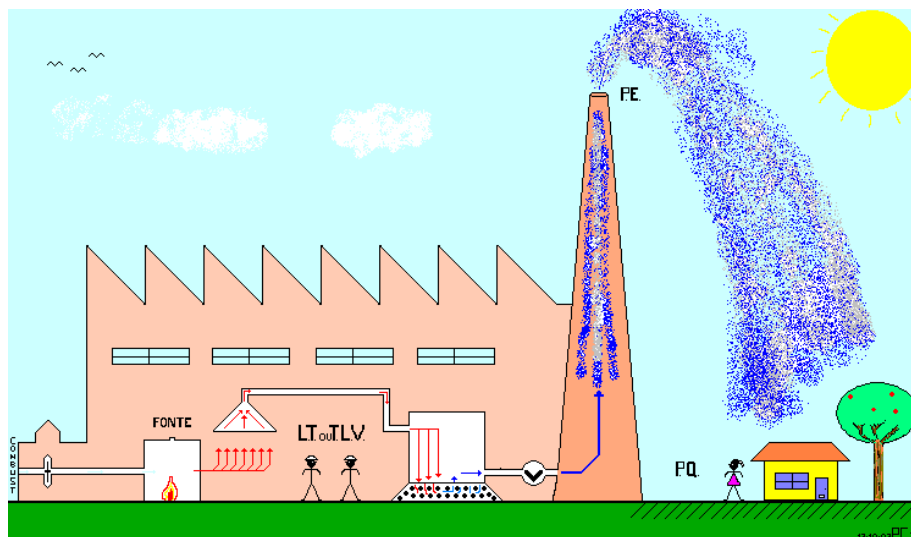


CONTROLE DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

Henrique de Melo Lisboa
Waldir Nagel Schirmer

UNIDADE VII

METODOLOGIA DE CONTROLE DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA



Montreal
Primeira versão - Novembro Outubro 2007

SUMÁRIO

7.1	INTRODUÇÃO	3
7.2	MÉTODOS DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR	3
7.2.1	MEDIDAS INDIRETAS	4
7.2.2	MEDIDAS DIRETAS	5
7.3	CLASSIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR	6
7.3.1	EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE MATERIAL PARTICULADO	6
7.3.2	EQUIPAMENTOS DE CONTROLE PARA GASES E VAPORES	7
7.4	CONCEITOS BÁSICOS PARA OS EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR	7
7.4.1	EFICIÊNCIA DOS EQUIPAMENTOS	7
7.4.2	EFICIÊNCIA GLOBAL DE COLETA	7
7.4.4	EFICIÊNCIA FRACIONADA - T(x)	8
7.4.5	PRINCIPAIS PRINCÍPIOS PARA A DEPURAÇÃO DO AR	9
7.4.6	MECANISMOS DE COLETA	10
7.5.	CLASSIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE MATERIAL PARTICULADO	13
7.5.1	COLETORES À SECO	13
7.5.1.1	CÂMARA DE SEDIMENTAÇÃO GRAVITACIONAL	13
7.5.1.2	CICLONES	17
7.5.1.3	FILTROS DE TECIDO	28
7.5.1.4	PRECIPITADORES ELETROSTÁTICOS	37
7.5.2	COLETORES ÚMIDOS	43
7.6	EQUIPAMENTOS PARA REMOÇÃO DE GASES E VAPORES	48
7.6.1	ABSORVEDORES	48
7.6.2	ADSORVEDORES	58
7.6.3	INCINERADORES DE GASES E VAPORES	66
7.6.4	PROCESSOS BIOLÓGICOS DE TRATAMENTO DE GASES E VAPORES	78
7.6.5	CONDENSAÇÃO PARA TRATAMENTO DE GASES E VAPORES	85
7.7	FATORES A SEREM VERIFICADOS NA SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR	87
7.8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

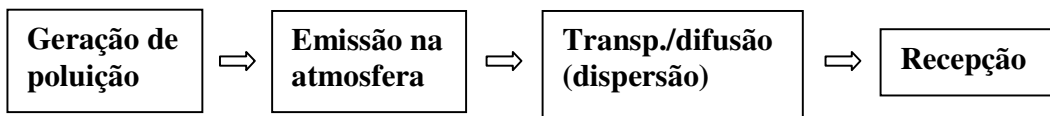
7.1 INTRODUÇÃO

De acordo com DE NEVERS (1995) e SEINFELD (1995) o processo de poluição do ar se resume a três momentos: (1) emissão de poluentes para a atmosfera; (2) transporte, diluição e modificação química ou física dos poluentes na atmosfera; (3) imissão dos poluentes - Figura 7. 1.



