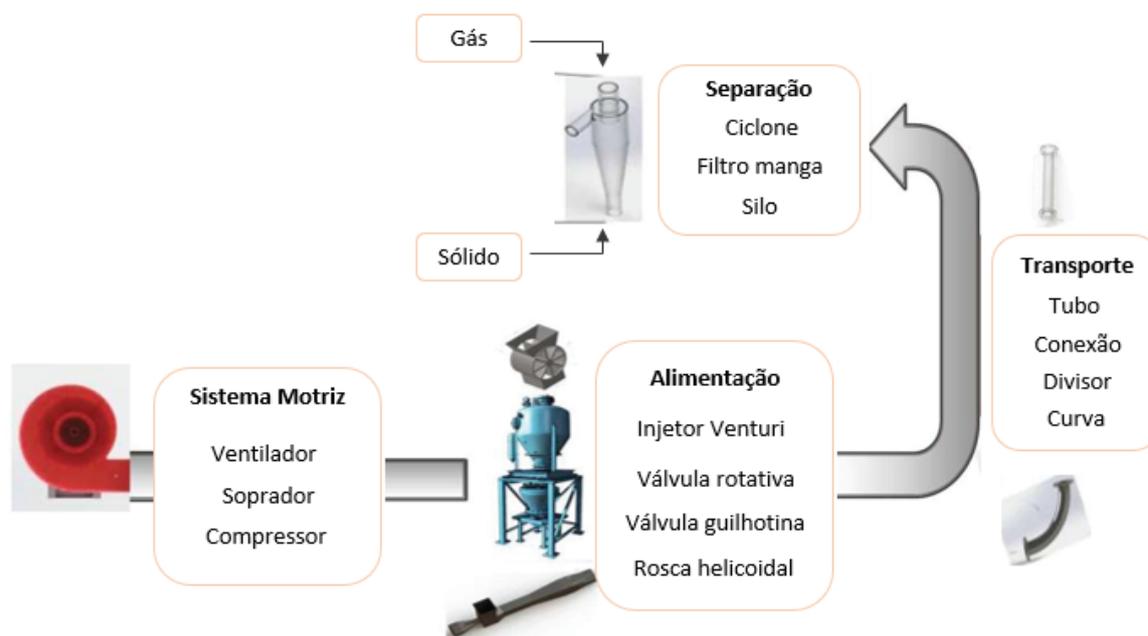
O tipo de equipamento a ser utilizado para o transporte de materiais sólidos deve levar em consideração o tipo de material a ser transportado, as distâncias e os desníveis entre o ponto de carga e descarga e a capacidade do equipamento (DENADAI, 2013).

2.3 Transporte pneumático

O transporte pneumático é uma operação unitária no qual materiais em pó, grãos ou particulados são transportados por tubulações através de um fluxo de gás inerte, a uma velocidade adequada, com pressão positiva ou negativa de um local para outro (GONÇALVES, 2016).

A operação do sistema de transporte é essencialmente constituída de quatro etapas como esquematizado na Figura 4.

Figura 4 - Etapas do sistema de transporte pneumático



Fonte: Adaptado de Lourenço (2019)

- **Sistema motriz:** responsável por fornecer energia necessária para movimentação do gás dentro da tubulação, podendo ser gerada por compressores, sopradores, ventiladores e bombas de vácuo;
- **Alimentação:** as partículas em repouso são adicionadas ao gás de transporte em movimento. Um dos dispositivos mais utilizados é a válvula rotativa;

- **Transporte:** responsável pelo direcionamento da mistura gás-sólido até o ponto de separação e descarga, consiste essencialmente em tubagens horizontais e verticais, constituídas por curvas e válvulas de desvio quando necessário;
- **Separação:** sistema responsável pela separação do produto do gás de transporte. Ciclones e filtros de mangas são equipamentos que podem ser utilizados.

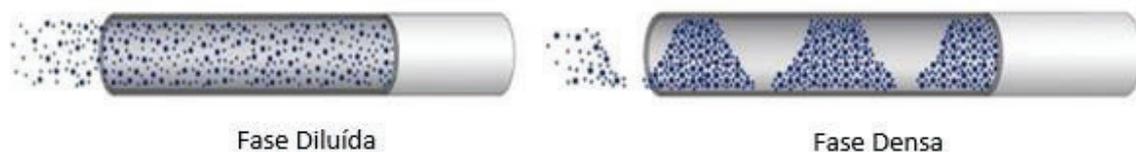
De acordo com Carvalho (2018), os sistemas de transporte pneumático podem ser classificados quanto a seu modo de operação (fase diluída ou densa) e quanto a pressão (positiva, negativa ou combinada), cada um com suas características construtivas e aplicações.

2.3.1 Classificação quanto ao modo de operação

A característica que mais se adequa para a classificação dos sistemas de transporte pneumático é a concentração gás/sólido no sistema de transporte, podendo ser dividido em fase densa e fase diluída.

Na fase densa as partículas sólidas não são completamente suspensas, utilizando alta pressão e baixa velocidade de transporte, já na fase diluída as partículas se encontram completamente suspensas, usando grandes caudais de ar a velocidades elevadas, exemplificado na Figura 5 (LOURENÇO, 2019).

Figura 5 - Modos de transporte pneumático em Fase Diluída e Fase Densa



Fonte: Adaptado de Zeppelin Systems (2022)

Conforme Carvalho (2018), essa classificação sugere que se a razão de carregamento, Equação (1), que representa a razão entre a vazão mássica de sólidos e a vazão mássica de ar, for de 0 até 15, existirá transporte pneumático em fase diluída, caso contrário, caracteriza-se a fase densa do transporte.

$$\dot{M} = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_{ar}} \quad (1)$$

Onde, \dot{m}_s é a vazão mássica de sólidos e \dot{m}_{ar} a vazão mássica de ar, sendo \dot{M} a carga de sólidos.

Variáveis como a velocidade superficial do gás e as propriedades do material, também interferem na escolha do modo de operação do sistema pneumático. O Quadro 1 apresenta algumas características gerais dos dois modos de transporte, com vantagens e desvantagens de cada sistema (CRUZ, 2013).

Quadro 1 - Características do transporte pneumático em fase densa e fase diluída

Características de Comparação	Fase Densa	Fase Diluída
Produtos para os quais os sistemas melhor se aplicam	Pós ou granulados - Abrasivos, frágeis, pesados, higroscópicos	Pós ou granulados - Não abrasivos, não frágeis, baixa densidade
Velocidade de transporte	De 0,1 a 2,0 m/s, utilizando-se pressão	Acima de 15 m/s, utilizando-se sopradores "Roots" ou sopradores centrífugos
Relação pressão e caudal de transporte	Pressões relativamente altas, acima de 100 kPa e baixo caudal de ar	Pressões baixas, inferiores a 100 kPa e alto caudal de ar
Caudal do material transportado	Maior comparado com outros sistemas	Mais baixo comparado com outros sistemas
Desgaste do equipamento	Baixo desgaste da tubagem e curvas, devido a baixa velocidade	Alto desgaste da tubagem e curvas, devido alta velocidade
Custo de implementação	Maior comparado com outros sistemas	Mais baixo comparado com outros sistemas
Custo de manutenção	Maior comparado com outros sistemas	Mais baixo comparado com outros sistemas

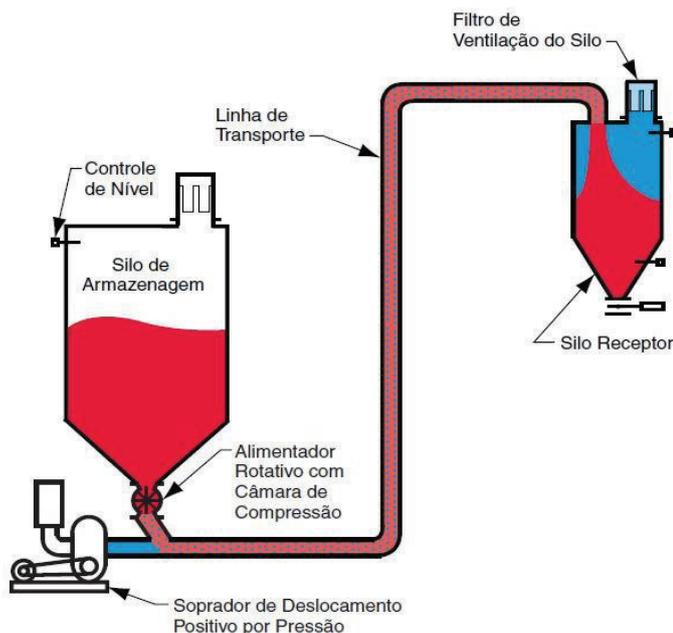
Fonte: Adaptado de Cruz (2013)

2.3.2 Classificação quanto à pressão

Além do modo de operação, sistemas pneumáticos também são classificados quanto a pressão exercida na tubulação, podendo essa ser positiva, negativa e combinada (positiva e negativa ao mesmo tempo).

Segundo Carvalho (2018), sistemas de pressão positiva, como pode ser observado na Figura 6, representam a configuração mais utilizada em transporte pneumático.

Figura 6 - Transporte pneumático em fase diluída sob pressão positiva



Fonte: Dinamic Air (2022)

Onde por meio de uma máquina de fluxo o fluido é impulsionado pela tubulação de transporte, para posterior encontro com o material particulado que é introduzido a linha por um dispositivo de alimentação. A pressão e a vazão do fluido, determinadas pela máquina de fluxo, garantem que a mistura gás-sólido cheguem ao silo receptor.

Esses sistemas são adequados para múltiplos locais de descarga, no qual o material é alimentado por um ponto único e carregado para vários silos de recepção, com a utilização de válvulas direcionais ou válvulas de desvio.

