

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE DESPOEIRAMENTO PARA UMA
UNIDADE DE BENEFICIAMENTO DE SEMENTES DE MILHO**

HELIO ALVES FILHO

Uberlândia-MG

2023

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

HELIO ALVES FILHO

**DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE DESPOEIRAMENTO PARA UMA
UNIDADE DE BENEFICIAMENTO DE SEMENTES DE MILHO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Mecânica como
requisito parcial para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Arthur Heleno Pontes Antunes

Uberlândia-MG

2023

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer, em primeiro lugar, aos meus pais, Leonícia Geralda de Sousa Alves e Helio Alves, que me apoiaram e incentivaram a estudar, fazendo com que fosse possível chegar até aqui. Agradeço também aos meus irmãos e demais familiares por sempre estarem sempre ao meu lado.

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica, principalmente ao professor Dr. Arthur Heleno Pontes Antunes pela orientação neste trabalho.

Ao Eng. Luciano Garcia Cunha, proprietário da Enercon, agradeço pelos ensinamentos e paciência ao compartilhar seus conhecimentos.

E por último, mas nos menos importante, quero expressar minha gratidão aos amigos que fiz durante a graduação, Antônio César, Marcos Antônio e Elias Guimarães, que nos momentos mais difíceis estiveram do meu lado.

RESUMO

O milho é um dos produtos mais importantes para a economia do Brasil, uma vez que o país é um dos maiores produtores e exportadores mundiais. As unidades de beneficiamento de sementes desempenham um importante papel na conservação de qualidade da semente de milho após a colheita. No ambiente de trabalho dessas unidades, é muito comum a formação de poeira, originada principalmente no deslocamento das sementes. A poeira gerada é prejudicial à saúde dos trabalhadores, pois pode provocar problemas respiratórios e outros impactos adversos. Além disso, a poeira é considerada uma poeira combustível e em determinadas concentrações e cenários pode provocar uma deflagração ou uma explosão. O presente trabalho tem como finalidade dimensionar um sistema de exaustão em uma unidade de beneficiamento de sementes de milho. A área da unidade escolhida foi o tratamento de sementes e foi baseada em algumas plantas existentes (cliente não revelado). Por meio de um dimensionamento e balanceamento corretos do sistema de exaustão, é possível minimizar os riscos associados a exposição à poeira, garantindo assim, um ambiente de trabalho mais seguro e saudável para todos os trabalhadores envolvidos. No projeto, foi realizada uma comparação do sistema antes e depois do balanceamento, mostrando a sua importância.

Palavras-chave: despoeiramento, exaustão, poeira combustível.

ABSTRACT

Corn is one of the most important products for the Brazilian economy, as the country is one of the largest global producers and exporters. Seed processing units play a significant role in preserving the quality of corn seeds after harvesting. In the working environment of these units, the formation of dust, primarily originating from the movement of seeds, is quite common. The dust generated is harmful to the health of workers, as it can cause respiratory problems and other adverse effects. Furthermore, the dust is considered combustible dust, and under certain concentrations and scenarios, it can lead to deflagration or an explosion. The purpose of this work is to design an exhaust system in a corn seed processing unit. The chosen area for this unit was seed treatment and was based on some existing plants (client undisclosed). Through proper sizing and balancing of the exhaust system, it is possible to minimize the risks associated with dust exposure, thus ensuring a safer and healthier working environment for all involved workers. In the project, a comparison of the system before and after balancing was conducted, highlighting its significance.

Keywords: *dedusting, exhaust, combustible dust.*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	Objetivo.....	7
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1	Beneficiamento	9
2.2	Riscos da poeira.....	11
2.3	Ventilação	13
2.3.1	Sistema de duto	14
2.3.2	Captor	19
2.3.3	Coletor	22
2.3.4	Ventiladores.....	25
2.3.5	Balanceamento do sistema de dutos	25
2.3.6	Medições no escoamento	26
3	METODOLOGIA.....	29
4	RESULTADOS	36
5	CONCLUSÃO.....	39
	REFERÊNCIAS	40
	ANEXO.....	43
	ANEXO A: Tabelas de perda de carga	43
	ANEXO B: Vazões recomendadas e perda de carga no captor.	48
	APÊNDICE	52
	APÊNDICE A: Comprimentos e perda de carga localizada nos dutos.....	52
	APÊNDICE B: Layout área de tratamento.....	54
	APÊNDICE C: Memorial de cálculo.....	55

1 INTRODUÇÃO

A indústria do milho no Brasil é um importante setor da economia, uma vez que o país é um dos maiores produtores e exportadores mundiais. O cultivo do milho tem se desenvolvido ao longo dos anos, e atualmente é realizado em praticamente todas as regiões do país. O milho é utilizado em diversos setores da indústria, como a alimentícia, de bebidas, de biocombustíveis, entre outras, o que evidencia sua importância para a economia mundial.

O beneficiamento da semente de milho pode envolver várias etapas, como a debulha, a secagem e a separação de componentes. Cada uma dessas etapas pode gerar diferentes poluentes, como poeira, gases, fumaça, odores e micro-organismos, que podem acumular no ambiente de trabalho e causar problemas respiratórios, alergias, irritações na pele, problemas oculares e outros efeitos à saúde dos trabalhadores se não for controlada. Além disso, a poeira resultante também pode ser explosiva em determinadas condições, o que aumenta o risco de acidentes (Juarez, 2008).

Para reduzir a poeira/polvente no ambiente industrial, é imprescindível a utilização de um sistema de exaustão que seja capaz de capturar, filtrar e remover a poeira gerada durante o beneficiamento do milho, antes que seja liberada no ambiente.

Para isso, o sistema de exaustão deve ser projetado de modo a assegurar que a vazão nos pontos de captura seja adequada para minimizar a quantidade de poeira presente no ambiente. Portanto, é importante que este sistema esteja balanceado, assegurando que as vazões de projeto sejam atendidas. Também, o sistema deve ser projetado de forma a atender as normas e regulamentações vigentes, para garantir segurança do sistema de exaustão e a remoção dos poluentes com maior eficiência possível.

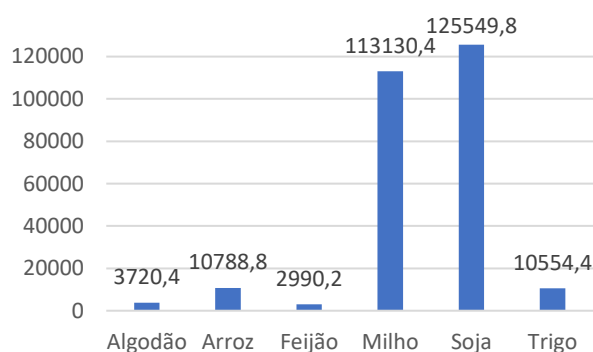
1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho, é apresentar uma proposta de dimensionamento de um sistema de exaustão para a área de tratamento de uma unidade de beneficiamento de sementes de milho. Este projeto foi realizado pelo autor deste trabalho através dos conhecimentos adquiridos no estágio em conjunto com a ENERCON, empresa de consultoria em projetos básicos conceituais com especialização em conservação termo energética e controle ambiental, situada em Uberlândia, MG. As informações mais detalhadas acerca do cliente não serão expostas devido ao contrato de confidencialidade feito pelas partes.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O milho é um dos alimentos mais consumidos do mundo, atrás apenas do leite e derivados, trigo, arroz, batata, cerveja, açúcar e tomate. Cerca de 80% do milho que se produzido no Brasil e não exportado vai para a fabricação de ração animal. Os 20% são processados e utilizados para produtos alimentícios e industriais. O grão do milho pode ser utilizado para a fabricação de etanol e os seus compostos estão presente em medicamentos, talco infantil, cosméticos, adesivos, tecidos engomados, graxas e resinas, produtos de limpeza, entre outros (NIDERA, 2021).

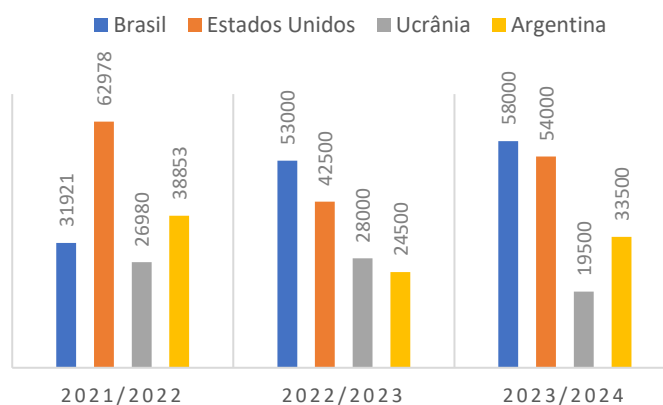
Figura 1: Produção de grãos no Brasil safra 2021/2022 em mil toneladas.



Fonte: Conab (Companhia Nacional de Abastecimento).

Segundo o balanço feito pela USDA (United States Department of Agriculture), o Brasil se tornou o maior exportador da safra 2022/2023, com 53 milhões de toneladas de milho e a previsão para a safra de 2023/2024 sendo 58 milhões de toneladas.

Figura 2: Balanço de exportação (mil toneladas) últimas safras e previsão para 2023/2024.



Fonte: USDA (United States Department of Agriculture).

O Brasil é o quarto maior consumidor de milho, atrás apenas dos Estados Unidos, China e União Europeia, respectivamente. A produção de etanol a partir do milho vem crescendo nos últimos anos. Segundo a UNEM (União Nacional do Etanol de Milho), a estimativa é que serão produzidos 6 bilhões de litros de etanol na safra 2023/2024 e a apenas 6 anos a produção nacional era de 520 milhões de litros.

2.1 Beneficiamento

O beneficiamento é um conjunto de etapas após a colheita para a produção de sementes. Seu objetivo é retirar contaminantes, garantir qualidades físicas, fisiológicas e sanitárias de forma a garantir um padrão comercial e maximizar a qualidade do lote de sementes. A semente tem diversas características físicas como: tamanho, forma, cor, condutividade elétrica, textura e afinidade com líquidos. Essas são as principais características utilizadas para separação das sementes (Previero, 2001 e Juarez,2008).

O processo de beneficiamento geralmente segue as seguintes etapas: debulha, pré-limpeza, secagem, limpeza, separação-classificação, tratamento e ensaque.

Quando o milho chega à unidade de beneficiamento de sementes (UBS), podem estar em forma de sementes de milho ou no formato de espigas. Se chegarem como espigas, é necessário passa-los pelo processo de debulha, separando as sementes do sabugo e retirando a palha das espigas.

Após a debulha, as sementes contêm uma certa quantidade de impurezas, como folhas, palhas, insetos e sementes de ervas daninhas. É importante remover essas impurezas para aumentar a eficiência durante o processo de secagem e não prejudicar a qualidade do lote. São utilizados vários tipos de peneiras, às vezes acompanhadas por um sistema de ventilação, para a remoção de poeiras e outros materiais.

Quando a semente chega na UBS, ela contém grande quantidade de umidade. O alto teor de umidade influencia na qualidade durante o armazenamento e também na eficiência das máquinas utilizadas nas etapas seguintes de beneficiamento. Portanto, é realizada uma etapa de secagem antes de seguir com os demais processos.

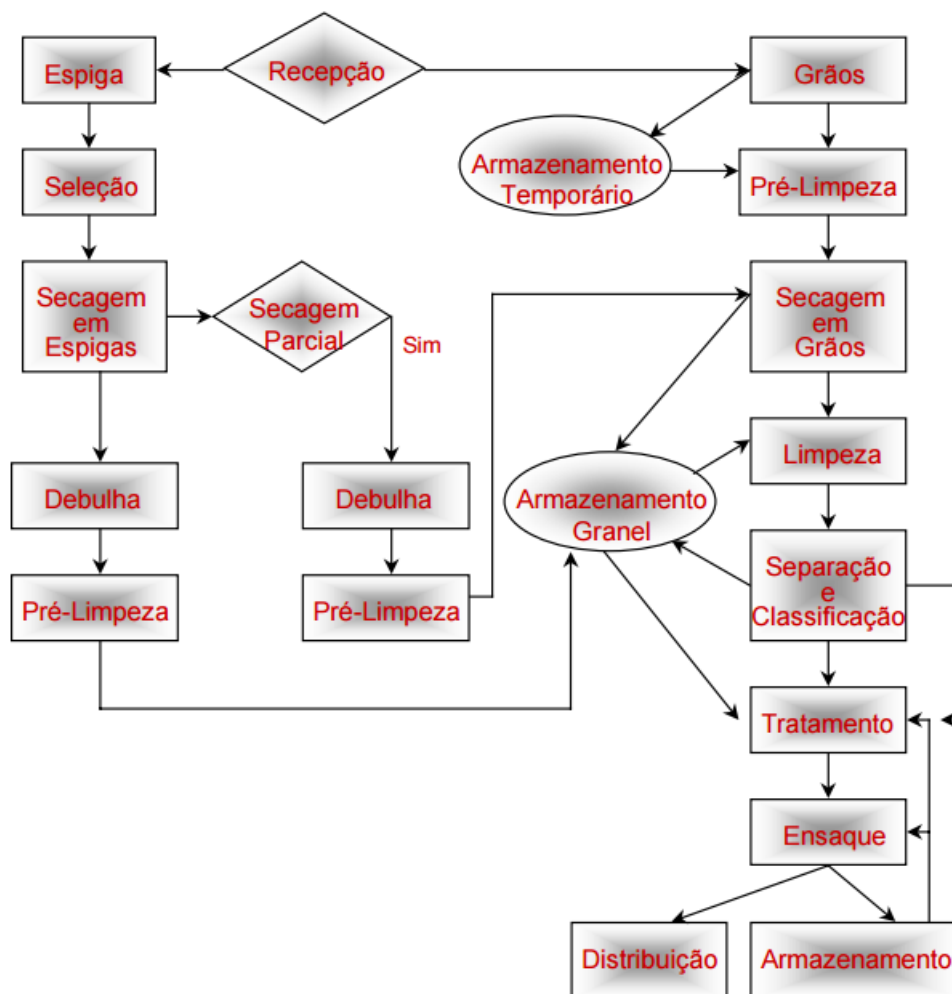
Depois da secagem, as sementes passam por uma limpeza mais rigorosa. Essa limpeza tem como objetivo retirar todas as impurezas que não foram retiradas durante a pré-limpeza.

Na fase de separação e classificação, restam impurezas oriundas a características das sementes. Então, são utilizados equipamentos que separam as sementes de acordo com

características físicas, como tamanho, peso, cor e outras características. Esta etapa tem como principal objetivo conferir uniformidade para tornar o tratamento eficiente e facilitar o plantio das sementes.

No tratamento são adicionados inseticidas e fungicidas às sementes. As sementes tratadas são identificadas com a adição de corante nos fungicidas/inseticidas para diferenciá-las das sementes não tratadas. Após essa etapa, as sementes são ensacadas e enviadas para o armazenamento ou transporte.

Figura 3: Fluxograma para beneficiamento de sementes de milho.

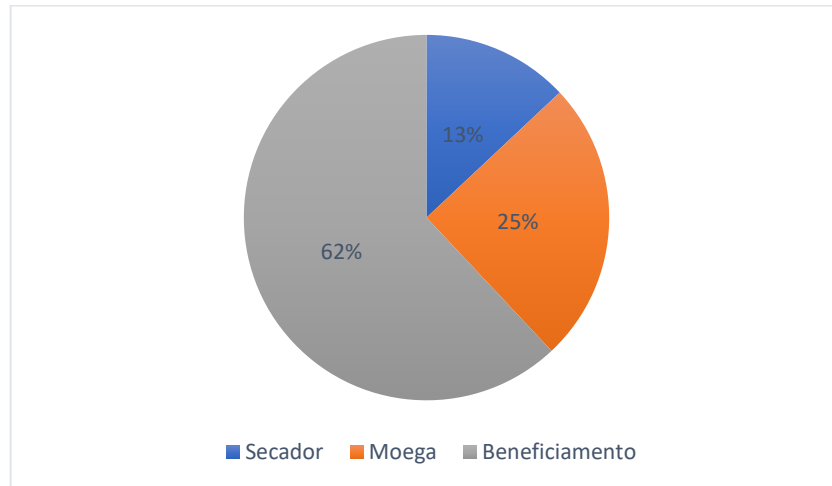


Fonte: (PREVIERO, 2001).

A poeira que surge no processo de beneficiamento é originada pela movimentação da massa de sementes. Quando ocorre essa movimentação, uma certa quantidade de material fica em suspensão no ar. A poeira é gerada principalmente em descargas em moegas, na admissão/descarga de transportadores, em máquinas de limpeza, elevadores, secagem e em

outros equipamentos/processos durante o beneficiamento. A figura (4), mostra onde está a localização da concentração de pó no processo do arroz.

Figura 4: Concentração de pó na indústria de arroz.



Fonte: (POHNDORF, LAAN, *et al.*, 2010)

2.2 Riscos da poeira

A poeira gerada no processo de beneficiamento é composta por fragmentos proteicos, microrganismos, produtos químicos e material inorgânico que causam reações irritativas, inflamatórias e alergênicas nas vias aéreas e pulmões.

Tietboehl (2004) fez um estudo com 195 trabalhadores de silos, divididos em grupos de alta exposição à poeira e de baixa exposição. Neste estudo, concluiu-se que trabalhadores que tiveram exposição prolongada a altos níveis de poeira apresentaram problemas respiratórios agudos, crônicos e provável perda da função pulmonar ao longo do tempo.

Além dos riscos que a poeira leva à saúde dos trabalhadores, muitos não tem consciência do potencial explosivo associado à poeira. A poeira do milho é considerada combustível, ou seja, quando está suspenso no ar, apresenta riscos de incêndios ou deflagrações. Para que uma deflagração ocorra, são necessários quatro fatores: poeira (combustível), fonte de ignição (calor), oxigênio (comburente) e a dispersão das partículas de pó. Uma explosão só ocorre se tiver os mesmos fatores da deflagração mais o confinamento da nuvem de poeira.

Um levantamento conduzido pela Purdue University entre 2013 a 2022, foram registradas 81 explosões devido a poeira nos EUA, deixando 13 mortos e 90 feridos. Dessas 81 explosões, 35 foram atribuídas à poeira de milho.

A poeira combustível é classificada em classes de explosão, para fazer essa classificação são utilizados os valores de Kst (índice de deflagração). O Kst é máxima taxa de aumento de pressão alcançada em um determinado volume. Quanto maior este índice, mais grave a explosão. De acordo com a NFPA 68 (National Fire Protection by Deflagration), o Kst da poeira de milho é 75 bar.m/s.

Tabela 1: Classes de perigo de deflagração da poeira.

Classe de explosão da poeira	Kst [bar-m/s]
St-1	≤ 200
St-2	$> 200 e \leq 300$
St-3	> 300

Fonte: NFPA 68.

Além disso, o limite de inflamabilidade mínima do milho é de 60 g/m³. O índice de inflamabilidade mínima é a menor concentração de uma substância combustível em um meio oxidante gasoso que propagará a chama, sob determinadas condições (NFPA 68).

O valor do índice de deflagração do milho pode ser considerado baixo, assim como o açúcar. Mas nem por isso pode-se menosprezar seu potencial de ocorrer explosões. Em 2008, houve uma explosão e incêndio na Imperial Sugar Company, matando 14 pessoas e deixando 38 feridos. A explosão foi desencadeada pelo excesso de acúmulo de pó de açúcar em todo o prédio de embalagens.

Figura 5: Explosão e incêndio Imperial Sugar Company.



Fonte: CBS.

Foi noticiado pelo Globo Rural (2023), em julho 2023, um acidente em um silo que levou morte de 8 pessoas na cidade de Palotina, Paraná, no armazém da C.Vale. A principal suspeita do acidente é a explosão provocada pela fricção dos grãos de milho.

A poeira é gerada na movimentação da semente de milho. Então os principais equipamentos onde se pode acontecer um acidente são em elevadores, transportadores, coletores de pó e silos.

Tomar medidas preventivas como controlar as possíveis fontes de ignição da explosão é a melhor maneira de evitar uma explosão. As fontes mais comuns de ignição são descargas estáticas, superfícies quentes, faíscas e chamas. Após o levantamento das fontes de ignição, deve-se adotar medidas como o aterramento das máquinas, coletores e dutos. É importante a instalação de um sistema de exaustão adequado para o processo. Em equipamentos como coletores, devem possuir portas de alívio para se ter uma liberação controlada de uma explosão. Além disso, pode ser instalados supressores para conter uma deflagração em seu início.(ACGIH, 1998).