Figura 7. 1 - Processo de poluição do ar. Fonte: Mauricy Kawano.

Fases do processo de poluição do ar:



7.2 MÉTODOS DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR

De modo geral há dois métodos básicos pelos quais se pode controlar a emissão de poluentes atmosféricos (e odores) nos processos industriais. Estas técnicas são divididas em dois grupos: a) Métodos indiretos, tais como modificação do processo e/ou equipamento; b) Métodos diretos ou técnicas de tratamento.

7.2.1 MEDIDAS INDIRETAS

Este grupo é classificado como método indireto de controle de gases, uma vez que tal controle é conseguido através da modificação do equipamento/processo, alteração de matérias primas por outras ecologicamente mais adequadas, manutenção dos equipamentos e operação dos mesmos dentro da sua limitação, etc, sempre com o objetivo de prevenir o escape ou formação dos gases. São, em grande parte, chamadas de “Tecnologias Limpas”. Eis algumas destas medidas:

➔ Impedir à geração do poluente:

- Substituição de matérias primas e reagentes:
 - . enxofre por soda na produção de celulose
 - . eliminação da adição de chumbo tetraetila na gasolina
 - . uso de resina sintética ao invés de borracha na fabricação de escovas de pintura
- Mudanças de processos ou operação:
 - . utilização de operações contínuas automáticas
 - . uso de sistemas completamente fechados
 - . condensação e reutilização de vapores (indústria petrolífera)
 - . processo úmido ao invés de processo seco
 - . processo soda ou termoquímico ao invés de processo KRAFT na produção de celulose (soda reduz emissão de gás sulfídrico)

➔ Diminuir a quantidade de poluentes geradas:

- Operar os equipamentos dentro da capacidade nominal
- Boa operação e manutenção de equipamentos produtivos
- Adequado armazenamento de materiais pulverulentos
- Mudança de comportamentos (educação ambiental)
- Mudança de processos, equipamentos e operações:
 - . forno cubilô por forno elétrico de indução
 - . fornos à óleo por fornos elétricos de indução (fundições)
 - . umidificação (pedreiras)
 - . utilização de material sinterizado em alto-fornos
 - . evaporação de contato direto por evaporação de contato indireto na recuperação do licor negro na produção de celulose
 - . controle da temperatura de fusão de metais
 - . operação de equipamentos com pessoal treinado
 - . redução da oxidação de SO_2 à SO_3 pela redução do excesso de ar (menor que 1%) quando da queima de óleos combustíveis
- Mudança de combustíveis
 - . combustível com menor teor de enxofre (óleo BPF por BTE)
 - . combustível líquido por combustível gasoso
 - . combustível sólido por combustível líquido ou gasoso

. substituição de combustíveis fósseis por energia elétrica

➔ **Diluição através de chaminés elevadas** : – Figura 7. 2.

Fatores a serem considerados:

- Relacionados com o processo:
 - quantidade emitida
 - temperatura de emissão
 - estado dos poluentes
 - concentração
 - distrib. de tamanho das partíc.
 - prop. químicas e toxicológicas dos poluentes

- Relacionados com a fonte:
 - altura e diâmetro da chaminé
 - velocidade dos gases na chaminé
 - relação da chaminé com as demais

- Meteorológicas:
 - direção e velocidade dos ventos
 - temperatura
 - estabilidade atmosférica
 - aspectos topográficos



Figura 7. 2 - Diluição através de chaminés elevadas.

➔ **Mascaramento do poluente:**

. Eliminação da percepção nasal humana de um odor pela superposição de outro odor.

➔ **Localização seletiva Fonte/Receptor (planejamento territorial)**

➔ **Adequada construção (lay-out) e manutenção dos edifícios industriais:**

- . armazenamento de produtos
- . adequada disposição de resíduos sólidos e líquidos

7.2.2 MEDIDAS DIRETAS

As medidas ou métodos diretos de controle incluem técnicas destrutivas como incineração e biofiltração, e técnicas recuperativas, como absorção, adsorção e condensação (KHAN e GHOSHAL, 2000; SCHIRMER e LISBOA, 2003). Na seqüência será apresentada uma breve descrição de cada uma destas técnicas. Maiores detalhes, parâmetros de projeto, etc., podem ser encontrados em literatura específica. Estas técnicas passam por duas etapas:

➔ **Concentração dos poluentes na fonte para tratamento efetivo antes do lançamento na atmosfera:**

- sistemas de ventilação local exaustora: Ver Capítulo 6 - Figura 7. 3.