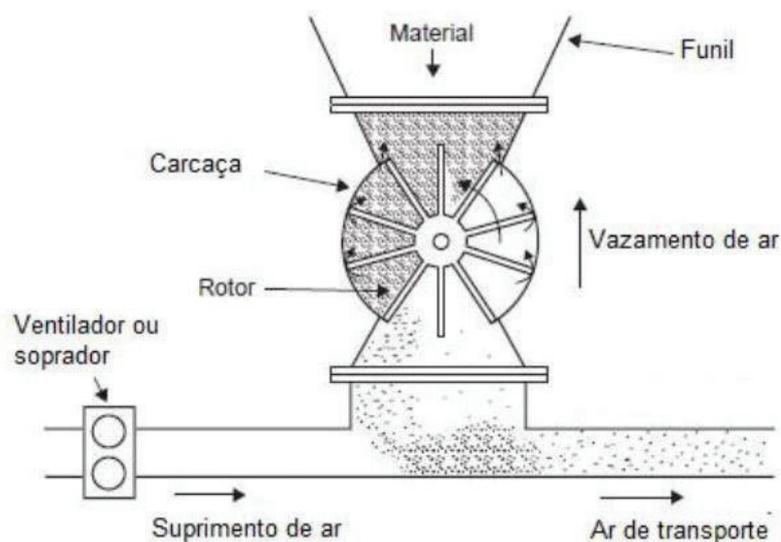
2.3.3 Elementos de um transportador pneumático

Os dispositivos pneumáticos são compostos por diversos componentes, os quais são responsáveis por funções específicas. O emprego simultâneo destes equipamentos realiza o funcionamento pleno de um transportador pneumático. Pode-se citar como principais dispositivos: mecanismos de alimentação; equipamentos geradores de pressão ou vácuo; tubulações e coletores (SCHEIBEL, 2018).

2.3.3.1 Mecanismo de alimentação

Um mecanismo de alimentação muito utilizado em sistemas pneumáticos é a válvula rotativa, uma vez que realiza a alimentação forçada na linha transportadora e descarga controlada do particulado no coletor, como mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Representação do funcionamento de uma válvula rotativa



Fonte: Carvalho (2018)

O equipamento possui um eixo giratório com palhetas, e a movimentação do rotor proporciona o abastecimento e retirada do material da linha de transporte. Essas características evitam entupimentos e sobrecarga de material nos dutos de transporte. A taxa de carregamento de sólido é controlada pela alteração do número de rotações da válvula, proporcionando praticidade quanto a necessidades de ajustes de vazão (GOMIDE, 1983).

2.3.3.2 Equipamentos geradores de pressão ou vácuo

Os mecanismos mais utilizados responsáveis pela movimentação do material particulado na linha de transporte pneumática são ventiladores ou compressores. Estes equipamentos têm por finalidade fornecer a vazão e estabelecer a pressão necessária ao fluxo de fluido para realizar a movimentação do particulado ao longo das tubulações. (SCHEIBEL, 2018).

Uma das maneiras de classificar essas máquinas de fluxo é de acordo com sua vazão e diferencial de pressão, conforme mostra o Quadro 2.

Quadro 2 – Classificação quanto a pressão e vazão de máquinas de fluxo para gases

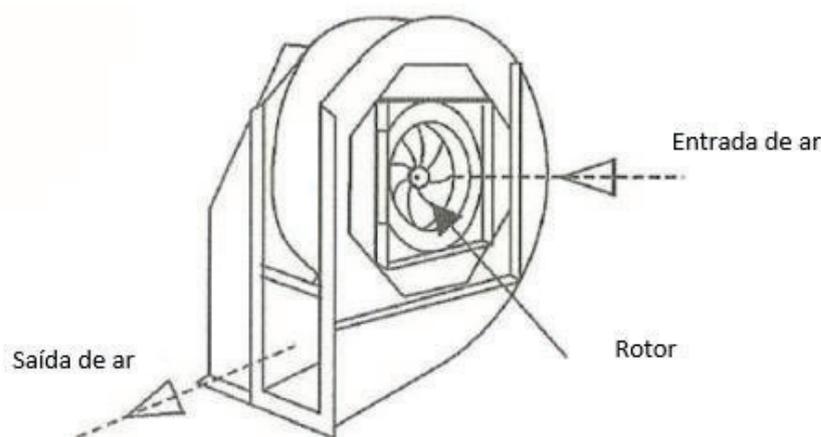
	Ventilador	Soprador	Compressor
Diferença de pressão	Baixo	Médio	Alto
Vazão	Alto	Médio	Baixo

Fonte: Adaptado de Carvalho (2018)

Os principais tipos usados para sistemas pneumáticos na fase diluída são os ventiladores centrífugos ou sopradores tipo lóbulos rotativos (também conhecido como *Roots*).

De acordo com Scheibel (2018), os ventiladores centrífugos realizam a aspiração do ar a partir do rotor e ejetam o fluido perpendicular ao eixo de aspiração pelo bocal de descarga, como mostra a Figura 8. Apresentam diferentes configurações em relação ao formato das pás, subdividindo-se em três categorias: pás inclinadas para trás, pás radiais e pás inclinadas para frente.

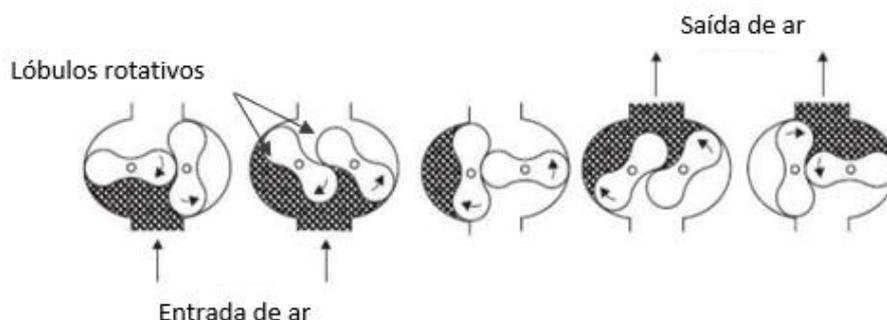
Figura 8 – Representação do funcionamento de um ventilador centrífugo



Fonte: Adaptado de Scheibel (2018)

O soprador do tipo lóbulo rotativo é constituído de dois lóbulos rotativos que giram em direção contrária, conforme indicado na Figura 9.

Figura 9 - Representação do funcionamento de um soprador tipo lóbulo rotativo (*Roots*)



Fonte: Adaptado de Carvalho (2018)

O ar fica comprimido entre o rotor e a carcaça do soprador, estabelecendo a saída de ar com uma capacidade média de diferença de pressão e vazão.

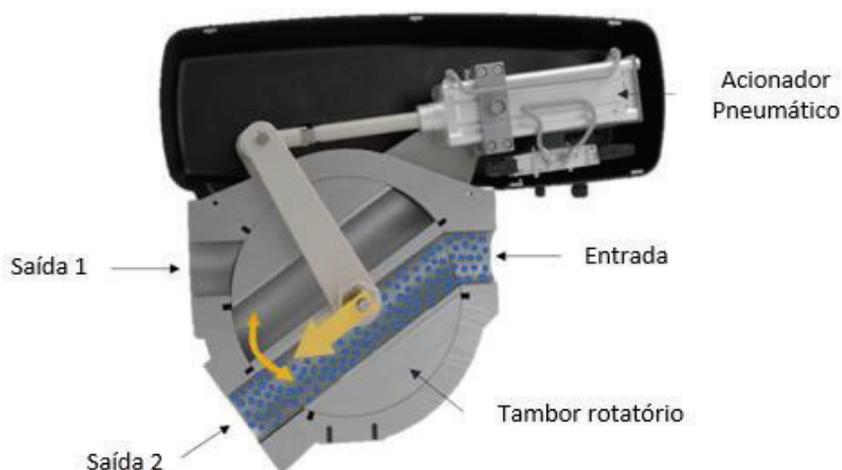
2.3.3.3 Tubulações e Válvulas de transporte

Com o objetivo de manter um fluxo de ar a uma velocidade uniforme ao longo do trajeto, com isolamento adequado e perfeito alinhamento das seções internas, o dimensionamento da tubulação é um fator crucial (SCHEIBEL, 2018).

Quanto à utilização de acessórios, curvas, cotovelos e válvulas nas linhas de transporte, é necessária atenção para que essas instalações não causem saliências abruptas, ocasionando acúmulo de sólido, obstruções e perda de carga excessiva.

Válvulas de desvios como ilustra a Figura 10, são comumente usadas para desviar o material da linha principal de transporte pneumático à pontos de necessidade, tais como silos ou outra linha de transporte.

Figura 10 - Representação do funcionamento de uma válvula de desvio tipo tambor



Fonte: Adaptado de <<https://www.youtube.com/watch?v=PuR9PtNievw>> (2020)

Válvulas de desvio do tipo tambor rotatório possuem em seu interior um tambor que gira e fecha opcionalmente uma das duas saídas que estão ligadas aos canais de transporte, através de um acionador pneumático, são usualmente encontradas em sistemas pneumáticos de vários pontos de descarga.

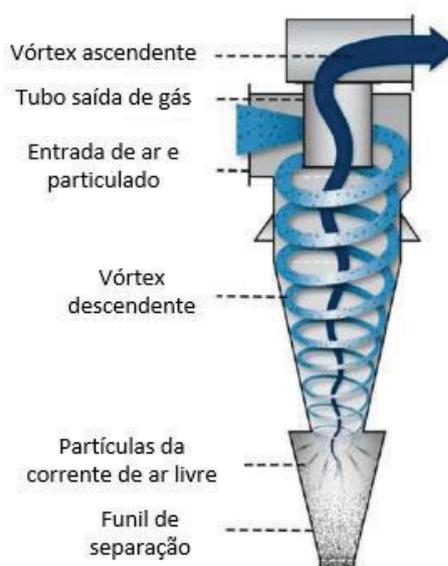
O circuito de tubulações é normalmente construído com tubo em aço sem costura, ligas de alumínio ou aço inox. Chapas soldadas ou calandradas podem ser utilizadas em caso de baixa abrasão, e os cotovelos podem ser em aço carbono ou fabricados a partir de tubos sem costura. O raio médio de curvatura mínima deve ser maior que 2,5 D (sendo D o diâmetro da tubulação calculada), (CARVALHO, 2018).

