



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA MECÂNICA

RELATÓRIO DE ESTÁGIO PROFISSIONAL

Análise do funcionamento do compressor dimensionado para o transporte de sólidos em fase diluída.

Autor:

Quemane, Milton Fernandes

Supervisores:

Eng.º Dionísio Alfredo Langa – UEM

Eng.º Caudêncio Mondlane – MEREC

Maputo, Dezembro de 2023



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

Departamento de Engenharia Mecânica

Curso de Licenciatura em Engenharia Mecânica

Relatório de Estágio Profissional

Análise do funcionamento do compressor dimensionado para o transporte de sólidos em fase diluída.

Autor:

Quemane, Milton Fernandes

Supervisor da Faculdade

Eng.º Dionísio Alfredo Langa

Supervisor da empresa

Eng.º Caudêncio Mondlane

Maputo, Dezembro de 2023



**Análise do funcionamento do compressor dimensionado para o transporte
de sólidos em fase diluída. – Milton Fernandes Quemane**

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
DECLARAÇÃO DE HONRA.....	iv
ÍNDICE DE TABELAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	v
LISTA DE SIMBOLOS	vii
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	10
1.1. Introdução	10
1.2. Problema.	11
1.3. Objectivo geral.	11
1.4. Objectivos específicos.	11
1.5. Hipóteses.....	11
1.6. Perguntas de investigação	11
1.7. Importância do estudo	12
1.8. Estrutura do trabalho	12
1.9. Metodologia	12
CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA.....	13
2.1. Vantagens e desvantagens do transporte pneumático	13
2.2. Zonas do transporte pneumático	15
2.3. Classificação do transporte pneumático	16
2.4. Principais componentes do transporte pneumático	18
2.4.1. Sistema de alimentação, mistura e aceleração.	18
2.4.2. Colectores	21
2.4.3. Equipamentos geradores de pressão.....	22
2.5. Tubulações	26
2.5.1. Conduitas	26
2.5.2. Curvas ou mudanças de direcção	26
CAPÍTULO 3 – CONTEXTUALIZAÇÃO DA INVESTIGAÇÃO	28
3.1. Situação actual no Mundo.....	28
3.2. A empresa e o uso na empresa	28

3.3. Situação do objecto de estudo.....	29
CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO DO PROBLEMA.....	30
4.1. Metodologia de resolução do problema.....	30
4.2. Caracterização do produto a transportar.....	30
4.3. Velocidade de transporte.....	31
4.4. Diâmetro do transportador.....	33
4.5. Vazão do sólido.....	34
4.6. Concentração do sólido.....	34
4.7. Perda de carga.....	34
4.8. Potência absorvida pelo compressor.....	37
4.9. Potência necessária no motor eléctrico.....	37
CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	38
5.1. Caracterização do Produto.....	38
5.2. Caracterização da instalação.....	39
5.3. Variante 1.....	39
5.3.1. Velocidade de transporte.....	39
5.3.2. Diâmetro da conduta.....	40
5.3.3. Caudal do sistema.....	40
5.3.4. Relação sólido / ar.....	40
5.3.5. Comprimento total da instalação.....	40
5.3.6. Perda de carga.....	40
5.3.7. Potência necessária.....	41
5.3.8. Potência necessária no motor eléctrico.....	42
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	43
6.1. Conclusões.....	43
6.2. Recomendações.....	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
ANEXOS.....	A
Anexo 1.....	A
Anexo 2.....	Erro! Marcador não definido.

AGRADECIMENTOS

Um especial agradecimento ao meu orientador Eng.º Dionísio Alfredo Langa que foi incansável no tratamento das minhas solicitações, que de uma forma exemplar e muito humana tomou todas as diligências para a sua resolução. Ao Eng.º Caudêncio Mondlane que teve um papel fulcral na orientação da elaboração do relatório, transmitindo sempre a sabedoria e experiência para a melhor resolução possível. A todos os técnicos de MERECE que tiveram um papel fulcral para o meu término com Sucesso. Aos meus pais, irmãos por todo o amor e apoio, pelos ensinamentos que me deram e os valores que me inculcaram. A todos aqueles que me esqueci de referenciar, mas que foram importantes na minha vida, o meu muito obrigado.

Agradecimentos

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, Milton Fernandes Quemane, declaro por minha honra, que o presente projecto é da minha autoria e que nunca foi apresentado para efeitos de avaliação em nenhuma outra instituição de ensino, não constituindo cópia de nenhum trabalho realizado anteriormente. Assumo, na qualidade de autor, total responsabilidade pelos conteúdos apresentados.

Assinatura: _____

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - características de transportadores pneumáticos de fase densa e diluída. Fonte: Adaptado de Dicknow (2013, p. 17).	18
Tabela 2 – Separação de partículas por GELDART (1973) [10].	31
Tabela 3 – Materiais e velocidades de transporte recomendadas. Fonte: Gomide.....	33
Tabela 4 – Comprimento equivalente para curvas. Fonte: Gomide	35
Tabela 5 – Perda de carga para diferentes elementos de colecta. Fonte: Gomide	36
Tabela 6 – Características do produto. Fonte: Autor	38
Tabela 7 – características da instalação. Fonte: autor.....	39
Tabela 10 – Resultados obtidos para diferentes valores do diâmetro do ducto para velocidade igual a 17 m/s. Fonte: autor	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Zonas de transporte pneumático.....	15
Figura 2 - Transportador pneumático de configuração directa (a) e indirecta (b). Fonte: adaptado de GOMIDE (1983, p. 166 - 167).	16
Figura 3- transportador pneumático em fase densa (a) e fase diluída (b). Fonte: Dynamic Air (2018).....	17
Figura 4 - imagem ilustrativa de uma válvula rotativa (Fonte: Padix, 2018)	19
Figura 5 – Esquema de funcionamento de uma válvula rotativa. Fonte: adaptado de Mills (2004, p. 58).....	20
Figura 6. Esquema de funcionamento do doseador de parafuso. Fonte: adaptado de Mills (2008).....	20
Figura 7. Alimentador de Venturi. Fonte: Mills (2008)	21
Figura 8 - Sistema colector do tipo ciclone. Fonte: Direct Industry (2018).	21

Figura 9 – Filtro de manga com sistema de limpeza por ar comprimido. Fonte: adaptado de Mills (2004).....	22
Figura 10 – Rotor radial fechado, Rotor radial aberto com disco, Rotor radial aberto, pás curvadas para trás Fonte: Padix.	23
Figura 11 - Ventilador multi-estágios. Fonte: Padix	23
Figura 12 – Esquema de funcionamento de uma bomba de palhetas de um estágio. Fonte: Padix	24
Figura 13 – Funcionamento de um compressor tipo Roots. Fonte: Padix	25
Figura 14 - Compressor de Lóbulos Rotativos. Fonte: Padix	25
Figura 15 – Exemplo de desgaste de um tubo. Fonte: MILLS, 2004.....	26
Figura 16 – Acção da força centrífuga. Fonte: MILSS, 2004.....	27
Figura 17 – Diagrama de GELDART (1973) [. Sendo ρ_p a densidade das partículas e d_m o diâmetro médio das partículas.....	31
Figura 18. Produto a transporte. Fonte: Autor	38
Figura 19 – diagrama de Geldart.....	39

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolo	Grandeza	Unidade
X	Relação de massa de sólido transportado	kg sólidos/kg ar
V	Velocidade de transporte	m/s
V _m	Velocidade do material	m/s
V _f	Velocidade de flutuação do fluido	m/s
c	Capacidade recomendada por unidade de área	t/h·m ²
C	Capacidade do sistema	t/h
S	Secção transversal da conduta	m ² /h
D	Diâmetro interno da conduta	Mm
ΔP	Perda de carga total	Kg/m ²
ΔP/L	Perda de carga de atrito por unidade de comprimento	mm·CA/m
ΔP _e	Perda de carga nos equipamentos	Pa
ΔP _a	Perda de carga por aceleração nos trechos horizontais	Pa
D _p	Diâmetro da partícula	μm
ρ _p	Densidade das partículas	kg/m ³
L _t	Comprimento total	M
L _e	Comprimento equivalente das curvas, válvulas e demais conexões	M
L _h	Comprimento total dos trechos horizontais	M
L _v	Comprimento total dos trechos verticais	M
φ	Factor de redução para perda de carga por aceleração	
ω	Ângulo de deslizamento	°
α	Ângulo de repouso	°
β	Ângulo de escoamento	°

RESUMO

QUEMANE, Milton. **Análise do funcionamento do compressor dimensionado para o transporte de sólidos em fase diluída.** 2023. Trabalho de conclusão do curso (Licenciatura em Engenharia Mecânica) – Universidade Eduardo Mondlane.

A utilização do transporte pneumático tem sido de grande importância para o aumento da eficiência operacional das indústrias e, em muitos casos, torna-se a única opção quando trata-se de materiais tóxicos ou que não podem ser contaminados. A MEREK possui um sistema de transporte pneumático em fase diluída de matéria-prima para a produção da sêmea, o sistema tem apresentado falhas durante o funcionamento, causando a obstrução dos ductos de transporte. Assim, para solucionar o problema, pretende-se avaliar se o compressor foi dimensionado correctamente.

Palavras-chave: Dimensionamento, transporte pneumático, fase diluída.

ABSTRACT

QUEMANE, Milton. **Analysis of the operation of the compressor deigned to transport solids in dilute phase.** 2023. Final paper (Degree in Mechanical Engineering) – Eduardo Mondlane University. The use of pneumatic transport has been of great importance for increasing the operational efficiency of industries and, in many cases, becomes the only option when it comes to toxic materials or that cannot be contaminated. MEREK has a pneumatic transport system in diluted phase of raw material for the production of bran, the system has presented failures during operation, causing obstruction of the transport ducts. Thus, as a way of solving the problem, it is intended to develop a new pneumatic conveying system.

Keywords: sizing, pneumatic transport, dilute phase

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1. Introdução

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 alimentos, mineração, geração de energia e indústria química, o transporte de materiais constitui uma das principais actividades, tornando-se foco de análise para o aumento do rendimento operacional. Dentro dos mecanismos de transporte de materiais mais utilizados está o sistema de transporte pneumático. Um sistema de transporte pneumático consiste na utilização de um gás como meio de transporte para grãos e materiais pulverulentos através de uma rede de tubulação.

Segundo Wypych (1998), as principais vantagens do sistema de transporte pneumático são: baixo custo com manutenção e pessoal, flexibilidade no desenho do trajecto da instalação, possibilidade de distribuição do material para diferentes locais da empresa, uso para transporte de múltiplos materiais granulados, e facilidade para automação e controle. No entanto, se eles não forem bem projectados, alguns problemas podem aparecer, dentre estes: alto consumo energético, desgaste e abrasão excessiva das tubulações e equipamentos e bloqueios inesperados.