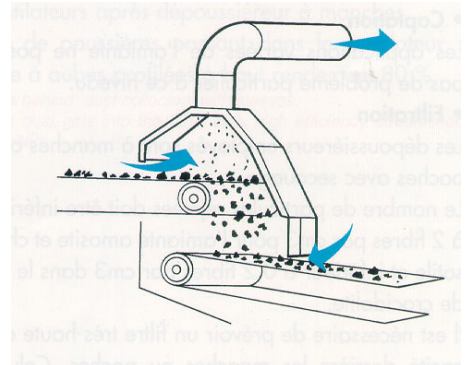


Figura 7. 3 - Sistemas de ventilação local exaustora

- ➔ **Retenção do poluente após geração através de equipamentos de controle de poluição do ar (ECP) -** Figura 7. 4.

Figura 7. 4 - Equipamentos de controle da poluição do ar.



7.3 CLASSIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR

Os equipamentos de controle são classificados primeiramente em função do estado físico do poluente a ser considerado. Em seguida a classificação envolve diversos parâmetros como mecanismo de controle, uso ou não de água ou outro líquido, etc.

7.3.1 EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE MATERIAL PARTICULADO

- **Coletores secos:**

- . coletores mecânicos inerciais e gravitacionais
- . coletores mecânicos centrífugos (ex.: ciclones)
- . precipitadores dinâmicos secos
- . filtro de tecido (ex.: o filtro-manga)
- . precipitador eletrostático seco

- **Coletores úmidos:**

- . torre de “spray” (pulverizadores)

- . lavadores com enchimento
- . lavador ciclônico
- . lavador venturi
- . lavadores de leito móvel

7.3.2 EQUIPAMENTOS DE CONTROLE PARA GASES E VAPORES

- Absorvedores
- Adsorvedores
- Incineração de gás com chama direta
- Incineradores de gás catalíticos

Ver: Equipamentos de controle – Apostilas do curso de engenharia ambiental na indústria. Faculdade de Saúde Pública/USP:

01. Mecanismo de coleta de partículas (Armando Luiz de Souza Mesquita)
02. Lavadores (João Baptista Galvão Filho)
03. Coletores centrífugos secos – ciclone (Paulo T . Hasegawa)
04. Filtros de tecidos – sumário das especificações (idem)
05. Precipitadores eletrostáticos (Ernesto R. Lima)

7.4 CONCEITOS BÁSICOS PARA OS EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR

7.4.1 EFICIÊNCIA DOS EQUIPAMENTOS

$$\eta_{(\%)} = \frac{100(A - B)}{A}$$

onde,

A = carga de entrada (concentração)

B = carga de saída

7.4.2 EFICIÊNCIA GLOBAL DE COLETA

Na prática existem muitos casos de utilização de equipamentos de controle em série, como por exemplo, um ciclone seguido de um lavador. Nesse caso define-se a Eficiência Global de Coleta

$$\eta_g = \left(1 - \left[(1 - \eta_1)(1 - \eta_2) \dots (1 - \eta_i)\right]\right) \times 100$$

7.4.3 PENETRAÇÃO, FATOR DE DESPOLUIÇÃO E ÍNDICE DE DESPOLUIÇÃO

Usada para coletores com eficiência extremamente alta

$$P = 100 - \eta$$

Onde, P = penetração

$$FD = A/B = \frac{1}{1 - \left(\frac{\eta}{100}\right)}$$

para

$$\eta = 99,999 \rightarrow FD = 10^5$$

O logaritmo em base 10 do FD (Fator de Despoluição) é conhecido como o índice de despoluição ID. Para o caso acima ID = 5

Exemplo: Determinar a eficiência global de coleta, a penetração e a quantidade encontrada após controle, para um sistema de controle de poluição do ar composto de 3 equipamentos em série, numa fonte de material particulado. Dados:

- . quantidade inicial de material particulado presente no efluente: 10.000 kg/h
- . eficiência de controle do equip. 1: 40%
- . eficiência de controle do equip. 2: 60%
- . eficiência de controle do equip. 3: 90%