2.3.3.4 Coletores

Os dispositivos destinados a recolher o sólido no final da linha de transporte pneumático são chamados de coletores. É possível empregar diferentes equipamentos para tal finalidade. Para sólidos finos tipicamente maiores que 5 μm , utilizam-se ciclones ou filtros de mangas.

Coletor tipo ciclone consiste em uma câmara de sedimentação na qual o campo gravitacional é substituído pelo centrífugo, exemplificado na Figura 11.

Figura 11 - Representação do funcionamento de um coletor tipo ciclone



Fonte: Scheibe (2018)

A mistura de ar e sólido entra na câmara do ciclone e o material particulado percorre uma trajetória helicoidal até atingir a região cônica do equipamento, sendo direcionado para separação, onde o ar sobe em um vórtex ascendente e é liberado ao ambiente, e as partículas sólidas decantam ao fundo do funil separador do ciclone.

Quando se tem o descarregamento de sólidos de diâmetro intermediário ou particulados grosseiros, acima de 2 mm, pode-se utilizar o próprio silo de estocagem para coleta e separação do produto (GOMIDE, 1983; LOURENÇO, 2019).

2.4 Caracterização da partícula transportada

Em sistemas particulados têm-se a interação entre partícula-partícula e/ou partícula-fluido, assim os estudos científicos voltados a essa categoria de operações unitárias exigem a compreensão das características de uma partícula ou de uma amostra de partículas (CREMASCO, 2018).

É essencial conhecer as características físicas e morfológicas das partículas, pois tais propriedades afetam diretamente interações entre os elementos constituintes do sistema. No estudo de materiais particulados é importante definir as dimensões dos grãos. Suas formas irregulares dificultam a estimativa, embora existam métodos que podem auxiliar nas medições. Para grãos com dimensões superiores a 40 μm , a análise por peneiramento é um método bastante eficaz. Para grãos menores, podem-se utilizar métodos ópticos, sedimentação ou elutriação (CARVALHO, 2018).

A densidade da partícula é outra propriedade que afeta as interações dos elementos de um sistema, como comenta Carvalho (2018), a definição de densidade de partícula para partículas não porosas pode ser escrita pela Equação (2).

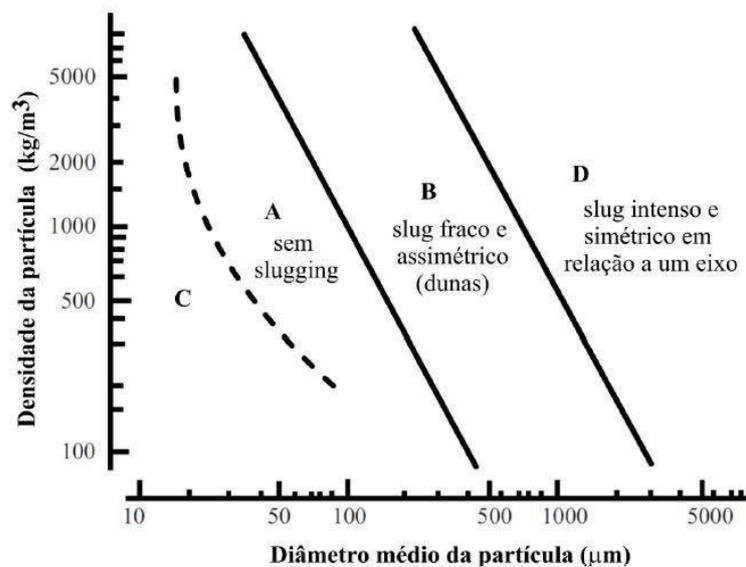
$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (2)$$

Onde m_p é a massa da partícula e V_p é o volume de uma partícula isolada, sendo ρ_p a densidade da partícula.

A fluidização é um fenômeno onde partículas sólidas, quando em suspensão por um gás ou líquido, passam a ter uma característica de fluido. No diagrama *Dixon's Slugging* os materiais são classificados em quatro grupos principais, de acordo com sua capacidade de aeração ou fluidização. Para isso, a densidade das partículas e o tamanho médio de partícula do material são relacionadas (LOURENÇO, 2019; CARVALHO, 2018).

O diagrama é dividido em áreas A, B, C, e D, como mostra a Figura 12. Determina-se que os materiais pertencentes ao mesmo grupo tenham modo de transporte pneumático semelhante.

Figura 12 - Diagrama de *Dixon's Slugging*



Fonte: Lourenço (2019)

De um modo geral, os materiais do grupo A são considerados pós capazes de fluidizar e, neste caso, podem ser transportados em fase densa. Materiais do Grupo B são mais grosseiros (partículas maiores) e não são capazes de serem transportados em fase densa em um sistema convencional. Os materiais do Grupo C são coesivos ou pós finos que podem ser

difíceis de fluidizar, embora muitas vezes eles tenham boas características de retenção de ar. Estes materiais podem ser transportados em fase densa, mas podem ser problemáticos principalmente no ponto de alimentação.

Materiais do Grupo D são produtos com partículas maiores, nesse grupo, o regime tende a ser turbulento, são possíveis candidatos aos regimes de *plug* ou *slug flow*, (em dunas, bateladas) e transporte em fase diluída (LOURENÇO, 2019).

2.5 Conceitos de dimensionamento para transporte pneumático

As especificações requeridas em um projeto de transporte pneumático, de acordo com Gomide (1983), são capacidade de transporte C (t/h), densidade ρ (t/m³), diâmetro médio D_p (mm) da partícula e *layout* do sistema de transporte mostrando todas as curvas, válvulas e equipamentos de coleta. Os parâmetros calculados são:

- V = velocidade de transporte (m/s)
- ρ = densidade aparente do sólido (t/m³)
- D_p = diâmetro das partículas (mm)
- D = diâmetro interno do duto (mm)
- Q = vazão do ar de transporte (m³/s)
- X = relação de sólidos em peso (kg de sólidos/kg de ar)
- F = fator de projeto (proporcional à perda de carga por metro de duto)
- L = comprimento do duto
- L_e = comprimento equivalente das conexões
- L_t = comprimento total ($L + L_e$)
- ΔP = perda de carga total (kg/cm²)
- P = potência do ventilador ou soprador (HP)

Gomide (1983), através de experimentos, relacionou os fenômenos físicos e químicos em transportadores pneumáticos, relacionando equações matemáticas que orientam e dimensionam equipamentos de transporte de sólidos granulares aproximando da realidade industrial.

A Equação (3) indica a velocidade de transporte.

$$V = 4,11^3 \sqrt{\rho} + \sqrt{D_p} + 23,4 \sqrt{\rho} \quad (3)$$

Onde:

- V = velocidade de transporte (m/s)
- ρ = densidade aparente do grão (t/m³)
- D_p = diâmetro médio do grão (mm)

De acordo com Gonçalves (2016), o diâmetro do transportador, vazão e concentração do sólido, podem ser obtidos pelas Equações (4), (5) e (6), respectivamente.

$$D = 3016 \frac{\sqrt{C}}{V^{0,98}} \quad (4)$$

Onde:

D = diâmetro interno do duto (mm)

C = capacidade de transporte (t/h)

V = velocidade de transporte (m/s)

$$Q = \frac{V \cdot D^2}{1,26 \cdot 10^6} \quad (5)$$

Onde:

Q = vazão do ar de transporte (m³/s)

V = velocidade de transporte (m/s)

D = diâmetro interno do duto (mm)

$$X = \frac{C}{4,29Q} \quad (6)$$

Onde:

X = concentração de sólidos em peso (kg de sólidos / kg de ar)

C = capacidade de transporte (t/h)

Q = vazão do ar de transporte em (m³/s)

Enquanto o cálculo da perda de carga total por atrito e a perda de carga total são previstas pelas Equações (7) e (8) respectivamente.

$$L_t = L_h + 2 \cdot L_v + L_e \quad (7)$$

Onde:

L_t = perda de carga por atrito devido ao comprimento total (m)

L_h = perda de carga devido ao trecho horizontal do duto de transporte (m)

L_v = perda de carga devido ao trecho vertical do duto de transporte em (m)

L_e = perda de carga devido ao comprimento equivalente do duto (m)

$$\Delta P_t = \left[1,68 \cdot L_t \cdot (X + 3,5) \cdot \frac{V^{1,8}}{D^{1,22}} + 0,138 \cdot \mu \cdot X \cdot V^2 + \Delta P_e \right] \cdot 10^{-4} \quad (8)$$

Onde:

ΔP_t = perda de carga total (kg/m²)

L_t = perda de carga por atrito devido ao comprimento total (m)

X = concentração de sólidos em peso (kg de sólidos / kg de ar)

V = velocidade de transporte (m/s)

D = diâmetro interno do duto (m)

μ = fator de redução da aceleração do material¹

ΔP_e = perda de carga nos equipamentos acoplados à linha como: ciclone, filtro, câmaras de poeira, entrada e saída de ar. Valores tabelados.

Ainda de acordo com Gomide (1983), a potência requerida pode ser obtida pela Equação (9).

$$P = 131,51 \cdot Q \cdot \Delta P_t \quad (9)$$

Onde:

P = potência do ventilador centrífugo (kW)

Q = vazão do ar (m³/s)

ΔP_t = perda de carga total (kg/m²)

Em se tratando de sistema direto deve-se prever 25% a mais na potência encontrada.

O transporte pneumático é uma ciência experimental, pois, mesmo aplicando-se os fundamentos teóricos básicos no seu projeto, o desempenho do equipamento resultante pode diferir muito do projetado. Isto ressalta a importância de testar estes equipamentos para avaliar e orientar as correções necessárias (GONÇALVES, 2016).

2.6 Vantagens da implementação de transporte pneumático

Atualmente, sistemas de transporte pneumático estão sendo usados muito mais frequentemente em diversos setores da indústria em relação a outros tipos de transporte que eram comumente utilizados, principalmente na área do manuseio e processamento de sólidos a granel (GOMES, 2011).

