

**SOCIEDADE UNIVERSITARIA REDENTOR
FACULDADE REDENTOR
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

DOUGLAS AGUIAR COSTA

**PROJETO DE DIMENSIONAMENTO DE TRANSPORTE
PNEUMÁTICO DE CALCÁRIO**

Itaperuna

2011



DOUGLAS AGUIAR COSTA

**PROJETO DE DIMENSIONAMENTO DE TRANSPORTE
PNEUMÁTICO DE CALCÁRIO**

Trabalho apresentado ao Curso de Graduação
em Engenharia Mecânica da Faculdade
Redentor como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Mecânica

Orientador: Sérgio Souza Dias

Itaperuna

Sociedade Universitária Redentor

BIBLIOTECA

Reg. 141/ 000000439

Data: 17/05/11

Nº de Chamada: _____

**PROJETO DE DIMENSIONAMENTO DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO DE
CALCÁRIO**

Douglas Aguiar Costa

Aprovada em 1º / 04 / 2011.

BANCA EXAMINADORA

Glênio F. Daniel (Coordenador)
Engenheiro Mecânico
Escola Naval / UFRJ

Sérgio Souza Dias (Orientador)
Engenheiro Mecânico, Civil e Metalúrgico
UFF- Universidade Federal Fluminense

Everton de Lima Viana Junior
Engenheiro Mecânico
SUR – Sociedade Universitária Redentor

Pedro Orro da Costa
Engenheiro Mecânico
SUR – Sociedade Universitária Redentor

DEDICATÓRIA

A Deus, que se fez sempre presente e tornou tudo possível

À minha família, em especial meus pais Namir e Ana, que sempre me apoiaram e confiaram na minha realização.

Aos eternos amigos que lutaram comigo por anos, em busca de um bem em comum, Everton, Ivan, Pedro e outros que ajudaram a fazer desses tempos, inesquecíveis.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Sérgio Souza Dias, pela cooperação e ajuda na concretização do trabalho.

Ao orientador Glênio Daniel pela paciência compreensão durante resolução do projeto.

À Calpar Mineração Ltda que cedeu a oportunidade de estágio que e me motivou sobre o tema transporte pneumático.

Ao meu pai que se fez sempre prestativo quando necessário.

Ao amigo engenheiro Everton de Lima Junior, que ajudou prestou assessoria técnica.

RESUMO

O transporte de partículas por uma corrente gasosa é comumente denominado de transporte pneumático, e tem sido freqüentemente utilizado em diversos processos. Essa condição não se dá somente à diversidade de materiais que é produzida e manipulada na forma de partículas, como também ao grande numero de possíveis aplicações desta operação. Seu baixo custo de aquisição, operação e manutenção em relação a outros tipos de transporte de partículas, torna seu uso bem difundido. A velocidade superficial do gás, o diâmetro da partícula e da tubulação, o tipo e a forma da partícula influenciam o transporte pneumático. Como consequência desta complexidade, estes sistemas são baseados em correlações empíricas obtidas por meio de estudos experimentais para cada sólido. Este trabalho tem como objetivo projetar e dimensionar um sistema de transporte pneumático de uma fábrica de calcário, assegurando eficiência no funcionamento do mesmo. A idéia e o sistema foram baseados nas necessidades de uma planta de produção de calcário, na cidade de Italva no estado do Rio de Janeiro, valorizando assim o projeto, pois apresenta soluções para situações reais. Trabalhando com todos os fatores que influenciam no bom funcionamento do sistema, levará em conta o tipo de material, volume de ar necessário, comprimento da tubulação, velocidade de escoamento e outros parâmetros.

ABSTRACT

The transport of particles for a gaseous current is denominated commonly of pneumatic conveying, and it has frequently been used in several processes. This condition happens because of the diversity of materials are produced and manipulated in form of particles, as well to the many possible applications of this operation. The low cost of acquisition, operation and maintenance in relation to other types of transport of particles, turns it very spread use. The superficial speed of the gas, the diameter of the particle and in the piping, the type and the way of the particle influences the pneumatic conveying. As a consequence of this complexity, these systems are based on empiric correlations obtained through experimental studies for

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	13
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONTEXTO	13
1.2 GENERALIDADES	14
1.3 OBJETIVOS	16
1.4 JUSTIFICATIVA	17
1.5 METODOLOGIA DE TRABALHO	18
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
CAPÍTULO II	20
2 ESTUDOS ANTERIORES	20
2.1 TRANSPORTE PNEUMÁTICO	20
2.2 TRANSPORTE PNEUMÁTICO EM FASE Densa, DILUÍDA E REGIMES DE ESCOAMENTO	25
2.3 TRANSPORTE EM FASE DILUÍDA	26
2.4 TRANSPORTE EM FASE Densa	28
CAPÍTULO III	30
3 MÉTODOS E DESENVOLVIMENTO	30
3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO PROJETO	30
3.2 METODOLOGIA TÉCNICA	31
3.3 ANÁLISE DOS DADOS E ENTRADA DO SISTEMA	33
3.4 DETERMINAÇÃO DAS PRESSÕES DE FUNCIONAMENTO	33
3.5 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE ESCOAMENTO	33
3.6 DETERMINAÇÃO DA VAZÃO MÁSSICA DE AR (m_a)	34
3.7 DETERMINAÇÃO DA PROPORÇÃO AR/MATERIAL (Φ)	34
3.8 DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA REQUERIDA (P)	35
3.9 CÁLCULO DA PERDA DE CARGA NO SISTEMA (Δp_a)	36
3.10 ESPECIFICAÇÃO DOS COMPONENTES DA REDE	39
CAPÍTULO IV	44
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

LISTA DE ABREVIATURAS

mp = Vazão mássica de sólidos

L = Comprimento da tubulação

d = Diâmetro da tubulação

Δp = Diferencial de pressão na rede

C_{min} = Velocidade mínima de escoamento

C_1 = Velocidade de escoamento

ma = vazão mássica de ar

Φ = Proporção ar/material

Δpa = Perda de carga do sistema

P = Potência requerida

V_0 = Fluxo volumétrico de ar

f = Fator de atrito

Leq = Comprimento equivalente da tubulação

Σk = Somatório dos fatores de curva

Re = Número de Reynolds

μ = Viscosidade

π = Constante algébrica

k = Fator de cálculo de curvas

Ψ = Fator da perda de carga

p_1 = pressão efetiva do compressor (2 bar)

p_2 = pressão relativa na rede (1,6 bar)

p_3 = pressão absoluta na rede (2,6 bar)

p_4 = pressão de saída da rede (atmosférica = 1 bar)

FORMULÁRIO

(Obs: Todas as fórmulas contidas nesse formulário foram retiradas da fonte:
Pneumatic Conveying Design Guide – David Mills, 2005)

$C_1 = 1,2 \times C_{min}$ - Fórmula para obtenção da velocidade de escoamento

$ma = \frac{2,74 \times p_2 \times C_1 \times d^2}{T_1}$ - Fórmula para obtenção da vazão mássica de ar

$\Phi = \frac{mp}{3,6 \times ma}$ - Fórmula para obtenção da proporção ar/material

$V_0 = \frac{2,23 \times d^2 \times p_2 \times C_1}{T_1}$ - Fórmula para obtenção do fluxo volumétrico de ar

$P = 203 \times V_0 \times \ln \left[\frac{p_4}{p_3} \right]$ - Fórmula para obtenção da potência requerida

$\Delta pa = \left[\left(1,0 + \frac{1,34 \times \Psi \times ma^2}{d^4 \times 10^5} \right)^{0,5} - 1,0 \right]$ - Fórmula para obtenção da perda de carga no sistema

$\Psi = \frac{(4fLeq)}{d} + \sum k$ - Fórmula para obtenção do fator de perda de carga

$Re = \frac{4ma}{d\mu\pi}$ - Fórmula para obtenção do número de Reynolds

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Sistema de transporte pneumático para silos de armazenamento (Fonte: Airetron, 2011).....	14
Figura 2: Capacidade de transporte em função da distância (Fonte: Union Carbide Corporation, 1983).....	21
Figura 3: Regimes de escoamento em tubulação vertical (Fonte: WEN, 1959).....	26
Figura 4: Sistema em fase diluída (Fonte: Dynamica Air - Conveying Systems, 2005).	27
Figura 5: Sistema de fase densa (Fonte: Dynamic Air - Conveying Systems, 2005).	29
Figura 6: Funcionamento de um compressor de palhetas (Fonte: Neto, Augusto J. Leda, 2009).....	30
Figura 7: Vista interna de um transportador pneumático tipo B (Fonte: FK Bomb Port-FLSmith, 2009).....	31
Figura 8: Fluxograma para cálculo para dimensionamento de sistema de transporte pneumático (Fonte: Mills, 2004).	32
Figura 9: Gráfico de determinação da viscosidade do ar através da temperatura (Fonte: Mills, 2004).....	37
Figura 10: Valores típicos de aspereza de tubos (Fonte: Mills, 2004)	38
Figura 11: Gráfico para a determinação do fator de atrito f (Fonte: Mills, 2004).....	38
Figura 12: Gráfico de indicação do fator K (Fonte: Mills, 2004).	38
Figura 13: Dados do catalogo do fabricante de compressores (Fonte: Soma, 2011)	40
Figura 14: Compressor de palhetas (Fonte: Premaq, 2010)	40
Figura 15: Catálogo da fabricante de motores elétricos (Fonte: WEG, 2011)	40
Figura 16: Ilustração de transportador pneumático (Fonte: FLSmith, 2009)	41
Figura 17: Tubos Schedule de 8" (Fonte: Multiduto, 2011)	42
Figura 18: Planta esquemática do projeto. 1 - Conjunto motor e compressor; 2 - Conjunto motor e transportador pneumático com moega de alimentação; 3 - tubulação; 4 - Silos de armazenamento.	43

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Exemplos de aplicações do transporte pneumático (Fonte: Rhodes, 2004).	23
Tabela 2: Características dos sistemas de transporte pneumático em fase densa e diluída (Fonte: Dow Química, 2000).	25
Tabela 3: Principais característica e aplicações de sistemas em fase diluída (Fonte: Gluck, 1968 e Frank, 1975).	28

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

O transporte de materiais é um processo presente em praticamente todas as plantas industriais que se tem conhecimento, pois é bastante comum a necessidade de se conduzir matérias primas para a manufatura, entre outros processos. A seleção do tipo de transporte a ser utilizado em determinada planta industrial varia em decorrência de vários fatores como o material a ser transportado, a distância a ser percorrida, o espaço disponível para os equipamentos, as condições de operação, o grau de investimentos, entre outros. Dentre os diversos tipos de transporte disponíveis, podem ser citados o transporte por correias transportadoras, por trilhos e carrinhos, por transportadores helicoidais, por veículos e também por transporte pneumático.