Solução:

$$\text{Eficiencia: } \eta_g = \left(1 - \left[(1 - \eta_1) \times (1 - \eta_2) \times (1 - \eta_3)\right]\right) \times 100$$

$$\eta_g = \left(1 - \left[(1 - 0,4) \times (1 - 0,6) \times (1 - 0,9)\right]\right) \times 100$$

$$\eta_g = 97,6\%$$

$$\text{Penetração: } P = 1 - \eta = 1 - 0,976 = 0,024$$

$$P = 2,4\%$$

Emissão após controle (E_f)

$$E_f = E_i \times P = E_i (1 - \eta) = 10.000 \text{ kg/h} \times 0,024$$

$$E_f = 240 \text{ kg/h}$$

Quantidade coletada = 10.000 - 240

$$Q_c = 9760 \text{ Kg}$$

7.4.4 EFICIÊNCIA FRACIONADA - T(x)

Quando a eficiência é expressa por tamanho de partículas. Um exemplo é mostrado na Tabela 7. 1 para vários tipos de coletores e na Figura 7. 5.

Tabela 7. 1 – Eficiência fracionada de coletores de material particulado em função da distribuição de tamanho das partículas (em porcentagens). Fonte: CETESB, 1987.

Tipo de equipamento ¹	Diâmetro (µm)				
	0 → 5	5 → 10	10 → 20	20 → 44	> 44
Câmara de sedimentação (com chicanas)	7,5	22,0	43,0	80,0	90,0
Ciclone de baixa pressão	12,0	33,0	57,0	82,0	91,0
Ciclone de alta pressão	40,0	79,0	92,0	95,0	97,0
Multiciclone	25,0	54,0	74,0	95,0	98,0
Filtro de tecido	99,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Lavadores de média energia	80,0	90,0	98,0	100,0	100,0
Lavador Venturi (lavador de alta energia)	95,0	99,5	100,0	100,0	100,0
Precipitador eletroestático	97,0	99,0	99,5	100,0	100,0
Torre de spray	90,0	96,0	98,0	100,0	100,0

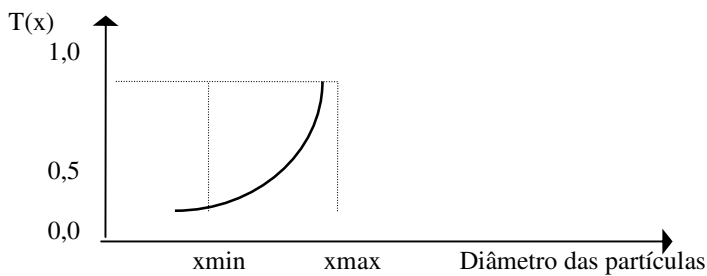


Figura 7. 5 – Aumento da eficiência fracionada com o diâmetro das partículas.

7.4.5 PRINCIPAIS PRINCÍPIOS PARA A DEPURAÇÃO DO AR

- GRAVITAÇÃO
- FILTRAÇÃO
- PROCESSO ELETROSTÁTICO
- ABSORÇÃO E ADSORÇÃO
- INCINERAÇÃO E COMBUSTÃO CATALÍTICA
- BIOTRATAMENTO
- SEPARAÇÃO POR INÉRCIA
- SEPARAÇÃO POR MEIOS LÍQUIDOS

¹ Valores comparativos. Não deverão ser utilizados para fins de dimensionamento.

7.5 EQUIPAMENTOS DE COLETA DE MATERIAL PARTICULADO (AEROSÓIS)

A retenção de partículas, originado de gases residuais, é um dos problemas de maior importância dentro do contexto da limitação da emissão de contaminantes gasosos. Esses são responsáveis por elevado número de fenômenos que depende da concentração e tempo de exposição.

Do ponto de vista da meteorologia as partículas se comportam como núcleos de condensação favorecendo a formação de neblinas que modificam, nas zonas altamente contaminadas, o microclima.

Do ponto de vista sanitário, as partículas em suspensão representam um grave perigo para pessoas afetadas por enfermidades bronquíticas crônicas.

Por outra parte, é grande a influência na vegetação, que uma vez depositado, obstruem estômatos e folhas dificultando o normal desenvolvimento de muitas das atividades biológicas (fotossíntese).