Devido à flexibilidade de instalação, o transporte pneumático de sólidos a granel é usado especialmente em áreas em plantas remotas, que do ponto de vista econômico seriam bem mais caras caso se utilizassem os transportadores mecânicos.

De acordo com Gomes (2011), uma vez que os sistemas de transporte pneumático são completamente fechados, a contaminação do produto, a perda de material e emissão de poeira (poluição ambiental) são reduzidos ou eliminados. Ainda, sistemas de transporte pneumático podem captar o material a granel a ser transportado em fontes múltiplas e / ou distribuí-los a muitos destinos diferentes. Pode-se acrescentar, ainda, como vantagens favoráveis à utilização dos sistemas de transporte pneumático as dimensões reduzidas, a redução progressiva do capital e custos de instalação, baixos custos de manutenção (devido ao pequeno número de peças móveis), e operação, o uso repetido de tubulações de transporte e a facilidade de controle e automação.

2.7 Método para desenvolvimento de projetos

Para o desenvolvimento do projeto baseando-se e adaptando a metodologia de desenvolvimento de projetos, segundo literatura “Projetos de Máquinas: uma abordagem integrada” (NORTON, 2013). Aplicando para o escopo proposto divide-se em oito etapas:

¹ Adotar zero: ponto de alimentação antes da aspiração do ventilador ou soprador;
Adotar 0,5: ponto de alimentação na entrada do ventilador;
Adotar valor unitário: ponto de alimentação após o ventilador.

- **Etapa 1 - Identificação da necessidade:** exposição inicial do problema.
- **Etapa 2 - Pesquisa de suporte:** desenvolvimento das informações, para definir e compreender completamente o problema.
- **Etapa 3 - Definição dos objetivos:** estabelecimento de objetivos específicos.
- **Etapa 4 - Especificação de tarefas:** conjunto de necessidades a serem estabelecidas limitando o alcance do problema.
- **Etapa 5 - Síntese:** concepção de alternativas de projeto chegando a soluções criativas.
- **Etapa 6 - Análise:** as possíveis soluções são analisadas e aceitas, rejeitadas ou modificadas.
- **Etapa 7 – Seleção:** seleção da solução mais promissora.
- **Etapa 8 – Projeto modelado:** todas as pontas são atadas, croquis do modelo, especificações definidas.

2.8 Considerações sobre revisão bibliográfica

Os estudos realizados e apresentados neste capítulo introduzem conceitos para o entendimento do processo de desenvolvimento do projeto proposto, exemplificando uma metodologia de elaboração.

É importante entender que um dos desafios no transporte pneumático é tornar o projeto de um sistema possível, sem a necessidade da realização de testes de transporte em escala real com um material, sendo as propriedades deste de grande influência sobre a capacidade de transporte.

Apesar da vasta literatura, o sistema de transporte pneumático não apresenta um procedimento geral de dimensionamento, mas alguns princípios gerais podem ser aplicados, e são estes princípios que podem levar a um projeto otimizado, gerando ainda mais vantagens perante métodos de transporte convencionais empregados na indústria de malte.

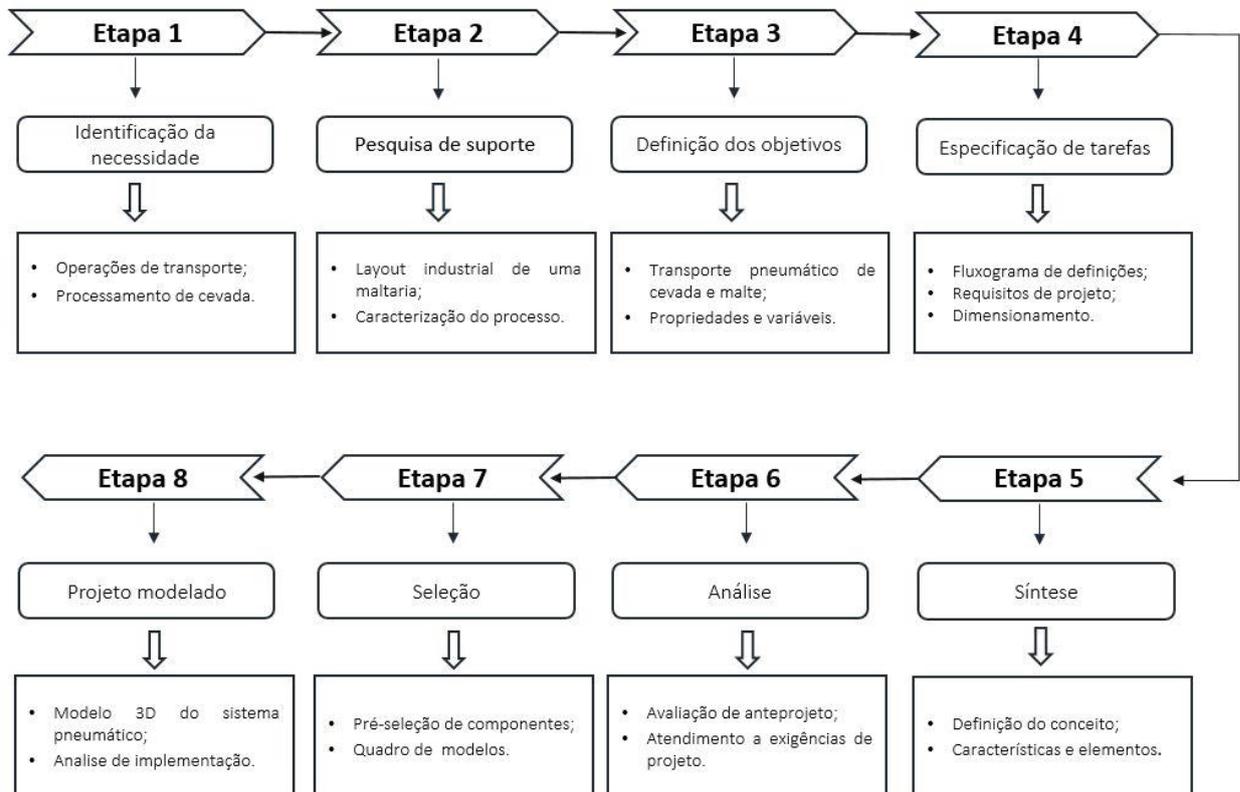
Diante das dificuldades de projeto de transportadores pneumáticos referenciados na literatura e devido a crescente necessidade de transporte de cevada, levando em consideração as vantagens do deslocamento pneumático de cereais, o presente trabalho visa verificar o comportamento do transporte de grãos de cevada em fase diluída sob pressão positiva através do desenvolvimento de um conceito teórico de transportador pneumático em uma indústria de malte.

3 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do projeto de um transportador pneumático a ser implementado em uma maltaria de pequeno porte, seguiu-se uma sequência de etapas, para realização correta e eficiente da tarefa e atendimento do conceito proposto.

A sequência de desenvolvimento seguirá uma adaptação da metodologia proposta por Norton (2013), onde aplicando para o escopo proposto divide-se em oito etapas, como mostra o fluxograma na Figura 13.

Figura 13 - Fluxograma de etapas para desenvolvimento do projeto



Fonte: Autor (2022)

Na **primeira etapa** é feito o estudo de processamento da cevada em maltarias, como é feito o transporte do grão, sendo usado essa operação entre cada etapa de processamento a relevância de implementação de meios que tragam vantagens, entrando assim na **segunda etapa** avaliando a planta industrial de uma mini maltaria, que embasará a construção do conceito do transportador pneumático necessário para a cevada transportada, caracterizando o *layout* de atuação.

A partir do *layout* de estudo apresentado nas etapas anteriores a **terceira etapa** visa definir os objetivos necessários e requisitos para elaboração do projeto, de acordo com os dispositivos de malteação e como estão dispostos na maltaria, propondo uma reavaliação das operações de transporte.

Na **quarta etapa** tem-se as etapas para as pré definições necessárias na elaboração do anteprojeto do transportador pneumático, e parâmetros de dimensionamento, sendo apresentado na **quinta etapa** o conceito, definindo o modo de operação de transporte, tipo de pressão e elementos que compõe o transportador.

Na **sexta etapa** o anteprojeto é analisado de forma a atender os requisitos de projeto, e funcionalidade conceitual, sem grandes modificações no layout existente, sendo feito uma pré-seleção dos componentes com especificações de trabalho do sistema, na sétima etapa, podendo assim ser feito a elaboração de um modelo em *software CAD 3D*, compreendendo a oitava e última etapa, possibilitando a avaliação de implementação de um sistema pneumático de transporte em uma maltaria de pequeno porte.

3.1 Etapa 1: Identificação da necessidade

A competitividade nas indústrias é um dos principais incentivos para que novas soluções sejam desenvolvidas com o intuito de melhorar processos, simplificar sistemas e garantir maior confiabilidade e disponibilidade de equipamentos.

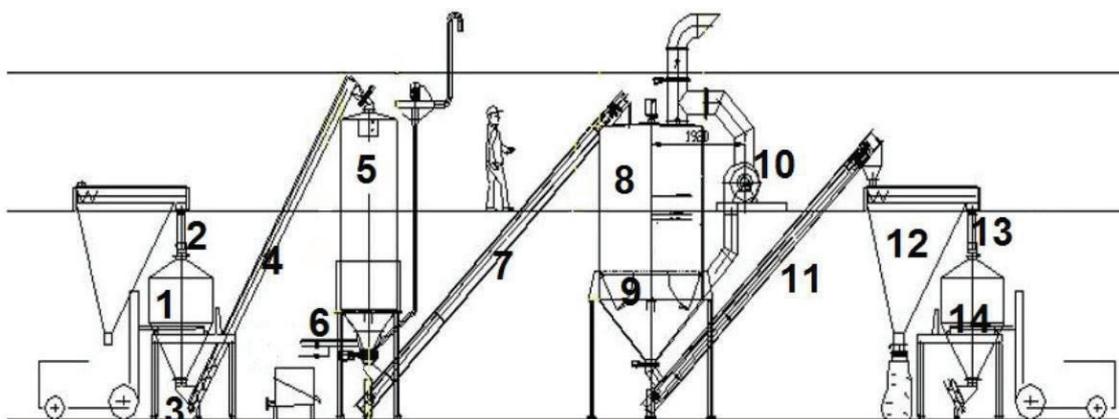
No caso das indústrias de malte, a etapa de transporte de materiais constitui uma das principais etapas da produção, tornando-se foco de análise para o aumento do rendimento operacional.