Pelos motivos anteriormente expostos, autores como Özbelge (1983), tratam o transporte pneumático não como uma ciência, e sim uma arte. Isso ocorre porque, apesar de muitos estudos já realizados sobre o assunto, ainda encontram-se discrepâncias em relação aos métodos de dimensionamento destes sistemas.

1.2. Problema.

A MEREC, possui uma linha de transporte pneumático para a fábrica de sêmea que tem apresentado obstruções durante o funcionamento, pretende-se averiguar se a obstrução é devido ao mau dimensionamento do compressor ou devido à problemas mecânicos do mesmo. A linha em estudo apresenta os seguintes dados técnicos:

- Capacidade do sistema (C): 5,9 t/h
- Potência do compressor (P): 10,21 kW
- Caudal do compressor (Q): 232 m³/min
- Comprimento da linha (L): 174 m

Objectivos

1.3. Objectivo geral.

Analisar o funcionamento do compressor dimensionado para o transporte de sólidos.

1.4. Objectivos específicos.

- Dimensionar o compressor do transportador pneumático.
- Identificar a causa da obstrução da linha do transporte do sistema instalado.

1.5. Hipóteses.

Hipótese 1:

A baixa potência do compressor pode não ser suficiente para vencer as perdas de carga no sistema de transporte e como consequência a linha de transporte fica obstruída.

Hipótese 2:

O caudal de ar fornecido pelo compressor pode estar abaixo dos limites indicados para fornecer uma relação de transporte dentro dos limites indicados para o transporte pneumático em fase diluída.

1.6. Perguntas de investigação

- A potência e caudal do compressor instalado são suficientes para o transporte do material?
- A obstrução da linha é devida ao mau dimensionamento do compressor ou aos problemas mecânicos do mesmo?

1.7. Importância do estudo

O estudo é de extrema importância, pois, se o sistema estiver bem dimensionado, haverá uma redução do consumo de energia, também serão conhecidos os pontos de funcionamento do sistema para um intervalo de variação da humidade do material e da capacidade do sistema, o que poderá proporcionar um óptimo funcionamento do sistema e uma redução dos custos relacionados a manutenção.

1.8. Estrutura do trabalho

O presente trabalho divide-se em cinco capítulos, com a seguinte ordem:

- **Capítulo 1:** neste são apresentados os objectivos, importância e a metodologia de desenvolvimento do mesmo.
- **Capítulo 2:** Faz-se a abordagem sobre o transporte pneumático e uma breve descrição dos equipamentos constituintes do transporte pneumático.
- **Capítulo 3:** apresenta informações contextuais referentes a empresa e ao sistema actualmente instalado.
- **Capítulo 4:** Faz-se uma explanação do procedimento de cálculo de sistemas de transporte pneumático.
- **Capítulo 5:** São apresentados todos os cálculos realizados para a tomada de decisão.
- **Capítulo 6:** apresenta as conclusões e as recomendações do trabalho.

1.9. Metodologia

O presente trabalho irá dotar de uma metodologia de pesquisa.

- Quanto a abordagem: quantitativa
- Quanto a natureza: pesquisa aplicada
- Quanto ao procedimento: bibliográfica e documental.

O uso deste método, deve-se ao facto de tratar-se de um trabalho de pesquisa onde serão pesquisadas diversas fontes existentes tais como:

- Manuais e tabelas referentes aos diferentes elementos que compõem o sistema de transporte pneumático.
- Relatórios e dissertações relacionados ao tema.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA

Segundo Gomide (1983), o transporte pneumático consiste no transporte a granel de materiais através da movimentação de ar numa conduta. O Transporte pneumático é a mais importante operação industrial de processos de transporte de materiais granulados ou polvorentos secos em ambiente gasoso que pode ser o ar ou um outro gás. Para que ocorra esta movimentação, há necessidade de se ter uma quantidade de ar constante e controlável, de forma a se obter um fluxo contínuo de ar sob pressão. A combinação das três variáveis é muito importante para a eficiência do transporte pneumático: volume, velocidade e pressão de ar. A utilização do ar para a movimentação de materiais sólidos apresenta vantagens em comparação com a movimentação mecânica (elevadores, transportadores helicoidais, telas transportadoras, etc.). São importantes para o projecto de um transporte pneumático as seguintes propriedades do sólido: granulometria e forma das partículas, densidade real e aparente, ângulo de repouso dinâmico, fragilidade, humidade, mobilidade, dureza e características de abrasão, aderência e aglomeração.

2.1. Vantagens e desvantagens do transporte pneumático

O transporte pneumático de materiais tem um número significativo de vantagens, que são as seguintes:

- Transporte isento de poeiras para uma grande variedade de produtos;
- Flexibilidade no traçado das condutas - pode ser transportada na vertical e horizontal por meio de utilização de curvas no traçado;
- Distribuição do produto para diferentes locais e a partir de diferentes locais na área industrial;
- Reduzida manutenção e baixo custo de mão-de-obra;
- Apresenta segurança no transporte pois as condutas podem ser usadas no transporte de produtos de grande valor; Facilidade de automação e controlo.
- Eliminação de formações de poeiras no ambiente (transporte sem poluição atmosférica);
- Redução de perdas de produto durante o processo de transporte;
- Elimina a possibilidade do contacto do produto com superfícies húmidas durante o transporte;
- Possibilidade de transporte aéreo e interno das instalações fabris;
- Possibilita traçados de transporte com percurso sinuoso da tubagem;
- Facilidade de adaptação aos edifícios existentes da tubagem de transporte;
- Protecção do material transportado contra a poluição;

- Possibilita a utilização gases neutros durante o transporte;
- Realização de instalações podendo integrar conjuntos completamente automatizados;
- Higiene e segurança no trabalho de transporte do produto.

O transporte pneumático apresenta as seguintes desvantagens:

- Alto consumo de energia;
- Desgaste e abrasão do equipamento;
- Uma projecção incorrecta do sistema pode resultar na degradação do produto a transportar;
- Limitação nas distâncias de transporte;
- Não é recomendado para sólidos muito húmidos ou viscosos;
- Dimensões das partículas, massas volumétricas muito grandes requerem velocidades de gás por vezes excessivas;
- Pode causar o sobreaquecimento do material a transportar;
- Não é recomendado para o transporte de partículas muito frágeis que podem sofrer reduções de tamanho durante o transporte.

2.2. Zonas do transporte pneumático

O transporte pneumático é essencialmente composto por quatro zonas distintas, em que cada uma delas necessita de equipamentos específicos para realizar a sua função. As quatro zonas de transporte pneumático estão representadas na Figura 1.

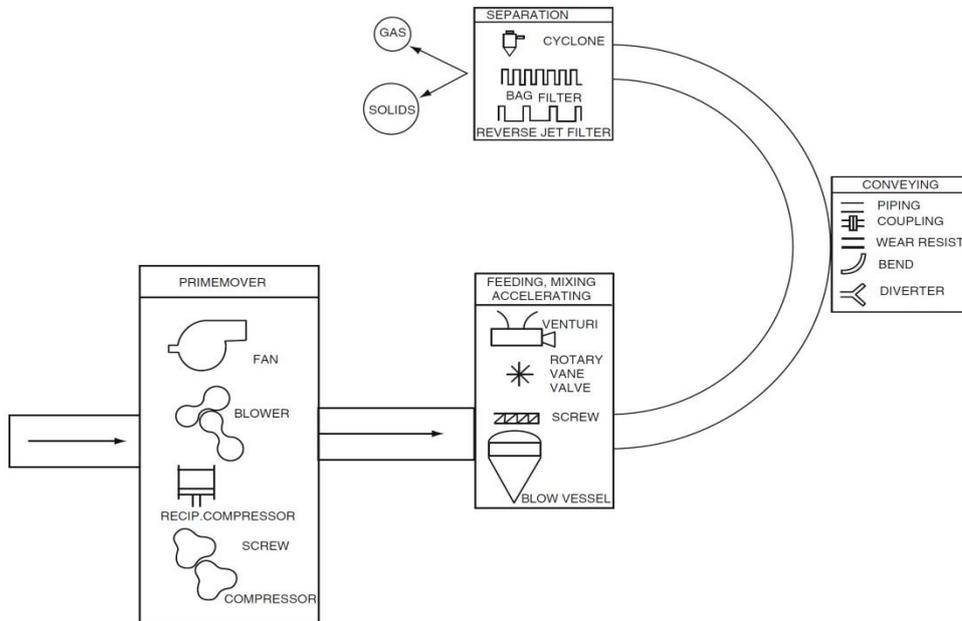


Figura 1 - Zonas de transporte pneumático

Sistema motor é usado para fornecer a energia necessária ao transportador por meio de compressores, sopradores, ventiladores e bombas de vácuo.

Zona de alimentação mistura e aceleração - é onde as partículas são adicionadas ao gás de transporte.

Zona de transporte - consiste essencialmente em tubagens.

Separação Gás/Sólidos - Nesta zona realiza-se a separação do produto do gás de transporte.

2.3. Classificação do transporte pneumático

Segundo GOMIDE (1983), é possível caracterizar o sistema pneumático quanto à configuração e actuação do ventilador ou compressor. A figura 2 mostra os tipos de configuração existentes.

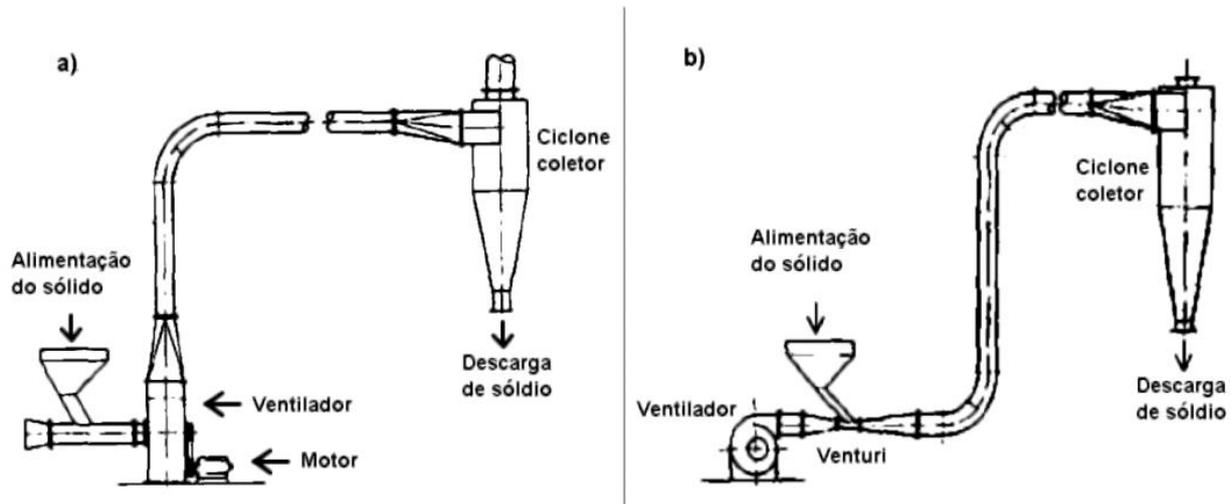


Figura 2 - Transportador pneumático de configuração directa (a) e indirecta (b). Fonte: adaptado de GOMIDE (1983, p. 166 - 167).