A retenção das partículas é um problema bastante complicado que carece de uma solução única. Junto com o aspecto da da separação em si, se encontram fenômenos tais como: perda de carga, esfriamento da corrente gasosa e outros que obrigam estudar cada caso particular elegendo o sistema mais adequado em cada circunstância.

7.4.6 MECANISMOS DE COLETA

A coleta de partículas envolve a aplicação de um ou mais dos seguintes mecanismos:

- sedimentação gravitacional
- força centrífuga
- difusão
- impactação
- interceptação
- força térmica
- força eletrostática

SEDIMENTAÇÃO GRAVITACIONAL: A sedimentação gravitacional é um mecanismo de deposição importante somente para partículas grandes (maiores que 20 micra). A eficiência de coleta de partículas através de sedimentação gravitacional é função da velocidade terminal da partícula, a

$$U_t = \frac{\phi_p^2 \cdot g \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot C}{18\mu_g}$$

qual, é expressa por:

onde,

U_t = velocidade terminal da partícula

ϕ_p = diâmetro da partícula

g = constante gravitacional

ρ_p = densidade da partícula

ρ_g = densidade do gás carreador

μ_g = viscosidade do gás carreador

C = fator de correção de Cunningham (adimensional)

$$\text{Fator de correção de Cunningham: } 1 + \frac{2\lambda}{D_f} \left[1,23 + 0,41e^{-0,44\frac{D_f}{\lambda}} \right]$$

Pela expressão acima verifica-se que a sedimentação gravitacional é diretamente proporcional à densidade e diâmetro da partícula. O fator de Cunningham corrige para o efeito de deslizamento das

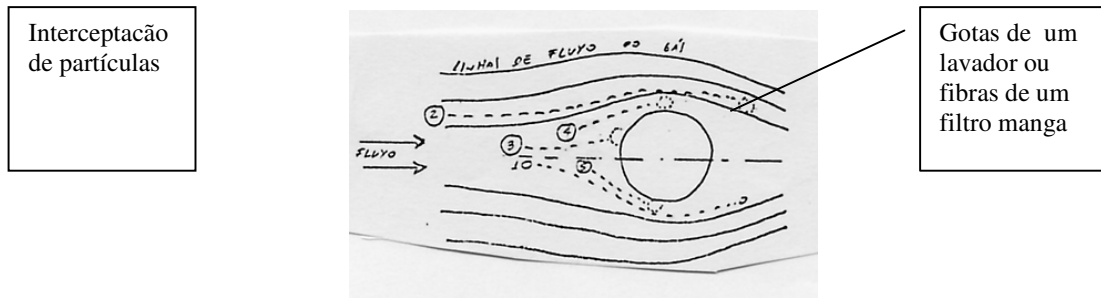


Figura 7.7 – Mecanismo de coleta de partículas por interceptação inercial (caso das partículas 4 e 5).

DIFUSÃO: O mecanismo de difusão torna-se mais importante à medida que o tamanho das partículas diminui. Esse mecanismo de coleta não apresenta importância para as partículas maiores que 1 µm em diâmetro. As partículas menores, em função da sua energia térmica, estão em constante movimento, similarmente ao que ocorre com as moléculas de um gás, fenômeno este chamado de Browniano – Figura 7.8

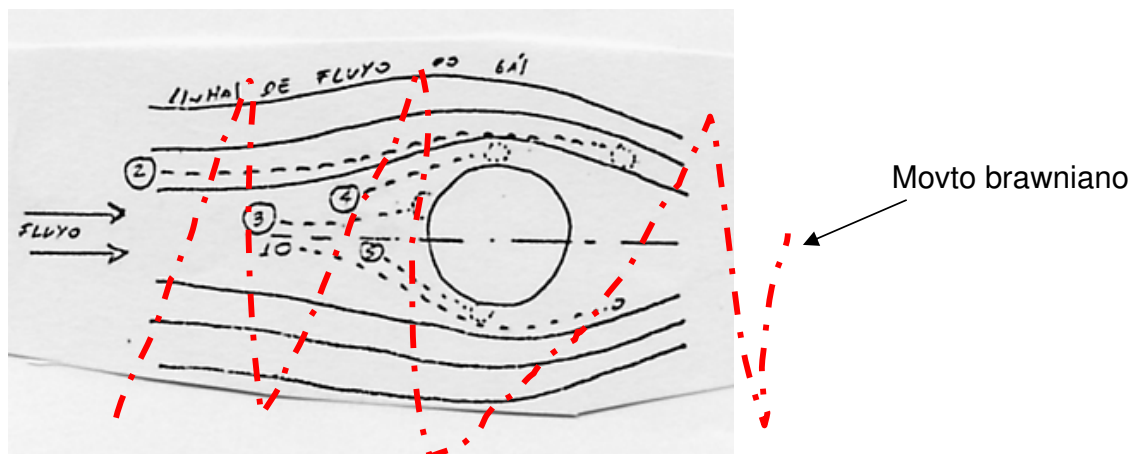


Figura 7.8 – Mecanismo de coleta de partículas por difusão.