Para um projeto adequado deve-se consultar às NFPA 61 (Prevenção de incêndios e explosões de poeira em instalações agrícolas e de processamento de alimentos), NFPA 68 (Proteção de explosões por ventilação de deflagração), NFPA 654 (Prevenção de incêndios e explosões de poeira provenientes da fabricação, processamento e manuseio de combustíveis sólidos particulados) e NFPA 69 (Sistemas de prevenção de explosão).

Logo, deve-se instalar um sistema de exaustão para remover a poeira gerada no processo, o que não apenas preserva a saúde dos trabalhadores, mas reduz o risco de explosões. No entanto, é fundamental que o sistema de exaustão seja projetado e operado de acordo com as normas e diretrizes recomendadas, a fim de prevenir possíveis acidentes.

2.3 Ventilação

Os sistemas de ventilação desempenham um papel fundamental na qualidade do ar em ambientes internos. Eles podem ser classificados em sistemas de ventilação geral ou sistemas de ventilação local exaustora (MACINTYRE, 1990).

O sistema de ventilação geral pode ser natural ou do tipo geral diluidora. A ventilação natural não envolve nenhum componente mecânico para descolar o ar, em vez disso, ela utiliza-se dos diferenciais de pressão e temperatura interno e externo, através de frestas, como janelas e portas, para promover a circulação do ar. Por outro lado, a ventilação geral diluidora utiliza

meios mecânicos para ventilar o ambiente. Isto pode ser feito por meio de insuflamento de ar fresco, exaustão do ar ou o misto entre ambos (MACINTYRE, 1990).

A ventilação local exaustora opera de maneira diferente em relação à ventilação geral diluidora. Nesse sistema, a fonte de poluição é capturada e removida do local onde é gerada. Isso é feito por meio de captores (CLEZAR e NOGUEIRA, 1999). Ela é especialmente importante em locais de trabalho onde ocorrem processos industriais ou atividades que geram poluentes específicos. Ela contribui para a proteção da saúde dos trabalhadores e a manutenção de um ambiente de trabalho seguro.

Na ventilação local exaustora pode-se ter dois tipos de sistema: sistemas centrais ou sistemas unitários. Nos sistemas centrais, todos os captores são ligados por dutos até o coletor e o ventilador. São sistemas para grande porte. Este tipo de sistema possui pequena versatilidade de operação e mudança na estrutura física e é necessário um projeto de engenharia, mas apresenta baixo custo de manutenção, operação e a área ocupada é baixa, pois os ventiladores e filtros podem ser colocados externamente (CLEZAR e NOGUEIRA, 1999).

Já os coletores unitários são de pequeno porte e podem possuir mobilidade. Esta mobilidade permite o atendimento de mais de uma fonte de geração de contaminante, mas apenas uma fonte por vez. O sistema possui alto custo de manutenção e operação e não necessita de um projeto de engenharia do equipamento (CLEZAR e NOGUEIRA, 1999).

Para o despoeiramento na indústria de beneficiamento de milho o sistema que será utilizado é a ventilação local exaustora com sistema central.

Os principais componentes do sistema de ventilação local exaustora são:

- Sistema de duto;
- Captor;
- Coletor;
- Ventilador.

2.3.1 Sistema de duto

Para o dimensionamento de um sistema de duto é necessário conhecer a vazão que será captada e a velocidade que o ar conduzirá as partículas de poeira no duto. As vazões em projetos industriais geralmente são elevadas, resultando velocidades igualmente altas nos ramais. Diferente do que ocorre nos projetos de condicionamento de ar para conforto térmico, nos quais as velocidades são restringidas pelo ruído, nos projetos industriais este limitante não existe.

Além disso, a velocidade precisa ser compatível com o tipo de contaminante que será removido pelo sistema de ventilação local exaustora (CLEZAR e NOGUEIRA, 1999).

Tabela 2: Velocidades mínima recomendadas para o projeto de dutos.

Natureza do contaminante	Exemplos	Velocidades de projeto [m/s]
Vapores, gases e fumaça	Vapor da água, fumaça da queima de carvão	Qualquer velocidade (normalmente de 5 – 10)
Fumos	Compostos Metálicos	10 – 13
Poeira fina	Fibra de algodão, pó de madeira	13 – 15
Poeiras secas e pós	Pó de borracha, pó de algodão	15 – 18
Poeira industrial média	Grão de café, pó de granito, pó de moagem	18 – 20
Poeira grossa	Serragem, rebarbas de metal	20 – 23
Poeira grossa ou úmida	Pó de cimento úmido, pós de chumbo com pequenas lascas	Maior que 23

Fonte: Adaptado de (ACGIH, 1998)

Apesar das altas velocidades, o escoamento pode ser considerado incompressível, e para os cálculos da perda de carga e as propriedades do fluido, a presença do contaminante pode ser desconsiderada. O dimensionamento de dutos baseia-se na equação da continuidade e no princípio da conservação de energia para fluidos em escoamento, descrito pela equação de Bernoulli.

Pela equação da continuidade temos que a vazão em um duto circular é calculada pela como:

$$Q = VA = V \frac{\pi D^2}{4} \quad (1)$$

Onde:

Q = vazão de ar [m^3/s]

A = área da seção transversal do duto [m^2]

D = diâmetro do duto [m]

A equação de Bernoulli para o escoamento permanente incompressível em dutos considerando a perda de carga é:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_g = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_p \quad (2)$$

Onde:

ρ = densidade do fluido [kg/m^3]

P = pressão estática do fluido [Pa]

V = velocidade do fluido [m/s]

z = altura em relação ao ponto de referência [m]

h_g = ganho de energia [m]

h_p = perda de carga ou energia dissipada [m]

O primeiro termo da equação de Bernoulli é a pressão estática, que representa a energia de pressão. Já o segundo termo é a pressão dinâmica, que corresponde a energia cinética. O último termo é a energia de posição, expressando a altura de um ponto em relação a um nível de referência. Em sistemas de ventilação, esse termo possui um valor insignificante; entretanto, em líquidos, onde a densidade é maior, esse termo torna-se crucial.

As perdas no escoamento são predominantemente atribuídas à resistência viscosa do ar, ao atrito nas paredes do duto em curvas, aos acessórios presentes na tubulação, filtros, captadores, mudança de seção, entre outros (MACINTYRE, 1990).

Em 1850, Julius Weisbach propôs a seguinte correlação:

$$h_{pd} = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (3)$$

Onde:

f = fator de atrito de Darcy [adimensional]

L = comprimento do trecho da tubulação [m]

h_{pd} = perda distribuída (perda por atrito tipo Moody) [m]

O nome do fator de atrito foi concedido em homenagem a Henry Darcy, que em 1857, destacou a importância da rugosidade nos escoamentos turbulentos. O número de Reynolds, o formato do duto e a rugosidade tem influência sobre o fator de atrito (WHITE, 2011).

Em escoamento laminares, o fator de atrito dependerá apenas do número de Reynolds (a rugosidade não exerce ação sobre o fator de atrito).

$$f_{lam} = \frac{64}{Re} \quad (4)$$

Onde:

f_{lam} fator de atrito em escoamento laminar [adimensional]

Re = número de Reynolds [adimensional]

O número de Reynolds é dado pela seguinte fórmula:

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (5)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (6)$$

Onde:

ν = viscosidade cinemática [m^2/s]

μ = viscosidade dinâmica [$kg/m-s$]

Já em 1939, Colebrook uniu as equações de fator de atrito escoamento em parede lisa e totalmente rugoso e chegou na seguinte equação:

$$\frac{1}{f^{1/2}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re f^{1/2}} \right) \quad (7)$$

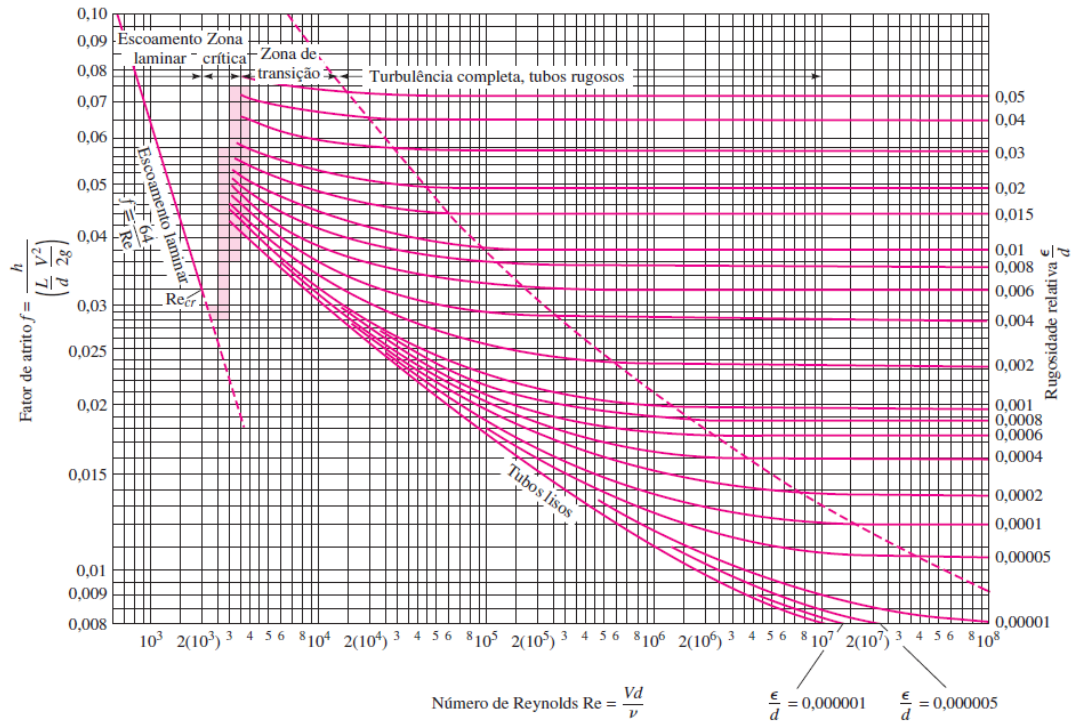
Onde:

ε = rugosidade da tubulação [m]

Esta equação é utilizada para determinar o fator de atrito em escoamento turbulento. Como calcular o fator de atrito pela fórmula de Colebrook não é uma tarefa trivial, pode-se recorrer ao diagrama de Moody. O diagrama de Moody apresenta uma precisão de 15 % em

relação a fórmula. Outra alternativa, é possível empregar a fórmula de Haaland, que possui uma variação de 2% em relação a Colebrook.

Figura 6: Diagrama de Moody para atrito em paredes lisas e rugosas.



Fonte: (WHITE, 2011).

Fórmula de Haaland:

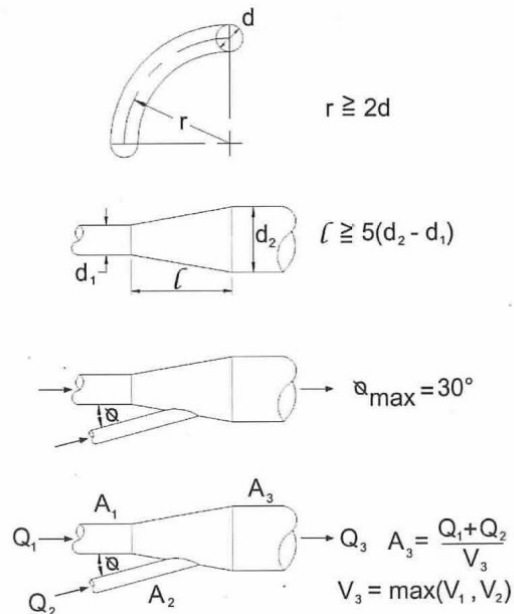
$$\frac{1}{f^{1/2}} \approx -1,8 \log \left[\left(\frac{\epsilon/D}{3,7} \right)^{1,11} + \frac{6,9}{Re} \right] \quad (8)$$

Na construção dos dutos, é crucial prestar atenção na sua geometria, principalmente em curvas, reduções, expansões e derivações. Dutos bem projetados são essenciais para reduzir as perdas de cargas, reduzindo a resistência ao fluxo de ar. Dependendo do *layout* da fábrica, a geometria precisa se adaptar ao o espaço físico existente. Isso implica em levar em consideração limitantes físicos, bem como garantir o acesso a alguma área ou equipamento, tudo isso de forma otimizada para se ter o menor gasto energético.

Além disso, é essencial a construção de portas de inspeção em pontos que possam haver algum tipo de bloqueio ou mudança de direção do fluxo de ar, pois é comum o acúmulo de

poeira nesses pontos. Assim, é necessária a instalação dessas aberturas para se ter acesso a limpeza dessas regiões.

Figura 7: Detalhes construtivos de acessórios.



Fonte: (CLEZAR e NOGUEIRA, 1999).

As perdas localizadas em curvas, reduções, entre outros acessórios, são proporcionais a pressão dinâmica, logo temos que a perda de carga localizada h_{pl} :

$$h_{pl} = C \frac{V^2}{2g} \quad (9)$$

Onde:

C = coeficiente de perda localizada [adimensional].

No Anexo B se tem as tabelas de perdas de cargas em alguns acessórios.

2.3.2 Captor

Macintyre (1990), define o captor como um dispositivo, que pela diferença de pressão entre o ambiente e o captor, induz uma corrente de ar para o seu interior. O objetivo do captor é a remoção de partículas, vapores ou gases que são gerados.

Para dimensionar um captor é necessário saber sua forma e dimensões, a vazão necessária para retirar o contaminante, sua posição em relação ao contaminante e a energia necessária para movimentar o ar (MESQUITA, GUIMARÃES e NEFUSSI, 1988).

Os captores podem ter dois tipos: enclausurante e externo. O captor enclausurante envolve o contaminante confinando-o, enquanto a externo não envolve a fonte poluidora.

Para calcular a vazão em um captor é necessário conhecer a velocidade do escoamento de ar no captor. As velocidades que atual em captor são: velocidade no duto, velocidade na face do captor e a velocidade de captura. A velocidade de captura é a velocidade a qual o contaminante é induzido e a velocidade na face é a velocidade na entrada do captor. A vazão é calculada a partir de $Q=VA$, A é a área da face aberta nos captores enclausurados e V é uma velocidade recomendada dependendo do tipo de captor e poluente que está sendo exaurido. Já em captores externos, a vazão tem que ser o suficiente para induzir a velocidade de captura no poluente (CLEZAR e NOGUEIRA, 1999).

A tabela (3) mostra as velocidades de captura recomendadas para cada tipo de dispersão de contaminante.

Tabela 3: Velocidades mínima recomendadas para o projeto de dutos.

Condição de dispersão do contaminante	Exemplos	Velocidades de captura (m/s)
Lançado com velocidade nula em ar calmo	Evaporação em tanques	0,25 – 0,5
Lançado com baixa velocidade em ar com movimento parado	Cabines de pintura, soldagem, enchimento intermitente de recipientes	0,5 – 1,0
Geração ativa em zona de movimento intenso	Pintura com pistola, carregamento de transportadores	1,0 – 2,5
Lançado com alta velocidade inicial em zonas de ar com movimento intenso	Esmerilhamento, jateamento abrasivo, tombamento.	2,5 – 10,0

Fonte: Adaptado de (ACGIH, 1998)

A vazão em captores de boca planas retangular e circulares é calculada como:

$$Q = (10x^2 + A)V_c \quad (10)$$

Onde:

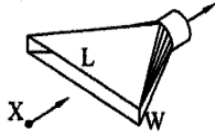
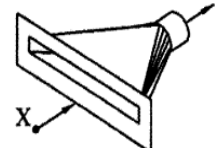
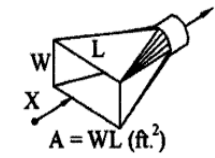
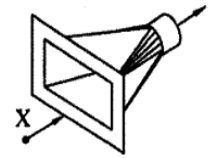
x = distância do ponto de captação até o captor [m]

A = área do captor [m²]

V_c = velocidade de captura [m/s]

Para outros tipos de captores a tabela (4) fornece as vazões.

Tabela 4: Vazões de captura.

Tipos de Captor	Descrição	Razão de Aspecto (W/L)	Vazão Volumétrica (Q)
	Fresta	$\leq 0,2$	$Q = 3,7LV_cX$
	Fresta flangeada	$\leq 0,2$	$Q = 2,8LV_cX$
	Abertura plana	$\geq 0,2$ ou circular	$Q = (10X^2 + A)V_c$
	Abertura flangeada	$\geq 0,2$ ou circular	$Q = (10X^2 + A)0,75V_c$

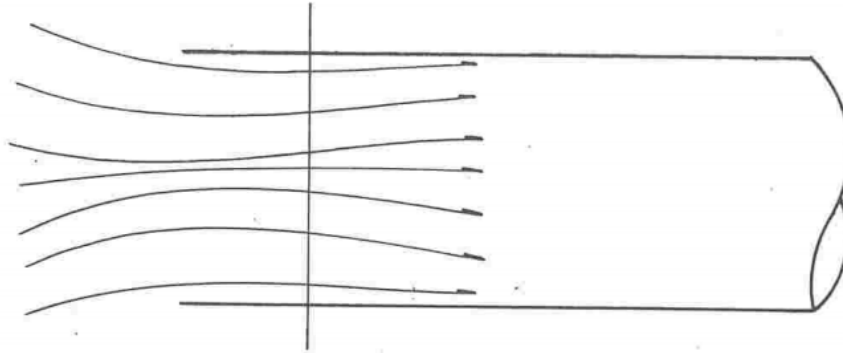
Fonte: (ACGIH, 1998).

O fluxo do fluido na entrada do captor sofre uma contração conhecida como vena contracta. Esta contração do fluido na entrada, faz com que a área da seção transversal do fluido diminua, fazendo com que a energia estática do fluido se transforme em energia cinética. Depois desta zona na entrada, a área que o fluido ocupa aumenta e a energia cinética se transforma em estática. Estas transformações de energia possuem perdas (MACINTYRE, 1990).

A American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) fornece a informações das vazões necessárias e a perda de carga em captores para alguns tipos de

equipamentos. O Anexo A tem as vazões e perdas de carga de captores recomendadas pela ACGIH para elevadores caçamba, transportares e processo de ensaque.

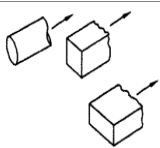
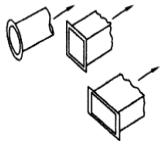
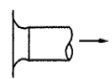
Figura 8: Configuração do fluxo na entrada (vena contracta).



Fonte: (MESQUITA, GUIMARÃES e NEFUSSI, 1988).

As perdas de cargas em captores são calculadas através da equação (9) e os coeficientes de perda podem ser encontrados na tabela (5).

Tabela 5: Coeficiente de perda de carga para captores.

Tipos de Captor	Descrição	Coeficiente de perda
	Aberturas planas	0,93
	Aberturas flangeadas	0,49
	Entrada em forma de cone	0,04

Fonte: (ACGIH, 1998)

2.3.3 Coletor

Equipamentos coletores desempenham um papel crucial em ambientes industriais, estes são projetados para capturar e reter poluentes contidos no ar antes que possam ser liberadas no

meio ambiente. Segundo Macintyre (1990), os mecanismos utilizados de coletas mais relevantes são:

- Filtragem: se utilizam da ação de filtragem para fazer a separação. Os mecanismos de separação são: impactação inercial, interceptação e difusão. O filtro de manga é um exemplo.
- Inércia: ocorre pela variação brusca da quantidade de movimento das partículas. Alguns exemplos são os ciclones e as câmaras inerciais.
- Gravidade: ocorre a sedimentação das partículas devido ao seu peso. As câmaras gravitacionais/sedimentação se utilizam desse mecanismo de coleta.
- Lavagem: é pulverizado um jato de água sobre o ar com as partículas contaminantes, fazendo com que a partícula fique retida pelas gotículas de água. Como exemplo estão lavadores ciclônicos e os lavadores venturi.
- Eletroestática: as partículas de contaminantes são ionizadas, através de uma diferença de potencial. Fazendo as partículas se moverem em direção ao polo de carga elétrica contrária, onde são capturadas. Os precipitadores eletroestáticos utilizam esse mecanismo de coleta.

O tipo de coletor que será utilizado dependerá de alguns parâmetros que se deseja alcançar, características do contaminante, preço entre outros, a seguir estão listados alguns fatores que influenciarão na escolha do coletor:

- Método de eliminação do material coletado;
- Grau de purificação desejado;
- Concentração, tamanho e distribuição granulométrica das partículas;
- Propriedades físicas e químicas do contaminante;
- Condições do ar de transporte;
- Facilidade de limpeza e manutenção;
- Fator econômico.