Com o entendimento do processamento da cevada para a fabricação de malte, todas as etapas de produção e necessidade de transporte do material entre elas, avaliando o *layout* estrutural de uma linha produtiva em maltaria de pequeno porte, que atua com transportadores helicoidais, é possível propor a implementação de um novo sistema de transporte, aplicando o transporte pneumático de grão com o estudo de funcionamento de um sistema de transporte de particulados com a utilização de sistema pneumático, entendendo a necessidade, características, elementos necessários e parâmetros a serem definidos, aplicando conceitos de dimensionamento segundo literatura.

3.2 Etapa 2: Pesquisa de suporte

A planta industrial de uma maltaria, Figura 14, que embasará a construção do conceito do transportador pneumático para cevada, retirando especificações de projeto, e fundando um embasamento de empregabilidade foi desenvolvida pela empresa Unicer Bebidas S.A., com instalações em Leça do Balio (Portugal), sendo um piloto de uma mini maltaria, retirado de Osório (2016).

Figura 14 – Planta industrial de mini maltaria suporte

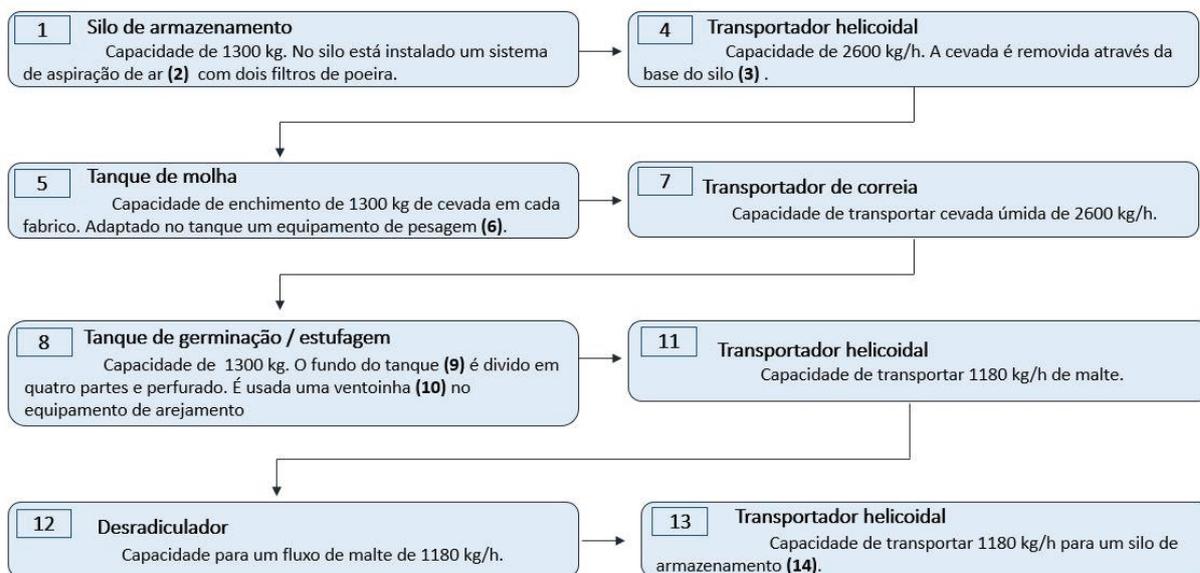


Fonte: Osório (2016)

Como referência de estudo para implementação do projeto desenvolvido, onde a proposta é de troca de sistemas de transportes convencionais (helicoidal e correia) para malte, pelo sistema de transporte pneumático

Para retirada de especificações necessárias na elaboração do conceito pneumático e seus componentes a Figura 15 exemplifica um fluxograma da planta atual e suas etapas de transporte e processos.

Figura 15 - Fluxograma de etapas de processamento em planta industrial de mini maltaria suporte



Fonte: Autor (2022)

A estrutura da mini maltaria conta com quatro silos e tanques de armazenamento e de etapas produtivas, dentre as quais há a necessidade de transporte da cevada e malte entre elas.

A cevada armazenada em um silo de armazenamento (1) é descarregada por uma válvula rotativa em um transportador helicoidal (4), que a encaminha até a primeira etapa produtiva, no tanque de molha (5), posteriormente a cevada úmida segue por um transportador correia (7) até o tanque de germinação (8).

Após a germinação, em temperatura e umidade controladas, no mesmo tanque a cevada passa pelo processo de secagem (estufagem). Com a geração de radículas nos grãos há a necessidade do agora malte ser encaminhado por outro transportador helicoidal (11) para o silo desradiculador (12), onde por meio de vibração mecânica as radículas são soltas e descartadas. O malte pronto é descarregado do silo desradiculador em um transportador helicoidal (13) que o encaminha para o armazenamento final antes da expedição do produto.

3.3 Etapa 3: Definição dos objetivos

A definição dos objetivos se dá de acordo com a estrutura da planta existente juntamente com a disposição dos elementos de processo, sendo elaborado um conjunto de características, chegando a um novo *layout* adequado.

Com o objetivo de modificação apenas do sistema de transporte, implementando um esquema em uma única linha de transporte pneumático que utilize um único equipamento, reduzindo espaço físico, custos de operação e manutenção, energia de trabalho e não degrade o material transportado, gerando o estudo da viabilização de implementação de um transportador pneumático em uma linha única, substituindo os quatro transportadores existentes.

As propriedades e variáveis que auxiliam na determinação da formação do sistema e posterior dimensionamento dos elementos, aplicando a literatura apresentada na Seção 2.4, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades e variáveis de trabalho para determinação de sistema pneumático

Propriedades	Valor	Unidade
Capacidade de transporte	2,6	[t/h]
Densidade da cevada	1,10	[t/m ³]
Diâmetro médio do grão	2,5	[mm]
Pressão de trabalho	> 100	[kPa]
Classificação do material	Tipo D	-

Fonte: Autor (2022)

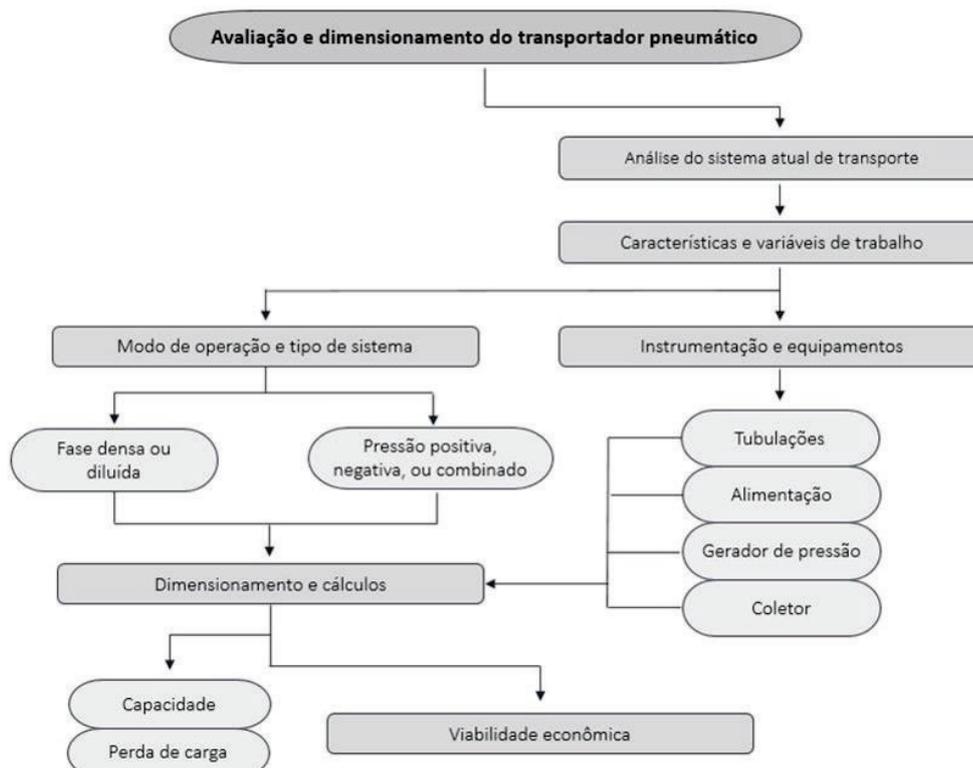
As propriedades do material transportado definem-se as interações entre partícula-partícula e/ou partícula-fluido tornando-se fundamental para a escolha e definições de concepções do sistema de transporte

De acordo com as propriedades da cevada e malte e parâmetros já definidos na estrutura de atuação da planta existente, tem-se o entendimento das interações entre os elementos constituintes do sistema, possibilitando a concepção e dimensionamento do novo sistema de transporte proposto.

3.4 Etapa 4: Especificação de tarefas

Para determinação do sistema pneumático, a Figura 16 através de um fluxograma, detalha as etapas de definições necessárias para que se chegue ao conceito do anteprojeto da linha do transporte pneumático.

Figura 16 - Etapas para definição do transportador pneumático



Fonte: Autor (2022)

Com objetivo de modificação apenas do sistema de transporte, implementando um esquema em uma única linha de transporte pneumático que utilize um único equipamento. A Tabela 2 sintetiza os principais parâmetros considerados para o projeto.