FORÇA ELETROSTÁTICA: A força eletrostática é um mecanismo de coleta predominante em precipitadores eletrostáticos. No entanto apresenta importância em outros tipos de equipamentos de controle de poluição do ar, como os filtros de tecidos, uma vez que as partículas podem ter, na ausência de campo elétrico, cargas elétricas positivas ou negativas. De acordo com a lei de Coulomb, a força eletrostática é expressa por:

$$F_e = q \cdot E \quad \text{sendo} \quad \left\{ \begin{array}{l} F_e = \text{força eletrostática} \\ q = \text{carga elétrica da partícula} \\ E = \text{intensidade do campo elétrico} \end{array} \right.$$

O carregamento elétrico de partículas ocorre não só por ação do campo elétrico, o qual é importante para partículas de tamanhos maiores que 0,5 µm em diâmetro, mas também por difusão, o qual age mais intensamente em partículas pequenas (menores que 0,2 µm). Para as partículas com

diâmetro entre 0,2 μm e 0,5 μm o carregamento elétrico ocorre tanto por ação do campo elétrico como por difusão.

7.5. CLASSIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE MATERIAL PARTICULADO

COLETORES À SECO COLETORES ÚMIDOS

Um sistema de captação de material particulado é formado pelas seguintes partes:

- dispositivo de captação (captor)
- rede de coletores (tubulações)
- aspirador de potência necessária (ventilador)
- sistema de evacuação das partículas residuárias (equipamento de controle)

Deve-se respeitar uma série de princípios a fim de lograr a alta eficiência da captação. Os mais importantes são:

- Colocar o dispositivo de aspiração o mais próximo possível da fonte emissora devido ao fenômeno da diminuição da velocidade de aspiração com a área da seção.
- Envolver, o máximo possível, a zona de geração das partículas sólidas. A solução ideal consiste em colocar a fonte em um recinto hermético diretamente unido com o circuito de aspiração, o que provoca frágil depressão e assegurará uma proteção da zona de emissão contra as correntes de ar.

O desenho da instalação de captação é um fator muito importante para resolver corretamente o problema da eliminação das partículas. Um sistema sobre-dimensionado pode conduzir a gastos muitos elevados, e se um sistema é sub-dimensionado dá lugar a uma emissão de partículas em suspensão muito difícil de controlar.

7.5.1 COLETORES À SECO

7.5.1.1 CÂMARA DE SEDIMENTAÇÃO GRAVITACIONAL

A câmara de sedimentação gravitacional é um equipamento de controle cujo mecanismo de coleta é a força gravitacional. Possui dimensões suficientemente grandes nas quais a velocidade da corrente gasosa se reduz, de forma que as partículas que se encontram em suspensão tenham tempo suficiente em depositar-se. Apresenta pouca importância em termos de poluição do ar face à baixa eficiência para partículas menores que 40 μ . O seu uso mais comum é como pré-coletor que retira o particulado grosso diminuindo a sobrecarga do equipamento de controle final. Outra desvantagem é o espaço ocupado. Esquemas de uma câmara de sedimentação gravitacional são apresentados nas Figuras 7.9 e 7.10.

A câmara de sedimentação apresenta a vantagem da construção simples e baixa perda de carga, da ordem de 10 mm de coluna de água, reduzindo o custo de operação. Outra vantagem é a coleta a seco do material particulado. A eficiência de coleta de uma câmara gravitacional simples é dada por:

$$\eta = k \frac{g(\rho_p - \rho_g).L_c.B}{18\mu_g.Q} \phi_p^2$$

Sendo:

ϕ_p	= diâmetro da partícula (μm)	Q	= vazão de gás (m^3/s)
g	= constante gravitacional (m/s^2)	ρ_p	= densidade da partícula (kg/m^3)
ρ_g	= densidade do gás (kg/m^3)	μ_g	= viscosidade do gás (Pa.s)
L_c	= comprimento da câmara (m)	B	= largura da câmara (m)
K	= constante empírica (em geral 0,5)		