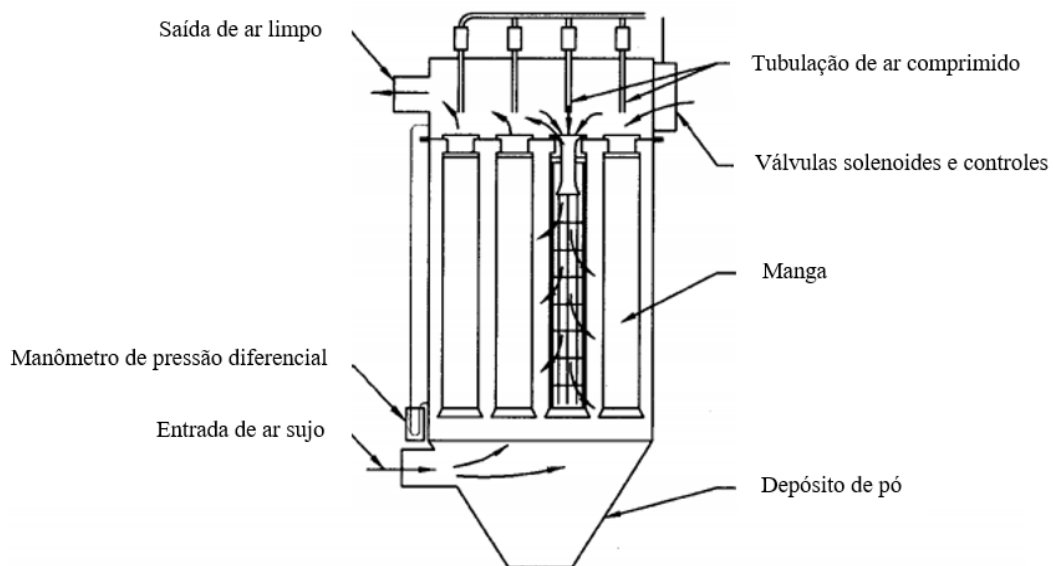
Os principais equipamentos utilizados no despoejamento em unidades de beneficiamento de sementes são os filtros de manga e os filtros cartuchos.

O filtro de manga é um dos coletores mais utilizados na ventilação industrial, possuindo uma eficiência de retenção de particulados por volta dos 90%. Neste dispositivo, o ar contaminado é direcionado através de um meio fibroso denominado “manga”. Diferente dos filtros mais antigos, a extremidade aberta da manga é posicionada na parte superior, promovendo um fluxo de ar que ocorre de cima para baixo, indo da região externa para a interna

da manga, a manga é inflada com o auxílio de uma armação metálica (CLEZAR e NOGUEIRA, 1999).

Neste tipo de sistema de filtragem, a limpeza é realizada por meio de um jato de ar comprimido, gerando uma onda de pressão ao longo do tecido filtrante e resultando no desprendimento das partículas retidas. À medida que o tecido retém poeira, ocorre um aumento na perda de pressão no filtro e, simultaneamente, a eficiência do filtro também aumenta. Geralmente, esses filtros incluem um manômetro que medem a diferença de pressão entre a entrada de ar sujo e a saída de ar purificado. Quando essa pressão ultrapassa um limite determinado, o processo de limpeza é acionado.

Figura 9: Filtros de mangas antigos



Fonte: (ACGIH, 1998)

Nos filtros cartuchos, o meio filtrante é plissado e enrolado em um suporte cilíndrico. É utilizado para remover partículas de cerca de 100 μm até 1 μm ou menos. Eles são preferidos para níveis de contaminação inferiores 100 mg/kg (massa da poeira pela massa de ar) (ASHRAE, 2007). A forma de limpeza do filtro é similar ao do filtro de manga.

Os filtros de mangas são utilizados para a captura de particulados maiores e em maior concentração, enquanto os filtros de cartuchos são utilizados para capturar partículas menores com uma concentração menor e possui uma menor perda de carga.

2.3.4 Ventiladores

Segundo Macintyre, ventiladores são turbomáquinas geratrizes, que tem como objetivo o deslocamento de gases. Eles convertem a energia mecânica do rotor em energia de pressão e energia cinética para o fluido. Com essa energia, o fluido é capaz de vencer as perdas de energia nos escoamentos.

Os ventiladores podem ser centrífugos ou axiais. Nos ventiladores centrífugos o escoamento do fluido é radial, enquanto nos axiais o escoamento é paralelo ao eixo. Os ventiladores centrífugos são melhores para lidar com escoamentos com maior resistência ao fluxo de ar.

Os ventiladores centrífugos de pás radiais são indicados para sistemas que contém grandes quantidades de particulados no ar, eles não possuem grande eficiência comparados aos outros. Os de pás inclinadas para frente possuem maior eficiência, mas não podem trabalhar com material particulado. Já os de pás inclinadas para frente apresenta eficiência elevada e tem uma autolimitação de potência (CLEZAR e NOGUEIRA, 1999).

A potência no eixo do ventilador pode ser calculada através da pressão estática ou da pressão total.

$$W_e = \frac{\dot{m}P_t}{\eta_t} = \frac{\dot{m}P_e}{\eta_e} \quad (11)$$

Onde:

\dot{m} = vazão mássica [kg/s]

W_e = potência no eixo do ventilador [W]

P_t = pressão total do ventilador [Pa]

P_e = pressão estática do ventilador [Pa]

η_t = eficiência total do ventilador

η_e = eficiência estática do ventilador

2.3.5 Balanceamento do sistema de dutos

Segundo Clezar (1999), um sistema está balanceado quando a vazão/velocidade em cada ramal está de acordo com o projeto. Existem dois métodos de balanceamento: com registros e balanceamento estático.

No balanceamento por registros, são utilizadas válvulas/registro para aumentar a perda de carga do ramal e, conseqüentemente, alterar a vazão deste ramal. As vantagens desse método são que o projeto é fácil e possui grande flexibilidade. As desvantagens são que o operador pode mudar a configuração do registro (alterando a vazão do projeto), é de difícil ajuste e o registro pode entupir e danificar.

Já no balanceamento estático, todos os ramais do sistema são planejados para ter a mesma perda de carga, ou seja, são alteradas as dimensões dos diâmetros dos dutos e as vazões de forma a obter o equilíbrio estático entre os ramais. As vantagens desse método é que o operador não pode alterar a vazão do projeto e ocorre menos obstruções. A desvantagem é a dificuldade do projeto e a menor flexibilidade de vazão.

2.3.6 Medições no escoamento

É importante fazer medições de velocidade, vazão e pressão estática nos sistemas de ventilação, principalmente em testes de validação de projetos e balanceamento do sistema de dutos. As medições também permitem aproveitar as experiências obtidas com projetos já implementados, fornecendo informações como perda de carga, faixa de operação, entre outros, valiosas ao se planejar novos projetos. Além disso, permite planos de manutenção, pois ajuda a estabelecer planos de manutenção de acordo com os desempenhos dos equipamentos (CLEZAR e NOGUEIRA, 1999).

Alguns dos instrumentos de medição mais utilizados em fluxos de ar são: o tubo de Pitot e o anemômetro.

Com o tubo de Pitot é possível obter as pressões do escoamento de ar: estática, dinâmica e total. Ele é formado por dois tubos concêntricos, no qual o tubo interno medi a pressão total e o tubo externo a pressão estática. O tubo interno e o externo são ligados por mangueiras a um manômetro, e como ele estará medindo a diferença entre a pressão total e a estática o seu resultado será a pressão dinâmica. E com a seguinte relação encontramos a velocidade do escoamento.

$$\rho_m g \Delta H = \rho_{ar} \frac{V^2}{2} \quad (12)$$

Onde:

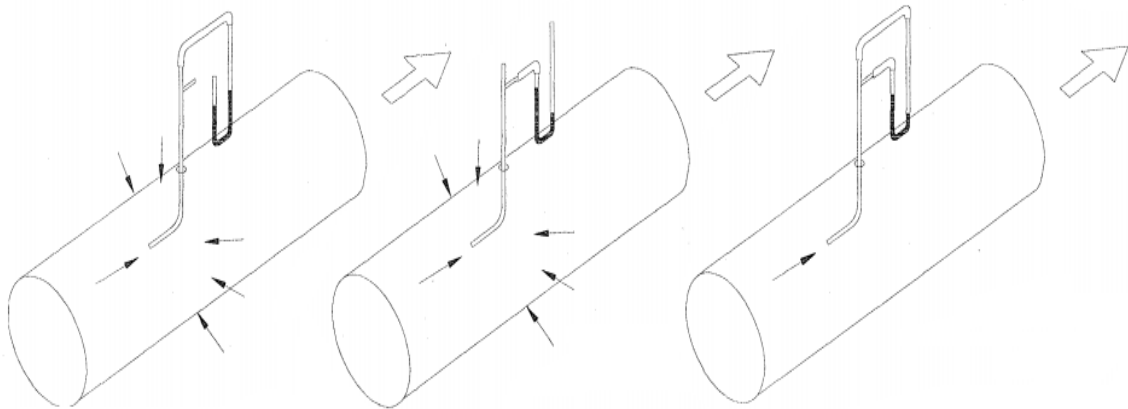
ρ_m = densidade do fluido do manômetro [kg/m³]

ΔH = diferença de altura do manômetro [m]

ρ_{ar} = densidade do fluido do ar [kg/m³]

Se conectar apenas a parte externa do tubo de Pitot ao manômetro encontra-se a pressão estática do ar e apenas a parte interna encontra-se a pressão total.

Figura 10: Da esquerda para direita as medidas de pressão total, estática e dinâmica.



Fonte: Adaptado (ACGIH, 1998).

O anemômetro é um dispositivo utilizado para medida velocidade média de um fluxo de ar. Existem vários tipos de anemômetros e cada um possui um princípio de funcionamento. O anemômetro clássico obtém a velocidade baseada na rotação de seu rotor/hélice, quanto maior a rotação maior a velocidade. Também existe o anemômetro de fio quente, quando se tem uma corrente passando por fio quente, este perde calor, e a perda de calor depende da velocidade de escoamento (MACINTYRE, 1990).

A velocidade não pode ser calculada em apenas um ponto, pois a velocidade em diferentes partes da seção do duto não são uniformes. Por isso, se deve calcular a velocidade em diferentes pontos e depois calcular a média da mesma. Logo, a vazão pode ser calculada como:

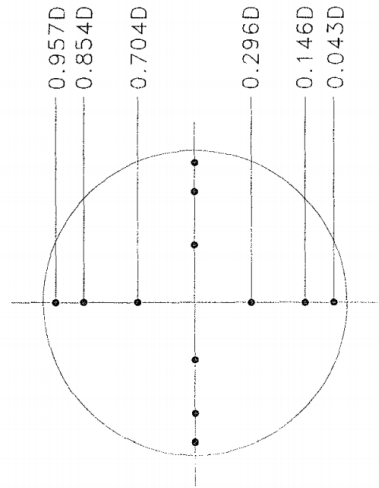
$$Q = A \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{n} \quad (13)$$

Onde:

n = número de amostras

Para que as amostragens sejam representativas, se tem a localização que deverá ser feitas as medições. As medições não deverão ser feitas próximas a curvas, reduções e outros tipos de acessórios.

Figura 11: Profundidade de inserção transversal recomendada para dutos redondos menores que 6 polegadas.



Fonte: (ACGIH, 1998).

3 METODOLOGIA

Os equipamentos atendidos pelo sistema de exaustão na área do tratamento de semente de milho são: 2 transportadores, tratador de sementes, elevador caneca, 2 silos, máquina de ensaque e 2 moegas de descarga. Os pontos escolhidos são aqueles que produzem a movimentação da semente de milho, ou seja, em descargas e entradas de equipamentos.

A primeira etapa de dimensionamento do sistema de exaustão é conhecer qual será a vazão de ar em cada ponto de captação. Ao todo são 14 pontos de captura de poeira. A tabela (6) especifica quais são os pontos de captura e sua respectiva vazão.

Tabela 6: Pontos de captação e vazões necessárias nesses pontos.

Elemento	Descrição	Dimensão	Critério Vazão	Vazão [m ³ /h]
5	Caixa para sementes	$A=7,85*10^{-3} \text{ m}^2$	$Q=A*V$	566
7	Chute transportador	$A=0,244 \text{ m}^2$	$Q=3652,8*A$	892
8	Pé elevador	$A=0,48 \text{ m}^2$	$Q=1826,3*A$	877
10	Ensaque	-	$Q=850$	850
13	Silo	$A=7,85*10^{-3} \text{ m}^2$	$Q=A*V$	566
14	Silo	$A=7,85*10^{-3} \text{ m}^2$	$Q=A*V$	566
17	Cabeça elevador	$A=0,48 \text{ m}^2$	$Q=1826,3*A$	877
18	Bica transportador	$L=0,8 \text{ m}$	$Q=1949,7*L$	1560
20	Chute transportador	$A=0,244 \text{ m}^2$	$Q=3652,8*A$	892
22	Moega tratador	$L=0,8 \text{ m}$	$Q=1949,7*L$	1560
24	Balança tratador	$A=7,85*10^{-3} \text{ m}^2$	$Q=A*V$	566
26	Caçamba tratador	$A=7,85*10^{-3} \text{ m}^2$	$Q=A*V$	566
28	Moega tratador	$A=7,85*10^{-3} \text{ m}^2$	$Q=A*V$	566
29	Chute tratador	$A=7,85*10^{-3} \text{ m}^2$	$Q=A*V$	566
Total:				11470

Fonte: Autoria Própria.

Segundo a ACGIH, a vazão recomendada para o ensaque, elevador e transportadores são:

- 200 cfm/ft² ou 3652,8 m³/h por m² de abertura para polia frontal nos transportadores (descarga);
- 350 cfm/ft ou 1949,7 m³/h por m de largura do transportador para a polia traseira com a velocidade do transportador menor que 1 m/s;
- 500 cfm ou 850 m³/h para o ensaque;
- 100 cfm/ft² 1826,3 m³/h por m² da área transversal do elevador.

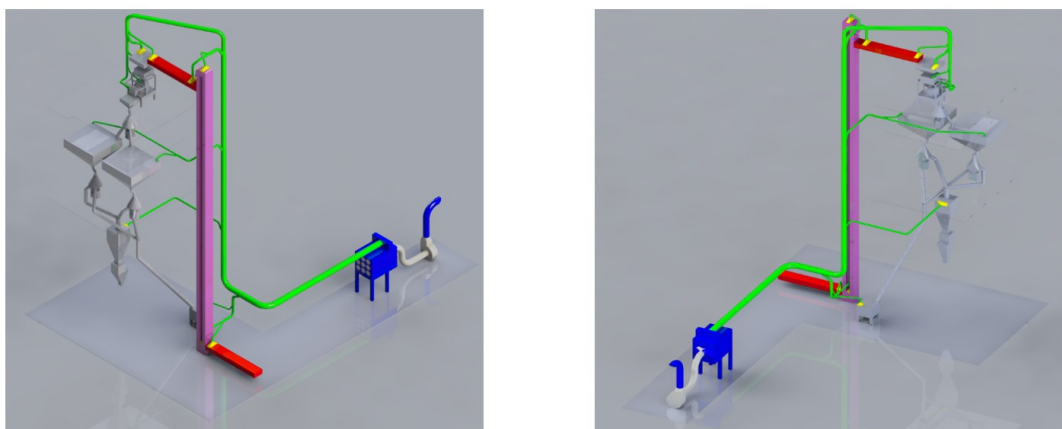
No Anexo A tem o formato dos captores e a perda de carga nesses casos. Velocidades de captura no captor foram de 1-2,5 m/s.

Para os pontos restantes foram considerados pontos de capturas enclausurados com diâmetros Ø 100 mm (área de $7,85 \cdot 10^{-3}$ mm²) a uma velocidade de 20 m/s.

Logo, a vazão requerida pelo sistema de exaustão é 11470 m³/h de ar.

Com as vazões definidas, é necessário definir como será o *layout* do sistema de dutos e suas dimensões. O sistema de dutos foi desenhado de forma a atender os 14 pontos de captação e respeitar as limitações físicas da área de tratamento.

Figura 12: *Layout* do sistema de exaustão.



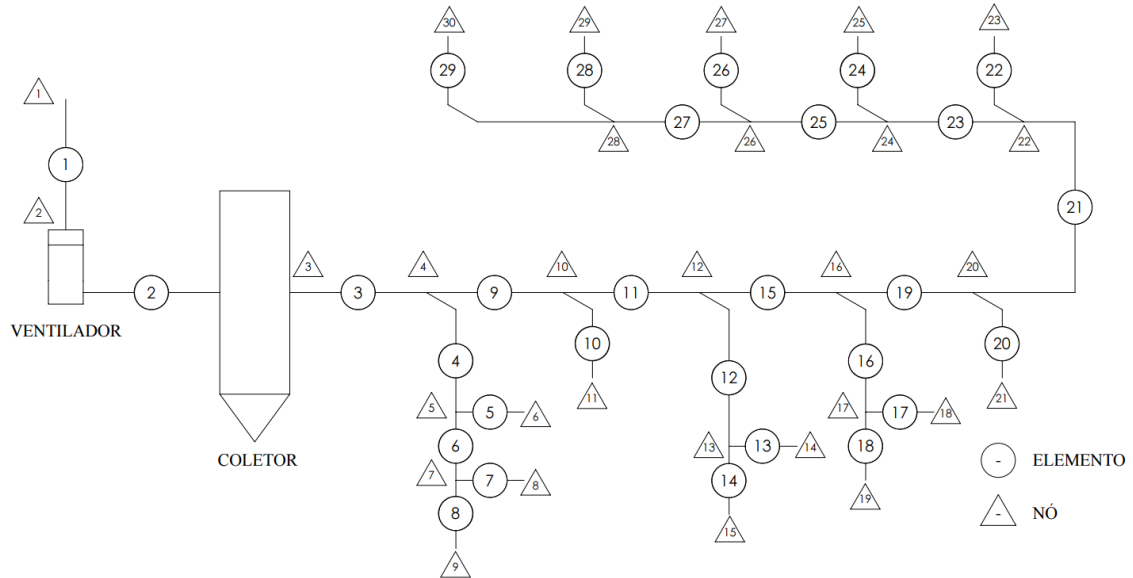
Fonte: Autoria própria.

Para facilitar a visualização do sistema de dutos, o sistema pode ser representado por um desenho esquemático separado em nós e elementos. Os elementos representam os dutos que possuem o mesmo diâmetro e são ligados por nós. Elementos que compartilham o mesmo nó possuem a mesma pressão, e a vazão que entra em um nó tem que ser igual a vazão que sai (continuidade).

De acordo com a tabela (3) (velocidades mínimas recomendadas para escoamento em dutos), a velocidade do projeto deve estar entre 18-23 m/s. Para o projeto, a velocidade utilizada

será 20 m/s para a parte suja (antes de entrar coletor) e 18 m/s para a parte limpa do escoamento (depois do coletor).

Figura 13: Desenho esquemático do sistema de exaustão.



Fonte: Autoria própria.

Utilizando a equação da continuidade nos nós e considerando as velocidades recomendadas, é possível encontrar o diâmetro de cada elemento.

Tabela 7: Valore da velocidade, vazão e diâmetro para cada elemento do sistema de exaustão.

Nº	V [m/s]	Q [m³/h]	Ø [mm]	Nº	V [m/s]	Q [m³/h]	Ø [mm]	Nº	V [m/s]	Q [m³/h]	Ø [mm]
1	18	11483	475	11	20	8166	380	21	20	3823	260
2	18	11483	475	12	20	1108	140	22	20	1540	165
3	20	11451	450	13	20	565,5	100	23	20	2376	205
4	20	2376	205	14	20	565,5	100	24	20	565,5	100
5	20	565,5	100	15	20	7127	355	25	20	1832	180
6	20	1732	175	16	20	2376	205	26	20	565,5	100
7	20	883,6	125	17	20	883,6	125	27	20	1108	140
8	20	883,6	125	18	20	1540	165	28	20	565,5	100
9	20	9048	400	19	20	4756	290	29	20	565,5	100
10	20	883,6	125	20	20	883,6	125				

Fonte: Autoria própria.

Antes de calcular a perda de carga, é preciso definir qual o coletor que será utilizado. Segundo Mancintyre (1990), a razão entre a vazão de ar (cfm) e a área do filtro de tecido (ft²), conhecida como relação ar/pano, varia de 1,5 - 3,5, dependendo do tipo de poeira. Considerando o caso mais conservador, a relação ar/pano igual a 1,5, e a vazão de 11470 m³/h, a área do filtro será de 420 m². O coletor escolhido foi o filtro cartucho Downflo Evolution 3-18 da Donaldson, que possui área filtrante de 424,8 m². A perda de carga no filtro será considerada como 150 mmca.

A perda de carga será feita a partir da equação de Bernoulli. Considerando que a perda de carga em um mesmo elemento a velocidade não varia, e que a altura z é desprezível para o ar, a equação se resume a:

$$\frac{P_{n1}}{\rho g} - \frac{P_{n2}}{\rho g} = \Delta P_{n1-n2} [m] = h_{p_e} = h_{pl_e} + h_{pd_e} = \left(\sum C_e + f_e \frac{L_e}{D_e} \right) \frac{V_e^2}{2g} \quad (14)$$

Onde e representa o elemento e n o nó.