Quando o material particulado passa através do ventilador ou compressor, o sistema é de uso directo, conforme mostrado na Figura 2-a. Para sistemas indirectos, o sólido não passa directamente pelo ventilador, como mostra a Figura 2-b. Entre os dois sistemas citados, o sistema de transporte directo tem mais aplicabilidade em indústrias, pois é mais simples de projectar, instalar e operar. A sua desvantagem é que não pode ser empregue em casos onde o material particulado pode danificar ou ocasionar gastos excessivos no ventilador.

Além da configuração directa ou indirecta do sistema pneumático, estes equipamentos podem operar em fase densa ou diluída.

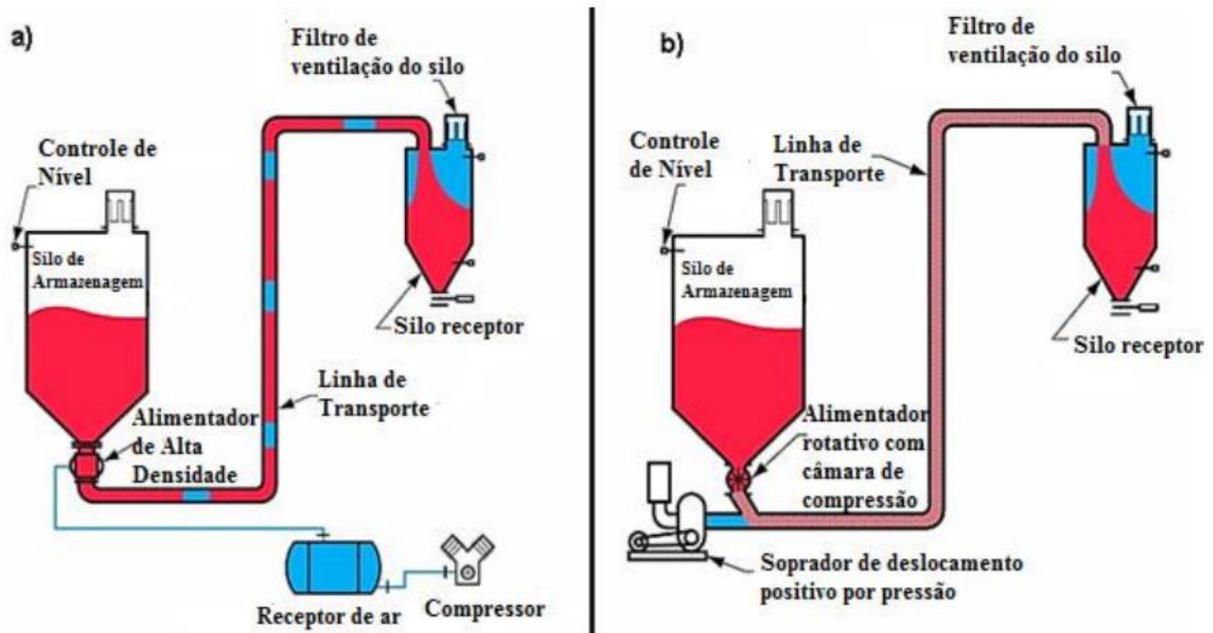


Figura 3- transportador pneumático em fase densa (a) e fase diluída (b). Fonte: Dynamic Air (2018)

Os transportadores de fase densa (Figura 3-a) opera com altas cargas de carregamento, altas pressões e baixas velocidades de transporte. Nestes dispositivos é comumente utilizada uma válvula doseadora ou vaso de pressão para introduzir o material destinado ao transporte. Para os dispositivos que operam em fase diluída, mostrado na figura 3-b, empregam-se baixas cargas de carregamento, fluxo de ar de alta velocidade, Baixa pressão ou vácuo. Estas características fazem com que o material presente na linha de transporte se encontre em estado de fluidização (DICKNOW, 2013).

Na Tabela 1 é possível observar uma diferença entre as características do transporte pneumático de fase densa e diluída.

Tipo de Transporte	Fase densa	Fase diluída
O produto para os quais os sistemas melhor se aplicam	Pó ou granulado – abrasivos, frágeis, misturas em bateladas (minimizar segregação)	Pó ou granulado – não abrasivos, não frágeis, de baixa densidade.
Velocidade de transporte	Baixa de 0,1 a 2 m/s, utilizando-se vaso de pressão	Alta, acima de 15 m/s utilizando-se sopradores tipo Roots ou sopradores centrífugos
Relação pressão e vazão do ar	Pressões relativas altas (acima de 103 kPa) e baixa vazão de ar	Pressões baixas inferiores a 103 kPa e alta vazão do ar
Vazão do material transportado	Mais alto comparado a outros sistemas	Mais baixo comparado a outros sistemas
Desgaste do equipamento	Baixo índice de desgaste na tubulação, redução do desgaste das curvas devido à baixa velocidade de transporte	Alto índice de desgaste na tubulação e altíssimo índice de desgaste das curvas devido à alta velocidade de transporte
Custos de manutenção	Mais baixo comparados aos outros sistemas	Mais alto comparado aos outros sistemas

Tabela 1 - características de transportadores pneumáticos de fase densa e diluída. Fonte: Adaptado de Dicknow (2013, p. 17).

2.4. Principais componentes do transporte pneumático

Um transportador pneumático é composto por diversos componentes, os quais são responsáveis por funções específicas, onde o emprego simultâneo destes equipamentos realiza o funcionamento pleno de um transportador pneumático (BORTOLAIA, 2008; DICKNOW, 2013).

- Podem-se citar como principais dispositivos:
- Sistema de alimentação, mistura e aceleração (Válvula rotativa, doseadores de parafuso e alimentador de venturi)
- Equipamentos geradores de pressão
- Tubulações
- Colectores

2.4.1. Sistema de alimentação, mistura e aceleração.

Um sistema eficiente de alimentação de sólidos na tubulação torna-se essencial para uma operação efectiva do sistema de transporte pneumático. A escolha do dispositivo alimentador

apropriado deve ter em conta as características do material a ser manipulado, o arranjo físico da instalação, o custo, o modo de operação e o seu controle de alimentação. Alguns dos principais modelos disponíveis são: válvula rotativa, doseador de parafuso e o alimentador tipo Venturi (KLINZING et al., 1990).

A válvula rotativa (Figura 4) é um dispositivo essencial em sistemas pneumáticos, uma vez que realiza a alimentação forçada na linha transportadora e descarga controlada do material no colector. O equipamento possui um eixo giratório com palhetas, e a movimentação do rotor proporciona o abastecimento e retirada do material da linha de transporte. Estas características evitam a obstrução e a sobrecarga do material nas condutas de transporte. A taxa de carregamento do sólido é controlada pela alteração do número de rotações da válvula, proporcionando facilidade quanto a necessidade de ajustes de vazão.



Figura 4 - imagem ilustrativa de uma válvula rotativa (Fonte: Padix, 2018)

Outra funcionalidade deste elemento é equalizar a pressão entre a sucção e a descarga do sistema de transporte. A válvula é composta basicamente por um corpo metálico que envolve um rotor, conforme mostrado Figura 5, sendo que o material constituinte do equipamento pode ser ferro fundido, aço carbono, alumínio, bronze, inox, ebonite, PVC e plástico reforçado com fibra de vidro. Independentemente de sua construção, as válvulas rotativas apresentam vazamento de ar devido ao retorno de lóbulos vazios e às perdas através da vedação entre o eixo e a carcaça, bem como pela folga entre o rotor e a carcaça (KLINZING et al., 1990)

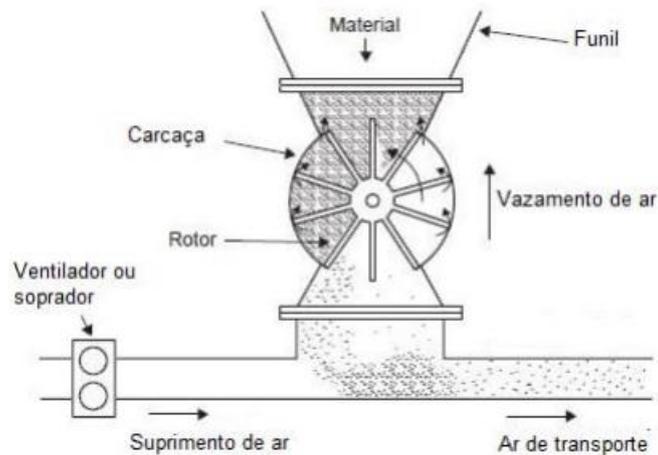


Figura 5 – Esquema de funcionamento de uma válvula rotativa. Fonte: adaptado de Mills (2004, p. 58)

Por outro lado, os doseadores de parafuso (Figura 6) são utilizados para instalações que funcionam por recalque, até pressões efectivas da ordem de 0,25 MPa. O dispositivo possui um parafuso helicoidal que comprime o produto, e durante o avanço do parafuso é introduzido o produto na linha de transporte. Esse tipo de doseador é utilizado para grandes vazões (até 250 ton/h), absorvendo uma potência relativamente elevada. Evita-se produtos pulverulentos muito abrasivos por sua característica construtiva (SILVA, 2005).