Tabela 2 – Requisitos básicos de projeto

Característica	Valor	Unidade
Distância média entre setores	3,5	[m]
Comprimento horizontal	12	[m]
Comprimento vertical	8	[m]
Comprimento equivalente do duto	5,4	[m]
Curvas 90°	8	-
Pontos de alimentação	5	-
Material de fabricação	Aço AISI Inox 304	-

Fonte: Autor (2022)

De acordo com o *layout* de mini maltaria existente é possível a retirada de medidas necessárias para a concepção estrutural das modificações na linha de transporte.

Tendo definido o conceito de funcionamento final, fez-se o dimensionamento dos componentes do sistema de transporte pneumático aplicando as equações explanadas na Seção 2.5. A relação dos parâmetros calculadas é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros calculados para linha de transporte pneumático

Parâmetro	Símbolo	Equação	Valor	Unidade
Velocidade de transporte	V	(3)	30,37	[m/s]
Diâmetro interno do duto	D	(4)	171,47	[mm]
Vazão do ar de transporte	Q	(5)	0,709	[m ³ /s]
Concentração de sólidos	X	(6)	0,86	[kg de sólidos / kg de ar]
Perda de carga por atrito	L_t	(7)	33,40	[m]
Perda de carga total	ΔP_t	(8)	400,0	[kg/m ²]
Potência requerida	P	(9)	3,13	[kW]

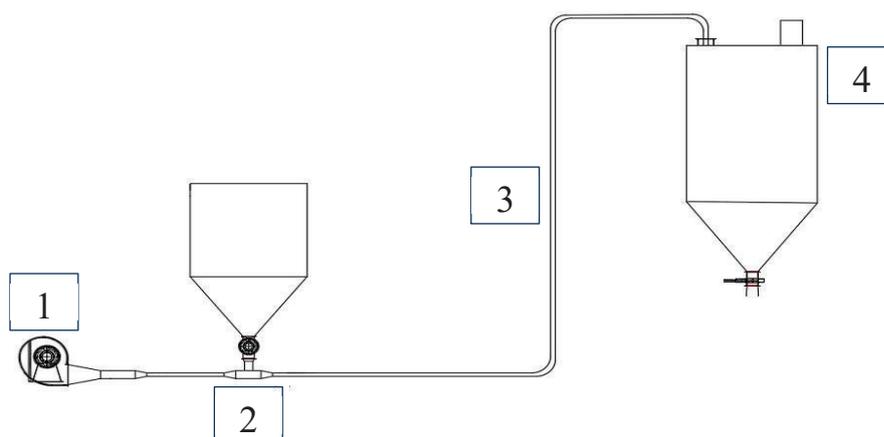
Fonte: Autor (2022)

Os parâmetros calculados definem dimensionalmente a linha de transporte para elaboração do anteprojeto de maneira a atender as necessidades de transporte e produtivas da planta.

3.5 Etapa 5: Síntese

De acordo com os requisitos de trabalho, características de processo e *layout* existente, define-se um conceito de sistema pneumático, sendo definido que esse atue em regime de fase diluída sob pressão positiva, de acordo com literatura explanada na Seção 2, esquematizado na Figura 17.

Figura 17 - Representação do conceito de transporte pneumático definido



Fonte: Autor (2022)

Seguindo as etapas de definição para transporte pneumático, o Quadro 3 mostra a estrutura estabelecida para o conceito desenvolvido previamente.

Quadro 3 - Definições de estrutura conceitual de sistema pneumático

Gerador de pressão (1)	Alimentação (2)	Transporte (3)	Coletor (4)
Ventilador centrífugo	Válvula rotativa Válvula guilhotina	Tubulações Curvas Válvulas de desvio	Silo receptor

Fonte: Autor (2022)

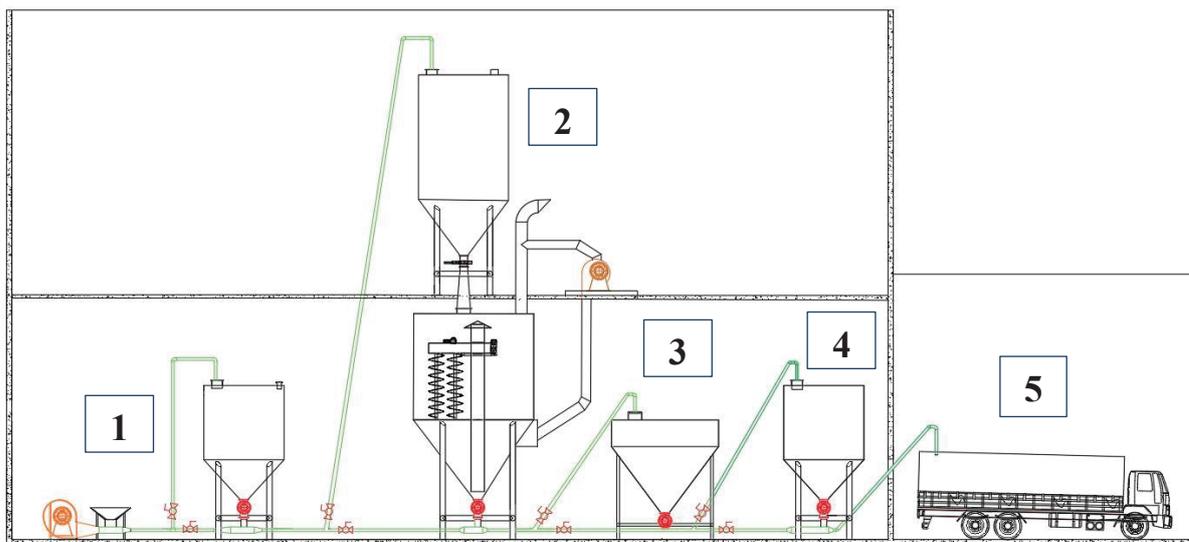
O conceito desenvolvido estabelece a geração de pressão por um ventilador centrífugo (1) gerando a energia necessária para movimentação do ar dentro das tubulações, onde o ar entra pelo ventilador, é impulsionado ao longo da tubulação, e faz o transporte dos grãos da cevada quando esses são liberados pelo sistema de alimentação através de uma válvula rotativa (2), que por meio do seu eixo giratório faz a dosagem do material a ser liberado para transporte.

A mistura de ar e grãos segue sendo direcionada pela tubulação (3), podendo ser horizontal e vertical, dependendo da necessidade de aplicação, até o ponto de separação e descarga no silo receptor (4), onde o ar sai por uma saída de ar e os grãos decantam para o fundo do tanque.

3.6 Etapa 6: Análise

Com as informações adquiridas de conceito estrutural e dimensionamento definido, elaborou-se um anteprojeto do *layout* de processamento de cevada com transportador pneumático, em modelo 2D, ilustrado na Figura 18. Para a avaliação do sistema, de modo a garantir a empregabilidade do equipamento em *layout* de trabalho.

Figura 18 - Anteprojeto em modelo 2D do *layout* de sistema pneumático



Fonte: Autor (2022)

No primeiro setor de recepção (1), onde os grãos de cevada chegam para serem armazenados, o ventilador centrífugo gera pressão positiva encaminhando o material que é dispensado no bocal de descarregamento até o silo de armazenamento.

Com a pressão positiva gerada pelo ventilador segue-se o processo de transporte da cevada, com o produto já no silo de armazenamento sendo feita a alimentação controlada na tubulação de transporte por válvula rotativa e o controle de direcionamento do ar para tubulação desejada através de válvulas de desvio.

No segundo setor (2), a cevada é liberada pelo silo de recepção até o tanque de maceração, por tubulação vertical, que por sua vez é passada ao tanque de germinação por gravidade, sequência adotado devido ao transporte da cevada úmida nesta etapa. Do tanque de germinação, onde os grãos passaram também pelo processo de estufagem, estando agora secos seguem para o terceiro setor (3), o desradicador.

No quarto setor (4) os grãos de cevada chegam ao silo de armazenamento, saindo do desradicador, ativando as válvulas de desvio, que permitem passagem do ar para tubulação a outros setores. Fechando o processo de malteação da cevada com transporte pneumático no quinto setor (5) o malte é transportado do silo de armazenamento até dispositivos de carregamento.

Com a avaliação do anteprojeto fez-se a definição de inclinação de linhas verticais com a utilização de válvulas de desvio do Tipo T com ângulo de 90°, para apresentação de modelo 3D. Atendendo as necessidades requeridas de aplicação do sistema em *layout* já existente, fazendo apenas a troca de transportadores helicoidais pelo sistema pneumático em uma única linha de trabalho. É possível prosseguir a seleção dos tipos de componentes pertinentes e modelamento final do projeto.

4 RESULTADOS E DISCUSÕES

Com o conceito de transporte na fase diluída e sob pressão positiva aplicado, empregando os elementos estabelecidos na linha de processamento da cevada e interligando os setores de recepção que antes eram abastecidos por transportadores helicoidais e correia,

fez-se um sistema fechado de transporte, com uma única linha principal horizontal de pressão, subdividindo-se em linhas paralelas verticais de distribuição de material.

Uma relação de equipamentos e elementos necessários com suas especificações de acordo com o dimensionamento realizado foi estabelecida de modo a garantir o modelamento 3D do *layout* com o sistema pneumático empregado, possibilitando uma análise inicial de aplicação do sistema.

4.1 Etapa 7: Seleção

A relação de componentes necessários é apresentada no Quadro 4, tendo em vista a proposta de modificação somente do sistema de transporte, mantendo os silos, válvulas rotativas e válvula guilhotina já existentes, de maneira a não influenciar na implementação do sistema pneumático analisado.