Considerações para o cálculo da perda de carga:

- Ar considerado gás ideal;
- Altitude de Uberlândia 863 m;
- Pressão ambiente 91,6 kPa;
- Temperatura 25 °C;
- Densidade do ar de 1,07 kg/m³;
- Viscosidade dinâmica 1,849. 10⁻⁵ kg/m-s;
- Rugosidade do aço comercial 0,05 mm;
- Válvulas borboletas fechadas;
- Os valores de C e L estão presentes no Apêndice A.
- Todos os cálculos utilizados para o cálculo da perda de carga, regressões polinomiais de curvas, propriedades do ar e balanceamento do sistema foram feitos utilizando o *software* Engineering Equation Solver (EES). Todo o memorial de cálculo está no Apêndice B deste trabalho.

O cálculo da perda de carga é feito considerando os ramais dos pontos de captura de poeira até a saída do ar limpo depois do ventilador. Como se percebe na tabela (8), as perdas de cargas não estão balanceadas, logo, ramais com menor perda de carga tem maiores velocidades. O ventilador deverá fornecer pressão estática suficiente para vencer toda perda de carga ao

longo do trajeto do ar, logo a pressão estática do ventilador deverá ser igual a maior perda de carga calculada nos ramais. A maior perda de carga é 263,3 m.

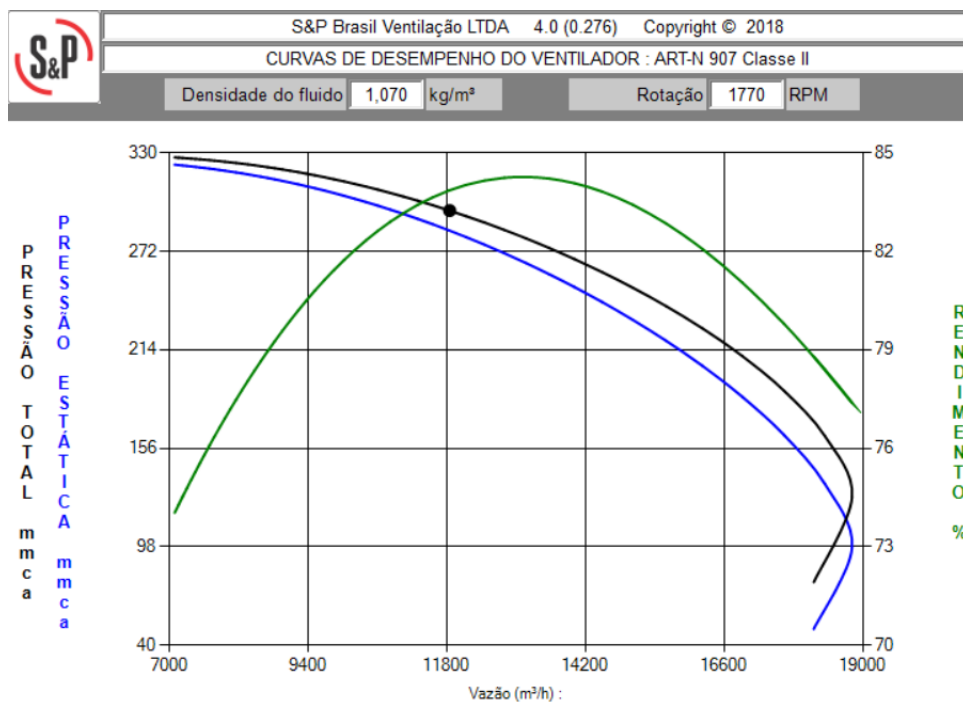
Tabela 8: Perda de carga nos ramais.

Trecho entre nós	Perda de carga [m]	Trecho entre nós	Perda de carga [m]
1-6	218,5	1-19	233,3
1-8	221,4	1-21	237,2
1-9	212,2	1-23	239,2
1-11	229,8	1-25	249,3
1-14	243,6	1-27	251,8
1-15	258,4	1-29	263,3
1-18	242,7	1-30	250,5

Fonte: Autoria Própria.

O ventilador foi selecionado utilizando o *software* VORTEX da Otam Soler & Palau Brasil. Os dados para escolha do ventilador foram: vazão 11470 m³/h e pressão estática 263,3 m. O ventilador escolhido foi o ART-N 907 com motor acoplado diretamente ao ventilador e rotação de 1770 RPM.

Figura 14: Curva ventilador ART-N 907.



Fonte: Otam Soler & Palau Brasil

Vale ressaltar que, para os cálculos de perda de carga, as pressões devem estar em metro de ar. Como na curva do ventilador e a perda de pressão no filtro estão em mmca, deve ser feita uma conversão para metro de ar.

$$\rho_{\text{água}} g \frac{P_{\text{mmca}}}{1000} = \rho_{\text{ar}} g P_m \quad (15)$$

Onde:

P_{mmca} = pressão [mmca]

P_m = pressão [m]

Após escolha do ventilador, é necessário realizar o balanceamento do sistema de exaustão com o ventilador. O tipo de balanceamento escolhido foi com registros. O tipo de registro selecionado foi a válvula borboleta e está presente em todos os pontos de captura.

Para obter a perda de carga localizada da válvula, foi feita uma regressão polinomial de grau 3 da perda de carga localizada em função da abertura. Assim, foi possível adicionar a abertura das válvulas nas equações de perda de carga.

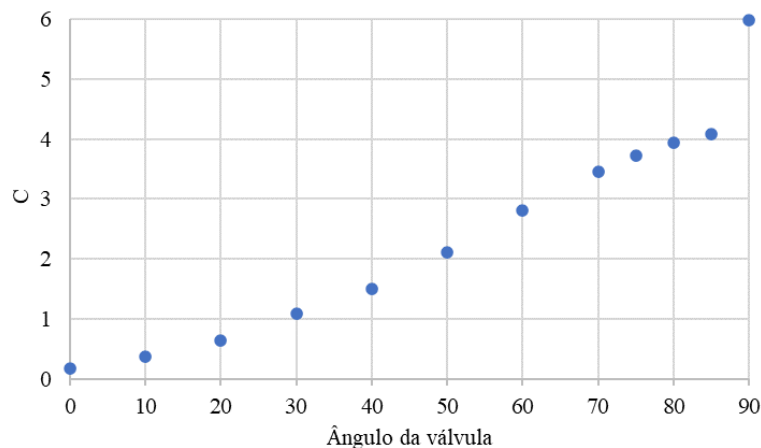
$$C_V = -7,196 \cdot 10^{-6} \theta^3 + 0,001168 \theta^2 - 0,00119 \theta + 0,228 \quad (16)$$

Onde:

C_V = perda de carga localizada da válvula

θ = Ângulo da válvula

Figura 15: Curva do coeficiente de perda localizada em função da abertura $D/D_0 = 0,7$.



Fonte: (ASHRAE, 2005).

Para o cálculo das aberturas das válvulas no balanceamento, foi criada uma função objetivo para minimizar o erro das velocidades nos pontos de captura de ar. A velocidade que deve ser atingida nos elementos de captação de poeira é 20 m/s/. As variáveis independentes que serão alteradas para minimizar a função objetivo são as aberturas das válvulas.

$$obj = \sum_i (V_i - 20)^2 \quad (17)$$

Onde:

V_i = velocidade nos elementos de captura [m/s]

É importante constar, que a precisão da perda de carga encontrada para o sistema poderá ser afetada pelos erros advindos da equação utilizada para encontrar o fator de atrito (resultados podem variar até 15%), assim como os coeficientes de perda de carga localizada utilizados no projeto. Por isso, é importante a validação do projeto após a sua montagem e o balanceamento do sistema é fundamental para corrigir quaisquer variações do sistema.

4 RESULTADOS

Após a escolha da geometria do sistema de dutos, coletor e ventilador, foram realizadas os cálculos para encontrar as velocidades e vazões resultantes em cada elemento do sistema. Na primeira análise, todas as válvulas borboletas estavam abertas. Foi feita uma regressão polinomial para a curva do ventilador.

$$h_g = -6,367.10^{-7}Q^2 + 0,01022Q + 271,2 \quad (18)$$

Onde:

h_g = ganho de pressão estática do ventilador [m]

Q = vazão de ar do ventilador [m³/h]

Após a inserção da curva do ventilador nas equações, as velocidades encontradas estão na tabela (9).

Tabela 9: Velocidades encontradas antes do balanceamento.

Elemento	Vazão [m ³ /h]	Velocidade Real [m/s]	Elemento	Vazão [m ³ /h]	Velocidade Real [m/s]
5	732,3	25,9	18	1815	23,57
7	1073	24,29	20	1015	22,97
8	1291	29,22	22	1697	22,05
10	1026	23,23	24	522,6	18,48
13	579,7	20,5	26	506,4	17,91
14	483,8	17,11	28	410,3	14,51
17	833,4	18,86	29	538,5	19,05

Fonte: Autoria própria.

A vazão do ventilador encontrada foi de 12524 m³/h e ganho de pressão de 252,3 m. Percebe-se que as velocidades nos elementos 14, 26 e 28 estão abaixo da velocidade recomendada (18 – 23 m/s) e, conseqüentemente, da velocidade de projeto 20 m/s, enquanto que nos pontos 5, 7, 8, 10 e 18 as velocidades estão acima. O problema das velocidades baixas é que a poeira pode se acumular em algumas partes da tubulação, obstruindo a passagem do

escoamento de ar, sendo necessário realizar a limpeza desse trecho da tubulação. Já para os ramais de altas velocidades, fará com que a velocidade de captura seja elevada, podendo ocorrer o arrasta não apenas da poeira, mas também da semente de milho.

Portanto, é necessário realizar o balanceamento do sistema. Para o balanceamento do sistema de exaustão, foi encontrado a abertura das válvulas borboletas de forma a minimizar a função objetivo, descrita pela equação (17).

Tabela 10: Velocidades, vazões e aberturas de válvulas encontradas após o balanceamento.

Elemento	Vazão [m ³ /h]	Velocidade Real [m/s]	θ	Elemento	Vazão [m ³ /h]	Velocidade Real [m/s]	θ
5	565,7	19,89	55,73	18	1539	20,13	43,22
7	882,8	20,07	53,38	20	883,9	20	40,68
8	883,1	19,93	60,6	22	1539	19,87	39,07
10	883,4	19,89	46,54	24	565,3	20,01	29,96
13	565,2	19,99	34,16	26	565	20,04	27,81
14	565,9	19,98	17,63	28	565,6	19,84	11,27
17	883	20,04	35,07	29	565,2	19,9	28,67

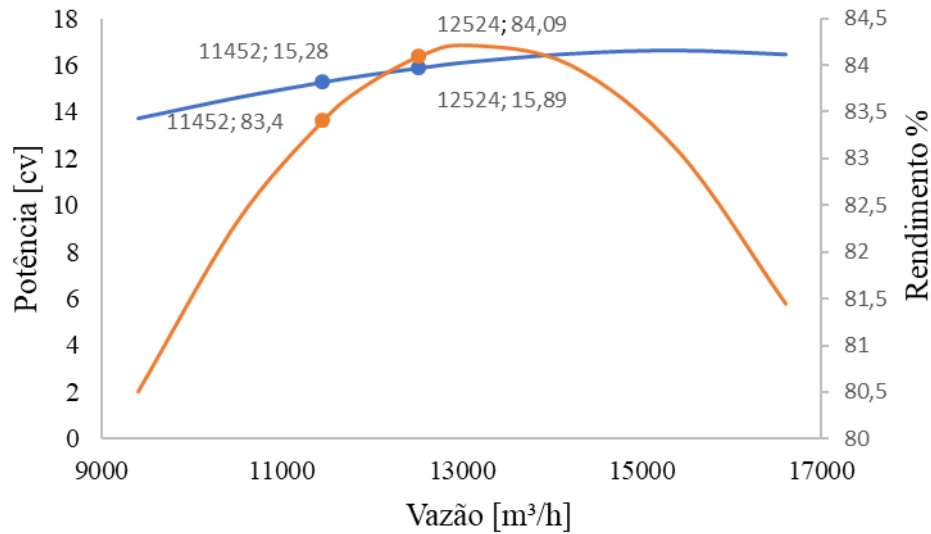
Fonte: Autoria própria.

A vazão do ventilador encontrada foi de 11452 m³/h e ganho de pressão de 265,4 m. Percebe-se que as velocidades resultantes após o balanceamento do sistema são próximas a velocidade do projeto (20 m/s), com o desvio máximo de 0,16 m/s. Com isso, pode-se considerar que o sistema está balanceado e cumpre todos os requisitos de vazão/velocidade nos pontos captura.

Com a equação (11) para o cálculo da curva de potência e os valores fornecidos da potência total e rendimento do ventilador pela figura (14), tem-se que a curva de potência do eixo do ventilador em função da vazão.

A potência necessária no eixo é de 15,28 cv depois do balanceamento e 15,89 cv antes do balanceamento. Considerando que um motor elétrico tem eficiência de 90%, a potência necessária é de 17,7 cv, portanto um motor de 20 cv deverá ser escolhido. Como a rotação do ventilador é por acoplamento direto no ventilador e a rotação deverá ser 1770 rpm, o motor deverá ser ter 4 polos.

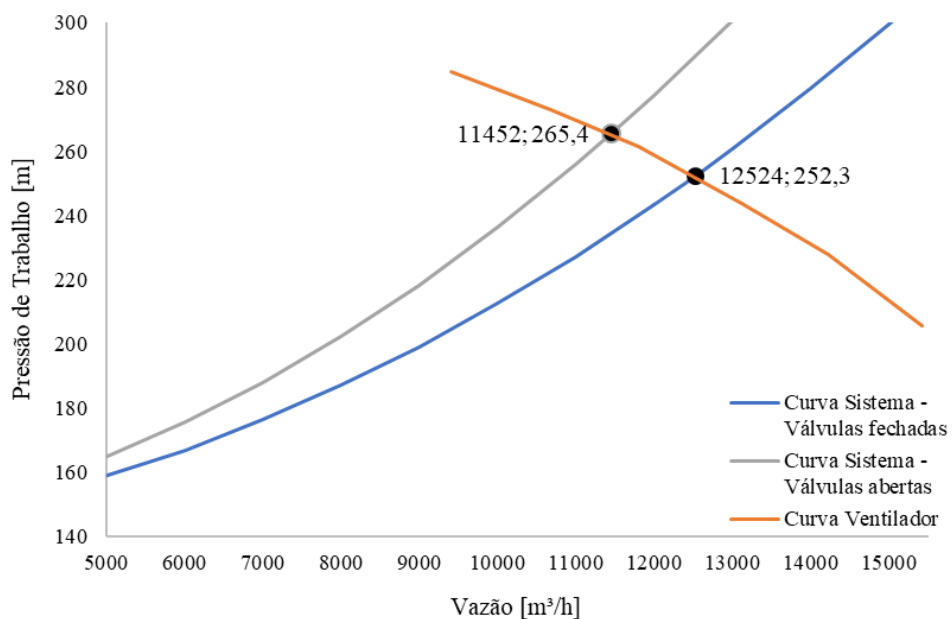
Figura 16: Curva da potência no eixo para o ventilador.



Fonte: Autoria própria.

Para uma visualização melhor do que acontece após o balanceamento, foi feito um gráfico que contém a curva de perda de carga do sistema de exaustão antes e depois do balanceamento junto com a curva do ventilador. O ponto de intersecção da curva do sistema com a curva do ventilador é o ponto de operação do ventilador. Observa-se que depois do balanceamento, houve um aumento da perda de carga do sistema, o que proporcionou a diminuição da vazão do sistema.

Figura 17: Curva da perda de carga do sistema junto com a curva do ventilador.



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho destaca a importância da instalação do sistema de ventilação local exaustora nas unidades de beneficiamento de sementes. Nessas unidades, existem vários processos que geram grandes quantidades de poeira, tornando o despoeiramento crucial para se ter um local de trabalho mais seguro para os funcionários, visto que o acúmulo de poeira pode desencadear em uma explosão e afetar as vias respiratórias dos trabalhadores.

A partir dos resultados obtidos, ficou claro que o desequilíbrio nas velocidades de ar ao longo do sistema de exaustão pode resultar em problemas como o acúmulo de poeira nos dutos, vazão menor que a recomendada e até arraste de sementes. É evidente a importância da análise, otimização e balanceamento do sistema de exaustão. Através do balanceamento, é possível ajustar o sistema para que as vazões fiquem dentro dos limites desejados.

A manutenção do sistema de exaustão é essencial para garantir os parâmetros do projeto.

Vale ressaltar, que se as condições e necessidades do projeto se alterarem dentro de um certo limite, pode ser feito outro balanceamento do sistema como uma alternativa vantajosa em relação a refazer o projeto ou mudar equipamentos e dutos.

O trabalho demonstrou que as conformidades com as especificações de projeto são cruciais para uma operação segura e eficaz do sistema.

REFERÊNCIAS

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Applications**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2007.

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Fundamentals**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2005.

ACGIH - AMERICAN CONFERENCE OF GOVERNMENTAL INDUSTRIAL HYGIENISTS. **Industrial Ventilation A Manual of Recommended Practice**. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. 23^a. ed. Cincinnati, Ohio 1998.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Tabela de dados – Produção e balanço de oferta e demanda de grãos 10/08/23. **CONAB**, 2023. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>>. Acesso em: 25 de set. de 2023.

CBS – CHEMICAL SAFETY BOARD. **CBS**, 2023. Disponível em: <<https://www.csb.gov/imperial-sugar-company-dust-explosion-and-fire/>>. Acesso em: 27 de ago. de 2023.

COSTA, E. C. **Ventilação**. 6^a. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

CLEZAR, C. A.; Nogueira. A. C. A. **Ventilação Industrial**. Florianópolis. 1999.

CREDER, H. **Instalações de ar condicionado**. 6^a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

DONALDSON. **Donaldson**, 2023. Disponível em: <<https://www.donaldson.com/content/dam/donaldson/dust-fume-mist/literature/north-america/equipment/dust-collectors/cartridge/downflo-evolution/f118005/Downflo-Evolution-Dust-Collector.pdf>> . Acesso em: 27 de ago. de 2023.

GIMENEZ, Izabel. Explosão em Palotina: tudo sobre a tragédia em silo da C. Vale. **GLOBO RURAL**, 2023. Disponível em: <<https://globorural.globo.com/agricultura/noticia/2023/07/explosao-em-palotina-tudo-sobre-a-tragedia-em-silo-da-cvale.ghtml>>. Acesso em: 27 de ago. de 2023.

MACINTYRE, A. J. **Ventilação industrial e controle da poluição**. 2ª ed. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1990.

MESQUITA, A. L. S.; GUIMARÃES, F. A.; NEFUSSI, N. **Engenharia de Ventilação Industrial**. São Paulo: CETESB, 1988. 442 p.

NFPA 68 – NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **Explosion Protection by Deflagration Venting**. National Fire Protection Association. 2007.

NIDERA SEMENTES. A história do milho. **Nidera Sementes**, 2021. Disponível em: <<https://somosmilhoes.com/milho/>>. Acesso em: 27 de ago. de 2023.

OTAM SOLAR & PALAU. **OTAM S&P**, 2023. Disponível em: <<https://solerpalau.com.br/index.php/home/ferramentasselecao>>. Acesso em: 27 de ago. de 2023.

POHNDORF, R. S.; LAAN, L. F. V. D.; RUTZ, D.; OLIVEIRA, M.; PERES, W.B.; GUIMARÃES, D. S.; ELIAS, M. C. **Aspectos de segurança do trabalho ambiental, operacional e de saúde em unidades de armazenamento e industrialização de grãos**. Laboratório de Pós-Colheita, Industrialização e Qualidade de Grãos – Departamento de Ciência e Tecnologia Agroindustrial - Faculdade Agronomia Eliseu Maciel - Universidade Federal de Pelotas, 2010.

PREVIERO, C. A. **Modelo de gestão de qualidade para usinas de beneficiamento de semente de milho**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

PURDUE UNIVERSITY. **Purdue University**, 203. Disponível em: <https://engineering.purdue.edu/FFP/research/dust-explosions/Dust_Explosions_2022_Purdue.pdf>. Acesso em: 27 de ago. de 2023.

SILVA, J. D. S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. 2ª. ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. 560 p.