O transporte pneumático se faz uma alternativa simples para situações em que o material a ser transportado se apresenta na forma de partículas pequenas e a distância não é muito longa. É um sistema de simples operação e manutenção, pois através de uma corrente de gás (geralmente ar) constante, a determinadas vazão e pressão, conduz o material pelo interior de uma tubulação até o ponto desejado. De forma limpa e sem contaminação, esse processo se revela muito aplicável em diversos casos e ecologicamente correto.



Figura 1: Sistema de transporte pneumático para silos de armazenamento (Fonte: Airetron, 2011)

1.2 GENERALIDADES

O transporte de partículas através de uma corrente de fluido, mais especificamente um gás, tem sido usado com muita frequência em diversos processos de transporte industrial. Isto se deve à grande variedade de materiais que é produzida ou manipulada na forma particulada, a exemplo de grãos agrícolas (trigo, arroz, etc.), produtos alimentícios (açúcar, café, etc.), combustíveis sólidos (carvão, biomassa, etc.) e produtos farmacêuticos. Esta operação de carregamento de sólidos granulados por um gás em movimento é comumente denominada de transporte pneumático.

O campo das aplicações do transporte pneumático é bastante vasto, se estendendo por uma ampla variedade de setores industriais, tais como:

- **Petroquímico:** O sistema de transporte pneumático é utilizado na perfuração de poços e craqueamento catalítico do petróleo (Pratt, 1974, Yerushalmi & Cankurt, 1978). Muitas indústrias de química fina fazem uso do transporte pneumático em alguma etapa do seu processo produtivo.
- **Carvão:** O transporte de carvão a longas distâncias é comumente realizado por via pneumática.

- Energia: Nas indústrias de processamento de carvão para produção energética, o minério é gaseificado e queimado em leito de transporte pneumático. O mesmo processo de geração de energia é usado quando a fonte energética é a biomassa (Nack et al, 1976).
- Alimentos: No setor alimentício, as indústrias que utilizam material granulado no processo, aplicam o transporte pneumático para transferir sólidos entre equipamentos ou a partir de algum equipamento para o silo de armazenamento.
- Agricultura: No processamento e armazenamento de cereais, o transporte pneumático pode ser usado para secagem do material e posterior transferência para um silo de armazenamento.

Os processos químicos e petroquímicos têm como finalidade transformar as matérias-primas em produtos comercializados. As etapas envolvidas durante este processamento consistem em uma série de operações unitárias que, em muitos casos, requerem o transporte de materiais particulados. Um dos métodos de deslocamento mais empregado atualmente é o transporte pneumático, que movimenta uma variedade de sólidos particulados, em geral de 0,1 mm até 10 mm com propriedades físicas e químicas diferentes (tamanho, forma, densidade, índice de fluidez, temperatura de ebulição e fusão). Tem como princípio conduzir os produtos dentro de uma tubulação na posição vertical, horizontal e inclinada, através de uma corrente de gás gerada por um ventilador ou soprador ou compressor pela diferença de pressão. Em muitos casos, o fluido empregado normalmente é o ar atmosférico, em função do preço, da facilidade de manipulação e da não toxicidade. Porém em condições especiais, com risco de explosão, com perigo de fogo e possíveis danos a saúde são utilizados gases diferentes, como o nitrogênio (MARCUS *et al*, 1990).

Os materiais granulares e pulverizados mais comumente transportados por unidades pneumáticas são alimentícios como o milho, o arroz, o feijão, a aveia e o trigo; farmacêuticos como a penicilina e a eritromicina; polímeros como o polietileno, o polipropileno, o poliestireno e o polivinil e sólidos diversos como as serragens, o

algodão, o papel, o carvão, o negro de fumo, o coque, o cimento e a areia (LI e TOMITA, 2000).

O transporte pneumático caracteriza-se por ser um sistema eficaz e limpo, com pouca contaminação do meio ambiente e produto. Pode ser classificado em duas fases distintas: diluída e densa. No transporte em fase diluída, as partículas permanecem totalmente suspensas, caracterizado por uma velocidade do ar em torno de 20 m/s, concentrações de sólidos menores que 1% em volume e perda de carga por unidade de comprimento menor que 50 mmca/m (milímetros de coluna de água por metro). Na fase densa, as partículas preenchem completamente a tubulação, sendo transportadas de forma semelhante à extrusão, utilizando velocidades de ar que variam de 1 a 5 m/s, concentrações de materiais maiores que 30% em volume e perda de carga por unidade de comprimento maior que 200 mmca/m (DYNAMIC AIR, 2005).

As vantagens do transporte em fase diluída, em relação ao transporte em fase densa, são a possibilidade de deslocar materiais a distâncias que podem variar de 20 a 400 metros inclusive com variações de nível, baixo custo de aquisição, operação e manutenção e facilidade de controle e automação (RHODES, 2004 e MOLERUS, 1996).

De forma proposital, a maioria das indústrias que trabalham com sistemas de transporte pneumático mantém a máxima rotação do soprador, superdimensionando-o com desperdício de energia e desgaste dos sólidos e das singularidades, tais como curvas, joelhos e tês (DOW QUÍMICA, 2000).

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral desse trabalho é projetar e dimensionar um sistema de transporte pneumático de calcário em fase diluída. Através de dados referentes ao material em si e às condições de funcionamento, o projeto atenderá as seguintes etapas:

- Definir a velocidade de escoamento;
- Definir as vazões mássicas de ar e material;

- Definir o diferencial de pressão do sistema;
- Estipular o diâmetro recomendado para a tubulação;
- Estipular os equipamentos necessários do sistema;
- Atender as necessidades de produção estipuladas;

O conjunto recebe o calcário diretamente do moinho, e deve conduzi-lo através de tubulações horizontais e verticais, até a entrada do silo de armazenamento, considerando as perdas de carga devido à granulometria do calcário, pelo atrito com o revestimento interno da tubulação e pelos acessórios da tubulação. Devendo atender à uma necessidade de alimentação de 40 ton/h de calcário.

1.4 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento do projeto se deu a partir da necessidade de apresentar um trabalho para a conclusão do curso de graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade Redentor, em Itaperuna Rio de Janeiro.

Tendo como principal motivação, as observações realizadas no período de estágio na fábrica de calcário Calpar Ltda. Na realização do estágio curricular em engenharia mecânica foram vistos alguns processos industriais que não apresentavam a eficácia exigida para uma produção segura e eficiente. Alguns desses processos não atendiam aos padrões de eficiência esperados, devido à obsolescência de alguns métodos e componentes. Dentre esses processos, se destacou o de transporte pneumático do Moinho 3, onde por muitas vezes a produção foi interrompida devido a problemas na rede. Os equipamentos do sistema em funcionamento são antigos e não apresentam grande confiabilidade técnica.

Justifica-se principalmente então, por ser um projeto de viabilidade industrial que atenderá às necessidades reais de uma empresa. Com total embasamento técnico e científico, é possível, através da aplicação do que é proposto no projeto que a empresa em questão não sofra mais dos problemas atuais que ocorrem na sua planta, que ocasionam interrupções e atrasos na produção e conseqüentemente diminuição em seus lucros. O fato de o ramo ser pouco explorado de forma acadêmica também contribuiu como motivação para a realização do trabalho, pois

ao mesmo tempo em que é uma prática industrial comum, é também um tema restrito e muitas vezes desconhecido.

O projeto foi realizado com base em cálculos práticos de engenharia, de maneira a comprovar matematicamente sua eficiência e eficácia e proporcionando embasamento teórico na confecção do mesmo.

1.5 METODOLOGIA DE TRABALHO

A metodologia a ser utilizada foi organizada segundo uma sistemática que seguiu a seguinte ordem:

1 - Pesquisa bibliográfica e embasamento teórico: Nessa etapa bibliotecas foram visitadas, levantados dados sobre sistemas similares em funcionamento, técnicos consultados e etc.

1 - Estruturação técnica do projeto: Nessa etapa os dados colhidos na etapa anterior foram moldados com o intuito de se determinar como seria realizada a parte técnica do projeto.

2 - Realização técnica: Nessa etapa com os devidos caminhos técnicos já estipulados, foram realizados os cálculos que permitiram a concretização do projeto.

3 - Análise de dados obtidos e coletados – Nessa quarta e ultima etapa os dados obtidos no desenvolvimento do projeto foram analisados e comparados com dados da literatura técnica, com o objetivo de viabilizar tecnicamente o projeto.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este projeto é composto por 4 capítulos e seus conteúdos estão dispostos a seguir:

O capítulo 1 apresenta a introdução do tema do projeto, assim como seus objetivos, sua justificativa, sua metodologia de trabalho e dissertação.

Já o capítulo 2 trata de expor brevemente o embasamento teórico utilizado na realização do projeto, citando diversas fontes pesquisadas.

Para o capítulo 3, apresenta-se os cálculos utilizados na confecção do projeto, assim como a sua viabilidade técnica.

No capítulo 4 apresenta-se considerações finais sobre o estudo realizado, as dificuldades encontradas e recomendações de uso.

CAPÍTULO II

2 ESTUDOS ANTERIORES

2.1 TRANSPORTE PNEUMÁTICO

O transporte de materiais na indústria pode ser observado em operações unitárias bem distintas como o transporte de sólidos, líquidos, gases e misturas. O transporte de sólidos é de grande importância em função da sua influência na economia global de muitos processos. Em alguns casos o custo pode atingir cerca de 80 % do custo total da operação (GOMIDE, 1983).

Dentro da indústria química, os sólidos podem ser deslocados por diversas formas, tais como, transporte hidráulico, pneumático, rodoviário, ferroviário e mecânico como por correia, corrente, caçamba, helicóide e por vibração.