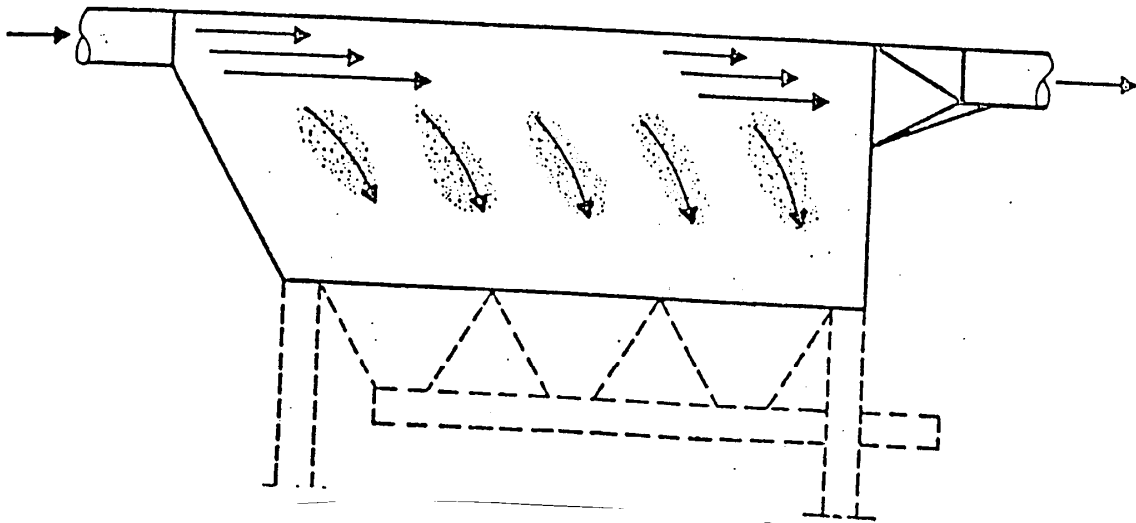


Figura 7. 9 - Câmara de sedimentação gravitacional do tipo simples.

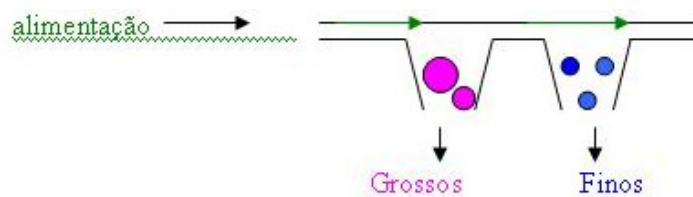


Figura 7. 10 – Mecanismo de deposição de MP por ação gravitacional.

O rendimento da câmara é função da superfície e independe, em primeira aproximação, de sua altura, que se encontra limitada de forma que a velocidade do gás não alcance valores altos para arrastar as partículas depositadas.

O rendimento das câmaras de sedimentação aumenta ao diminuir a velocidade do gás, que desse modo tenham tempo de depositar-se, incluindo as partículas de menor tamanho. A velocidade do gás na câmara em geral é limitada a no máximo 3 m/s para evitar a reentrada das partículas coletadas no fluxo gasoso. Em geral encontra-se na faixa de 0,5 a 1,5 m/s.

Os resultados apresentados no Quadro 7. 1 indicam que deveriam montar-se câmaras muito grandes para partículas de pequeno diâmetro. Por esta razão este sistema só emprega-se bem como etapa prévia de outro sistema de separação ou bem para partículas de grandes tamanhos ($50\mu\text{m}$).

Quadro 7. 1 - Relação altura comprimento em função do diâmetro da partícula.

DÍAMETRO(μm)	RELAÇÃO h/L
100	1,33
87	1,00
50	0,33
25	0,085
10	0,013
1	0,00013

Uma forma de aumentar a eficiência de uma câmara de sedimentação gravitacional é com a adição de chicanas ou anteparos - Figura 7. 11. Outros mecanismos vem a se somar à gravitação, como a impactação e a inércia.