TIETBOEHL, C. N. F. **As doenças respiratórias ocupacionais causadas pela poeira na armazenagem de grãos vegetais**. 2004. Tese (Doutorado em Medicina) – Programa de Pós-graduação em Medicina Interna, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

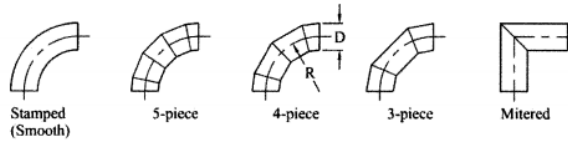
UNEM – UNIÃO NACIONAL DO ETANOL E MILHO. Unem projeta alta de 36% na produção de etanol de milho. **UNEM**, 2023. Disponível em: <<https://etanoldemilho.com.br/2023/03/07/unem-projeta-alta-de-etanol-de-milho/>>. Acesso em: 27 de ago. de 2023.

USDA – United States Department of Agriculture. Grain: World Markets and trade. **USDA**, 2023. Disponível em: <<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/grain.pdf>>. Acesso em: 27 de ago. de 2023.

WHITE, F. M. **Mecânica dos fluidos**. 6ª. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

ANEXO

ANEXO A: Tabelas de perda de carga



	R / D				
	0.75	1.00	1.50	2.00	2.50
Stamped	0.33	0.22	0.15	0.13	0.12
5-piece	0.46	0.33	0.24	0.19	0.17*
4-piece	0.50	0.37	0.27	0.24	0.23*
3-piece	0.54	0.42	0.34	0.33	0.33*

* extrapolated from published data

OTHER ELBOW LOSS COEFFICIENTS

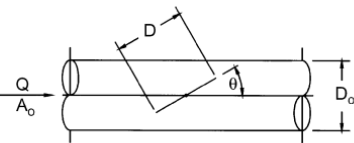
Mitered, no vanes	1.2
Mitered, turning vanes	0.6
Flatback (R/D = 2.5)	0.05 (see Chapter 5, Figure 5-20)

NOTE: Loss factors are assumed to be for elbows of "zero length." Friction losses should be included to the intersection of centerlines.

Fonte: (ACGIH, 1998).

CD9-1 Damper, Butterfly

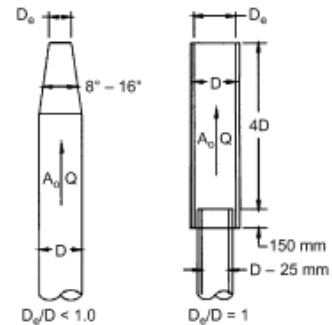
D/D_o	C_o Values											
	θ											
	0	10	20	30	40	50	60	70	75	80	85	90
0.5	0.19	0.27	0.37	0.49	0.61	0.74	0.86	0.96	0.99	1.02	1.04	1.04
0.6	0.19	0.32	0.48	0.69	0.94	1.21	1.48	1.72	1.82	1.89	1.93	2.00
0.7	0.19	0.37	0.64	1.01	1.51	2.12	2.81	3.46	3.73	3.94	4.08	6.00
0.8	0.19	0.45	0.87	1.55	2.60	4.13	6.14	8.38	9.40	10.30	10.80	15.00
0.9	0.19	0.54	1.22	2.51	4.97	9.57	17.80	30.50	38.00	45.00	50.10	100.00
1.0	0.19	0.67	1.76	4.38	11.20	32.00	113.00	619.00	2010.00	10350.00	99999.00	99999.00



Fonte: (ASHRAE, 2005).

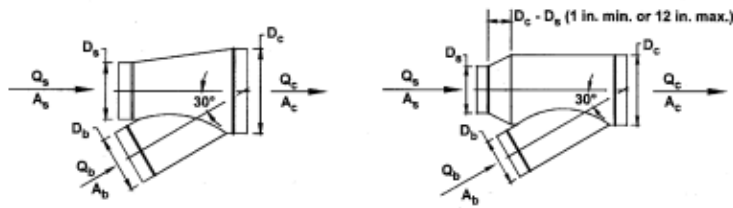
SD2-6 Stackhead

D_p/D	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
C_o	129	41.02	16.80	8.10	4.37	2.56	1.60	1.00



Fonte: (ASHRAE, 2005).

EDS-1 Wye, 30 Degree, Converging



		<i>C_b</i> Values									
		<i>Q_b/Q_c</i>									
<i>A_s/A_c</i>	<i>A_b/A_c</i>	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	
0.2	0.2	-24.17	-3.78	-0.60	0.30	0.64	0.77	0.83	0.88	0.98	
0.2	0.3	-55.88	-9.77	-2.57	-0.50	0.25	0.55	0.67	0.70	0.71	
0.2	0.4	-99.93	-17.94	-5.13	-1.45	-0.11	0.42	0.62	0.68	0.68	
0.2	0.5	-156.51	-28.40	-8.37	-2.62	-0.52	0.30	0.62	0.71	0.69	
0.2	0.6	-225.62	-41.13	-12.30	-4.01	-0.99	0.20	0.66	0.78	0.75	
0.2	0.7	-307.26	-56.14	-16.90	-5.61	-1.51	0.11	0.73	0.90	0.86	
0.2	0.8	-401.44	-73.44	-22.18	-7.44	-2.08	0.04	0.84	1.06	1.01	
0.2	0.9	-508.15	-93.02	-28.15	-9.49	-2.71	-0.03	0.99	1.27	1.20	
0.2	1.0	-627.39	-114.89	-34.80	-11.77	-3.39	-0.08	1.18	1.52	1.43	
0.3	0.2	-13.97	-1.77	0.08	0.59	0.77	0.84	0.88	0.92	1.06	
0.3	0.3	-33.06	-5.33	-1.09	0.10	0.51	0.66	0.71	0.72	0.74	
0.3	0.4	-59.43	-10.08	-2.52	-0.41	0.32	0.59	0.67	0.68	0.66	
0.3	0.5	-93.24	-16.11	-4.30	-1.00	0.14	0.56	0.69	0.70	0.66	
0.3	0.6	-134.51	-23.45	-6.44	-1.68	-0.03	0.57	0.76	0.77	0.70	
0.3	0.7	-183.25	-32.08	-8.93	-2.45	-0.21	0.61	0.87	0.88	0.79	
0.3	0.8	-239.47	-42.01	-11.77	-3.32	-0.38	0.69	1.02	1.03	0.91	
0.3	0.9	-303.16	-53.25	-14.97	-4.27	-0.56	0.80	1.21	1.23	1.07	
0.3	1.0	-374.32	-65.79	-18.53	-5.32	-0.73	0.94	1.45	1.47	1.27	
0.4	0.2	-9.20	-0.85	0.39	0.71	0.82	0.87	0.90	0.94	1.09	
0.4	0.3	-22.31	-3.24	-0.38	0.39	0.64	0.73	0.76	0.78	0.85	
0.4	0.4	-40.52	-6.48	-1.37	0.02	0.48	0.64	0.67	0.66	0.65	
0.4	0.5	-63.71	-10.50	-2.50	-0.33	0.40	0.63	0.69	0.67	0.63	
0.4	0.6	-92.00	-15.37	-3.84	-0.71	0.33	0.67	0.75	0.71	0.65	
0.4	0.7	-125.40	-21.08	-5.40	-1.13	0.28	0.75	0.85	0.80	0.70	
0.4	0.8	-163.90	-27.65	-7.16	-1.59	0.25	0.86	1.00	0.93	0.80	
0.4	0.9	-207.52	-35.07	-9.14	-2.09	0.25	1.02	1.18	1.10	0.93	
0.4	1.0	-256.25	-43.35	-11.33	-2.63	0.26	1.21	1.42	1.31	1.09	
0.5	0.2	-6.62	-0.36	0.54	0.77	0.85	0.88	0.90	0.95	1.11	
0.5	0.3	-16.42	-2.11	-0.01	0.54	0.72	0.78	0.80	0.83	0.96	
0.5	0.4	-30.26	-4.59	-0.79	0.22	0.54	0.64	0.66	0.64	0.64	
0.5	0.5	-47.68	-7.55	-1.61	-0.02	0.48	0.63	0.65	0.62	0.59	
0.5	0.6	-68.93	-11.13	-2.56	-0.28	0.45	0.67	0.69	0.65	0.58	
0.5	0.7	-94.00	-15.31	-3.65	-0.55	0.44	0.74	0.77	0.71	0.61	
0.5	0.8	-122.90	-20.12	-4.88	-0.83	0.46	0.85	0.90	0.81	0.68	
0.5	0.9	-155.63	-25.54	-6.25	-1.12	0.51	1.00	1.06	0.94	0.77	
0.5	1.0	-192.18	-31.58	-7.77	-1.43	0.59	1.19	1.26	1.12	0.90	
0.6	0.2	-5.12	-0.10	0.62	0.79	0.85	0.87	0.90	0.95	1.11	
0.6	0.3	-13.00	-1.49	0.18	0.61	0.75	0.79	0.82	0.86	1.02	
0.6	0.4	-24.31	-3.55	-0.50	0.30	0.55	0.62	0.63	0.62	0.63	
0.6	0.5	-38.41	-5.94	-1.16	0.09	0.48	0.59	0.60	0.57	0.55	
0.6	0.6	-55.58	-8.80	-1.92	-0.12	0.45	0.61	0.62	0.57	0.52	
0.6	0.7	-75.83	-12.16	-2.79	-0.33	0.44	0.66	0.67	0.60	0.52	
0.6	0.8	-99.17	-16.00	-3.76	-0.54	0.46	0.74	0.76	0.67	0.56	
0.6	0.9	-125.60	-20.33	-4.83	-0.76	0.51	0.86	0.88	0.77	0.62	
0.6	1.0	-155.12	-25.14	-6.02	-0.99	0.58	1.02	1.04	0.90	0.71	
0.7	0.2	-4.24	0.05	0.65	0.80	0.85	0.87	0.89	0.94	1.12	
0.7	0.3	-11.00	-1.15	0.27	0.63	0.75	0.79	0.82	0.87	1.06	
0.7	0.4	-20.82	-3.00	-0.38	0.31	0.52	0.59	0.60	0.59	0.61	
0.7	0.5	-32.99	-5.09	-0.98	0.10	0.43	0.53	0.54	0.52	0.51	
0.7	0.6	-47.78	-7.58	-1.67	-0.11	0.38	0.52	0.53	0.49	0.45	
0.7	0.7	-65.22	-10.50	-2.44	-0.32	0.34	0.53	0.54	0.49	0.43	
0.7	0.8	-85.32	-13.83	-3.30	-0.53	0.33	0.58	0.59	0.52	0.43	
0.7	0.9	-108.07	-17.58	-4.26	-0.75	0.34	0.66	0.67	0.58	0.46	
0.7	1.0	-133.48	-21.76	-5.30	-0.97	0.38	0.76	0.78	0.67	0.51	

Fonte: (ASHRAE, 2005).

Duct Design

35.33

ED5-1 Wye, 30 Degree, Converging (Continued)

		<i>C₂</i> Values (Concluded)								
<i>A₁/A_c</i>	<i>A₂/A_c</i>	<i>Q_s/Q_c</i>								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.8	0.2	-3.75	0.11	0.65	0.79	0.84	0.86	0.88	0.94	1.12
	0.3	-9.88	-0.99	0.29	0.63	0.74	0.78	0.81	0.87	1.09
	0.4	-18.88	-2.75	-0.36	0.28	0.48	0.55	0.56	0.57	0.61
	0.5	-29.98	-4.71	-0.96	0.04	0.36	0.46	0.47	0.46	0.47
	0.6	-43.46	-7.05	-1.64	-0.20	0.26	0.41	0.43	0.41	0.39
	0.7	-59.34	-9.77	-2.40	-0.44	0.19	0.38	0.41	0.38	0.34
	0.8	-77.64	-12.88	-3.26	-0.69	0.13	0.38	0.42	0.37	0.31
	0.9	-98.35	-16.38	-4.20	-0.95	0.09	0.40	0.45	0.39	0.30
	1.0	-121.48	-20.27	-5.24	-1.23	0.06	0.45	0.51	0.43	0.31
	0.9	0.2	-3.52	0.12	0.64	0.78	0.82	0.85	0.88	0.93
0.3		-9.34	-0.95	0.28	0.60	0.71	0.76	0.80	0.87	1.10
0.4		-17.96	-2.70	-0.40	0.22	0.43	0.50	0.53	0.54	0.60
0.5		-28.58	-4.65	-1.05	-0.07	0.26	0.37	0.40	0.41	0.42
0.6		-41.45	-6.97	-1.77	-0.35	0.12	0.28	0.32	0.32	0.32
0.7		-56.61	-9.66	-2.58	-0.65	0.00	0.21	0.27	0.26	0.24
0.8		-74.08	-12.74	-3.49	-0.97	-0.12	0.16	0.23	0.22	0.18
0.9		-93.84	-16.21	-4.50	-1.30	-0.23	0.13	0.21	0.19	0.14
1.0		-115.92	-20.06	-5.61	-1.66	-0.34	0.11	0.21	0.18	0.11
1.0		0.2	-3.48	0.10	0.62	0.76	0.81	0.84	0.87	0.92
	0.3	-9.22	-1.00	0.23	0.56	0.68	0.74	0.78	0.86	1.11
	0.4	-17.76	-2.79	-0.50	0.14	0.37	0.45	0.49	0.52	0.60
	0.5	-28.31	-4.82	-1.21	-0.20	0.15	0.28	0.33	0.35	0.38
	0.6	-41.06	-7.21	-2.01	-0.55	-0.04	0.15	0.22	0.23	0.25
	0.7	-56.09	-9.99	-2.91	-0.92	-0.23	0.03	0.12	0.14	0.15
	0.8	-73.39	-13.17	-3.92	-1.32	-0.41	-0.07	0.04	0.06	0.06
	0.9	-92.98	-16.75	-5.04	-1.75	-0.60	-0.17	-0.03	-0.01	-0.02
	1.0	-114.85	-20.74	-6.28	-2.21	-0.79	-0.26	-0.09	-0.07	-0.09

		<i>C₁</i> Values								
<i>A₁/A_c</i>	<i>A₂/A_c</i>	<i>Q_s/Q_c</i>								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.2	0.2	-16.02	-3.15	-0.80	0.04	0.45	0.69	0.86	0.99	1.10
	0.3	-11.65	-1.94	-0.26	0.32	0.60	0.77	0.90	1.01	1.10
	0.4	-8.56	-1.20	0.05	0.47	0.68	0.82	0.92	1.02	1.11
	0.5	-6.41	-0.71	0.25	0.57	0.73	0.84	0.93	1.02	1.11
	0.6	-4.85	-0.36	0.38	0.63	0.76	0.86	0.94	1.02	1.11
	0.7	-3.68	-0.10	0.48	0.68	0.79	0.87	0.95	1.03	1.11
	0.8	-2.77	0.10	0.56	0.71	0.81	0.88	0.95	1.03	1.11
	0.9	-2.04	0.26	0.62	0.74	0.82	0.89	0.95	1.03	1.11
	1.0	-1.45	0.38	0.66	0.76	0.83	0.89	0.96	1.03	1.11
	0.3	0.2	-36.37	-7.59	-2.48	-0.79	-0.06	0.29	0.47	0.57
0.3		-26.79	-5.07	-1.42	-0.27	0.21	0.42	0.53	0.59	0.61
0.4		-19.94	-3.49	-0.80	0.02	0.35	0.49	0.56	0.60	0.62
0.5		-15.18	-2.44	-0.41	0.20	0.43	0.54	0.58	0.61	0.62
0.6		-11.73	-1.70	-0.13	0.32	0.49	0.56	0.60	0.61	0.62
0.7		-9.13	-1.14	0.07	0.41	0.53	0.58	0.60	0.61	0.62
0.8		-7.11	-0.72	0.23	0.48	0.57	0.60	0.61	0.62	0.62
0.9		-5.49	-0.38	0.35	0.53	0.59	0.61	0.62	0.62	0.62
1.0		-4.17	-0.11	0.45	0.58	0.61	0.62	0.62	0.62	0.62
0.4		0.2	-64.82	-13.76	-4.74	-1.81	-0.59	-0.02	0.24	0.36
	0.3	-47.92	-9.38	-2.93	-0.94	-0.16	0.19	0.34	0.39	0.40
	0.4	-35.81	-6.62	-1.88	-0.46	0.07	0.30	0.38	0.41	0.40
	0.5	-27.39	-4.78	-1.20	-0.16	0.22	0.36	0.41	0.42	0.41
	0.6	-21.28	-3.48	-0.73	0.04	0.31	0.41	0.43	0.43	0.41
	0.7	-16.68	-2.51	-0.38	0.20	0.38	0.44	0.45	0.43	0.41
	0.8	-13.10	-1.77	-0.12	0.31	0.44	0.46	0.46	0.44	0.41
	0.9	-10.24	-1.18	0.09	0.40	0.48	0.48	0.46	0.44	0.41
	1.0	-7.90	-0.69	0.26	0.47	0.51	0.50	0.47	0.44	0.41

Fonte: (ASHRAE, 2005).

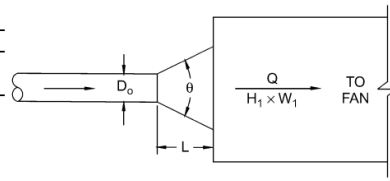
EDS-1 Wye, 30 Degree, Converging (Concluded)

		C_p Values (Concluded)								
		Q_s/Q_c								
A_s/A_c	A_b/A_c	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.5	0.2	-101.39	-21.64	-7.61	-3.07	-1.19	-0.34	0.05	0.22	0.26
	0.3	-75.05	-14.87	-4.83	-1.75	-0.54	-0.03	0.19	0.26	0.27
	0.4	-56.18	-10.59	-3.21	-1.02	-0.20	0.13	0.26	0.29	0.27
	0.5	-43.04	-7.74	-2.16	-0.56	0.02	0.23	0.30	0.30	0.27
	0.6	-33.51	-5.72	-1.43	-0.24	0.16	0.30	0.33	0.31	0.28
	0.7	-26.34	-4.22	-0.90	-0.01	0.27	0.35	0.35	0.32	0.28
	0.8	-20.75	-3.06	-0.49	0.16	0.35	0.39	0.37	0.33	0.28
	0.9	-16.29	-2.14	-0.17	0.30	0.41	0.41	0.38	0.33	0.28
	1.0	-12.64	-1.39	0.10	0.41	0.46	0.44	0.39	0.33	0.28
	0.6	0.2	-146.06	-31.26	-11.09	-4.56	-1.89	-0.68	-0.12	0.10
0.3		-108.19	-21.55	-7.12	-2.69	-0.97	-0.24	0.07	0.17	0.17
0.4		-81.04	-15.40	-4.80	-1.65	-0.48	-0.01	0.17	0.20	0.18
0.5		-62.13	-11.31	-3.30	-0.99	-0.17	0.13	0.22	0.22	0.18
0.6		-48.43	-8.41	-2.25	-0.54	0.03	0.22	0.26	0.24	0.18
0.7		-38.10	-6.25	-1.49	-0.22	0.18	0.29	0.29	0.25	0.19
0.8		-30.07	-4.59	-0.90	0.03	0.30	0.34	0.31	0.25	0.19
0.9		-23.64	-3.27	-0.44	0.23	0.39	0.38	0.33	0.26	0.19
1.0		-18.39	-2.20	-0.06	0.39	0.46	0.42	0.34	0.27	0.19
0.7		0.2	-198.85	-42.62	-15.17	-6.31	-2.68	-1.04	-0.29	0.01
	0.3	-147.33	-29.41	-9.78	-3.77	-1.44	-0.45	-0.04	0.10	0.10
	0.4	-110.40	-21.07	-6.64	-2.36	-0.77	-0.14	0.09	0.15	0.11
	0.5	-84.67	-15.50	-4.60	-1.48	-0.36	0.05	0.17	0.17	0.11
	0.6	-66.02	-11.56	-3.19	-0.86	-0.08	0.18	0.23	0.19	0.12
	0.7	-51.97	-8.63	-2.15	-0.42	0.12	0.27	0.27	0.20	0.12
	0.8	-41.04	-6.37	-1.35	-0.08	0.27	0.34	0.29	0.21	0.12
	0.9	-32.30	-4.58	-0.72	0.19	0.39	0.39	0.32	0.22	0.12
	1.0	-25.16	-3.12	-0.21	0.40	0.49	0.43	0.33	0.23	0.13
	0.8	0.2	-259.75	-55.70	-19.86	-8.29	-3.56	-1.43	-0.46	-0.06
0.3		-192.48	-38.47	-12.84	-4.99	-1.95	-0.66	-0.12	0.05	0.05
0.4		-144.25	-27.58	-8.74	-3.16	-1.09	-0.26	0.05	0.11	0.06
0.5		-110.65	-20.32	-6.08	-2.00	-0.55	-0.01	0.15	0.15	0.07
0.6		-86.30	-15.17	-4.24	-1.20	-0.19	0.15	0.22	0.17	0.08
0.7		-67.95	-11.34	-2.88	-0.62	0.08	0.27	0.27	0.19	0.08
0.8		-53.67	-8.40	-1.84	-0.18	0.28	0.36	0.30	0.20	0.08
0.9		-42.26	-6.05	-1.02	0.16	0.44	0.43	0.33	0.21	0.08
1.0		-32.93	-4.15	-0.35	0.44	0.56	0.49	0.36	0.22	0.09
0.9		0.2	-328.76	-70.51	-25.16	-10.53	-4.54	-1.84	-0.62	-0.12
	0.3	-243.63	-48.72	-16.28	-6.35	-2.50	-0.87	-0.20	0.03	0.03
	0.4	-182.60	-34.94	-11.09	-4.03	-1.41	-0.37	0.02	0.10	0.04
	0.5	-140.07	-25.75	-7.74	-2.57	-0.74	-0.06	0.15	0.14	0.05
	0.6	-109.25	-19.24	-5.40	-1.56	-0.28	0.15	0.23	0.17	0.05
	0.7	-86.04	-14.40	-3.68	-0.83	0.06	0.30	0.30	0.20	0.06
	0.8	-67.96	-10.66	-2.37	-0.27	0.31	0.41	0.34	0.21	0.06
	0.9	-53.52	-7.70	-1.33	0.17	0.51	0.50	0.38	0.22	0.06
	1.0	-41.71	-5.29	-0.49	0.52	0.67	0.57	0.41	0.23	0.07
	1.0	0.2	-405.88	-87.06	-31.07	-13.01	-5.62	-2.29	-0.77	-0.16
0.3		-300.78	-60.15	-20.11	-7.85	-3.10	-1.09	-0.26	0.02	0.02
0.4		-225.44	-43.14	-13.70	-4.99	-1.76	-0.47	0.01	0.11	0.04
0.5		-172.93	-31.80	-9.56	-3.18	-0.92	-0.09	0.17	0.17	0.05
0.6		-134.89	-23.76	-6.68	-1.94	-0.35	0.17	0.28	0.20	0.06
0.7		-106.23	-17.78	-4.56	-1.04	0.06	0.36	0.35	0.23	0.06
0.8		-83.92	-13.18	-2.93	-0.35	0.37	0.50	0.41	0.25	0.06
0.9		-66.08	-9.52	-1.65	0.19	0.62	0.61	0.46	0.26	0.07
1.0		-51.51	-6.54	-0.61	0.63	0.81	0.70	0.49	0.28	0.07

Fonte: (ASHRAE, 2005).