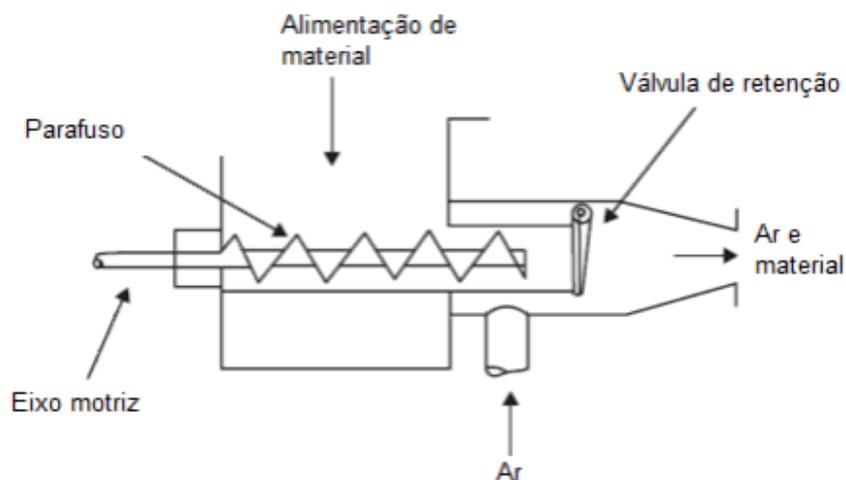


Figura 6. Esquema de funcionamento do doseador de parafuso. Fonte: adaptado de Mills (2008).

Por último, o alimentador tipo Venturi surge como um dos mais usados devido à sua simplicidade do ponto de vista construtivo. O equipamento é constituído de um bocal de entrada de ar, que posteriormente afunila e leva ao aumento da velocidade do ar e à geração de uma região de pressão negativa, por onde o material entra na tubulação (Figura 7). Contudo, esse sistema é restrito a curtas distâncias e baixa vazão mássica de material (KLINZING et al., 1990).

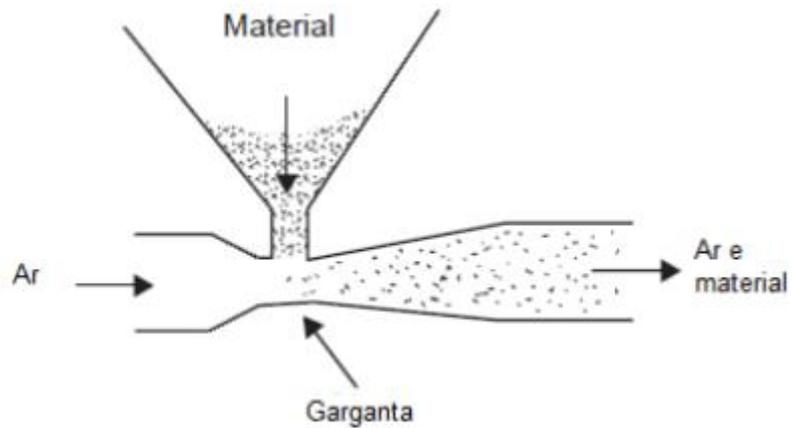


Figura 7. Alimentador de Venturi. Fonte: Mills (2008)

2.4.2. Colectores

Os dispositivos destinados a recolher o sólido no fim da linha de transporte pneumático são chamados de colectores. É possível empregar diferentes equipamentos para tal finalidade. Para sólidos finos tipicamente maiores que 5 μm , utilizam-se ciclones de filtros de mangas; quando tem-se descarregamento de sólidos de diâmetro médio ou grosseiros, pode-se utilizar o silo de armazenagem ou adoptar a utilização da camara gravitacional (GOMIDE, 1983). O ciclone mostrado na Figura 8, é o equipamento colector de maior emprego no transporte pneumático.

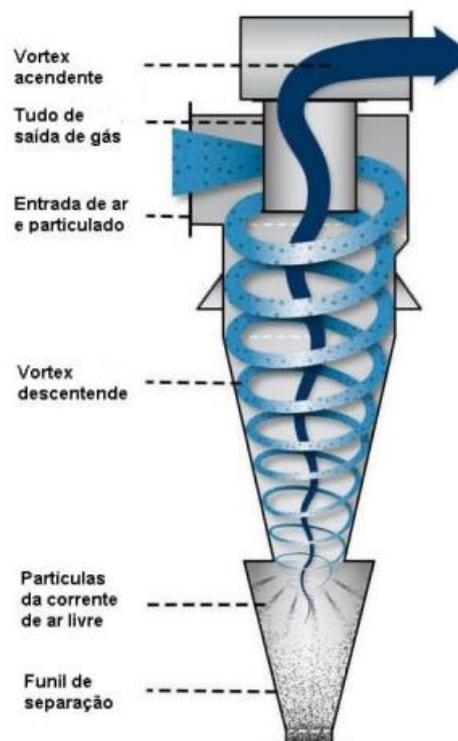


Figura 8 - Sistema colector do tipo ciclone. Fonte: Direct Industry (2018).

Este tipo de colector consiste em uma câmara de sedimentação na qual o campo gravitacional é substituído pelo centrífugo. 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. Quando o material chega ao fundo do trecho cônico acontece o descarregamento (GOMIDE, 1980).

O colector do tipo ciclone possui uma eficiência de 85 % e opera com uma perda de carga de 15 a 150 milímetros de coluna de água (mm C.A.). Esse dispositivo tem como vantagens o baixo custo de construção e instalação, simplicidade de operação, exigência de pouca manutenção e versatilidade, podendo ser adaptado em diversas operações. As desvantagens desse dispositivo são a baixa eficiência de operação com partículas muito finas e possibilidade de entupimento quando utilizado na separação de partículas higroscópicas e aderentes (GOMIDE, 1980)

Por outro lado, o aumento de operações industriais com transporte de partículas finas tem incentivado o uso do filtro de mangas para garantir uma separação gás-sólido quase total. A seleção do material deve considerar as características físicas e químicas das partículas e do processo. A Figura 9 apresenta o funcionamento de um filtro de mangas com limpeza por ar comprimido (KLINZING et al., 1990)

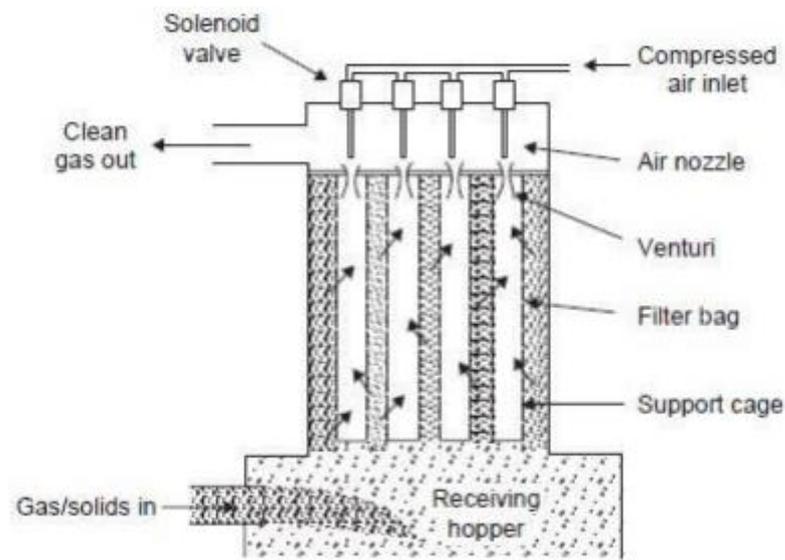


Figura 9 – Filtro de manga com sistema de limpeza por ar comprimido. Fonte: adaptado de Mills (2004)

2.4.3. Equipamentos geradores de pressão

Para o transporte horizontal e vertical em fase diluída é necessário operar a baixas velocidades de modo a minimizar a perda de pressão do escoamento, reduzir o atrito e os custos decorrentes deste efeito. O soprador pode fornecer ao sistema grandes caudais de ar. Um adequado dimensionamento do soprador evita a condição de entupimento da linha, nesta condição o sistema

fica colmatado de sólidos e só pode ser reiniciado pela drenagem da linha. Os tópicos a seguir exemplificam os principais tipos de equipamentos que podem ser utilizados como sopradores promovendo o caudal de ar necessário ao processo.

2.4.3.1. Ventiladores centrífugos

Neste tipo de equipamento, o rotor aspira o ar e a extracção é feita através do bocal de descarga, seguindo uma trajectória em espiral. O eixo de descarga é perpendicular ao eixo de aspiração. Como o fluxo de ar atravessa o ventilador, usa-se o rotor de palhetas inclinadas para trás que propicia um melhor rendimento. Se o ar estiver contaminado por poeiras, ou se o produto atravessar o ventilador, deve-se utilizar um rotor aberto com palhetas radiais. Nessa situação o rendimento do ventilador ficara entre 50 e 70% (Da SILVA, 2005) [5].

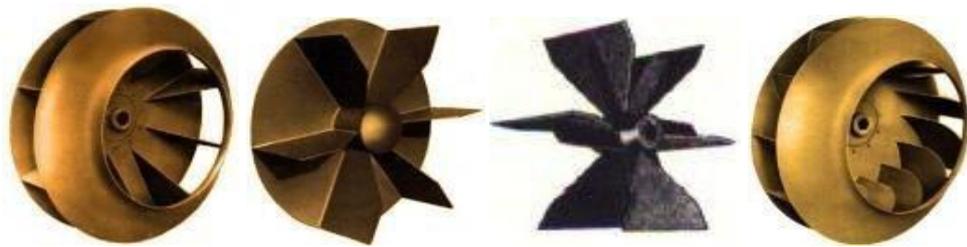


Figura 10 – Rotor radial fechado, Rotor radial aberto com disco, Rotor radial aberto, pás curvadas para trás Fonte: Padix

2.4.3.2. Ventiladores Multi-estágios

Com o intuito de se obter pressões mais elevadas do que as obtidas nos ventiladores centrífugos, podem-se usar ventiladores em serie ou ventiladores com rotor em multi-estágios (Figura 11).



Figura 11 - Ventilador multi-estágios. Fonte: Padix

Esses equipamentos são utilizados em instalações de descarga de navios ou em limpezas com alto vácuo. Porém, como o caudal varia com a carga instantânea, torna-se necessário equipar a instalação com um regulador para limitar variações de caudal de ar e por consequência a variação da potência absorvida.

2.4.3.3. Compressor de Palhetas

Este sistema é constituído por um estator cilíndrico que recebe um rotor excêntrico e ranhurado. Cada ranhura é provida de uma palheta deslizante que é forçada contra a parede do estator por molas ou pela força "centrífuga" causada pelo movimento de rotação do rotor. Na Figura 12 é ilustrado seu funcionamento.