Quadro 4 – Relação de componentes necessários ao sistema pneumático

Etapa	Componente	Especificação		Exemplo
Sistema Motriz	Ventilador centrífugo	Velocidade de transporte	30,37 [m/s]	 VENTILADOR CENTRÍFUGO MOTOR ELÉTRICO
		Tipo de pressão	Positiva	
		Pressão	> 100 [kPa]	
		Capacidade requerida	0,73 [kg/s]	
	Vazão	0,709 [m³/s]		
Motor Elétrico	Potência	4,3 [cv]		
Alimentação	Válvulas Rotativas	Manter as existentes		 VÁLVULA ROTATIVA VÁLVULA GUILHOTINA FUNIL - ENTRADA PRODUTO
		Possibilidade de automatização		
	Válvula Guilhotina	Manter a existente		
	Funil - Entrada Produto	Adptação para encaixe na tubulação de transporte		
	Capacidade	2,6 [t/h]		
Transporte	Tubulação	Material	Aço Inox AISI 304	 TUBULAÇÃO / FLANGES CURVA VÁLVULA DE DESVIO "T"
	Flanges	Diâmetro Interno	171,47 [mm]	
	Curvas	Raio médio	< 429,68 [mm]	
		Ângulo	90° [Graus]	
	Válvulas de Desvio	Diâmetro Interno	171,47 [mm]	
		Tipo	"T"	
Separação	Silos Receptores	Concentração de Sólidos	0,86 [kg sólido/kg ar]	 SILOS / TANQUE
		Manter os existentes		
		Silo armazenamento - Cevada	Capacidade: 1300 [kg]	
		Tanque Maceração	Capacidade: 1300 [kg]	
		Tanque de Geminação	Capacidade: 1300 [kg]	
		Desradiculador	Fluxo: 1200 [kg/h]	
Silo de armazenamento - Malte	Capacidade: 1200 [kg]			

Fonte: Autor (2022)

As variáveis relacionadas à vazão de ar, potência do ventilador e capacidade do sistema definem a escolha de importantes dispositivos, sendo responsáveis pela movimentação, abastecimento e descarga do material.

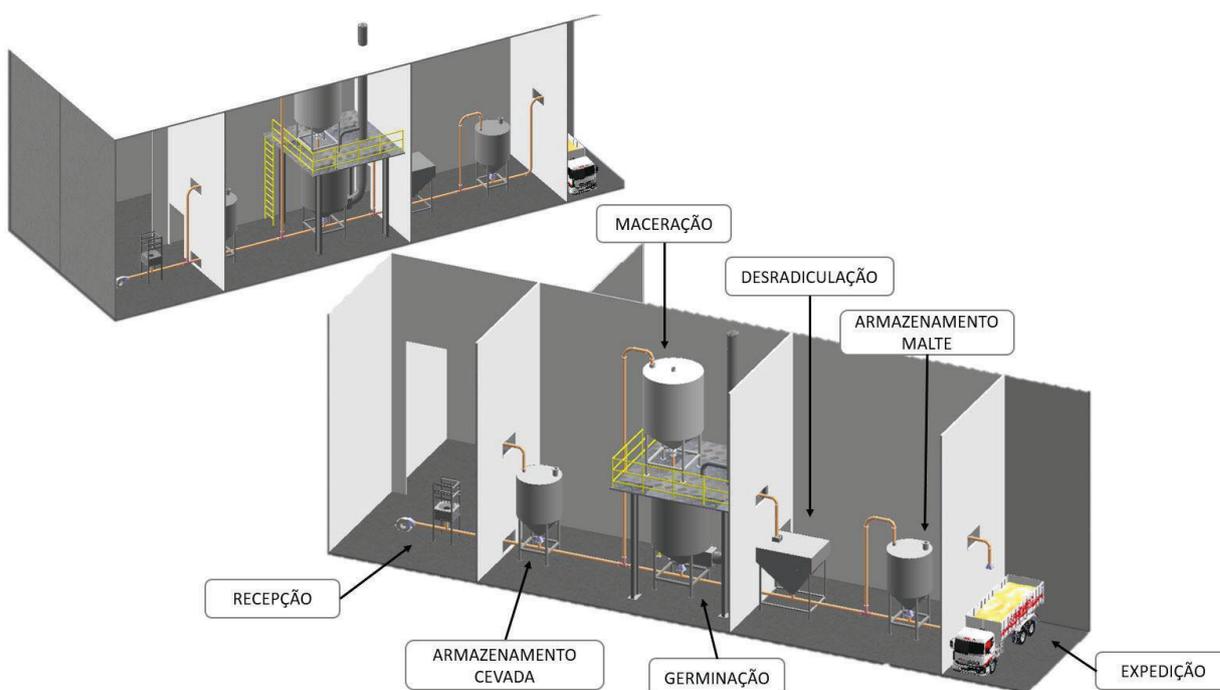
Tendo conhecimento das características do transportador proposto, busca-se a relação de equipamentos e suas especificações, que melhor atendam às necessidades e demandas pré-determinadas para o projeto.

4.2 Etapa 8: Projeto modelado

Com a avaliação do conceito estrutural dimensionado e seus elementos necessários estabelecidos, fez-se o modelamento do *layout* proposto em *Software CAD 3D SolidWorks®*, em estrutura de blocos como concepção inicial do modelo, como forma de apresentação inicial de proposta de novo método de transporte em indústria malteira.

O *layout* geral, demonstrando a reorganização do ambiente produtivo da planta, é apresentado na Figura 19.

Figura 19 - Modelo em *CAD 3D* do *layout* proposto com sistema pneumático



Fonte: Autor (2022)

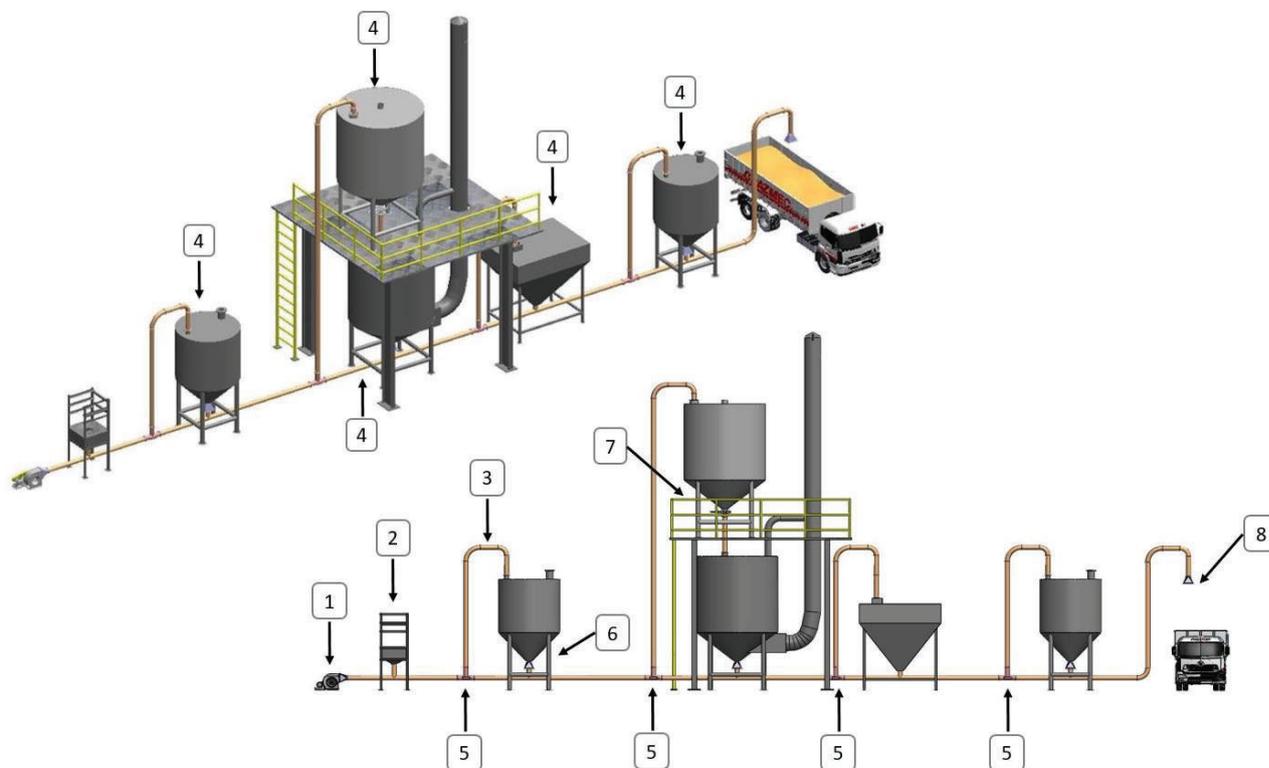
Apresentado a reorganização da planta da malteria de estudo, com as etapas de processos divididas com o sistema pneumático de transporte abrangendo a todas as etapas do processo.

Com a análise do anteprojeto em modelo 2D, fez-se a definição de inclinação de linhas verticais com a utilização de válvulas de desvio do Tipo T com ângulo de 90°, para apresentação de modelo 3D. Modelo da linha de transporte ilustrado na Figura 20.

Sugerindo algumas adaptações e alterações na estrutura do ambiente fabril, como o transporte da cevada úmida do tanque de maceração para o tanque de germinação por meio de

gravidade, a localização e disposição dos silos e tanques de maneira alinhada, para suprir a necessidade da linha de transporte.

Figura 20 - Modelo 3D da linha de sistema pneumático.



Fonte: Autor (2022)

Contendo no modelo os componentes analisados e pré-selecionados para o funcionamento do sistema. Sendo eles:

- **1 – Ventilador centrífugo;**
- **2 - Funil de recebimento da cevada,** por meio de descarregamento de *Bags*, já utilizado com os transportadores helicoidais.
- **3 - Tubulação** necessária, com curvas e flanges;
- **4 – Silos e Tanques,** já existentes na planta, onde são os receptores e separadores, separando a cevada e/ou mante do ar.
- **5 - Válvulas de desvio Tipo T;**
- **6 - Válvulas rotativas,** já existentes nas saídas dos silos e tanques;
- **7 – Válvula guilhotina,** já existente na saída do tanque de maceração para transportadores helicoidais;
- **8 – Bocal de descarregamento,** para carregamento do malte já pronto após finalização do processo.