De acordo com GOMIDE (1983), as principais variáveis para a seleção e o dimensionamento de equipamentos de transporte são:

- A capacidade de movimentação dos sólidos;
- As distâncias e o desnível entre a carga e a descarga;
- A natureza do material, como as características físicas e mecânicas dos sólidos;
- Os fatores econômicos, como os custos de aquisição, operação e manutenção.

Certos fatores são importantes na especificação de um transportador. As seguintes propriedades do sólido, como: granulometria e forma das partículas, densidades real e aparente, ângulo de repouso dinâmico, fragilidade, umidade, mobilidade, dureza e características de abrasão, aderência e aglutinação, influenciam no comportamento do material transportado.

A seleção do transportador pelo critério econômico de menor custo de aquisição, operação e manutenção deve incluir os periféricos, como os dispositivos de carga, armazenamento, embalagem e descarga final do produto.

A Figura 2 mostra as faixas de aplicações de alguns sistemas de transporte, a qual relaciona dois fatores, a capacidade de produto (t/h) em função da distância transportada (km).

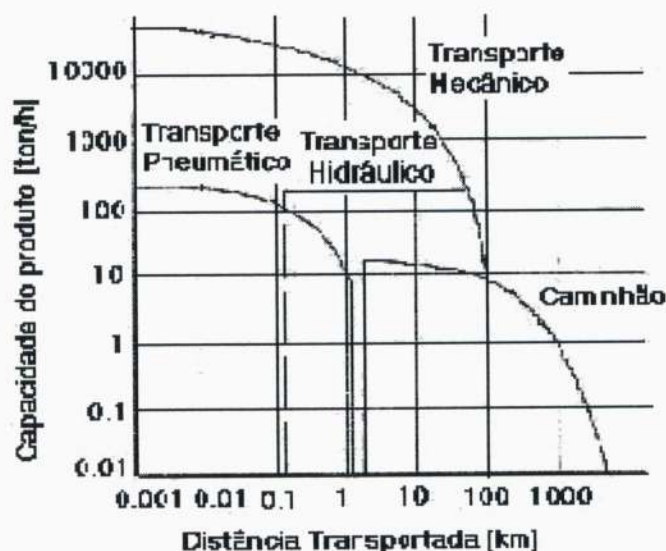


Figura 2: Capacidade de transporte em função da distância (Fonte: Union Carbide Corporation, 1983).

Apesar da Figura 2 não considerar parâmetros importantes como as dimensões dos sólidos, pode-se notar que os transportadores pneumáticos são indicados para capacidades aproximadas de até 300 ton/h para até 1 km de distância a não ser que o sólido não seja adequado para tal sistema.

De acordo com MOLERUS (1996) o primeiro sistema de transporte pneumático documentado (1847) foi o da planta da Peugeot localizada na cidade de Valentigney – França na exaustão de poeiras de moedores de pedras. O segundo sistema reportado foi a patente nomeada Cramptom's, "Melhorias na moagem, preparação e queima de carvão" (1868).

MOLERUS (1996) relata também que o transporte pneumático é utilizado para deslocar uma vasta variedade de materiais particulados (cerca de 300 produtos

diferentes) devido à sua versatilidade e flexibilidade, uma vez que o sólido pode ser direcionado para mais de um ponto na indústria.

O transporte pneumático, segundo RIBEIRO (2005), é um dispositivo de grande emprego na movimentação e elevação de uma variedade de materiais sólidos em um fluxo de gás, através de tubulações horizontais e verticais fechadas nas indústrias químicas, alimentícias, metalúrgicas e petroquímicas. O fluido normalmente usado é ar atmosférico, porém, em casos de risco de explosão, a saúde humana e até mesmo perigo de fogo empregam-se gases inertes, como o nitrogênio.

MARCUS *et al* (1990) relataram que o transporte pneumático pode ser aplicado nos sistemas de despoeiramento, descarga de filtros de manga ("big-bag"), transporte de pó ou de produtos a granel como: açúcar, alumina, amendoim, argila em esferas, algodão, barrilha, bauxita, calcita, carbonato de cálcio, caulim, cimento, dolomita, farinha, fertilizantes, finos de carvão, granulados de aço, leite em pó, óxido de ferro, polietileno, grãos de café, PVC, sal, soda, talco, vidro, ácido adípico, entre outros.

Conforme RHODES (2004) este tipo de transporte pode ser usado para partículas que variam de pós finos a grãos, com granulometria acima de 100 μm a 10 mm respectivamente e densidades aparentes de 16 a 3200 kg/m^3 . A Tabela 1 mostra exemplos de vários segmentos que deslocam sólidos por meio pneumático.

Tabela 1 - Exemplos de aplicações do transporte pneumático (Fonte: Rhodes, 2004).

Segmento	Material
Cimenteiras	Pó de clínquer, cimento, escória de alto forno
Fabricantes de abrasivos	Lixa, rebolo e esmeril
Fundição	Areia de fundição
Indústrias alimentícias	Cereais, soja, malte, sementes de girassol, cacau
Indústria de alumínio	Alumina calcinada, bauxita, resíduos de eletrodos
Indústrias de isoladores e mantas sintéticas	Resíduos de produção, serragem, despoeiramento
Indústria química	Cal calcinado, fertilizantes, polímeros em geral
Indústria de vidro	Feldspato, quartzo, caulim, cacos de vidro
Mineração de carvão	Concentrados, rejeitos
Processamento de carvão	Grafites, eletrodos, peças técnicas
Mineração de ferro	Concentrados, rejeitos
Processadores de lixo	Resíduos domésticos e industriais
Siderurgia (altos fornos)	Sinterização, calcário, despoeiramento, escória
Usinas termoeletricas	Despoeiramentos, cinzas

Segundo MARCUS *et al* (1990) as principais vantagens do sistema pneumático são:

- a) Transporta uma variedade de produtos sem liberar poeira;
- b) Possui flexibilidade de instalação – o transporte pode ser vertical ou horizontal pela inserção de um cotovelo, uma curva e outras singularidades;
- c) Permite a distribuição de sólidos e alimentação para diversas áreas da fábrica;
- d) Requer baixa manutenção e baixos custos de trabalho humano;
- e) Pode ser empregada, em função da segurança, para transportar produtos de alto valor;
- f) Utiliza, em geral, ar para a movimentação de materiais;
- g) Comporta múltiplos usos - uma tubulação pode ser usada para uma variedade de produtos;
- h) É de fácil controle e automação;

i) Pode ter altíssima capacidade de movimentação em distâncias de 20 a 400 m, inclusive com variações de nível;

MARCUS *et all* (1990) forneceram também as seguintes desvantagens do transporte pneumático:

- a) Alto consumo de energia;
- b) Alto custo inicial de instalação;
- c) Abrasão e desgaste de equipamentos;
- d) Um projeto incorreto pode resultar na degradação das partículas;
- e) Em razão dos complexos fenômenos de escoamento envolvidos, existe a necessidade de altos níveis de conhecimento no projeto, operação e manutenção dos sistemas pneumáticos.

RIBEIRO (2005) listou como vantagens do emprego dessa modalidade de transporte:

- a) A supressão de quaisquer formações de poeiras no ambiente (transporte sem poluição atmosférica);
- b) A supressão de quaisquer perdas de produto;
- c) Elimina a queda de produtos no piso de trabalho;
- d) A possibilidade de transporte aéreo e interno;
- e) A possibilidade de percurso sinuoso;
- f) A facilidade de adaptação aos edifícios existentes;
- g) A proteção do material transportado contra a poluição;
- h) A possibilidade de transportes utilizando gases neutros;
- i) A realização de instalações podendo integrar conjuntos completamente automatizados;
- j) A armazenagem e os custos de produção reduzidos;
- l) A higiene e segurança pessoal no trabalho.

Em alguns casos, citou ainda RIBEIRO (2005), o transporte pneumático não pode ser adotado devido às características físicas ou químicas do material, como:

- a) Sólido muito úmido ou pegajoso;
- b) Dimensões de partículas, ou a massa volumétrica muito grande, que requerem uma velocidade de gás também excessiva;

- c) A temperatura do material elevada;
- d) Partículas muito frágeis, que podem sofrer uma redução de tamanho, ou mudança de aspecto.

2.2 TRANSPORTE PNEUMÁTICO EM FASE DENSA, DILUÍDA E REGIMES DE ESCOAMENTO

A diferença entre as fases de transporte pneumático estão relacionadas à certas propriedades de cada sistema. Entre essas propriedades podem ser citadas a velocidade superficial do gás e a relação entre a vazão mássica das fases gasosa e sólida, para se poder classificar o transporte pneumático entre fase densa e diluída. As características gerais dos transportes em fase densa e diluída são apresentadas na Tabela 2, abaixo.

Tabela 2: Características dos sistemas de transporte pneumático em fase densa e diluída (Fonte: Dow Química, 2000).

Tipo de transporte	Carga de sólidos, massa de sólidos/massa de ar	Velocidade de transporte	Sistema de queda de pressão
Fase densa	Maior que 15	< 2000 ft/min (< 10 m/s)	> 15 psi (> 100 kPa)
Fase diluída	0-15	> 2000 ft/min (> 10 m/s)	< 15 psi (< 100 kPa)

MARCUS observou que uma redução na velocidade do gás, para uma mesma alimentação de sólido, resulta numa distribuição não uniforme na linha de transporte. Segundo SCHIAVON, os padrões de regimes de escoamento podem variar bruscamente, podendo ocorrer desde o preenchimento da seção da tubulação em regime denso, até os sólidos serem conduzidos pelo fundo da tubulação, gerando movimentos como de dunas.