Quando a palheta A passa pelo orifício de entrada de ar, a câmara a ser evacuada é colocada em contacto com o volume limitado pelo estator, e no selo superior, também no rotor e na própria palheta. Este volume de ar aumentará conforme ocorre o avanço da palheta, isso produzirá uma queda de pressão na câmara, queda esta que continuará até que a palheta B avance até a entrada, quando então o ar existente neste volume ser isolado entre as duas palhetas. Conforme a rotação continua, o ar existente passa a ser comprimido pela palheta B, até que atinja pressão suficiente para abrir a válvula de saída sendo assim descarregado para a atmosfera. Como as palhetas actuam sequencialmente, com uma rotação, um volume de ar igual ao dobro do mostrado na Figura 12b será retirado da câmara. Os contactos das palhetas e do rotor com o estator podem formar três câmaras separadas (Figura 12d) que contêm ar em diferentes pressões, e devem, portanto ser estanques.

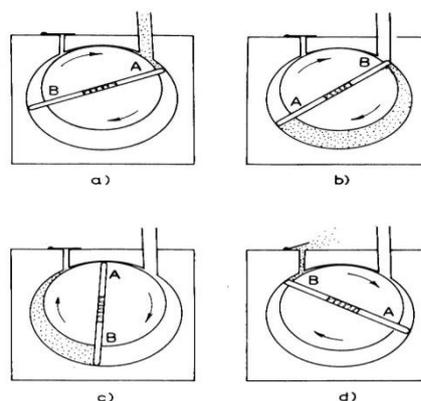


Figura 12 – Esquema de funcionamento de uma bomba de palhetas de um estágio. Fonte: Padix

2.4.3.4. Compressor de Lóbulos Rotativos

Este equipamento, que também é conhecido como compressor tipo *Roots*, tem ampla utilização no transporte pneumático, é constituído tipicamente de dois rotores simétricos em forma de “8” conjugados por engrenagens e girando em sentido inverso, movimento este sendo realizado no interior de um invólucro (Figura 13).

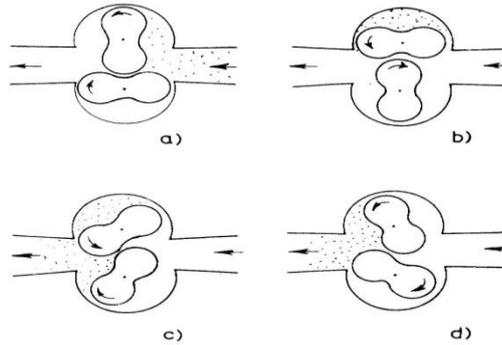


Figura 13 – Funcionamento de um compressor tipo Roots. Fonte: Padix

O funcionamento do compressor ocorre sem lubrificação dos lóbulos, nem arrefecimento do corpo. Desta forma, o ar está isento de óleo, entretanto é necessário considerar as folgas mínimas que existem entre os lóbulos e entre cada um deles e a carcaça.



Figura 14 - Compressor de Lóbulos Rotativos. Fonte: Padix

2.5. Tubulações

2.5.1. Conduitas

Deve-se escolher o diâmetro da conduta para que seja possível, manter em todo o trajecto de transporte a velocidade necessária para o deslocamento do produto. O circuito é feito com tubo em aço com costura de usos gerais. Em todos os casos, o circuito deve ser perfeitamente estanque e as secções diferentes de tubulação devem ser alinhadas perfeitamente para evitar todo e qualquer ressalto interno. O acoplamento entre elas deve ser conseguido por meio de flanges soldadas e aparafusadas, com uso de juntas de estanqueidade, juntas de dilatação ou outros acessórios desenvolvidos para esse fim.

2.5.2. Curvas ou mudanças de direcção

Quando há utilização de acessórios, curvas, cotovelos e válvulas nas linhas de transporte é necessário atenção para que essas instalações não causem saliências abruptas, causando acúmulo de sólido, obstruções e perda de carga excessiva. Outras variáveis importantes são a espessura e o tipo de material utilizado na construção da tubulação. A escolha do material deve ser baseada nas características do material a transportar dando atenção para sólidos abrasivos, uma vez que esses causam excessivo desgaste e conseqüentemente constante substituição das tubulações, acessórios e equipamento (MILLS, 2004). A Figura 15 mostra o desgaste causado num tubo durante o transporte pneumático.



Figura 15 – Exemplo de desgaste de um tubo. Fonte: MILLS, 2004

Partículas sólidas em suspensão, em tubos horizontais ou verticais rectos, tendem a tocar a superfície das curvas devido a força centrífuga (Figura 16). Em virtude deste factor, a velocidade das partículas é reduzida e são, então, rearrastadas e reaceleradas resultando em quedas de pressão elevadas.

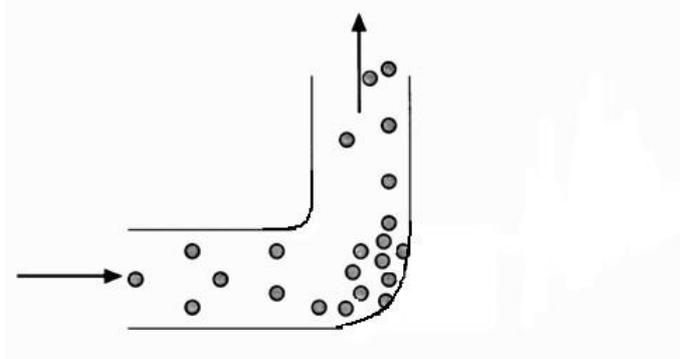


Figura 16 – Acção da força centrífuga. Fonte: MILSS, 2004

CAPÍTULO 3 – CONTEXTUALIZAÇÃO DA INVESTIGAÇÃO

3.1. Situação actual no Mundo

O primeiro sistema de transporte pneumático documentado data de 1847 pela autoria da fábrica Peugeot® localizada na cidade de Valentigney na França, na extracção de poeiras provenientes de sistemas de moagem de pedra. O segundo sistema terá sido patenteado pela Crampton's®, “Melhorias na moagem, preparação e queima de carvão” de 1868. Apesar disso a empresa B.F. Sturtevant Company® transcreve que o seu fundador foi o primeiro a usar ar no transporte de materiais fluidizados na pós-revolução industrial, que em 1864 começou as experiências primárias na remoção do pó em operações de moagem, polimento, etc.. A empresa B.F. Sturtevant Company®, desenvolveu um transportador pneumático para materiais leves como a madeira de serragem, papel e algodão, produtos com características não abrasivas que podiam passar através das pás do ventilador. Hoje em dia, o transporte pneumático é utilizado em várias aplicações de armazenagem e transporte, sendo utilizado para transporte de materiais a granel em fábrica, armazéns, áreas de carga e descarga de ferrovias e portos marítimos, descarregamento pressurizado de contentores, para controlo e Selecção de materiais em silos e para muitas outras finalidades similares. Existe uma grande variedade de materiais granulados secos e em pó que são transportados com eficiência através desta tecnologia, como o cimento, carvão em pó, grãos, alumina, apatita, cinzas, algodão, carvão moído, madeira de serragem, granulado de PVC, Resina de PVC, Carbonato de cálcio, Dióxido de Titânio e muitos outros produtos, de uma maneira geral todos os produtos polvorentos e granulados são susceptíveis de serem transportados através de transporte pneumático, variando sim, a forma e método do transporte para assim se adaptar melhor as especificações de cada produto.

3.2. A empresa e o uso na empresa

A MEREC industries, SA foi fundada em 1996, é uma das referências no sector de fabricação de alimentos e hoje é uma referência nacional na produção de farinhas de milho e trigo, massas, bolachas e rações animais. As unidades industriais da MEREC possuem equipamentos com os mais altos padrões da qualidade. Com estes recursos a MEREC pode garantir a excelência dos seus produtos, dentro dos padrões de qualidade exigidos pelos consumidores nacionais e internacionais. A empresa possui 4 unidades fabris (duas na Matola, uma na Beira e outra em Nacala)

A empresa possui vários sistemas de transporte pneumático, alguns destes fazem o transporte dentro das fábricas e outros entre as fábricas. A Moageira possui cinco sistemas de transporte pneumático, três para a fábrica de sêmea, um para a fábrica das massas e um para a fábrica de bolachas. O objecto de estudo é o transportador de que transporta o material da Moageira para a

fábrica de sêmea. Este material é aspirado do trigo bruto durante o transporte para a armazenagem temporária nos silos.

3.3. Situação do objecto de estudo

O objecto de estudo encontra-se localizado na MEREK SOCIMOL localizada na Av. Josina Machel, Maputo. Esta, ocupa uma área de 3 km² distribuídas da seguinte maneira:

- Parques de estacionamento, de cargas e descargas
- Bloco administrativo
- Armazém de matérias
- Oficina de manutenção
- Armazém de peças
- Moageira
- Fábrica de massas
- Fábrica de bolachas
- Fábrica de sêmea

O sistema em estudo é um sistema de transporte pneumático constituído por um dispositivo gerador de pressão do tipo lóbulo com a potência $P = 10,21$ kW e caudal $Q = 232$ m³/min, o sistema de alimentação é do tipo válvula rotativa com a capacidade $C = 5,1$ t/h e no final do sistema existe um sistema colector do tipo ciclone. O circuito de transporte é feito de tubos de aço com o diâmetro igual a 100 mm e comprimento de 174 metros, sendo 144 metros de trechos horizontais e 30 metros de trechos verticais e 11 curvas.

CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO DO PROBLEMA.

Faz-se uma explanação do procedimento de cálculo de sistemas de transporte pneumático de pó na fábrica de sênea da MEREC.

4.1. Metodologia de resolução do problema

O projecto do sistema de transporte pneumático obedece a seguinte metodologia:

- Caracterização do produto a transportar;
- Cálculo da velocidade de transporte;
- Cálculo do diâmetro da conduta;
- Cálculo do comprimento total da instalação;
- Cálculo do caudal do sistema;
- Cálculo da relação de sólidos/gás;
- Cálculo da perda de carga do sistema;
- Cálculo da potência necessária do sistema;
- Selecção da bomba de vácuo para o sistema;

4.2. Caracterização do produto a transportar

Nesta fase interessa determinar as características granulométricas e físicas do produto a transportar, nomeadamente:

- ρ_p – Massa específica das partículas [kg/m³]
- d_p – Diâmetro das partículas [mm]
- ω – Ângulo de deslizamento [°]
- α – Ângulo de repouso [°]
- β – Ângulo de escoamento [°]
- Teor de humidade [%]

Os diversos intervalos de granulometria dos pós e as suas características físicas influenciam o regime de transporte. Uma metodologia para a separação das partículas em diversos grupos, é apresentada na Tabela 2.