O modelo elaborado em *CAD 3D* permite a apresentação do sistema, para posterior simulações necessárias e modificações estruturais, sem causar prejuízos financeiros e de implementação. Com o dimensionamento de parâmetros necessários para definição e seleção de componentes para base de estudo de viabilidade de implementação e possibilidade de futura fabricação de protótipo em escala piloto.

4.3 Análise de implementação

De acordo com o estudo teórico apresentado, com dimensionamento da linha de transporte pneumático e seus elementos necessários, fez-se a análise positiva de implementação, em primeiro croqui do projeto.

Como pode ser apresentado com o conceito pré-definido, elementos como as válvulas rotativas, silos e tanques, válvula guilhotina, bag de recepção do material, não serão alterados, resultando apenas na troca de sistema de transporte da cevada e malte, trocando os transportadores helicoidais pela linha pneumática.

A elaboração do conceito proposto mostrou algumas vantagens perante o sistema existente:

- Poucos elementos necessários para o sistema de transporte pneumático;
- Grande possibilidade e facilidade de automatização;
- Melhor organização do espaço de trabalho garantindo mais espaço do ambiente produtivo;
- Distribuição do material a silos diferentes na mesma linha de trabalho, com uso repetido de tubulações;
- Gasto teórico de energia menor, devido a menos elementos com motores elétricos.
- Gasto teórico de implementação menor, devido a simplicidade do sistema, e troca de quatro equipamentos transportadores helicoidais por um sistema com poucos componentes;
- Redução progressiva do capital e custos de instalação;
- Baixos custos de manutenção (devido ao pequeno número de peças móveis) e operação.

Além das vantagens gerais do método de transporte elaborado, uma vez que os sistemas de transporte pneumático são completamente fechados, a contaminação do produto, a perda de material e emissão de poeira (poluição ambiental) são reduzidos ou eliminados.

Para definições e seleções definitivas dos componentes de acordo com as especificações de dimensionamento são necessárias mais fundamentações da empregabilidade positiva do sistema, como simulações computadorizadas e protótipos em escala piloto. Afim de afirmar a possibilidade de implementação real no campo fabril estudado. Seguindo com o planejamento de troca de sistemas de transporte, com cotações de componentes, avaliando custos e seleção definitiva, reorganização do ambiente produtivo, possibilidades de otimização e automatização.

O desenvolvimento do conceito apresentado possibilita seguir para etapas de simulação do sistema, de forma a garantir ainda mais a empregabilidade do mesmo.

5 CONCLUSÕES

O estudo do *layout* proposto para a implementação de um novo sistema de transporte, aplicando o transporte pneumático de grão, que atua com transportadores helicoidais, possibilitou o entendimento do processamento da cevada para a fabricação de malte, todas as etapas de produção e necessidade de transporte do material entre elas. Possibilitando a elaboração do melhor layout, usando os elementos já existentes e necessários ao processo de fabricação, garantindo melhor avaliação de aplicabilidade de um sistema teórico, onde foram aplicadas mudanças de disposição dos tanques e silos existentes de maneira a atender à necessidade e empregabilidade do transporte pneumático.

Na etapa de maceração e germinação da cevada foi proposto o transporte por gravidade da cevada de um tanque ao outro, onde o tanque de maceração foi disposto no andar de cima ao tanque de germinação, devido a essas etapas de produção utilizarem a cevada molhada e úmida, precisando ser passada de um tanque a outro o transporte pneumático necessitaria um estudo muito mais aplicado para o transporte nessa etapa, devido ao material conter umidade.

A determinação de características do tipo de transporte e pressão empregada, através da classificação do material transportado, sua densidade e diâmetro médio, sendo definido um sistema em regime de fase diluída sob pressão positiva para o transporte de cevada e malte, que se enquadram ao Tipo “D” de material.

Os cálculos de dimensionamento possibilitam a determinação de parâmetros importantes para seleção dos componentes e informações de como se dará o fluxo de material, como a vazão de ar necessária para que o material seja impulsionado pela tubulação de transporte, a velocidade em que o material e o ar serão transportados, o diâmetro do duto adequado, a concentração de sólidos dentro dos dutos, sabendo qual é a proporção de cevada e malte a ser dispensados nos silos de recepção, que farão a separação dos materiais, onde a cevada ou malte decantam ao fundo do silo enquanto o ar é dispensado por saídas de ar.

Calculando ainda a perda de carga que ocorre durante os desníveis dos dutos devido ao atrito, e a perda de carga total, resultando na determinação da potência necessária para o acionamento do sistema e transporte contínuo, possibilitando a elaboração de um conceito e modelo 2D do *layout* e modelo 3D da concepção final.

Para que adaptações no *layout*, que possam vir a ser necessárias para implementação do sistema pneumático, sejam planejadas, bem elaboradas e desenvolvidas, como a adaptação de descargas dos silos pela válvula rotativa já existente que se manterá a mesma, sendo necessário novo encaixe para a tubulação pneumática. Bem como, adaptação de saída de funil de descarregamento de *Big Bags* e entrada inicial do material na linha de transporte, que antes descarregavam em um transportador helicoidal, sendo necessária modificação para encaixe na tubulação de transporte pneumática.

De acordo com o estudo teórico apresentado, fez-se a análise positiva de implementação, em primeiro croqui do projeto. Pontuando a utilização de poucos componentes para composição do sistema de transporte, facilidade de otimização e automatização, ambiente fabril mais organizado, distribuição da cevada/malte de maneira fácil e limpa, gasto teórico de energia menor que o sistema existente, baixo custo de manutenção e operação, devido ao pequeno número de peças móveis.

Com o desenvolvimento do estudo de conceito de aplicabilidade do sistema de transporte pneumático do *layout* de estudo, pode-se sugerir ainda novas incrementações a linha, como a utilização de atuadores pneumáticos para acionamento das válvulas rotativas nas descargas dos silos reduzindo ainda mais o consumo de energia pelo sistema.

Para definições e seleções definitivas dos componentes de acordo com as especificações de dimensionamento são necessárias mais fundamentações da empregabilidade positiva do sistema, como simulações computadorizadas e protótipos em escala piloto. A fim de afirmar a possibilidade de implementação real no campo fabril estudado. Seguindo com o planejamento de troca de sistemas de transporte, com cotações de componentes, avaliando custos e seleção definitiva, reorganização do ambiente produtivo, possibilidades de otimização e automatização.

A partir dos resultados apresentados ao longo do projeto, percebe-se a facilidade em determinar as principais características do sistema de transporte pneumático na teoria, a grande dificuldade é analisar a viabilidade econômica do projeto, tendo em vista o custo de

instalação e operação de um sistema deste porte, pois espera-se um rápido retorno financeiro no âmbito industrial.

Ao longo do trabalho identificou-se oportunidades para o desenvolvimento de estudos ainda mais aprofunda neste projeto, uma vez que este teve como principal objetivo propor um sistema de transporte pneumático conceitual, na teoria, o que oportuniza para futuros trabalhos o desenvolvimento de testes em *softwares* de simulação ou até mesmo a construção de uma escala piloto deste transportador pneumático para aplicações em disciplinas nas mais diversas áreas da engenharia.

O desenvolvimento do conceito apresentado possibilita seguir para etapas de simulação do sistema, de forma a garantir ainda mais a empregabilidade do mesmo. Com o modelo elaborado em *CAD 3D* o projeto permite a apresentação do sistema, para posterior simulações necessárias e modificações estruturais, sem causar prejuízos financeiros e de implementação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBINI G. **Secagem de cevada (*hordeum vulgare*): análise da difusividade efetiva**. XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA. Florianópolis, Universidade Federal de São Carlos, 2014.

CARVALHO, M. **Projeto conceitual de um transportador pneumático para fins de bauxita**. Monografia – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, p. 61. 2018.

CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados fluidomecânicos**. 3ª Ed. São Paulo: Blucher, 2018. p. 6-423.

CRUZ, F.D. **Transporte pneumático de granulados em fase diluída**. Dissertação (Mestrado em Equipamentos e Sistemas Mecânicos) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Coimbra, Portugal, p. 127. 2013

DENADAI, J. **Operações Unitárias 1: Introdução e transporte de materiais**. São Paulo. 2013. p. 1 – 57.

DINAMIC AIR. **Transporte Pneumático**. Disponível em: <<http://www.dynamicair.com.br/>>. Acesso em: 31 maio 2022.

GELDART, D. **Types of Gas Fluidization**. Powder Technology.1973

GONÇALVES, M. **Estudo da perda de carga em uma unidade piloto de transporte pneumático de grãos de milho em fase diluída – influência da singularidade t_e**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Santa Cecília, São Paulo, p. 130. 2016.)

GOMES, M. L. **Contribuição à análise do transporte pneumático em fase diluída**. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais) – Pós-Graduação em Engenharia Recursos Naturais, Proderna, Amazônia, p. 225. 2011.)

GOMIDE, R. **Operações Unitárias: Operações com sistemas sólidos granulares**. 1ª Vol. São Paulo: Edição do Autor, 1983. p. 1 – 292.

LOURENÇO, G. **Transporte pneumático horizontal de partículas de baixa densidade: proposta de um sistema de alimentação e estudos de fluidodinâmica**. Tese (Doutorado em

Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade de Uberlândia, Uberlândia, p. 155. 2019.)

NORTON, L. R. **Projeto de máquinas:** Uma abordagem integrada. 4ª Ed. Porto Alegre, 2013. p. 1 – 1055.

OSÓRIO M. **Otimização energética de maltagem a menor temperatura de estufagem.** Dissertação (Mestrado em Química) – Faculdade de Química, Universidade do Porto. Porto, Portugal, p. 102. 2016.)

SCHEIBEL, M. **Avaliação e dimensionamento de um sistema de transporte pneumático em uma indústria de leite em pó.** Monografia – Faculdade de Engenharia Química, Universidade do Vale do Taquari – Univates. Lajeado, p. 72. 2018.

ZEPPELIN SYSTEMS. **Transporte Pneumático.** Disponível em: < <https://www.zeppelinla.com/transporte-pneumatico>>. Acesso em: 18 maio 2022.