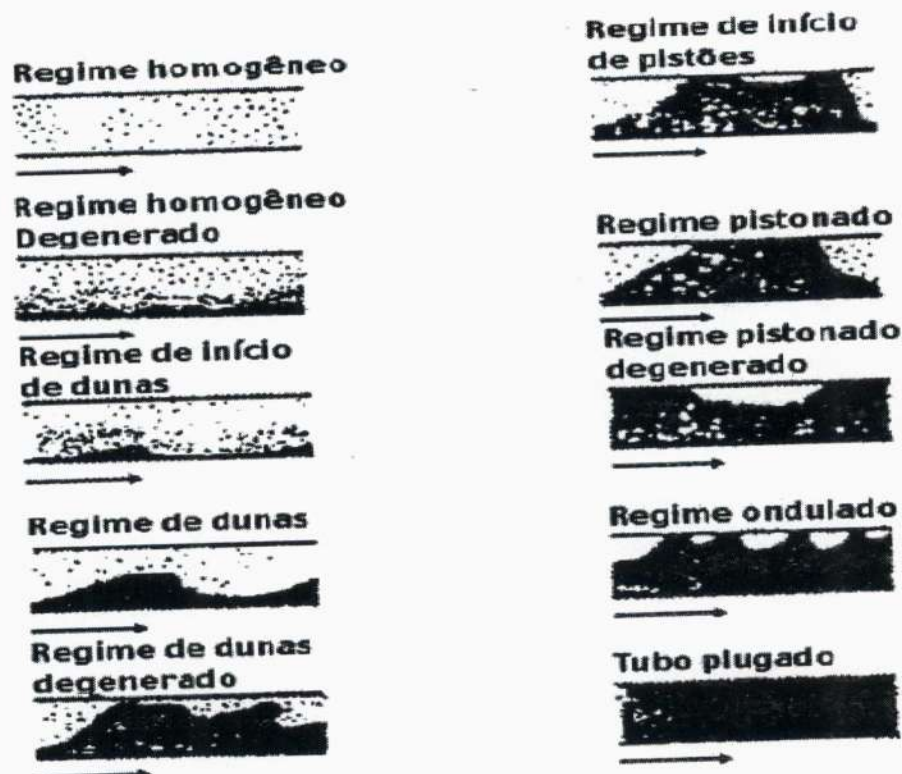


Figura 3: Regimes de escoamento em tubulação vertical (Fonte: WEN, 1959)

2.3 TRANSPORTE EM FASE DILUÍDA

O transporte de fase diluída conforme RHODES (2004) é caracterizado por altas velocidades de gás, baixas concentrações de sólidos (menos que 1% em volume), baixas quedas de pressão por unidade de comprimento de linha de transporte (menos de 5 mbar/m, $\cong$ 50 mmca/m). Em contrapartida, gera maior atrito, erosão na tubulação e degradação de materiais. A Figura 4 apresenta um sistema de transporte pneumático em fase diluída.

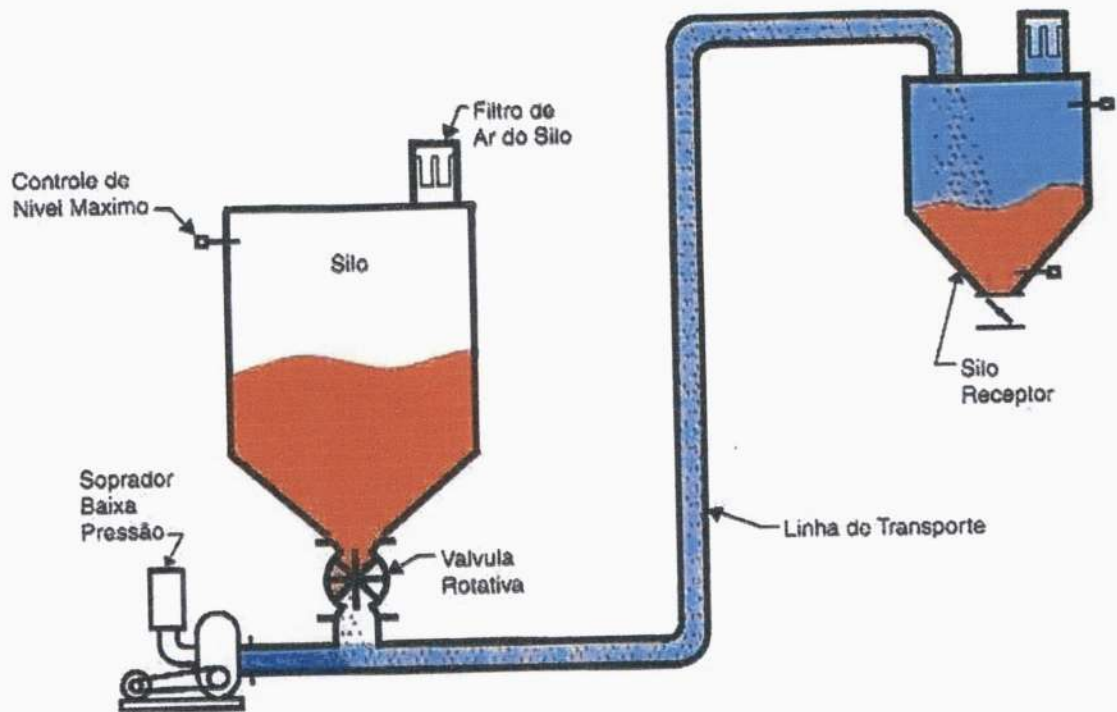


Figura 4: Sistema em fase diluída (Fonte: Dynamica Air - Conveying Systems, 2005).

O sistema pode ser de pressão positiva, pressão negativa ou empregar uma combinação de ambas, para succionar ou impulsionar os materiais através de dutos.

Normalmente sistemas de pressão positiva são limitados a uma pressão manométrica máxima de 1 bar ($\cong 10,3 \text{ mca} \cong 1 \text{ kgf/cm}^2$) e sistemas de pressão negativa, a um vácuo de cerca de 304 mmHg ($0,4 \text{ kgf/cm}^2$) empregando sopradores e exaustores. Também é limitada a pequena extensão, transporte contínuo de sólidos a vazões menores que 10 toneladas/hora. Sob condições de fluxo diluído as partículas sólidas se comportam como individuais completamente suspensas no gás e as forças de interação fluido/partícula predominam.

São usados separadores por ciclone para recuperar os sólidos do fluxo de gás na extremidade receptora da linha de transporte. Filtros de diversos tipos e com vários métodos de recuperação de sólidos são usados para limpar o gás de transporte, antes da descarga ou reciclo.

Em algumas circunstâncias pode não ser desejável usar o ar como o gás de transporte. Alguns exemplos são:

- Possível contaminação da fábrica com substâncias tóxicas ou radioativas;
- Possibilidade de explosão a menos que um gás inerte seja usado;
- Possíveis problemas com sólidos sensíveis a umidade, a menos que a umidade seja controlada.

A Tabela 3 mostra alguns parâmetros gerais para cada tipo de sistema pneumático em fase diluída.

Tabela 3: Principais característica e aplicações de sistemas em fase diluída (Fonte: Gluck, 1968 e Frank, 1975).

Tipo		Características	Aplicações
Sistema com pressão positiva	Alta	- Pressão aproximadamente de 125 psig ($\cong 8,5 \text{ kgf/cm}^2$)	- Deslocar materiais finos e pós que não reagem com calor em longas distâncias
	Média	- Pressão na faixa de 7 a 15 psig ($\cong 0,5 \text{ a } 1 \text{ kgf/cm}^2$)	- Sistemas com uma única entrada e diversos pontos de descarga como tanques de armazenamento de unidades de processo.
	Baixa	- Pressão menor que 3 psig ($\cong 0,2 \text{ kgf/cm}^2$) - Baixa capacidade e taxa de material-ar.	- Usado para pós coletados e em instalações com tubos grandes devido a expansão do material quando aerado.
Sistema com pressão negativa		- Velocidade de 4 a 6 ft/min ($\cong 0,02 \text{ a } 0,03 \text{ m/s}$)	- Transportar materiais corrosivos, tóxicos e perigosos
Sistema com pressão combinada positiva e negativa		- Vácuo de 15 a 16 inHg ($\cong 29 \text{ a } 31 \text{ kgf/cm}^2$) - Positiva de 10 a 12 psig ($\cong 0,7 \text{ a } 0,8 \text{ kgf/cm}^2$)	- Movimentar materiais leves e pós
Sistema com circuito fechado			- Transportar materiais tóxicos e radioativos.

2.4 TRANSPORTE EM FASE DENSA

Desde meados dos anos 60, tem surgido maior interesse no modo de transporte de fase densa. Nesse método as partículas sólidas não são completamente suspensas e há muita interação entre elas, relata RHODES em 2004.

O transporte pneumático em fase densa tem características formadas em baixas velocidades de gás, altas concentrações de sólidos (maior que 30% em volume), altas quedas de pressão em relação ao comprimento do tubo e utiliza sempre pressão positiva. É usado um compressor de ar de alta pressão como fonte de energia.

As principais vantagens desta fase surgem em situações em que baixos volumes de gás são exigidos, que geralmente significam baixas exigências de energia por massa de produto carregado e também significa que são requeridas linhas menores como também recuperação e separação sólido/gás. Baixas velocidades de sólidos significam que materiais abrasivos podem ser carregados com pouca erosão da tubulação principal ou degradação do produto.

Este tipo de transporte pneumático é comumente utilizado para materiais muito abrasivos, como por exemplo, areia. Entre suas desvantagens podemos citar os elevados custos de aquisição, além de exigir mão de obra especializada para operação e manutenção. A Figura 5 representa o transporte pneumático em fase densa.