Grupo	Características
A	Materiais com Tamanho médio das partículas pequeno ou baixa densidade $1,4 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. Podem ser transportados em fase densa com pouca possibilidade de obstrução da tubagem, como por exemplo o cimento.
B	Partículas de tamanho de $40 < d_p < 500 \text{ [}\mu\text{m]}$ e densidade $1,4 < \rho_p < 4 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. Pós que podem ter uma relação de massa de sólido transportado - X - $[\text{Kg sólidos/Kg ar}]$ até 100 vezes.
C	Pós de natureza coesiva de diâmetros muito pequenos, que tendem a aglomerar em sistemas de transporte convencionais, ocasionando obstruções na tubagem. Nestes sistemas são muito utilizados tubos flexíveis para impedir tal fenómeno físico.
D	Sólidos de grandes diâmetros. Transportados com altas velocidades de ar e uma baixa relação de massa de sólido transportado - X - $[\text{Kg sólidos/Kg ar}]$.

Tabela 2 – Separação de partículas por GELDART (1973) [10].

A Figura 17 com as regiões dos grupos de A até D é denominada de Diagrama de GELDART. Nas abscissas encontra-se a granulometria e nas ordenadas a densidade dos diferentes materiais.

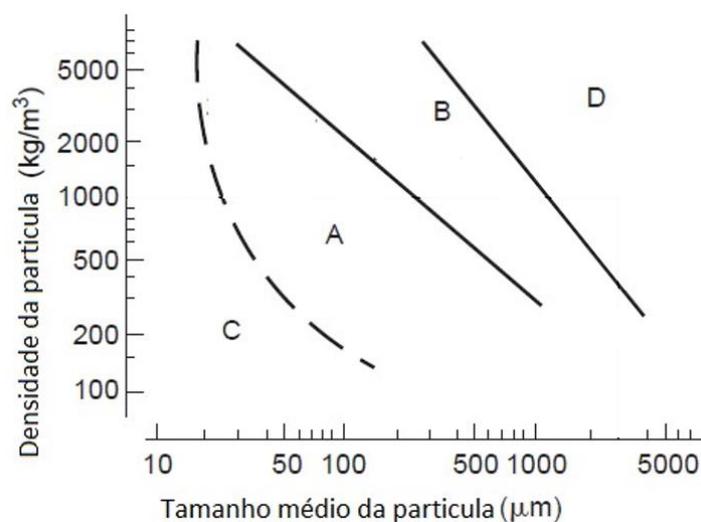


Figura 17 – Diagrama de GELDART (1973) [. Sendo ρ_p a densidade das partículas e d_m o diâmetro médio das partículas.

4.3. Velocidade de transporte

Segundo este processo de cálculo, a velocidade do fluido de transporte deve em geral variar nos diversos trechos horizontais e verticais do transportador. Todavia em sistemas de pequeno porte

ou sistema com trechos verticais curtos, costuma-se utilizar uma única velocidade para todo o sistema. A velocidade de flutuação de um sólido num trecho vertical, baseada na área da secção transversal da partícula perpendicular a direcção do escoamento, vem dada pela expressão

$$V_f = 3,28 \cdot \sqrt{\rho_s \cdot D_p} \quad (1)$$

A velocidade de transporte deverá ser a soma da velocidade de flutuação com a velocidade do material, que pode ser admitida proporcional a raiz quadrada da densidade aparente (ρ). A expressão recomendada é a seguinte:

$$V_m = 23,4 \cdot \sqrt{\rho} \quad (2)$$

Como a densidade aparente é mais fácil de conhecer em relação a densidade real do sólido, será interessante substituir ρ_s em função de ρ na expressão de V_f , utilizando a seguinte aproximação:

$$\rho_s = 1,47 \cdot \rho^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

Resulta:

$$V_f = 4,11 \cdot \sqrt[3]{\rho} \cdot \sqrt{D_p} \quad (4)$$

E finalmente

$$V = 4,11 \cdot \sqrt[3]{\rho} \cdot \sqrt{D_p} + 23,4 \cdot \sqrt{\rho} \quad (5)$$

Para materiais cujos valores de ρ e D_p sejam difíceis de obter ou não estejam disponíveis, recomenda-se utilizar as velocidades da Tabela 3. Sempre que possível, é mais económico usar velocidades menores e concentrações mais elevadas de sólidos durante o transporte.

Material	Velocidade (m/s)
Algodão	22,9
Areia	35,6
Areia de jacto	20,3
Borracha em pó	22,9
Café em grãos	17,8
Calcário moído	25,4
Carvão fino	20,3
Cereais em grãos	28,4
Cimento	35,6
Cortiça	15,2
Lã	20,3
Papel	25,4
Poeiras metálicas	9,1
Pó de chumbo	22,4
Pós de fundição	22,9
Raspas de metal	25,4
Serragem seca	15,2
Trigo	29,5

Tabela 3 – Materiais e velocidades de transporte recomendadas. Fonte: Gomide

4.4. Diâmetro do transportador

Durante o transporte pneumático de sólidos deve-se observar a a capacidade recomendada por unidade de área (c) em função da velocidade de transporte V . este valor pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$c = 0,14 \cdot V^{1,95} \left[\frac{t}{h} \cdot m^2 \right] \quad (6)$$

A partir deste valor e da capacidade C (t/h) especificada calcula-se a secção transversal da conduta, em m^2 :

$$S = \frac{C}{c} \quad (7)$$

O diâmetro em metros será:

$$D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \quad (8)$$

Substituindo S e c das equações e convertendo as unidades resulta, resulta, para D em mm:

$$D = 3016 \frac{\sqrt{C}}{V^{0,98}} \quad (9)$$

4.5. Vazão do sólido

A vazão, em m³/h, pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$Q = \frac{VD^2}{1,27 \cdot 10^6} \quad (10)$$

4.6. Concentração do sólido

Para ar a 20°C e 1 atm pode-se calcular X pela seguinte expressão:

$$X = \frac{C}{4,29Q} \quad (11)$$

Se esta relação resultar maior do que 15, deve-se admitir um diâmetro maior.

4.7. Perda de carga

A perda de carga por atrito, por unidade de comprimento, $\Delta P/L$ (mm CA/m), para escoamento de ar numa conduta de diâmetro D (mm) à velocidade V (m/s) pode ser calculada por meio da seguinte equação empírica obtida a partir de uma figura preparada por Wrigt:

$$\frac{\Delta P}{L} = 6,52 \frac{V^{1,8}}{D^{1,11}} \quad (12)$$

Uma vez que as condutas utilizadas nos transportadores pneumáticos são mais lisas e têm menos juntas em relação aos utilizados para o aquecimento e ventilação, pode-se multiplicar esta perda de carga por 0,9:

$$\frac{\Delta P}{L} = 5,87 \frac{V^{1,8}}{D^{1,11}} \quad (13)$$

Havendo sólidos em suspensão, a perda de carga será maior. Para os trechos horizontais deve-se multiplicar o resultado acima por um factor F dado pela expressão:

$$F = \frac{X}{K} + 1 \quad (14)$$

Onde K depende da velocidade e, em menor escala, do tamanho e forma da partícula. O trabalho original recomenda adoptar K=3,5 para todas as velocidades normalmente utilizadas em transporte pneumático. Combinado com a anterior, resulta:

$$\frac{\Delta P}{L} = 1,68(X + 3,5) \frac{V^{1,8}}{D^{1,11}} \left[\frac{mm \cdot CA}{m} \right] \quad (15)$$

Para os trechos verticais a perda de carga poderá ser adoptada como o dobro da perda para um trecho horizontal de mesmo comprimento e com a mesma concentração de sólidos. Isto inclui a re-aceleração até a velocidade normal no trecho horizontal a jusante. Para efeito de cálculo pode-se utilizar a equação anterior, porém o comprimento dos trechos verticais devera ser multiplicado por dois.

D (mm)	L _e = comprimento equivalente (m)	
	R = 2D	R = 3D
50	1,4	1,4
100	2,6	2,6
125	3,6	3,0
150	4,4	3,6
175	5,4	4,4
200	6,2	5,0
250	8,6	6,6
300	10,4	8,6
400	14,0	12,0

Tabela 4 – Comprimento equivalente para curvas. Fonte: Gomide

R = Raio de curvatura médio da curva

D = Diâmetro da conduta

A perda de carga total por atrito deverá ser calculada com o comprimento total L_t, que é a soma dos comprimentos dos trechos horizontais L_h, o dobro do comprimento dos trechos verticais L_v e mais o comprimento equivalente às curvas e conexões L_e:

$$L_t = L_h + 2 \cdot L_v + L_e \quad (16)$$

Alguns valores são apresentados na Tabela 5, juntamente com perdas típicas em equipamentos de colecta do sólido transportado. Seguindo a prática recomendada, os valores já foram multiplicados por dois por se tratar de ar com sólidos em suspensão.

Equipamentos de colecta	Perdas (mm CA)	
	Mínimo	Máximo
Câmara gravitacional	30	40
Ciclone comum	30	60
Ciclone de alta eficiência	70	150
Câmaras de impactação	40	100
Filtros de tecido	80	150

Tabela 5 – Perda de carga para diferentes elementos de colecta. Fonte: Gomide

A perda de carga por aceleração do material nos trechos horizontais terá que ser computada sempre que a alimentação seja feita após o ventilador. Se for nas imediações da boca de aspiração do ventilador, será menor que o valor medido experimentalmente por Gaterstadt e que pode ser representado pela expressão:

$$\Delta P_a = 2,25XP_v \quad (17)$$

$$P_v = \text{pressão de velocidade} = \left(\frac{V}{4,043}\right)^2 \text{ mm CA, para ar ambiente.} \quad (18)$$

Uma vez que esta perda não existe se o sólido for alimentado após o ventilador, convém multiplicar este valor por um factor de redução (ϕ), que será igual a 1,0 se o sólido for alimentado depois do ventilador, e menor do que 1,0, se o material passar pelo ventilador. Se a alimentação for feita nas imediações da boca de aspiração, usa-se $\phi = 0$. O trabalho original recomenda, como regra prática, utilizar $\phi = 0,5$ se o ponto de alimentação estiver localizado um pouco a montante da boca de aspiração. A perda de carga total é a soma de todas as perdas por atrito, por aceleração e nos demais equipamentos do sistema (silos, camaras de poeira, ciclones, filtros, venturi, entradas e saída de ar). Fazendo todos os cálculos e multiplicando por 10^{-4} para obter o resultado em kg/cm^2 , resulta finalmente:

$$\Delta P = \left[1,68L_t(X + 3,5) \frac{V^{1,8}}{D^{1,11}} + 0,138\phi XV^2 + \Delta P_e \right] 10^{-4} \quad (19)$$

4.8. Potência absorvida pelo compressor

A potência necessária para realizar o transporte quando o exaustor aspira no final do transportador ou sopra através de um sistema alimentado com venturi ou alimentador helicoidal é apresentada na expressão 20. Se o sólido passar pelo ventilador, terá que haver um acréscimo devido a aceleração das partículas causada pelas paletas do ventilador. Este aumento poderá chegar a 25%. O valor obtido deverá ser dividido pelo rendimento do ventilador seleccionado.

$$P_{comp} = \frac{99 \cdot Q \cdot \Delta P}{\eta} [kW] \quad (20)$$

4.9. Potência necessária no motor eléctrico

Por motivos de segurança, a potência do motor deve ser superior à potência absorvida pelas máquinas nas seguintes proporções: até 25 HP +20%, de 25 a 75 HP +15% e acima de 75 HP + 10%

$$P_{motor} = n \cdot P_{comp} [kW] \quad (21)$$

Onde n é a margem de segurança.