ED2-1 Conical Diffuser, Round to Plenum, Exhaust/Return Systems

A_1/A_0	C_p Values											
	L/D_0											
	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	
1.5	0.03	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.10	0.11	0.13	
2.0	0.08	0.06	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.08	0.09	0.10	
2.5	0.13	0.09	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.08	0.09	
3.0	0.17	0.12	0.09	0.07	0.07	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08	
4.0	0.23	0.17	0.12	0.10	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	
6.0	0.30	0.22	0.16	0.13	0.12	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.08	
8.0	0.34	0.26	0.18	0.15	0.13	0.12	0.11	0.10	0.09	0.09	0.09	
10.0	0.36	0.28	0.20	0.16	0.14	0.13	0.12	0.11	0.10	0.09	0.09	
14.0	0.39	0.30	0.22	0.18	0.16	0.14	0.13	0.12	0.10	0.10	0.10	
20.0	0.41	0.32	0.24	0.20	0.17	0.15	0.14	0.12	0.11	0.11	0.10	

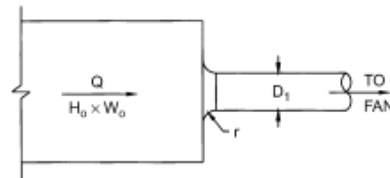


A_1/A_0	Optimum Angle θ											
	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	
1.5	34	20	13	9	7	6	4	3	2	2	2	
2.0	42	28	17	12	10	9	8	6	5	4	3	
2.5	50	32	20	15	12	11	10	8	7	6	5	
3.0	54	34	22	17	14	12	11	10	8	8	6	
4.0	58	40	26	20	16	14	13	12	10	10	9	
6.0	62	42	28	22	19	16	15	12	11	10	9	
8.0	64	44	30	24	20	18	16	13	12	11	10	
10.0	66	46	30	24	22	19	17	14	12	11	10	
14.0	66	48	32	26	22	19	17	14	13	11	11	
20.0	68	48	32	26	22	20	18	15	13	12	11	

Fonte: (ASHRAE, 2005).

ER2-1 Bellmouth, Plenum to Round, Exhaust/Return Systems

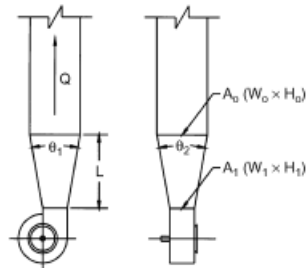
A_p/A_1	C_p Values												
	r/D_1												
	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.08	0.10	0.12	0.16	0.20	10.00
1.5	0.22	0.20	0.15	0.14	0.12	0.10	0.09	0.07	0.05	0.04	0.03	0.01	0.01
2.0	0.13	0.11	0.08	0.08	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01
2.5	0.08	0.07	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00
3.0	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
4.0	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
8.0	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



Fonte: (ASHRAE, 2005).

SR7-17 Pyramidal Diffuser at Centrifugal Fan Outlet with Ductwork

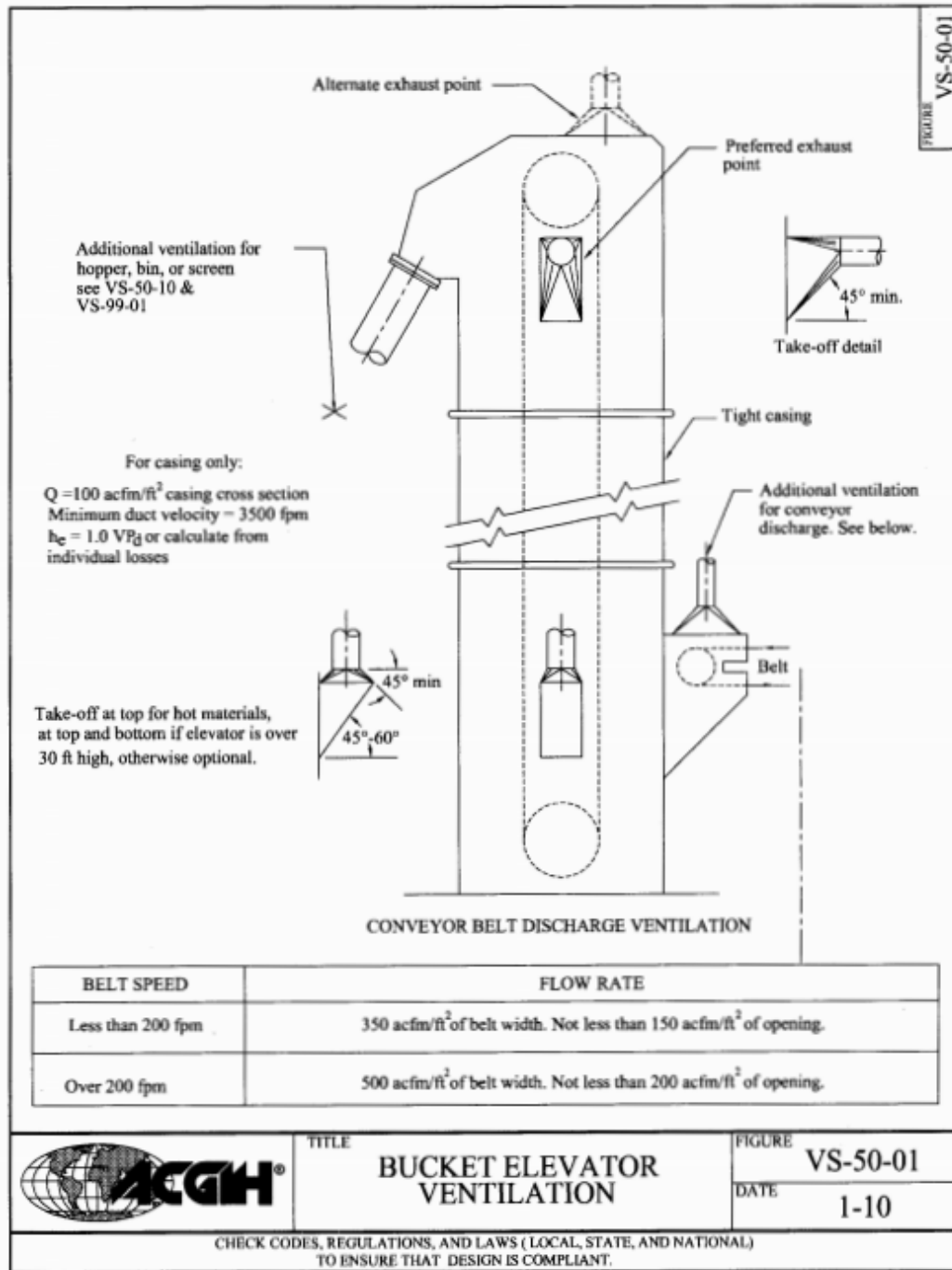
θ	C_1 Values					
	A_p/A_1					
	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.10	0.18	0.21	0.23	0.24	0.25
15	0.23	0.33	0.38	0.40	0.42	0.44
20	0.31	0.43	0.48	0.53	0.56	0.58
25	0.36	0.49	0.55	0.58	0.62	0.64
30	0.42	0.53	0.59	0.64	0.67	0.69



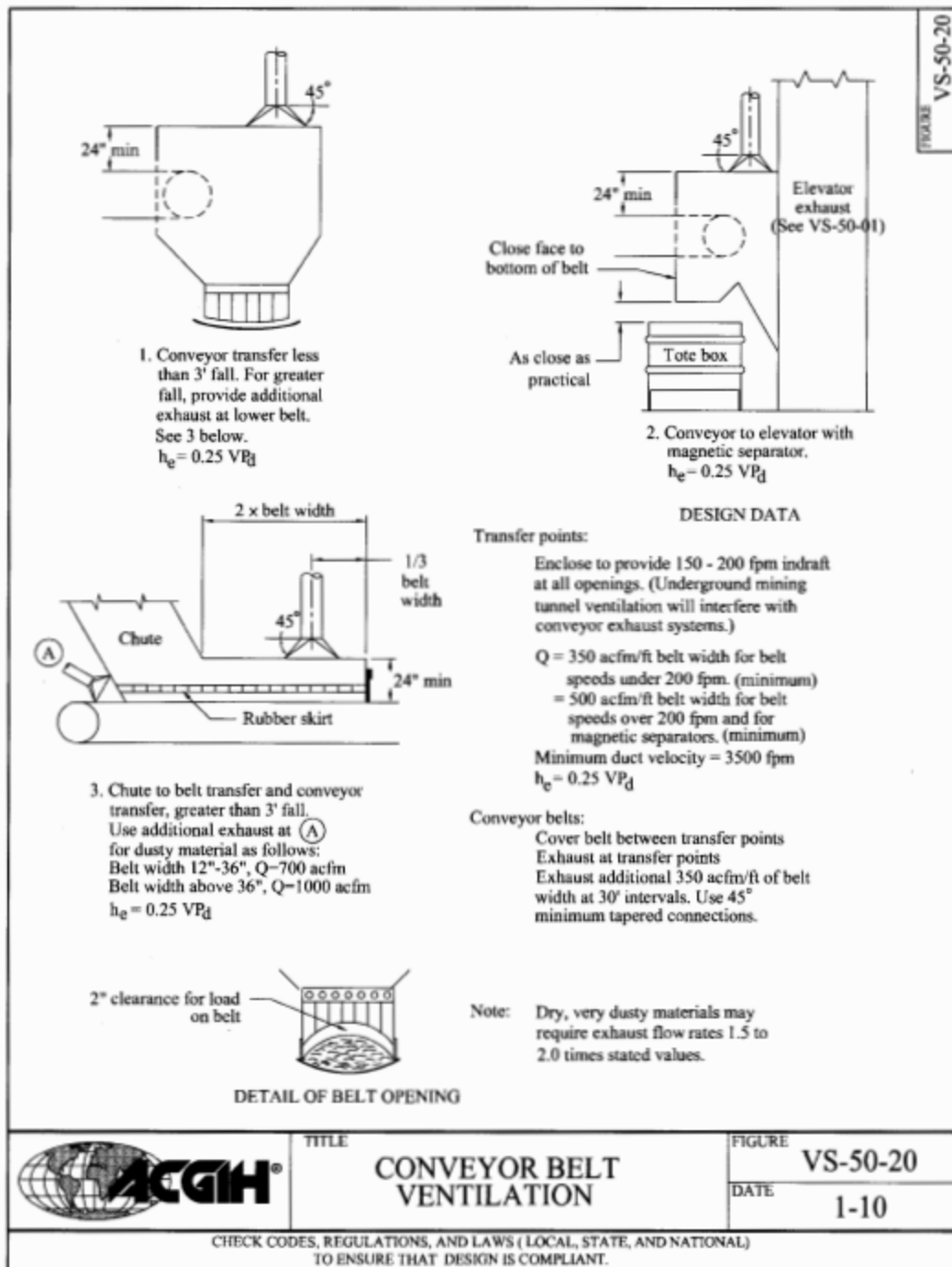
θ is larger of θ_1 and θ_2

Fonte: (ASHRAE, 2005).

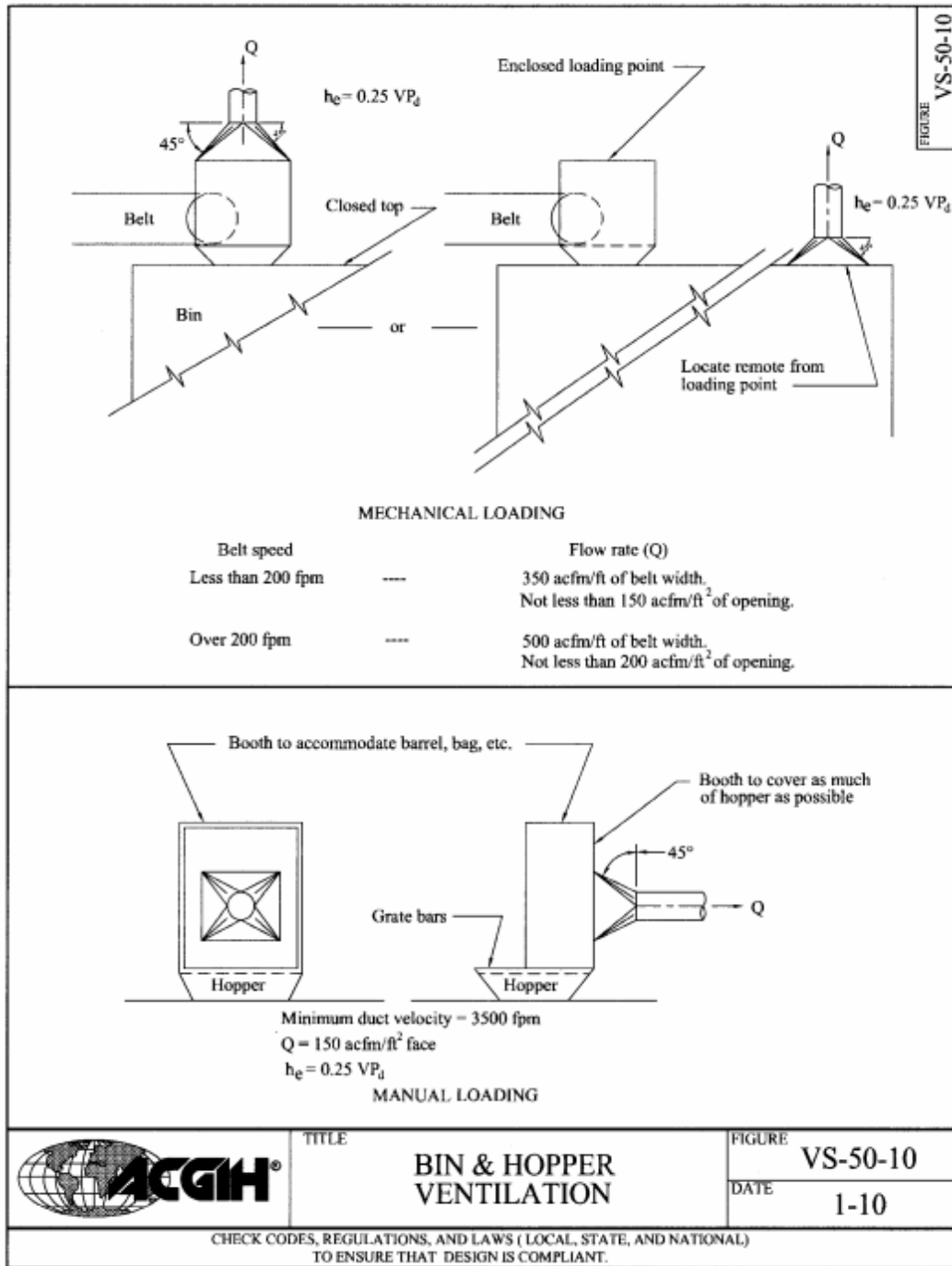
ANEXO B: Vazões recomendadas e perda de carga no captor.



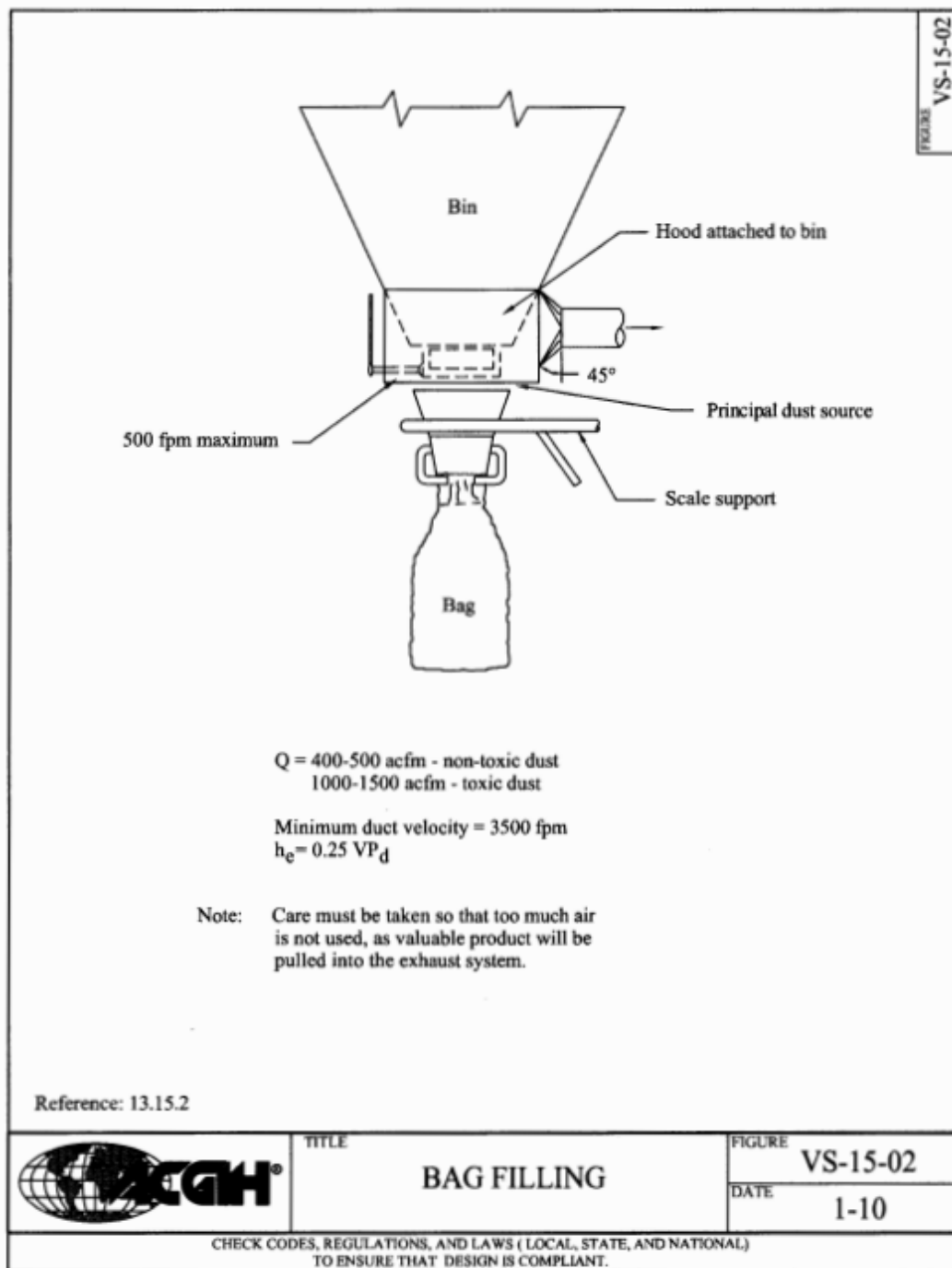
Fonte: (ACGIH, 1998).