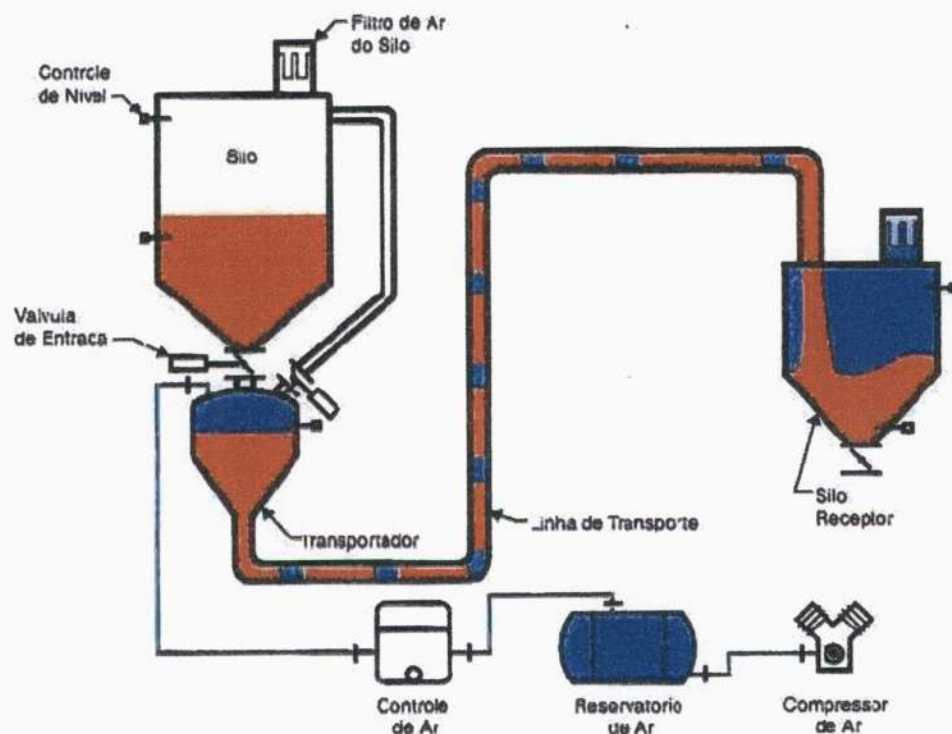


Figura 5: Sistema de fase densa (Fonte: Dynamic Air - Conveying Systems, 2005).

CAPÍTULO III

3 MÉTODOS E DESENVOLVIMENTO

3.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO PROJETO

Nesse capítulo foram definidas todas as bases técnicas que permitiram a concretização do projeto. Através de cálculos precisos de mecânica dos fluidos, foram alcançados os valores das variáveis que compõe esse complexo sistema de transporte pneumático, possibilitando assim a seleção dos equipamentos que compõe a rede.

Os dois principais equipamentos do sistema são o compressor e o transportador pneumático. O compressor selecionado foi o do tipo rotativo de palhetas. Seu funcionamento é realizado através de um rotor interno com palhetas deslizantes e descentralizado com relação ao seu invólucro. Quando o ar entra, fica preso entre as lâminas (que se apóiam no interior do invólucro), sendo levado então para o orifício de descarga. Esse tipo de compressor não possui movimento alternativo, dispensando assim a necessidade de um reservatório de ar, opera sem vibrações, livre de pulsações e com fluxo contínuo de ar.

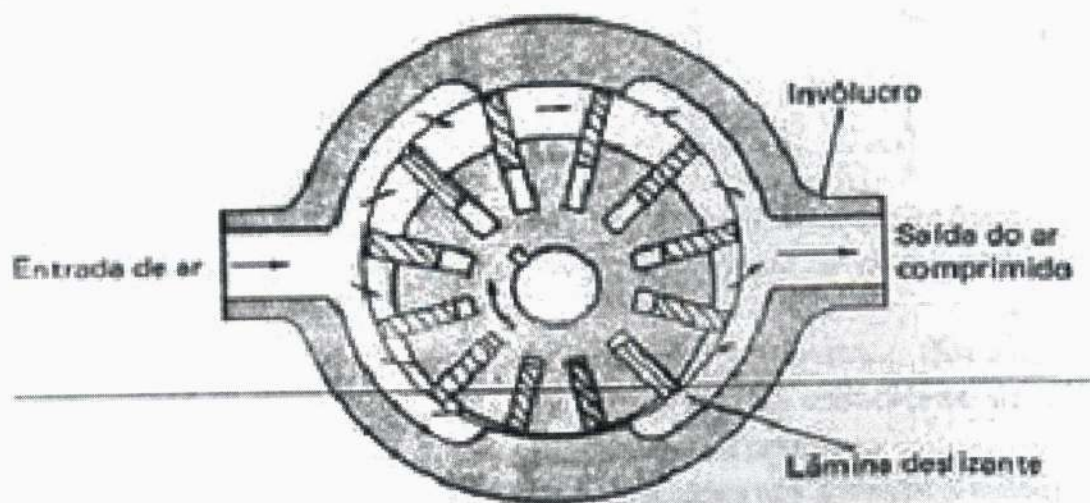


Figura 6: Funcionamento de um compressor de palhetas (Fonte: Neto, Augusto J. Leda, 2009).

O transportador pneumático escolhido foi o Tipo Bomba BS, onde o material cai na tremonha (por gravidade) e avança por uma rosca, sendo ao mesmo tempo compactado pelo passo decrescente da mesma. Forma-se, assim, entre a última espiral e o conjunto de válvula, um selo de material cuja densidade pode ser controlada. A seguir o material entra na câmara de mistura, sendo fluidificado e passado à linha de transporte. Seu funcionamento pode ser visto na figura 7.

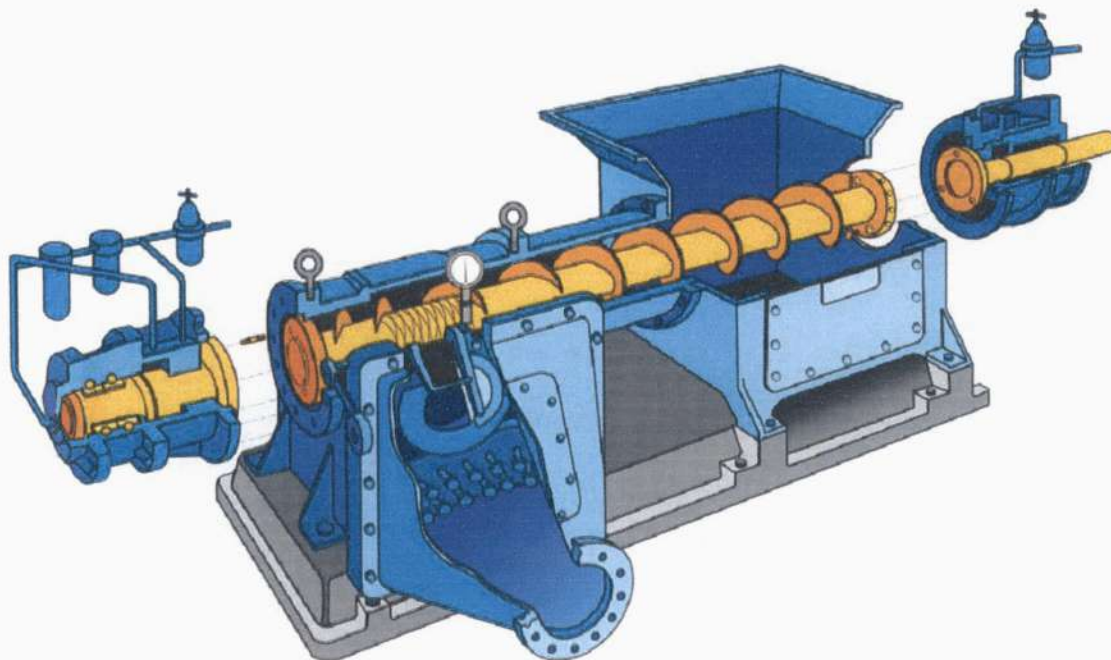


Figura 7: Vista interna de um transportador pneumático tipo B (Fonte: FK Bomb Port-FLSmith, 2009).

3.2 METODOLOGIA TÉCNICA

Os estudos e desenvolvimentos técnicos adotados na concepção deste trabalho seguem as indicações contidas no livro *Pneumatic Conveying Design Guide* – David Mills, onde um fluxograma exemplifica as tarefas que devem ser cumpridas para se dimensionar matematicamente um sistema de transporte pneumático. Todas as fórmulas utilizadas nessa etapa do trabalho foram retiradas mesmo livro de David Mills, e estão dispostas no formulário do projeto. O fluxograma em questão está disposto à seguir:

PNEUMATIC CONVEYING DESIGN GUIDE

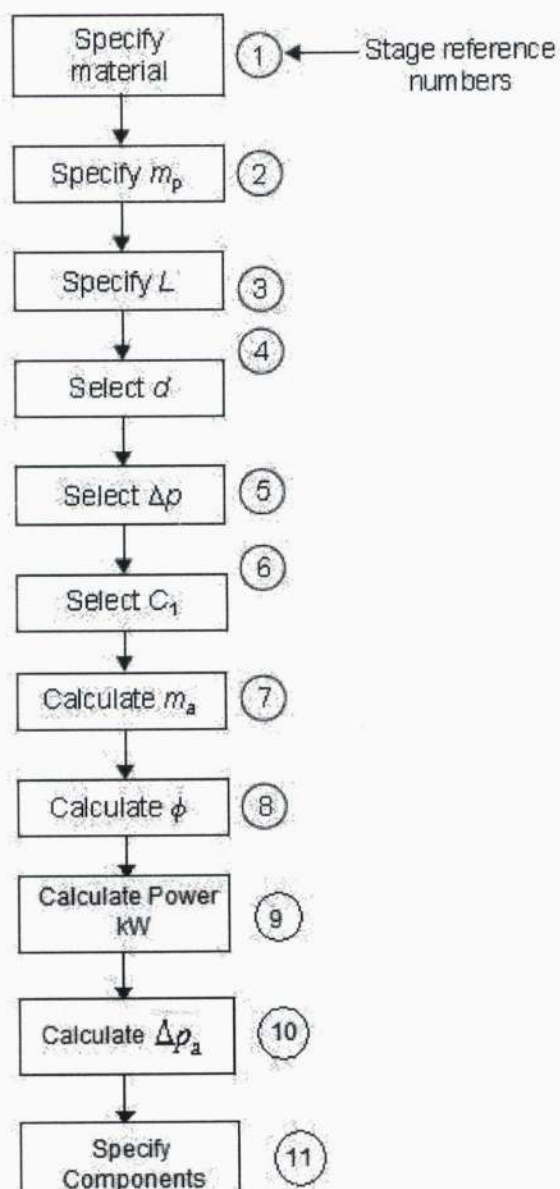


Figura 8: Fluxograma para cálculo para dimensionamento de sistema de transporte pneumático (Fonte: Mills, 2004).

Onde (mp) é a vazão mássica de sólidos, (L) o comprimento da tubulação, (d) o diâmetro da tubulação, (Δp) é o diferencial de pressão no sistema, (C_1) a velocidade de escoamento, (ma) a vazão mássica de ar, (Φ) a proporção ar/material e (Δpa) a perda de carga no sistema.