CAPÍTULO 5 – APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.

5.1. Caracterização do Produto

O quadro seguinte foi obtido por ensaios realizados com o pó recolhido no sistema, dos quais resultaram os dados apresentados na Tabela 6. A tabela apresentada representa o resumo de variáveis que se deve ter em conta durante o dimensionamento do sistema pneumático.



Figura 18. Produto a transporte. Fonte: Autor

Caracterização do produto	
Nome do produto	Pó do trigo bruto
Massa específica das partículas	283 kg/m ³
Diâmetro da partícula	0,3 mm

Tabela 6 – Características do produto. Fonte: Autor

Para a definição do modo de transporte pneumático usamos o diagrama de Geldart, como podemos ver na Figura 18.

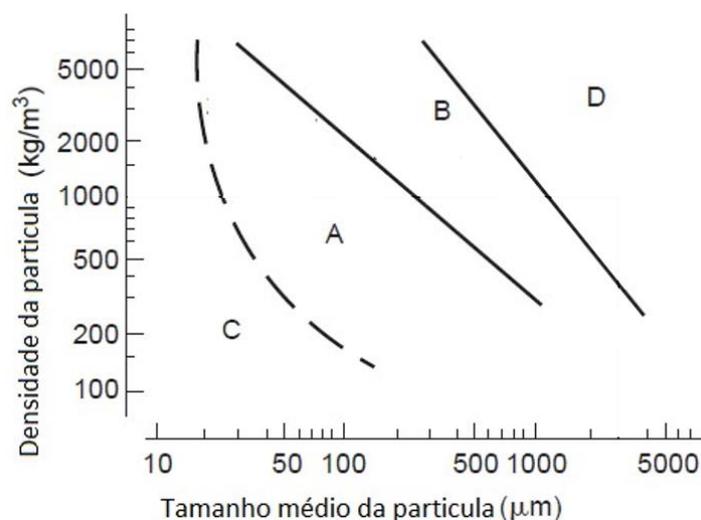


Figura 19 – diagrama de Geldart

Sendo que a massa específica do produto a transportar é de 283 Kg/m^3 e o diâmetro médio, é de $0,3 \text{ mm}$, como sendo a granulometria máxima encontrada, obtemos uma correspondência na zona C onde o transporte em fase diluída é o indicado.

5.2. Caracterização da instalação

Caracterização da instalação	
Capacidade da instalação (t/h)	5,1
Comprimento das condutas horizontais (m)	144
Comprimento das condutas verticais (m)	30
Número de curvas	11
Ciclone comum	1
Válvula rotativa	1
Compressor tipo lóbulo rotativo	1

Tabela 7 – características da instalação. Fonte: autor.

5.3. Variante 1

Nesta variante, será feito o dimensionamento do sistema de transporte pneumático considerando a possibilidade da substituição do actual sistema.

5.3.1. Velocidade de transporte

Para a obtenção deste parâmetro, retomamos a equação (5)

$$V = 4,11 \cdot \sqrt[3]{0,283} \cdot \sqrt{0,3} + 23,4 \cdot \sqrt{0,283} = 13,93 \frac{m}{s}$$

De acordo com a Tabela1, a velocidade mínima admissível para transporte pneumático em fase diluída é de 17 m/s, que é maior que a velocidade mínima para transporte deste material.

5.3.2. Diâmetro da conduta

$$D = 3016 \frac{\sqrt{5}}{17^{0,98}} = 429 \text{ mm}$$

Escolhe-se o diâmetro normalizado $D = 400 \text{ mm}$

5.3.3. Caudal do sistema

$$Q = \frac{17 \cdot 0,4^2}{1,27 \cdot 10^6} = 2,13 \frac{m^3}{s}$$

5.3.4. Relação sólido / ar

$$X = \frac{5}{4,29 \cdot 2,13} = 0,56 \frac{kg_s}{kgar}$$

Este valor é menor que 15, significa que a relação sólido/ar está dentro dos valores recomendado, mas em contrapartida, será necessário um compressor com capacidade de fornecer grande caudal de ar.

5.3.5. Comprimento total da instalação

A instalação possui as seguintes características:

- $L_h = 144 \text{ m}$
- $L_v = 30 \text{ m}$
- $L_e = 14,0 \text{ m}$, para curva com $D = 400 \text{ mm}$.

O comprimento total da instalação é obtido da equação 16:

$$L_t = 144 + 2 \cdot 30 + 15 \cdot 14 = 414 \text{ m}$$

5.3.6. Perda de carga

No cálculo da perda de carga deve ser computada a perda referente ao equipamento de colecta, a instalação possui um ciclone comum, este equipamento possui uma perda compreendida no intervalo de 30 a 60 mm CA, para efeitos de cálculo será usado $\Delta Pe = 45 \text{ mm CA}$. Substituindo na equação (19)

$$\Delta P = \left[1,68 \cdot 414 \cdot (0,6 + 3,5) \frac{13,93^{1,8}}{0,4^{1,11}} + 0,138 \cdot 0,5 \cdot 0,6 \cdot 13,93^2 + 45 \right] \cdot 10^{-4}$$

$$\Delta P = 0,05 \text{ kg/cm}^2$$

5.3.7. Potência necessária

Neste tipo de instalações são usados sopradores de deslocamento positivo do tipo lóbulo, que apresentam um rendimento de 65%, a potência necessária, em kW, é calculada pela equação 21:

$$P = \frac{118 \cdot 2,13 \cdot 0,05}{0,65} = 16,2 \text{ kW} = 21,6 \text{ HP}$$

5.3.8. Potência necessária no motor eléctrico

A potência consumida pelo compressor está abaixo de 25 HP, para obter-se a potência do motor eléctrico deve considerar-se uma margem de segurança de 15%

$$P_{motor} = 1,2 \cdot 16,2 = 19,5 \text{ kW} = 26 \text{ HP}$$

As equações mostradas na descrição da metodologia usada mostram que o aumento da velocidade, reduz a relação solido/ar, a redução desta relação implica o uso de grandes caudais de ar para o transporte de pequenas quantidades de sólido, aumenta a perda de carga e consequentemente a potência consumida pelo sistema. Por outro lado, o aumento do diâmetro da tubulação reduz a relação solido/ar, aumenta o consumo de ar e consequentemente a potência consumida pelo sistema.

A equação (19) mostra que para termos um sistema económico em termos construtivos e energéticos, deve-se usar a velocidade mínima admissível e grandes relações solido/ar para o transporte do material. A Tabela 10, mostra os valores assumidos pelos parâmetros do sistema para diferentes valores de diâmetro da tubulação e velocidade de transporte (V_t) igual a 17 m/s.

D (mm)	X (kg_s/kg_{ar})	ΔP_t (kg/cm²)	P (kW)	Q (m³/min)	Q_s (m³/min)	Q_{ar} (m³/min)
400	0,56	0,05	16,2	128,178	0,3	127,88
300	0,99	0,06	10,9	72,102	0,3	71,8
250	1,42	0,07	8,8	50,07	0,3	49,77
200	2,22	0,09	7,2	32,046	0,3	31,75
175	2,9	0,11	6,83	24,534	0,3	24,23
150	3,95	0,15	6,84	18,024	0,3	17,72
125	5,69	0,21	6,65	12,516	0,3	12,22
<u>100</u>	<u>8,89</u>	<u>0,33</u>	<u>6,69</u>	<u>8,01</u>	<u>0,3</u>	<u>7,71</u>
50	35,52	2,13	10,8	2,004	0,3	1,7

Tabela 8 – Resultados obtidos para diferentes valores do diâmetro do ducto para velocidade igual a 17 m/s. Fonte: autor

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1. Conclusões

Terminado projecto de dimensionamento do transportador pneumático para o transporte de resíduos sólidos do trigo bruto e com base nos objectivos traçados, conclui-se que:

- O mau funcionamento do sistema não esta associada ao mau dimensionamento do compressor, mas devido a problemas mecânicos ou a variação da humidade do material.
- O compressor instalado possui potência e caudal de ar suficientes para transportar o material em fase diluída sem que ocorra a obstrução da conduta.

6.2. Recomendações

- O departamento de manutenção deve ter um guia prático para os transportadores pneumáticos, no decorrer do projecto foi evidente a falta de um documento guia fidedigno de cálculo para um caso prático de transporte pneumático em fase diluída, onde o departamento de manutenção obtivesse uma base para este tipo de cálculo, e assim de uma forma bastante prática pudesse efectuar melhorias e correcções nos sistemas instalados.
- A humidade do ar pode causar o surgimento de fungos nas tubulações, que por sua vez, podem causar o a acumulação de pós em sistemas, capazes de aumentar a granulação do produto transportado, causando o entupimento das condutas. Para eliminar este problema, recomenda-se a instalação de equipamentos para a desumidificação do ar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **BORTOLAIA, L. A., ANDRIGHETTO, P. L. e BENATTI, M.** *Avaliação técnica de um transportador pneumático de grãos por aspiração*. Santa Maria : Ciência Rural, 2008.
2. **DICKNOW, S. R.** *Dimensionamento de transportador pneumático para resíduos de cereais*. 66 f. Monografia (Graduação) – Curso do Engenharia Mecânica, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. Panambi : s.n., 2013.
3. **DYNAMIC_AIR.** *Sistemas e componentes para transportes pneumáticos*. São Paulo : s.n., 2010.
4. **GELDART, D.** *Types of Gas Fluidization. Powder Technology*. 1973.
5. **GOMIDE, R.** *Operações unitárias: Operações com sistemas sólidos granulares. 1. ed.* s.l. : São Paulo, 1983.
6. **KLINZING, G. E., MARCUS, R. D., RIZK, F, LEUNG, L. S.** *Pneumatic conveying of solids*. New York : Chapman & Hall, 1990.
7. **Littm, Lirag. R.C. e H.** *Statistical Study of Pressure Fluctuation in a Fluid Bed*. 2000.
8. **Meissner, H.P. e H.S. M ickley.** *Eng. Chem.* New York : s.n., 2012.
9. **MILLS, D.** *Pneumatic Conveying Design Guide. 2 ed.* Amsterdam : Elsevier Butterworth Heinemann, 2004.
10. **SILVA, D. R.** *Transporte Pneumático: Tecnologia, projectos e aplicações na indústria e nos serviços*. Artliber Ltda : São Paulo, 2005.
11. **WYPYCH, W.P. in: YANG, W. C.** *Fluidization, Solids Handling, and Processing*. Pittsburgh : William Andrew, 1998.
12. **Omel.** *Soprador SRT*. Brasil : s.n., 2004.