Fonte: (ACGIH, 1998).



Fonte: (ACGIH, 1998).



Fonte: (ACGIH, 1998).

APÊNDICE

APÊNDICE A: Comprimentos e perda de carga localizada nos dutos.

(continua)

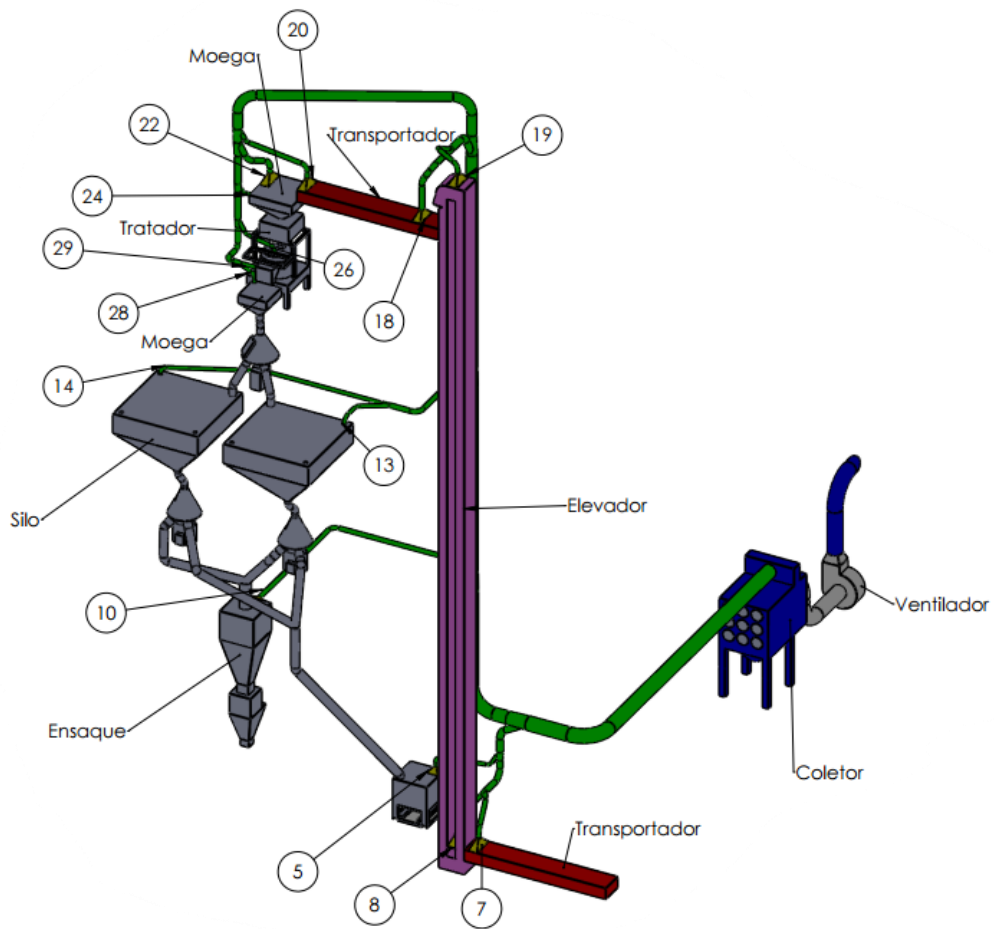
Trecho	Diâmetro [mm]	Área [m ²]	Vazão [m ³ /h]	L [m]	Quant. Válvula Borboleta
1	475	0,1772	11483	4,90	-
2	475	0,1772	11483	5,56	-
3	450	0,1590	11451	14,01	-
4	205	0,0330	2376	1,19	-
5	100	0,0079	565	2,32	1
6	175	0,0241	1732	1,95	-
7	125	0,0123	884	2,19	1
8	125	0,0123	884	2,40	1
9	400	0,1257	9048	6,28	-
10	125	0,0123	884	9,72	1
11	380	0,1134	8166	7,35	-
12	140	0,0154	1108	4,52	-
13	100	0,0079	565	1,63	1
14	100	0,0079	565	7,86	1
15	355	0,0990	7127	8,50	-
16	205	0,0330	2376	5,77	-
17	125	0,0123	884	2,09	1
18	165	0,0214	1540	2,20	1
19	290	0,0661	4756	9,82	-
20	125	0,0123	884	2,28	1
21	260	0,0531	3823	0,50	-
22	165	0,0214	1540	1,63	1
23	205	0,0330	2376	1,30	-
24	100	0,0079	565	1,69	1
25	180	0,0254	1832	1,30	-
26	100	0,0079	565	1,68	1
27	140	0,0154	1108	2,43	-
28	100	0,0079	565	0,80	1
29	100	0,0079	565	0,81	1

Fonte: Autoria própria.

(conclusão)

Trecho	C Curva 90	C Curva 45	C Curva 60	C Convergência	C Captor	C total (válvula aberta)
1	1*0,13	0	0	-	-	0,13
2	2*0,13	0	0	-	-	0,8
3	1*0,13	0	0	0	-	0,43
4	0	0	1*0,086667	0,11	-	0,1967
5	1*0,13	0	1*0,086667	0,27	0,49	1,206
6	1*0,13	0	0	0	-	0,13
7	1*0,13	1*0,065	0	0,48	0,25	1,154
8	1*0,13	1*0,065	0	0	0,25	0,6738
9	1*0,13	0	0	0	-	0,13
10	1*0,13	0	1*0,086667	0	0,25	0,6955
11	0	0	0	0	-	0
12	1*0,13	0	1*0,086667	0	-	0,2167
13	1*0,13	0	1*0,086667	0,48	0,49	1,416
14	1*0,13	1*0,065	0	0	0,49	0,9138
15	0	0	0	0	-	0
16	0	0	1*0,086667	0,27	-	0,3567
17	1*0,13	0	1*0,086667	0,3	0,25	0,9955
18	0	2*0,065	0	0	0,25	0,6088
19	2*0,13	0	0	0	-	0,26
20	0	1*0,065	1*0,086667	0,11	0,25	0,7405
21	0	0	0	0	-	0
22	1*0,13	1*0,065	0	0,3	0,25	0,9738
23	0	0	0	0	-	0
24	1*0,13	0	1*0,086667	0,27	0,49	1,206
25	0	0	0	0	-	0
26	1*0,13	0	1*0,086667	0,27	0,49	1,206
27	2*0,13	0	0	0	-	0,26
28	0	1*0,065	1*0,086667	0,48	0,49	1,351
29	0	0	0	0	0,49	0,7188

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICD B: Layout área de tratamento.

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE C: Memorial de cálculo.

"Curva Ventilador"

$x[1]=9400$
 $x[2]=10672$
 $x[3]=11803$
 $x[4]=13118$
 $x[5]=14225$
 $x[6]=15425$
 $y[1]=305/\rho$
 $y[2]=292/\rho$
 $y[3]=280/\rho$
 $y[4]=261/\rho$
 $y[5]=244/\rho$
 $y[6]=220/\rho$

Call CURVEFIT1D('Polynomial2';x[1..6];y[1..6]:k[1..3])

"Curva Valvula borboleta d/d0=0,7"

$teta_valv[1]=0$
 $teta_valv[2]=10$
 $teta_valv[3]=20$
 $teta_valv[4]=30$
 $teta_valv[5]=40$
 $teta_valv[6]=50$
 $teta_valv[7]=60$
 $teta_valv[8]=70$
 $teta_valv[9]=75$
 $teta_valv[10]=80$
 $teta_valv[11]=85$
 $c_valv[1]=0,19$
 $c_valv[2]=0,37$
 $c_valv[3]=0,64$
 $c_valv[4]=1,101$
 $c_valv[5]=1,51$
 $c_valv[6]=2,12$
 $c_valv[7]=2,81$
 $c_valv[8]=3,46$
 $c_valv[9]=3,73$
 $c_valv[10]=3,94$
 $c_valv[11]=4,08$

Call CURVEFIT1D('Polynomial3';teta_valv[1..11];c_valv[1..11]:k_valv[1..4])

"Propriedades do ar"

"Altura da cidade 862"

$g = 9,81$
 $T_{amb}=25$
 $P_{amb}=91,6$
 $\rho = \text{Density}(\text{Air}; T=T_{amb}; P=P_{amb})$
 $\mu = \text{Viscosity}(\text{Air}; T=T_{amb})$
 $\nu = \mu/\rho$

"Parâmetros trecho _1"

$c_1 = 0,13 \cdot 1$
 $l_1 = 4,9$
 $v[1] = 18$
 $d_1 = 475/1000$
 $e_1 = 5e-05$
 $a_1 = \pi \cdot d_1^2/4$

"Contas trecho _1"

$q[1] = a_1 \cdot v[1] \cdot 3600$
 $pn[1]/(\rho \cdot g) = pn[2]/(\rho \cdot g) - hp_1$
 $hp_1 = (f_1 \cdot l_1/d_1 + c_1) \cdot (v[1]^2/(2 \cdot g))$
 $1/\sqrt{f_1} = -1,8 \cdot \log_{10}(((e_1/d_1)/3,7)^{1,11+6,9/Re_1})$
 $Re_1 = v[1] \cdot d_1/\nu$

"Parâmetros trecho _2"

$c_2 = 2 \cdot 0,13 + 0,01 + 0,53$
 $l_2 = 5,56$
 $v[2] = 18$
 $d_2 = 475/1000$
 $e_2 = 5e-05$
 $a_2 = \pi \cdot d_2^2/4$

"Contas trecho _2"

" $q_i = q[2]$ "

$hg[2] = k[3] \cdot q[2]^2 + k[2] \cdot q[2] + k[1]$
 $q[2] = a_2 \cdot v[2] \cdot 3600$
 $pn[2]/(\rho \cdot g) - hg[2] = pn[3]/(\rho \cdot g) - hp_2$
 $hp_2 = (f_2 \cdot l_2/d_2 + c_2) \cdot (v[2]^2/(2 \cdot g)) + 150/\rho$
 $1/\sqrt{f_2} = -1,8 \cdot \log_{10}(((e_2/d_2)/3,7)^{1,11+6,9/Re_2})$
 $Re_2 = v[2] \cdot d_2/\nu$

"Parâmetros trecho _3"

$c_3 = 1 \cdot 0,13 + 0,3$
 $l_3 = 14,01$
 $v[3] = 20$
 $d_3 = 450/1000$
 $e_3 = 5e-05$
 $a_3 = \pi \cdot d_3^2/4$

"Contas trecho _3"

$q[3] = a_3 \cdot v[3] \cdot 3600$
 $pn[3]/(\rho \cdot g) = pn[4]/(\rho \cdot g) - hp_3$
 $hp_3 = (f_3 \cdot l_3/d_3 + c_3) \cdot (v[3]^2/(2 \cdot g))$
 $1/\sqrt{f_3} = -1,8 \cdot \log_{10}(((e_3/d_3)/3,7)^{1,11+6,9/Re_3})$
 $Re_3 = v[3] \cdot d_3/\nu$

"Parâmetros trecho _4"

$c_4 = 1 \cdot 0,08667 + 0,11$
 $l_4 = 1,19$
 $v[4] = 20$
 $d_4 = 205/1000$
 $e_4 = 5e-05$
 $a_4 = \pi \cdot d_4^2/4$

"Contas trecho _4"

$$q[4] = a_4 \cdot v[4] \cdot 3600$$

$$pn[4]/(\rho \cdot g) = pn[5]/(\rho \cdot g) - hp_4$$

$$hp_4 = (f_4 \cdot l_4/d_4 + c_4) \cdot (v[4]^2/(2 \cdot g))$$

$$1/\sqrt{f_4} = -1,8 \cdot \log_{10}(((e_4/d_4)/3,7)^{1,11+6,9/Re_4})$$

$$Re_4 = v[4] \cdot d_4/\nu$$

"Parâmetros trecho _5"

$$c_{5valv} = k_{valv[4]} \cdot \text{teta}[5]^3 + k_{valv[3]} \cdot \text{teta}[5]^2 + k_{valv[2]} \cdot \text{teta}[5] + k_{valv[1]}$$

$$c_5 = 1 \cdot 0,13 + 1 \cdot 0,08667 + 0,27 + 0,49 + c_{5valv}$$

$$l_5 = 2,32$$

$$"v[5] = 20"$$

$$d_5 = 100/1000$$

$$e_5 = 5e-05$$

$$a_5 = \pi \cdot d_5^2/4$$

"Contas trecho _5"

$$q[5] = a_5 \cdot v[5] \cdot 3600$$

$$pn[5]/(\rho \cdot g) = pn[6]/(\rho \cdot g) - hp_5$$

$$hp_5 = (f_5 \cdot l_5/d_5 + c_5) \cdot (v[5]^2/(2 \cdot g))$$

$$1/\sqrt{f_5} = -1,8 \cdot \log_{10}(((e_5/d_5)/3,7)^{1,11+6,9/Re_5})$$

$$Re_5 = v[5] \cdot d_5/\nu$$

"Parâmetros trecho _6"

$$c_6 = 1 \cdot 0,13$$

$$l_6 = 1,95$$

$$"v[6] = 20"$$

$$d_6 = 175/1000$$

$$e_6 = 5e-05$$

$$a_6 = \pi \cdot d_6^2/4$$

"Contas trecho _6"

$$q[6] = a_6 \cdot v[6] \cdot 3600$$

$$pn[5]/(\rho \cdot g) = pn[7]/(\rho \cdot g) - hp_6$$

$$hp_6 = (f_6 \cdot l_6/d_6 + c_6) \cdot (v[6]^2/(2 \cdot g))$$

$$1/\sqrt{f_6} = -1,8 \cdot \log_{10}(((e_6/d_6)/3,7)^{1,11+6,9/Re_6})$$

$$Re_6 = v[6] \cdot d_6/\nu$$

"Parâmetros trecho _7"

$$c_{7valv} = k_{valv[4]} \cdot \text{teta}[7]^3 + k_{valv[3]} \cdot \text{teta}[7]^2 + k_{valv[2]} \cdot \text{teta}[7] + k_{valv[1]}$$

$$c_7 = 1 \cdot 0,13 + 1 \cdot 0,065 + 0,48 + 0,25 + c_{7valv}$$

$$l_7 = 2,19$$

$$"v[7] = 20"$$

$$d_7 = 125/1000$$

$$e_7 = 5e-05$$

$$a_7 = \pi \cdot d_7^2/4$$

"Contas trecho _7"

$$q[7] = a_7 \cdot v[7] \cdot 3600$$

$$pn[7]/(\rho \cdot g) = pn[8]/(\rho \cdot g) - hp_7$$

$$hp_7 = (f_7 \cdot l_7/d_7 + c_7) \cdot (v[7]^2/(2 \cdot g))$$

$$1/\sqrt{f_7} = -1,8 \cdot \log_{10}(((e_7/d_7)/3,7)^{1,11+6,9/Re_7})$$

$$\text{Re}_7 = v[7] \cdot d_7 / \nu$$

"Parâmetros trecho _8"

$$c_{8\text{valv}} = k_{\text{valv}[4]} \cdot \text{teta}[8]^3 + k_{\text{valv}[3]} \cdot \text{teta}[8]^2 + k_{\text{valv}[2]} \cdot \text{teta}[8] + k_{\text{valv}[1]}$$

$$c_8 = 1 \cdot 0,13 + 1 \cdot 0,065 + 0,25 + c_{8\text{valv}}$$

$$l_8 = 2,4$$

$$v[8] = 20$$

$$d_8 = 125/1000$$

$$e_8 = 5e-05$$

$$a_8 = \pi \cdot d_8^2 / 4$$

"Contas trecho _8"

$$q[8] = a_8 \cdot v[8] \cdot 3600$$

$$pn[7] / (\rho \cdot g) = pn[9] / (\rho \cdot g) - hp_8$$

$$hp_8 = (f_8 \cdot l_8 / d_8 + c_8) \cdot (v[8]^2 / (2 \cdot g))$$

$$1/\sqrt{f_8} = -1,8 \cdot \log_{10} \left(\left(\frac{e_8 / d_8}{3,7} \right)^{1,11 + 6,9 / \text{Re}_8} \right)$$

$$\text{Re}_8 = v[8] \cdot d_8 / \nu$$

"Parâmetros trecho _9"

$$c_9 = 1 \cdot 0,13$$

$$l_9 = 6,28$$

$$v[9] = 20$$

$$d_9 = 400/1000$$

$$e_9 = 5e-05$$

$$a_9 = \pi \cdot d_9^2 / 4$$

"Contas trecho _9"

$$q[9] = a_9 \cdot v[9] \cdot 3600$$

$$pn[4] / (\rho \cdot g) = pn[10] / (\rho \cdot g) - hp_9$$

$$hp_9 = (f_9 \cdot l_9 / d_9 + c_9) \cdot (v[9]^2 / (2 \cdot g))$$

$$1/\sqrt{f_9} = -1,8 \cdot \log_{10} \left(\left(\frac{e_9 / d_9}{3,7} \right)^{1,11 + 6,9 / \text{Re}_9} \right)$$

$$\text{Re}_9 = v[9] \cdot d_9 / \nu$$

"Parâmetros trecho _10"

$$c_{10\text{valv}} = k_{\text{valv}[4]} \cdot \text{teta}[10]^3 + k_{\text{valv}[3]} \cdot \text{teta}[10]^2 + k_{\text{valv}[2]} \cdot \text{teta}[10] + k_{\text{valv}[1]}$$

$$c_{10} = 1 \cdot 0,13 + 1 \cdot 0,08667 + 0,25 + c_{10\text{valv}}$$

$$l_{10} = 9,72$$

$$v[10] = 20$$

$$d_{10} = 125/1000$$

$$e_{10} = 5e-05$$

$$a_{10} = \pi \cdot d_{10}^2 / 4$$

"Contas trecho _10"

$$q[10] = a_{10} \cdot v[10] \cdot 3600$$

$$pn[10] / (\rho \cdot g) = pn[11] / (\rho \cdot g) - hp_{10}$$

$$hp_{10} = (f_{10} \cdot l_{10} / d_{10} + c_{10}) \cdot (v[10]^2 / (2 \cdot g))$$

$$1/\sqrt{f_{10}} = -1,8 \cdot \log_{10} \left(\left(\frac{e_{10} / d_{10}}{3,7} \right)^{1,11 + 6,9 / \text{Re}_{10}} \right)$$

$$\text{Re}_{10} = v[10] \cdot d_{10} / \nu$$

"Parâmetros trecho _11"

$$c_{11} = 0$$

$$l_{11} = 7,35$$

$$v[11] = 20$$

d_11 = 380/1000
 e_11 = 5e-05
 a_11 = pi*d_11^2/4

"Contas trecho _11"

q[11] = a_11*v[11]*3600
 pn[10]/(rho*g) = pn[12]/(rho*g) - hp_11
 hp_11 = (f_11*l_11/d_11 + c_11)*(v[11]^2/(2*g))
 1/sqrt(f_11) = -1,8*log10(((e_11/d_11)/3,7)^1,11+6,9/Re_11)
 Re_11 = v[11]*d_11/nu

"Parâmetros trecho _12"

c_12 = 1*0,13+1*0,08667
 l_12 = 4,52
 "v[12] = 20"
 d_12 = 140/1000
 e_12 = 5e-05
 a_12 = pi*d_12^2/4

"Contas trecho _12"

q[12] = a_12*v[12]*3600
 pn[12]/(rho*g) = pn[13]/(rho*g) - hp_12
 hp_12 = (f_12*l_12/d_12 + c_12)*(v[12]^2/(2*g))
 1/sqrt(f_12) = -1,8*log10(((e_12/d_12)/3,7)^1,11+6,9/Re_12)
 Re_12 = v[12]*d_12/nu

"Parâmetros trecho _13"

c_13valv = k_valv[4]*teta[13]^3+k_valv[3]*teta[13]^2+k_valv[2]*teta[13]+k_valv[1]
 c_13 = 1*0,13+1*0,08667+0,48+0,49+c_13valv
 l_13 = 1,63
 "v[13] = 20"
 d_13 = 100/1000
 e_13 = 5e-05
 a_13 = pi*d_13^2/4

"Contas trecho _13"

q[13] = a_13*v[13]*3600
 pn[13]/(rho*g) = pn[14]/(rho*g) - hp_13
 hp_13 = (f_13*l_13/d_13 + c_13)*(v[13]^2/(2*g))
 1/sqrt(f_13) = -1,8*log10(((e_13/d_13)/3,7)^1,11+6,9/Re_13)
 Re_13 = v[13]*d_13/nu