3.3 ANÁLISE DOS DADOS E ENTRADA DO SISTEMA

Os estágios 1, 2, 3 e 4 são dados de entrada do sistema, com os quais serão efetuados os cálculos de funcionamento da rede. Estão dispostos à seguir:

- 1 Especificar material (Calcário)
- 2 Especificar a vazão mássica de material ($mp = 40 \text{ ton/h} = 11,111 \text{ kg/s}$)
- 3 Especificar o comprimento ($L = 30\text{m}$ verticais e 70m horizontais, com 3 curvas de 90°)
- 4 Especificar o diâmetro da tubulação ($d = 8'' \cong 203 \text{ mm}$)

3.4 DETERMINAÇÃO DAS PRESSÕES DE FUNCIONAMENTO

O estágio 5 indica a determinação do diferencial de pressão em que trabalhará o sistema, sendo:

- $p1$ – pressão efetiva do compressor (2 bar)
- $p2$ – pressão relativa na rede (1,6 bar)
- $p3$ – pressão absoluta na rede (2,6 bar)
- $p4$ – pressão de saída da rede (atmosférica = 1 bar)

3.5 DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE ESCOAMENTO

No sexto estágio é determinada a velocidade de escoamento do fluido ($C1$). A velocidade mínima ($Cmin$) de escoamento para um sistema de escoamento em fase diluída é um valor maior do que 10 m/s . A velocidade mínima indicada e arbitrada para esse tipo de material é em torno de 13 m/s . A velocidade de escoamento $C1$ deve ser o valor da velocidade mínima $Cmin$ acrescido de 20%, logo:

$$C1 = 1,2 \times Cmin$$

$$C1 \cong 16 \text{ m/s}$$

3.6 DETERMINAÇÃO DA VAZÃO MÁSSICA DE AR (ma)

No sétimo estágio é calculado a vazão mássica de ar (ma). O cálculo realizado para ser alcançado o valor está disposto abaixo:

$$ma = \frac{2,74 \times p_2 \times C_1 \times d^2}{T_1} \text{ kg/s}$$

$$ma = 0,87 \text{ kg/s}$$

Sendo (2,74) um valor constante na fórmula, (p_2) o valor da pressão relativa na rede (1,6 bar ou 160 kpa), (C_1) a velocidade de escoamento (16 m/s), (d) o diâmetro interno da tubulação (8" ou 203 mm) e (T_1) o valor da temperatura do ar na rede, saindo aquecido do compressor à uma temperatura aproximada de 60°C (333 K).

3.7 DETERMINAÇÃO DA PROPORÇÃO AR/MATERIAL (Φ)

No oitavo estágio é calculado a proporção ar/material no sistema (Φ). A Dow Quimica indica que para sistemas em fase diluída, esse valor fique entre 0 e 15. Para ser obtido deve se usar a seguinte relação:

$$\Phi = \frac{mp}{3,6 \times ma}$$

$$\Phi = \frac{40 \frac{\text{ton}}{\text{h}}}{0,87 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}$$

$$\Phi = 40 \times \frac{1000 \text{ kg}}{3600 \text{ s}} \times \frac{1 \text{ s}}{0,87 \text{ kg}}$$

$$\Phi = 12,7$$

Onde (mp) é a vazão mássica de material e (ma) a vazão mássica de ar no sistema.

3.8 DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA REQUERIDA (P)

No estágio 9 é calculada a potência (P) necessária para o transportador pneumático que funciona acoplado à um motor elétrico. No cálculo da potência se faz necessário o valor do fluxo de ar na rede (V_0), e esse é obtido através da expressão:

$$V_0 = \frac{2,23 \times d^2 \times p_2 \times C_1}{T_1} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_0 = \frac{2,23 \times 0,203^2 \times 160 \times 16}{333} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_0 \cong 0,70 \text{ m}^3/\text{s} \cong 2520 \text{ m}^3/\text{h}$$

Onde (2,23) é uma constante da fórmula, (d) é o diâmetro da tubulação (203 mm), (p_2) é a pressão relativa na rede (160 kpa), (C_1) a velocidade de escoamento do fluido e (T_1) a temperatura do fluido.

A potência necessária (P) então é obtida através do seguinte cálculo:

$$P = 203 \times V_0 \times \ln \left[\frac{p_4}{p_3} \right] \text{ kW}$$

$$P = 203 \times 0,7 \times \ln \left[\frac{260}{101} \right] \text{ kW}$$

$$P = 134,5 \text{ kW}$$

Onde (203) é um valor constante na fórmula, (V_0) é o fluxo de ar obtido, (p_4) a pressão de saída na rede e (p_3) a pressão absoluta na rede.

3.9 CÁLCULO DA PERDA DE CARGA NO SISTEMA (Δp_a)

O décimo estágio é o mais importante, é onde é calculada a perda de carga (Δp_a), e poderá provar matematicamente que o sistema projetado é fisicamente viável. O cálculo da perda de carga é obtido através das seguintes expressões:

$$\Delta p_a = \left[\left(1,0 + \frac{1,34 \psi m_a^2}{d^4 \times 10^5} \right)^{0,5} - 1,0 \right] \text{ bar}$$

Onde:

$$\psi = \frac{(4fLeq)}{d} + \Sigma k$$

- Leq é o comprimento equivalente da tubulação onde é somado o valor horizontal mais o dobro do valor vertical da tubulação, resultando em $Leq = 130\text{m}$

- f é uma constante de fator de atrito da tubulação ($f = 0,0043$). (ver figura 11)

- Σk é o somatório de uma variável (k) relacionada ao comprimento equivalente relacionado às curvas ($\Sigma k = 3 \times 18,5 = 55,5$). (ver figura 12).

Resultando nas seguintes expressões:

$$\psi = \frac{(4 \times 0,0043 \times 120)}{203} + (3 \times 18,5)$$

$$\psi = 72,18 \text{ (adimensional)}$$

$$\Delta p_a = \left[\left(1,0 + \frac{1,34 \times 72,18 \times 0,87^2}{203^4 \times 10^5} \right)^{0,5} - 1,0 \right]$$

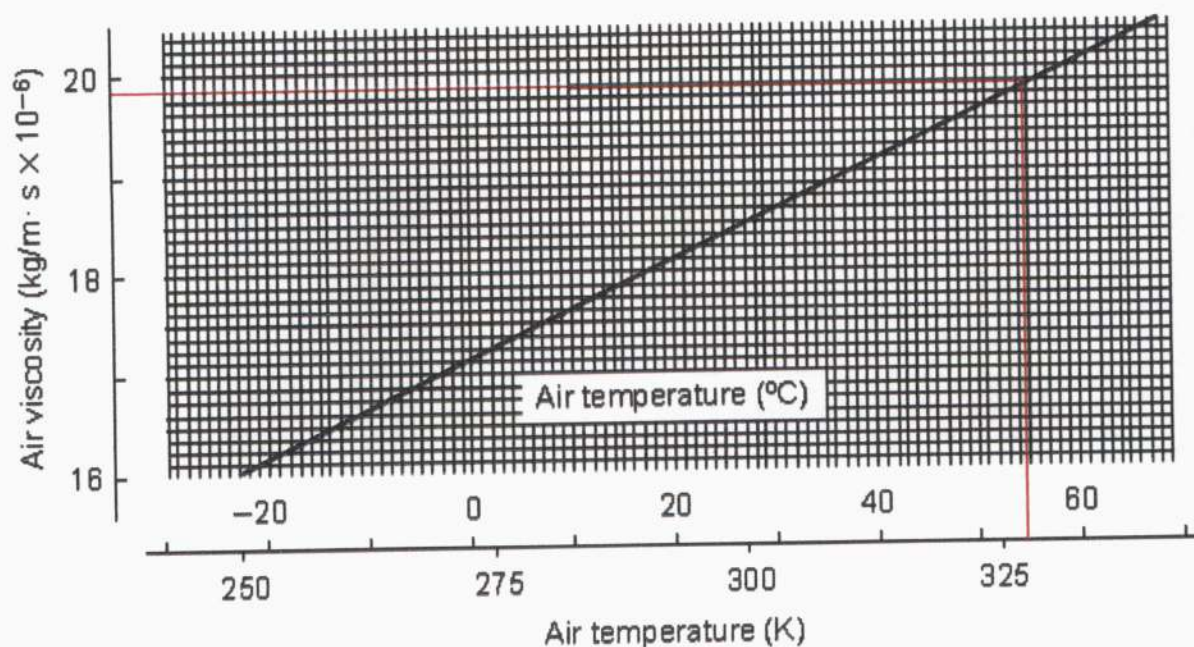


Figura 9: Gráfico de determinação da viscosidade do ar através da temperatura (Fonte: Mills, 2004)

Com a viscosidade de $19,85 \text{ kg/m} \cdot \text{s} \times 10^{-6}$, para a determinação do fator de atrito f é necessário o valor do número de Reynolds do sistema. Este pode ser obtido através da fórmula:

$$Re = \frac{4ma}{d\mu\pi}$$

Onde (ma) é a vazão mássica de ar, (d) é o diâmetro da tubulação e (μ) a viscosidade do ar.

O número Reynolds obtido foi ($Re = 2,73 \times 10^5$). Esse valor, combinado com o valor de aspereza padrão para aços comerciais, que é $4,5 \text{ }\mu\text{m}$, indica o fator de atrito f . Na figura 10 podem ser vistos os valores de aspereza típicos para tubos metálicos. E na figura 11 pode ser conferidos os critérios adotados na obtenção do fator de atrito f .