ANEXOS

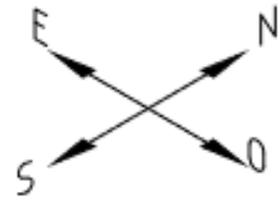
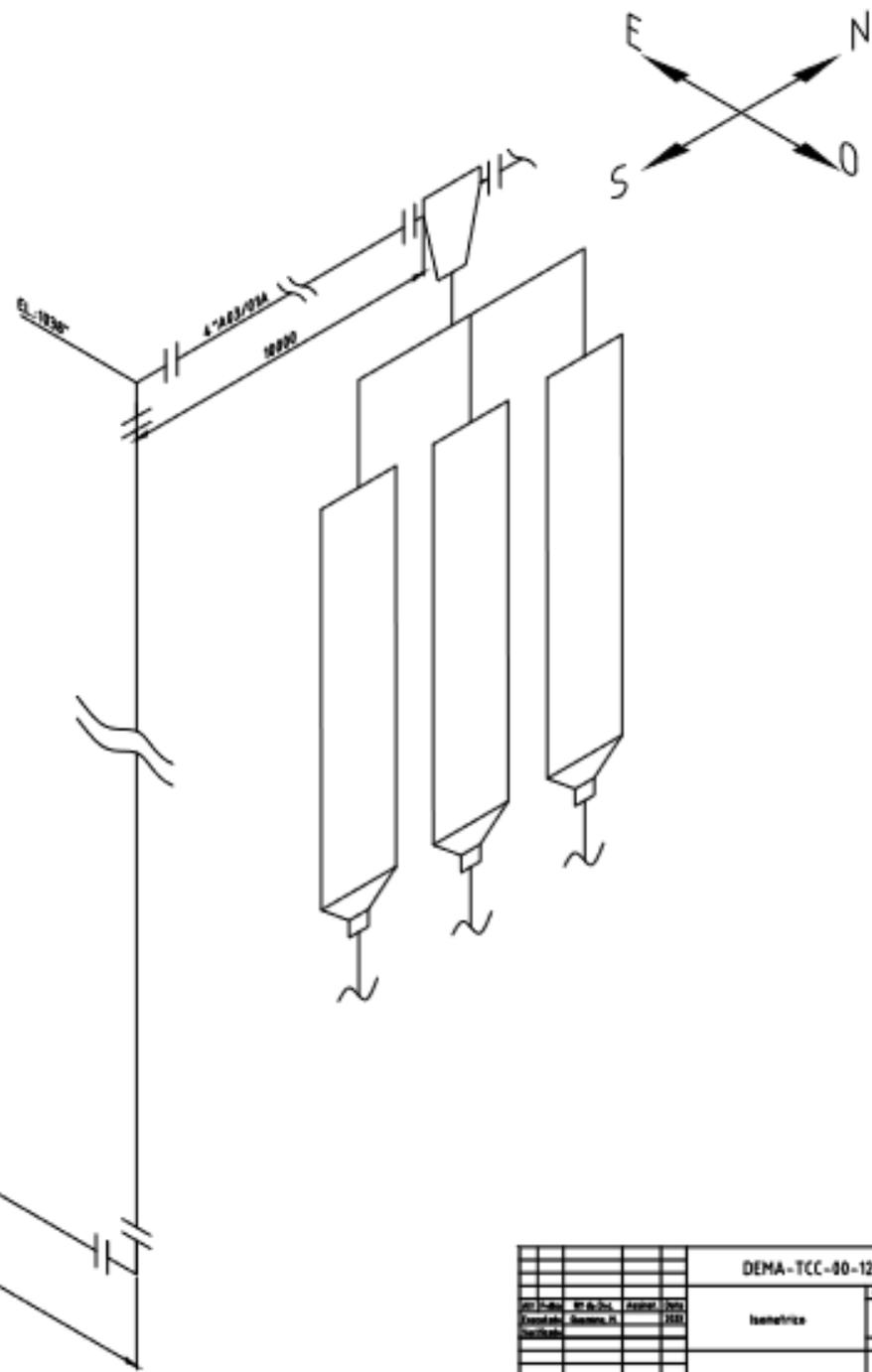
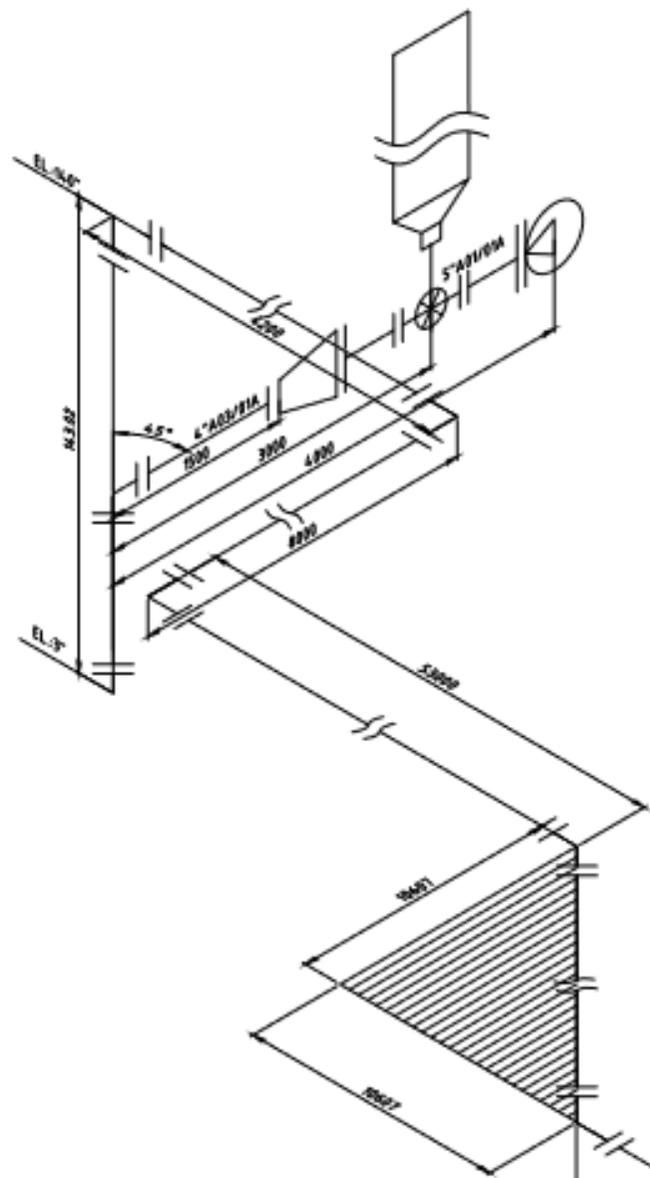
Anexo 1

Ordem	Grandeza	Símbolo	Formula	Valor	Unidade
1	Massa específica do produto a transportar	ρ_p		283	kg/m ³
2	Massa específica do produto a transportar	ρ_p		0,283	t/m ³
3	Diâmetro das partículas	D_p		0,3	mm
4	Velocidade de transporte	V_t		13,93	m/s
4	Velocidade de transporte (seleccionada)	V_t		17	m/s
5	Capacidade recomendada por unidade de área	c		35,12	t/hm ²
6	Vazão da válvula rotativa	Q_{VR}		18	m ³ /h
7	Vazão da válvula rotativa	Q_{VR}		0,3	m ³ /min
7	Vazão da válvula rotativa	Q_{VR}		0,005	m ³ /s
7	Capacidade do sistema	C		5,09	t/h
8	Capacidade do sistema	C		1,41	kg/s
9	Diâmetro interno da tubagem	D		429,77	mm
10	Diâmetro normalizado	D		100	mm
11	Diâmetro normalizado	D		0,1	m
12	Comprimento total dos trocos horizontais	L_h		144	m
13	Comprimento total dos trocos verticais	L_v		30	m
14	Número de curvas (90o Raio longo)	n		15	
15	Comprimento equivalente para curva	L_{ec}		2,6	m
16	Comprimento equivalente para curvas	L_{ecs}		39	m
17	Comprimento total	L_t		243	m
18	Vazão	Q		0,1335	m ³ /s
19	Fracção em peso de solido transportado	X		8,89	kgs/kgar
20	Vazão dos sólidos	Q_s		0,005	m ³ /s
21	Vazão do ar	Q_{ar}		0,1285	m ³ /s
22	Vazão do ar	Q_{ar}		7,71	m ³ /min
22	Ciclone de alta eficiência	ΔP_e		150	mm CA
23		ΔP_e		0	mm CA
24		ΔP_e		0	mm CA
25		ΔP_e		0	mm CA
26	Perda de carga nos equipamentos	$\Sigma \Delta P_e$		150	mm CA
27	Local de admissão do produto			Antes do Compressor	
28	Factor de redução	ϕ		0,5	
29	Perda de carga total	ΔP_t		0,33	kg/cm²

Tabela A 1 – Folha de cálculo Excel para auxílio do cálculo da potência necessária (Continua)

30	Perda de carga total	ΔP_t	3300 mm CA
31	Tipo de sistema	Indirecto	1 m
32	Tipo de soprador		Compressor tipo lóbulo
33	Rendimento do compressor	η	0,65
34	Potência necessária do sistema	P	6,69 kW
35	Potência necessária do sistema	P	8,92 HP
36	Potencia consumida pelo motor eléctrico		8,03 kW
37	Potencia Consumida pelo motor eléctrico		10,7 HP

Continuação da tabela A1



DEMA-TCC-80-12-23-0001			
Proj. (AutoCAD)	Rev. (01)	Assunto (TCC)	Data (2001)
Execução (Sistema II)			
Escala (1:100)			
Título (TCC)			1/100
LUGAR DE MECÂNICA			