"Parâmetros trecho _14"

c_14valv = k_valv[4]*teta[14]^3+k_valv[3]*teta[14]^2+k_valv[2]*teta[14]+k_valv[1]
 c_14 = 1*0,13+0,065*1+0,49+c_14valv
 l_14 = 7,86
 "v[14] = 20"
 d_14 = 100/1000
 e_14 = 5e-05
 a_14 = pi*d_14^2/4

"Contas trecho _14"

q[14] = a_14*v[14]*3600

$pn[13]/(\rho \cdot g) = pn[15]/(\rho \cdot g) - hp_{14}$
 $hp_{14} = (f_{14} \cdot l_{14}/d_{14} + c_{14}) \cdot (v[14]^2/(2 \cdot g))$
 $1/\sqrt{f_{14}} = -1,8 \cdot \log_{10}(((e_{14}/d_{14})/3,7)^{1,11+6,9/Re_{14}})$
 $Re_{14} = v[14] \cdot d_{14}/\nu$

"Parâmetros trecho _15"

$c_{15} = 0$
 $l_{15} = 8,5$
 $v[15] = 20$
 $d_{15} = 355/1000$
 $e_{15} = 5e-05$
 $a_{15} = \pi \cdot d_{15}^2/4$

"Contas trecho _15"

$q[15] = a_{15} \cdot v[15] \cdot 3600$
 $pn[12]/(\rho \cdot g) = pn[16]/(\rho \cdot g) - hp_{15}$
 $hp_{15} = (f_{15} \cdot l_{15}/d_{15} + c_{15}) \cdot (v[15]^2/(2 \cdot g))$
 $1/\sqrt{f_{15}} = -1,8 \cdot \log_{10}(((e_{15}/d_{15})/3,7)^{1,11+6,9/Re_{15}})$
 $Re_{15} = v[15] \cdot d_{15}/\nu$

"Parâmetros trecho _16"

$c_{16} = 1 \cdot 0,08667 + 0,27$
 $l_{16} = 5,77$
 $v[16] = 20$
 $d_{16} = 205/1000$
 $e_{16} = 5e-05$
 $a_{16} = \pi \cdot d_{16}^2/4$

"Contas trecho _16"

$q[16] = a_{16} \cdot v[16] \cdot 3600$
 $pn[16]/(\rho \cdot g) = pn[17]/(\rho \cdot g) - hp_{16}$
 $hp_{16} = (f_{16} \cdot l_{16}/d_{16} + c_{16}) \cdot (v[16]^2/(2 \cdot g))$
 $1/\sqrt{f_{16}} = -1,8 \cdot \log_{10}(((e_{16}/d_{16})/3,7)^{1,11+6,9/Re_{16}})$
 $Re_{16} = v[16] \cdot d_{16}/\nu$

"Parâmetros trecho _17"

$c_{17valv} = k_{valv[4]} \cdot \text{teta}[17]^3 + k_{valv[3]} \cdot \text{teta}[17]^2 + k_{valv[2]} \cdot \text{teta}[17] + k_{valv[1]}$
 $c_{17} = 0,13 \cdot 1 + 0,08667 \cdot 1 + 0,3 + 0,25 + c_{17valv}$
 $l_{17} = 2,09$
 $v[17] = 20$
 $d_{17} = 125/1000$
 $e_{17} = 5e-05$
 $a_{17} = \pi \cdot d_{17}^2/4$

"Contas trecho _17"

$q[17] = a_{17} \cdot v[17] \cdot 3600$
 $pn[17]/(\rho \cdot g) = pn[18]/(\rho \cdot g) - hp_{17}$
 $hp_{17} = (f_{17} \cdot l_{17}/d_{17} + c_{17}) \cdot (v[17]^2/(2 \cdot g))$
 $1/\sqrt{f_{17}} = -1,8 \cdot \log_{10}(((e_{17}/d_{17})/3,7)^{1,11+6,9/Re_{17}})$
 $Re_{17} = v[17] \cdot d_{17}/\nu$

"Parâmetros trecho _18"

$c_{18valv} = k_{valv[4]} \cdot \text{teta}[18]^3 + k_{valv[3]} \cdot \text{teta}[18]^2 + k_{valv[2]} \cdot \text{teta}[18] + k_{valv[1]}$

$c_{18} = 2 \cdot 0,065 + 0,25 + c_{18valv}$
 $l_{18} = 2,2$
 $v[18] = 20$
 $d_{18} = 165/1000$
 $e_{18} = 5e-05$
 $a_{18} = \pi \cdot d_{18}^2/4$

"Contas trecho _18"

$q[18] = a_{18} \cdot v[18] \cdot 3600$
 $pn[17]/(\rho \cdot g) = pn[19]/(\rho \cdot g) - hp_{18}$
 $hp_{18} = (f_{18} \cdot l_{18}/d_{18} + c_{18}) \cdot (v[18]^2/(2 \cdot g))$
 $1/\sqrt{f_{18}} = -1,8 \cdot \log_{10}(((e_{18}/d_{18})/3,7)^{1,11} + 6,9/Re_{18})$
 $Re_{18} = v[18] \cdot d_{18}/\nu$

"Parâmetros trecho _19"

$c_{19} = 2 \cdot 0,13$
 $l_{19} = 9,82$
 $v[19] = 20$
 $d_{19} = 290/1000$
 $e_{19} = 5e-05$
 $a_{19} = \pi \cdot d_{19}^2/4$

"Contas trecho _19"

$q[19] = a_{19} \cdot v[19] \cdot 3600$
 $pn[16]/(\rho \cdot g) = pn[20]/(\rho \cdot g) - hp_{19}$
 $hp_{19} = (f_{19} \cdot l_{19}/d_{19} + c_{19}) \cdot (v[19]^2/(2 \cdot g))$
 $1/\sqrt{f_{19}} = -1,8 \cdot \log_{10}(((e_{19}/d_{19})/3,7)^{1,11} + 6,9/Re_{19})$
 $Re_{19} = v[19] \cdot d_{19}/\nu$

"Parâmetros trecho _20"

$c_{20valv} = k_{valv[4]} \cdot \text{teta}[20]^3 + k_{valv[3]} \cdot \text{teta}[20]^2 + k_{valv[2]} \cdot \text{teta}[20] + k_{valv[1]}$
 $c_{20} = 1 \cdot 0,065 + 1 \cdot 0,08667 + 0,11 + 0,25 + c_{20valv}$
 $l_{20} = 2,28$
 $v[20] = 20$
 $d_{20} = 125/1000$
 $e_{20} = 5e-05$
 $a_{20} = \pi \cdot d_{20}^2/4$

"Contas trecho _20"

$q[20] = a_{20} \cdot v[20] \cdot 3600$
 $pn[20]/(\rho \cdot g) = pn[21]/(\rho \cdot g) - hp_{20}$
 $hp_{20} = (f_{20} \cdot l_{20}/d_{20} + c_{20}) \cdot (v[20]^2/(2 \cdot g))$
 $1/\sqrt{f_{20}} = -1,8 \cdot \log_{10}(((e_{20}/d_{20})/3,7)^{1,11} + 6,9/Re_{20})$
 $Re_{20} = v[20] \cdot d_{20}/\nu$

"Parâmetros trecho _21"

$c_{21} = 0$
 $l_{21} = 0,5$
 $v[21] = 20$
 $d_{21} = 260/1000$
 $e_{21} = 5e-05$
 $a_{21} = \pi \cdot d_{21}^2/4$

"Contas trecho _21"

$q[21] = a_{21} \cdot v[21] \cdot 3600$
 $pn[20]/(\rho \cdot g) = pn[22]/(\rho \cdot g) - hp_{21}$
 $hp_{21} = (f_{21} \cdot l_{21}/d_{21} + c_{21}) \cdot (v[21]^2/(2 \cdot g))$
 $1/\sqrt{f_{21}} = -1,8 \cdot \log_{10}(((e_{21}/d_{21})/3,7)^{1,11+6,9/Re_{21}})$
 $Re_{21} = v[21] \cdot d_{21}/\nu$

"Parâmetros trecho _22"

$c_{22valv} = k_{valv}[4] \cdot \text{teta}[22]^3 + k_{valv}[3] \cdot \text{teta}[22]^2 + k_{valv}[2] \cdot \text{teta}[22] + k_{valv}[1]$
 $c_{22} = 1 \cdot 0,13 + 0,065 \cdot 1 + 0,3 + 0,25 + c_{22valv}$
 $l_{22} = 1,63$
 $v[22] = 20$
 $d_{22} = 165/1000$
 $e_{22} = 5e-05$
 $a_{22} = \pi \cdot d_{22}^2/4$

"Contas trecho _22"

$q[22] = a_{22} \cdot v[22] \cdot 3600$
 $pn[22]/(\rho \cdot g) = pn[23]/(\rho \cdot g) - hp_{22}$
 $hp_{22} = (f_{22} \cdot l_{22}/d_{22} + c_{22}) \cdot (v[22]^2/(2 \cdot g))$
 $1/\sqrt{f_{22}} = -1,8 \cdot \log_{10}(((e_{22}/d_{22})/3,7)^{1,11+6,9/Re_{22}})$
 $Re_{22} = v[22] \cdot d_{22}/\nu$

"Parâmetros trecho _23"

$c_{23} = 0$
 $l_{23} = 1,3$
 $v[23] = 20$
 $d_{23} = 205/1000$
 $e_{23} = 5e-05$
 $a_{23} = \pi \cdot d_{23}^2/4$

"Contas trecho _23"

$q[23] = a_{23} \cdot v[23] \cdot 3600$
 $pn[22]/(\rho \cdot g) = pn[24]/(\rho \cdot g) - hp_{23}$
 $hp_{23} = (f_{23} \cdot l_{23}/d_{23} + c_{23}) \cdot (v[23]^2/(2 \cdot g))$
 $1/\sqrt{f_{23}} = -1,8 \cdot \log_{10}(((e_{23}/d_{23})/3,7)^{1,11+6,9/Re_{23}})$
 $Re_{23} = v[23] \cdot d_{23}/\nu$

"Parâmetros trecho _24"

$c_{24valv} = k_{valv}[4] \cdot \text{teta}[24]^3 + k_{valv}[3] \cdot \text{teta}[24]^2 + k_{valv}[2] \cdot \text{teta}[24] + k_{valv}[1]$
 $c_{24} = 1 \cdot 0,13 + 1 \cdot 0,08667 + 0,27 + 0,49 + c_{24valv}$
 $l_{24} = 1,69$
 $v[24] = 20$
 $d_{24} = 100/1000$
 $e_{24} = 5e-05$
 $a_{24} = \pi \cdot d_{24}^2/4$

"Contas trecho _24"

$q[24] = a_{24} \cdot v[24] \cdot 3600$
 $pn[24]/(\rho \cdot g) = pn[25]/(\rho \cdot g) - hp_{24}$
 $hp_{24} = (f_{24} \cdot l_{24}/d_{24} + c_{24}) \cdot (v[24]^2/(2 \cdot g))$
 $1/\sqrt{f_{24}} = -1,8 \cdot \log_{10}(((e_{24}/d_{24})/3,7)^{1,11+6,9/Re_{24}})$
 $Re_{24} = v[24] \cdot d_{24}/\nu$

"Parâmetros trecho _25"

$c_{25} = 0$
 $l_{25} = 1,3$
"v[25] = 20"
 $d_{25} = 180/1000$
 $e_{25} = 5e-05$
 $a_{25} = \pi \cdot d_{25}^2/4$

"Contas trecho _25"

$q[25] = a_{25} \cdot v[25] \cdot 3600$
 $pn[24]/(\rho \cdot g) = pn[26]/(\rho \cdot g) - hp_{25}$
 $hp_{25} = (f_{25} \cdot l_{25}/d_{25} + c_{25}) \cdot (v[25]^2/(2 \cdot g))$
 $1/\sqrt{f_{25}} = -1,8 \cdot \log_{10}(((e_{25}/d_{25})/3,7)^{1,11+6,9/Re_{25}})$
 $Re_{25} = v[25] \cdot d_{25}/\nu$

"Parâmetros trecho _26"

$c_{26valv} = k_{valv[4]} \cdot \text{teta}[26]^3 + k_{valv[3]} \cdot \text{teta}[26]^2 + k_{valv[2]} \cdot \text{teta}[26] + k_{valv[1]}$
 $c_{26} = 1 \cdot 0,13 + 1 \cdot 0,08667 + 0,27 + 0,49 + c_{26valv}$
 $l_{26} = 1,68$
"v[26] = 20"
 $d_{26} = 100/1000$
 $e_{26} = 5e-05$
 $a_{26} = \pi \cdot d_{26}^2/4$

"Contas trecho _26"

$q[26] = a_{26} \cdot v[26] \cdot 3600$
 $pn[26]/(\rho \cdot g) = pn[27]/(\rho \cdot g) - hp_{26}$
 $hp_{26} = (f_{26} \cdot l_{26}/d_{26} + c_{26}) \cdot (v[26]^2/(2 \cdot g))$
 $1/\sqrt{f_{26}} = -1,8 \cdot \log_{10}(((e_{26}/d_{26})/3,7)^{1,11+6,9/Re_{26}})$
 $Re_{26} = v[26] \cdot d_{26}/\nu$

"Parâmetros trecho _27"

$c_{27} = 2 \cdot 0,13$
 $l_{27} = 2,543$
"v[27] = 20"
 $d_{27} = 140/1000$ **"150"**
 $e_{27} = 5e-05$
 $a_{27} = \pi \cdot d_{27}^2/4$

"Contas trecho _27"

$q[27] = a_{27} \cdot v[27] \cdot 3600$
 $pn[26]/(\rho \cdot g) = pn[28]/(\rho \cdot g) - hp_{27}$
 $hp_{27} = (f_{27} \cdot l_{27}/d_{27} + c_{27}) \cdot (v[27]^2/(2 \cdot g))$
 $1/\sqrt{f_{27}} = -1,8 \cdot \log_{10}(((e_{27}/d_{27})/3,7)^{1,11+6,9/Re_{27}})$
 $Re_{27} = v[27] \cdot d_{27}/\nu$

"Parâmetros trecho _28"

$c_{28valv} = k_{valv[4]} \cdot \text{teta}[28]^3 + k_{valv[3]} \cdot \text{teta}[28]^2 + k_{valv[2]} \cdot \text{teta}[28] + k_{valv[1]}$
 $c_{28} = 1 \cdot 0,065 + 1 \cdot 0,08667 + 0,48 + 0,49 + c_{28valv}$
 $l_{28} = 0,8$
"v[28] = 20"
 $d_{28} = 100/1000$
 $e_{28} = 5e-05$

$$a_{28} = \pi \cdot d_{28}^2 / 4$$

"Contas trecho _28"

$$q[28] = a_{28} \cdot v[28] \cdot 3600$$

$$pn[28]/(\rho \cdot g) = pn[29]/(\rho \cdot g) - hp_{28}$$

$$hp_{28} = (f_{28} \cdot l_{28}/d_{28} + c_{28}) \cdot (v[28]^2 / (2 \cdot g))$$

$$1/\sqrt{f_{28}} = -1,8 \cdot \log_{10}(((e_{28}/d_{28})/3,7)^{1,11} + 6,9/Re_{28})$$

$$Re_{28} = v[28] \cdot d_{28} / \nu$$

"Parâmetros trecho _29"

$$c_{29valv} = k_{valv[4]} \cdot \text{teta}[29]^3 + k_{valv[3]} \cdot \text{teta}[29]^2 + k_{valv[2]} \cdot \text{teta}[29] + k_{valv[1]}$$

$$c_{29} = 0,49 + c_{29valv}$$

$$l_{29} = 0,81$$

$$v[29] = 20$$

$$d_{29} = 100/1000$$

$$e_{29} = 5e-05$$

$$a_{29} = \pi \cdot d_{29}^2 / 4$$

"Contas trecho _29"

$$q[29] = a_{29} \cdot v[29] \cdot 3600$$

$$pn[28]/(\rho \cdot g) = pn[30]/(\rho \cdot g) - hp_{29}$$

$$hp_{29} = (f_{29} \cdot l_{29}/d_{29} + c_{29}) \cdot (v[29]^2 / (2 \cdot g))$$

$$1/\sqrt{f_{29}} = -1,8 \cdot \log_{10}(((e_{29}/d_{29})/3,7)^{1,11} + 6,9/Re_{29})$$

$$Re_{29} = v[29] \cdot d_{29} / \nu$$

"Equação Continuidade"

$$q[1] = q[2]$$

$$q[2] = q[3]$$

$$q[3] = q[4] + q[9]$$

$$q[4] = q[5] + q[6]$$

$$q[6] = q[7] + q[8]$$

$$q[9] = q[10] + q[11]$$

$$q[11] = q[12] + q[15]$$

$$q[12] = q[13] + q[14]$$

$$q[15] = q[16] + q[19]$$

$$q[16] = q[17] + q[18]$$

$$q[19] = q[20] + q[21]$$

$$q[21] = q[23] + q[22]$$

$$q[23] = q[24] + q[25]$$

$$q[25] = q[27] + q[26]$$

$$q[27] = q[28] + q[29]$$

"Pressoes Ambientes"

$$pn[1] = Pamb \cdot 1000$$

$$pn[6] = Pamb \cdot 1000$$

$$pn[8] = Pamb \cdot 1000$$

$$pn[9] = Pamb \cdot 1000$$

$$pn[11] = Pamb \cdot 1000$$

$$pn[14] = Pamb \cdot 1000$$

$$pn[15] = Pamb \cdot 1000$$

$$pn[18] = Pamb \cdot 1000$$

$$pn[19] = Pamb \cdot 1000$$

$$pn[21] = Pamb \cdot 1000$$

$$pn[23] = Pamb \cdot 1000$$

pn[25] = Pamb*1000
 pn[27] = Pamb*1000
 pn[29] = Pamb*1000
 pn[30] =Pamb*1000

"Perda de carga Total"

hp_t5 = hp_3 + hp_4+ hp_5 + hp_1 + hp_2
 hp_t7 = hp_3 + hp_4 + hp_6 + hp_7 + hp_1 + hp_2
 hp_t8 = hp_3 +hp_4 + hp_6 + hp_8 + hp_1 + hp_2
 hp_t10 = hp_3 + hp_9+ hp_10 + hp_1 + hp_2
 hp_t13 = hp_3 + hp_9+ hp_11 + hp_12 + hp_13 + hp_1 + hp_2
 hp_t14 = hp_3 + hp_9+ hp_11 + hp_12 + hp_14 + hp_1 + hp_2
 hp_t17 = hp_3 + hp_9+ hp_11 + hp_15 + hp_16 + hp_17 + hp_1 + hp_2
 hp_t18 = hp_3 + hp_9+ hp_11+ hp_15 + hp_16 + hp_18 + hp_1 + hp_2
 hp_t20 = hp_3 + hp_9+ hp_11 + hp_15 + hp_19 + hp_20 + hp_1 + hp_2
 hp_t22 = hp_3 + hp_9+ hp_11 + hp_15 + hp_19 + hp_21 +hp_22+ hp_1 + hp_2
 hp_t24 = hp_3 + hp_9+ hp_11+ hp_15 + hp_19 + hp_21 + hp_23 + hp_24 + hp_1 + hp_2
 hp_t26 = hp_3 + hp_9+ hp_11 + hp_15 + hp_19 + hp_21 + hp_23 + hp_25 + hp_26 +hp_1 + hp_2
 hp_t28= hp_3 + hp_9+ hp_11 + hp_15+ hp_19 + hp_21+ hp_23 + hp_25 + hp_27 + hp_28 +hp_1 + hp_2
 hp_t29 = hp_3 + hp_9+ hp_11 + hp_15 + hp_19 + hp_21 + hp_23 + hp_25 + hp_27 + hp_29 + hp_1 + hp_2

"Função objetivo"

obj = ((v[5]-20)^2 + (v[7]-20)^2 + (v[8]-20)^2 + (v[10]-20)^2 + (v[13]-20)^2 + (v[14]-20)^2 + (v[17]-20)^2 + (v[18]-20)^2 + (v[20]-20)^2 + (v[22]-20)^2 + (v[24]-20)^2 + (v[26]-20)^2 + (v[28]-20)^2 + (v[29]-20)^2)

{"Angulos Válvula borboleta"

teta[5]=0
 teta[7]=0
 teta[8]=0
 teta[10]=0
 teta[13]=0
 teta[14]=0
 teta[17]=0
 teta[18]=0
 teta[20]=0
 teta[22]=0
 teta[24]=0
 teta[26]=0
 teta[28]=0
 teta[29]=0}