Pipe material	Surface roughness $m \times 10^{-6} (\mu\text{m})$
Drawn tubing	1.5
Commercial steel and wrought iron pipes	4.5
Asphalted cast iron	120
Galvanized iron	150
Cast iron	300–3000

Figura 10: Valores típicos de aspereza de tubos (Fonte: Mills, 2004)

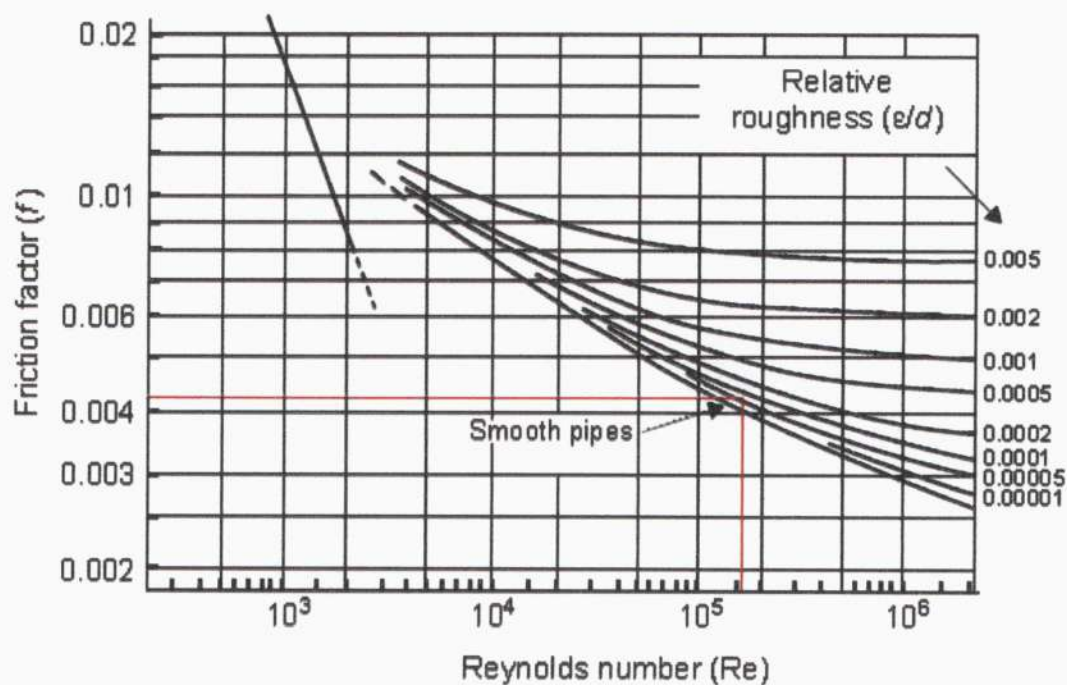


Figura 11: Gráfico para a determinação do fator de atrito f (Fonte: Mills, 2004)

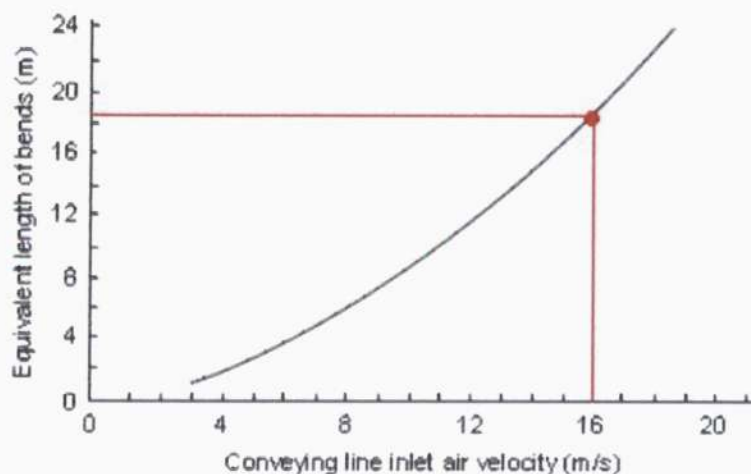


Figura 12: Gráfico de indicação do fator K (Fonte: Mills, 2004).

Com o valor obtido ($\Psi = 72,18$) aplicado na expressão da perda de carga, é alcançado o seguinte valor de $\Delta p_a = 0,19$ bar. Esse valor de perda de carga, somado ao valor da pressão relativa na rede, não ultrapassa o valor da pressão efetiva do compressor, assim sendo, o sistema projetado garante eficiência de funcionamento e embasamento técnico atestando sua aplicabilidade. Essa relação pode ser observada abaixo, onde:

$$\Delta p_a = 0,19 \text{ bar}$$

$$p_2 = 1,6 \text{ bar}$$

$$p_1 = 2,0 \text{ bar}$$

$$\Delta p_a + p_2 = 1,79 \text{ bar}$$

O projeto seria inviável tecnicamente se o valor obtido nessa soma (1,79 bar) fosse superior ao valor de p_1 (2,0 bar). O dimensionamento do projeto é tal, que ainda lhe confere uma folga de 0,21 bar, podendo o valor da perda de carga ser dobrado, e ainda assim o projeto atenderia aos requisitos.

3.10 ESPECIFICAÇÃO DOS COMPONENTES DA REDE

O último estágio do projeto é a especificação dos componentes a serem utilizados no sistema, de acordo com os dados obtidos e indicações técnicas.

Os principais componentes a serem selecionados são o compressor e seu motor de acionamento, a transportador pneumático (bomba) e seu motor de acionamento e o material da tubulação.

O fluxo de ar ($V_0 \cong 2520 \text{ m}^3/\text{h}$) obtido no nono estágio deu a capacidade a ser atendida pelo compressor escolhido. Para se trabalhar à uma pressão de 30 Psi (2,06 bar), a fabricante Soma, tradicional no setor de transporte pneumático e sistemas de pressão dispõe o modelo CR- 300. Segundo os dados do fabricante, esse compressor funcionando à 600 RPM é capaz de suprir uma necessidade de até $2681 \text{ m}^3/\text{h}$ de ar. Para o acionamento do compressor é necessária a utilização de um motor elétrico com 200hp. A fabricante WEG conta em seu catálogo com o modelo W22 Plus, de 8 polos e 440V. Funcionando com 60Hz gera 895 RPM, uma rotação

maior do que a especificada pelo fabricante, mas que não afeta significativamente o desempenho do compressor.

MODELO	RPM	30 PSI - 2,10 Kg/cm ² - 2 bar	
		m ³ /h	HP
CR-300	600	2681	200

Figura 13: Dados do catalogo do fabricante de compressores (Fonte: Soma, 2011)



Figura 14: Compressor de palhetas (Fonte: Premaq, 2010)

W22 Plus ⁽¹⁾

Potência		Carcaça	Conjugado nominal Cn (kgfm)	Corrente com rotor bloqueado Ip/In	Conjugado com rotor bloqueado Cp/Cn	Conjugado máximo Cmáx/Cn	Momento de inércia J kgm²	Tempo máximo com rotor bloqueado (s)		Peso (kg)	Nível médio de pressão sonora dB (A)	Fator de Serviço	RPM
kW	cv							Quente	Frio				
VIII polos - 900 rpm - 60 Hz													
0,12	0,16	71	0,145	2,8	1,8	2,0	0,00077	122	268	9,0	45	1,15	805
0,18	0,25	80	0,209	3,6	2,03	2,2	0,0024	41	90	11,5	46	1,15	840
0,25	0,33	80	0,290	3,7	2,1	2,3	0,0029	39	86	13,5	46	1,15	840
0,37	0,5	90S	0,429	3,4	1,72	2,29	0,0077	40	88	18,0	47	1,15	840
90	125	315S/M	98,5	5,8	1,8	2,0	4,37	25	55	967	66	1,15	890
110	150	315S/M	120	5,8	1,8	2,0	5,63	26	57	1043	66	1,15	890
132	175	355M/L	144	6,0	1,4	2,2	11,9	50	110	1424	75	1,15	895
150	200	355M/L	163	6,0	1,4	2,1	14,8	50	110	1511	75	1,15	895
185	250	355M/L	201	6,2	1,5	2,2	16,3	48	106	1653	75	1,15	895
220	300	355M/L	239	6,0	1,5	2,1	19,5	44	97	1793	75	1,15	895

Figura 15: Catálogo da fabricante de motores elétricos (Fonte: WEG, 2011)

O transportador selecionado foi o modelo B20, também da fabricante Soma. Devido às dimensões do material a ser transportado, sua granulometria e vazão necessária, o modelo B20 atende aos requisitos do sistema, tendo apenas que ser especificado ao fabricante, a dimensão de saída da tubulação, que deve ser flangeada de 8". Para o acionamento do transportador, deve ser analisado o resultado do nono estágio do fluxograma, onde a potência necessária ($P = 134,5 \text{ kW}$) indica a especificação do motor a ser utilizado no transportador. Com esse valor de potência obtido, foi selecionado o motor modelo W22 Plus, também da fabricante WEG. As exigências de potência são aproximadamente similares, o motor escolhido tem 4 pólos e potência de 150kW. Funcionando com 60Hz, gera 1785 RPM. Atendendo perfeitamente às exigências dos sistema.

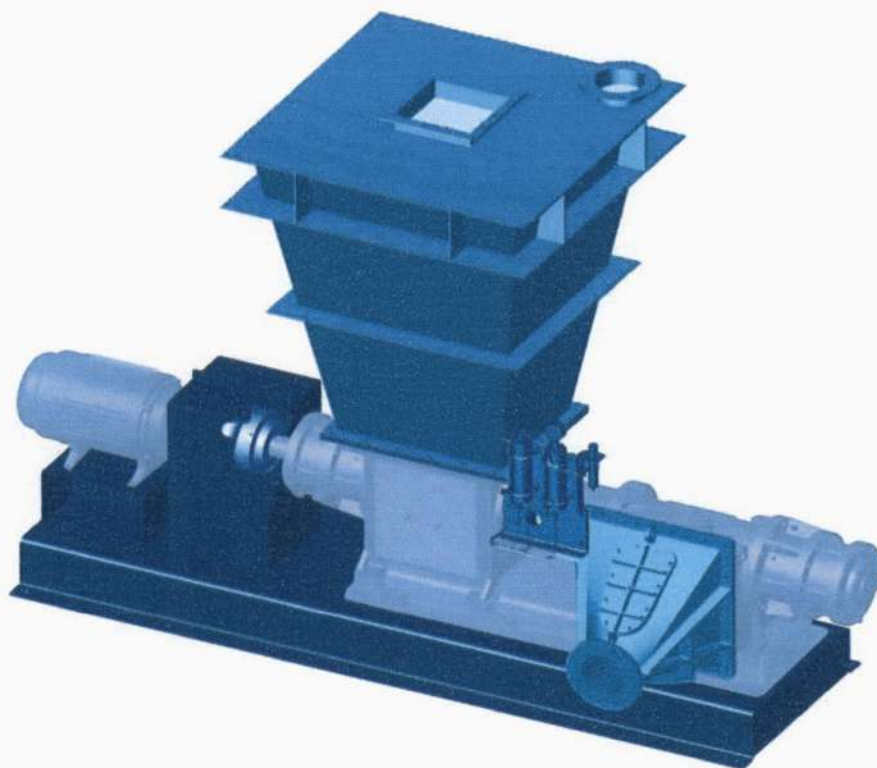


Figura 16: Ilustração de transportador pneumático (Fonte: FLSmith, 2009)

A tubulação indicada na literatura técnica é de tubos com alta espessura e com curvas de calota removível, que são aberturas removíveis caso seja necessária a realização de algum serviço de manutenção. Como o material a ser transportado (ar comprimido e calcário) não apresenta necessidade de materiais especiais, não é corrosivo nem tóxico, uma tubulação de aço carbono padrão SAE 1020 é indicada e

se mostra como uma opção prática, barata e eficiente. Com base nas recomendações de alta espessura, tubos do tipo Schedule nº 60 são uma boa opção, por terem a espessura de 10,31 mm, um valor alto comparado aos tubos normais.

TUBO SCHEDULE SEM COSTURA E COM COSTURA						
Dimensões				Identificação		
Nominal	 m/m Exter.	 m/m Inter.	 m/m Parede	 Kg / m	Demon.	Schedule Nº
8"	219,07	206,07	6,35	33,27		20
		204,99	7,04	36,75		30
		202,71	8,18	42,48	STD	40
		198,45	10,31	53,03		60
		193,67	12,70	64,56	XS	80

Figura 17: Tubos Schedule de 8" (Fonte: Multiduto, 2011)

Baseado em todas as pesquisas técnicas, cálculos e consultas a fabricantes e fornecedores, o sistema finalizado conta com os seguintes equipamentos:

- 1 compressor de ar de palhetas modelo CR-300 da fabricante Soma;
- 1 motor elétrico de 200 hp modelo W22 Plus da fabricante WEG;
- 1 transportador pneumático modelos B20 da fabricante Soma;
- 1 motor elétrico de 150 kw modelo W22 Plus da fabricante WEG;
- 100 metros de tubulação em aço carbono SAE 1020 de alta espessura com 3 curvas de 90°

Um desenho esquemático da aplicação do projeto pode ser visto na figura 18, onde são apresentados os componentes do sistema assim como sua disposição ao longo da rede.

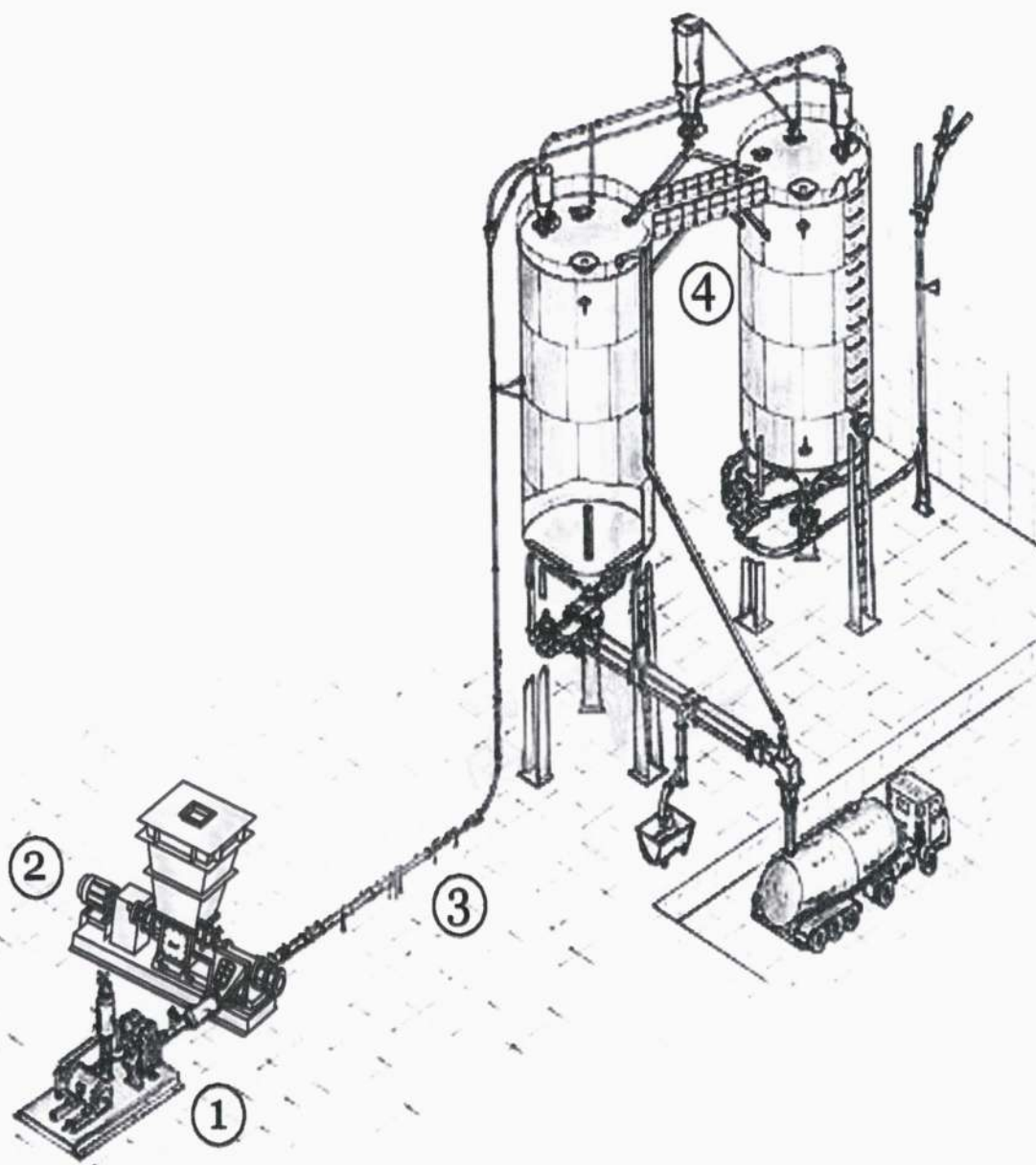


Figura 18: Planta esquemática do projeto. 1 - Conjunto motor e compressor; 2 - Conjunto motor e transportador pneumático com moega de alimentação; 3 - tubulação; 4 - Silos de armazenamento.

CAPITULO IV

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto que se apresenta aqui confirma sua viabilidade técnica através do embasamento teórico na área em questão. Os passos dados em sua elaboração foram realizados de acordo com o que a literatura especializada indica, e todos os resultados alcançados foram analisados e comparados com sistemas idealizados. A análise dos resultados obtidos pode comprovar sua eficácia, visto que através da metodologia indicada e utilizada o projeto se provou tecnicamente confiável.

No decorrer da elaboração do projeto foram encontradas inúmeras dificuldades, e entre essas pode se destacar a pouquíssima opção de literatura sobre o tema, disponível em língua portuguesa. Fez-se necessário a busca por embasamento teórico em literatura estrangeira, que dispõe de inúmeras publicações no tema e com alto nível de praticidade e qualidade. Esta opção resultou por conferir ao projeto sua confiabilidade técnica, mas por outro lado, os obstáculos encontrados nessa opção contribuíram para atraso considerável na finalização do mesmo.

Baseado em cotação de preço com fornecedores, o custo de aquisição dos equipamentos estipulados no projeto são orçados em aproximadamente cento e oitenta mil reais, variando de acordo com os fornecedores. Um valor viável no planejamento de uma empresa do porte da Calpar Ltda, ou qualquer outra empresa com plantas industriais e que necessitem de transportar materiais de um ponto ao outro de forma simples, barata e com baixíssima manutenção.

Fica como recomendação prática de funcionamento do sistema, a realização do procedimento de que nos primeiros cinco minutos de funcionamento da rede, apenas o ar comprimido em elevada temperatura seja conduzido pela tubulação, com o intuito de se eliminar qualquer umidade no interior da mesma, que possa atrapalhar a condução fluida do calcário posteriormente. E como recomendação para projetos de complementação é indicado um estudo de aplicabilidade de sistema

caixa de redução ou inversor de frequência no motor que impulsiona o compressor, para que este funcione plenamente de acordo com todas as especificações técnicas do fabricante. Também é recomendado para projetos futuros, a instalação de um sistema de desvio de fluxo na tubulação, que agilizaria o processo de alternância de silos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GELDART D. Types of gas fluidization. *Powder Technology*, 1973.

GOMIDE R. **Operações Unitárias**. São Paulo: R. Gomide, v.1, 1983.

LEUNG L. S., JONES P. J., **Proceedings of Pneumotransport 4**, BHRA Fluid Engineering, 1978.

MARCUS R. D., LEUNG L. S., KLINZING G. E., RIZK F. **Pneumatic conveying of solids**, London: Chapman and Hall, 1990.

RIBEIRO D. S. **Transporte Pneumático – Tecnologia, projetos e aplicações na indústria e nos serviços**, ARTLIBER, 2005.

SCHIAVON F. L. **Aplicação de técnicas de controle ativo em transportadores pneumáticos de sólidos**. São Carlos (SP): Faculdade de Engenharia Mecânica, EESC/USP, 2000.

KLINZING, G. E., MARCUS, R. D., RIZK, F, LEUNG, L. S.: **"Pneumatic Conveying of Solids"**. Chapman & Hill, 2a Edição, London, 1997.

MILLS, D., JONES, M. G., AGARWAL, V. K., **"Handbook of Pneumatic Conveying Engineering"**, Marcel Dekker, Inc., New York, 2004.

MILLA, D., **Pneumatic Conveying Design Guide, Second Edition**, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.

MATSUMOTO S., HARADA S., SAITO S., MAEDA S. J. **Chemical Engineering**, Japan, v.7, 425, 1975.

LEUNG L. S., JONES P. J., **Proceedings of Pneumotransport 4**, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, paper C1, 1978.