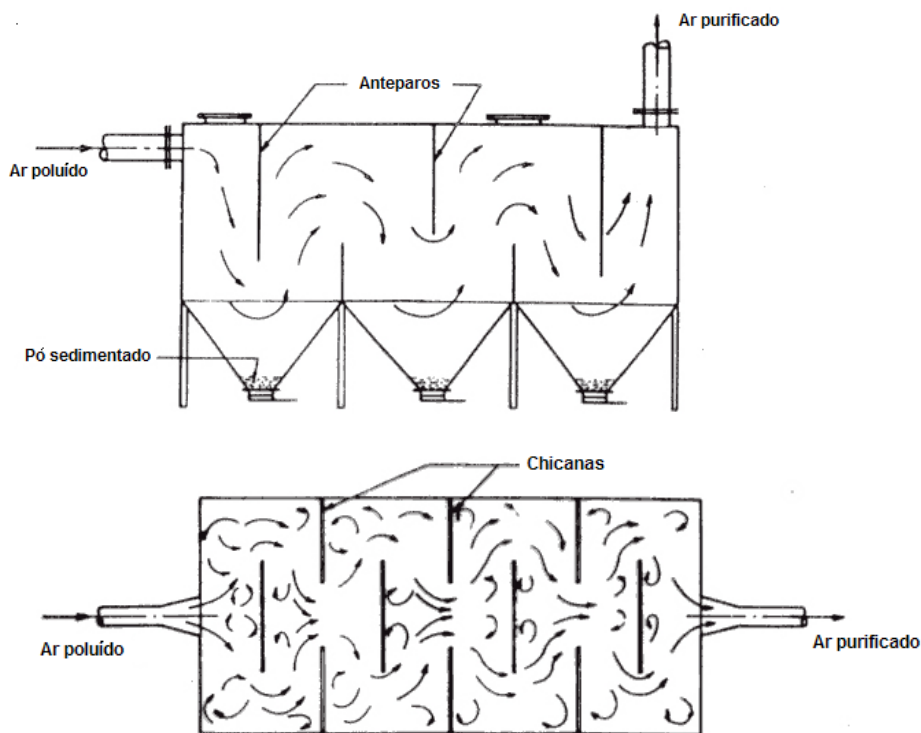


Figura 7. 11 – Câmara de sedimentação gravitacional com chicanas.

USOS, VANTAGENS E DESVANTAGENS:

- USOS:
 - pré-coletor de partículas grandes ($> 40 \mu$);
 - para reduzir a carga poluidora do ECP final;

• **VANTAGENS:**

- baixa perda de carga (< 0,5"ca: em geral na faixa de 10 a 25 mm ca);
- projeto, construção e instalação simples;
- baixo custo de instalação e de manutenção;
- não tem limitação de temperatura, exceto pelo material de construção;
- coleta a seco: permite recuperação mais fácil.

OBS: A utilização de pré-coletores resulta, em geral, na melhora da performance e aumento da vida útil dos equipamentos de coleta final (filtros de tecido, precipitadores eletrostáticos e lavadores), os quais são mais caros e complexos que os coletores mecânicos.

- **DESVANTAGENS :**
- baixa eficiência p/pequenas partículas (<10 μ)
 - requer espaço relativamente grande para instalação.

OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO: As câmaras de sedimentação gravitacional apresentam poucos problemas de manutenção se bem projetadas, instaladas e operadas adequadamente. Os problemas usuais são a corrosão externa e interna, a formação de depósitos internos, inclusive na tremonha, principalmente por materiais higroscópicos. O controle da temperatura do gás, de forma que a mesma esteja sempre acima do ponto de orvalho, reduzirá os problemas acima citados, exceto o de corrosão externa, que dependerá da utilização de camada protetora adequada. Não deixe a corrosão se alastrar. Ao primeiro sinal tome as providências necessárias. Inspeção periodicamente o sistema e anote no "diário" os problemas observados e as soluções adotadas. O início do "diário" deverá conter as condições de projeto da câmara para fins comparativos, durante a vida da mesma.

7.5.1.2 CICLONES

Ciclones são coletores que utilizam primariamente a força centrífuga para a coleta de partículas - Figura 7. 12. Os ciclones podem ter entrada tangencial ou radial. São compostos por um corpo cônico-cilíndrico, ao qual entram tangencialmente os gases a depurar, por uma abertura na parte superior do equipamento - Figura 7. 13. As partículas, submetidas à força centrífuga no final de certo número de voltas chocam-se com a parede e terminam depositando-se na parte inferior do cone - Figura 7. 14.

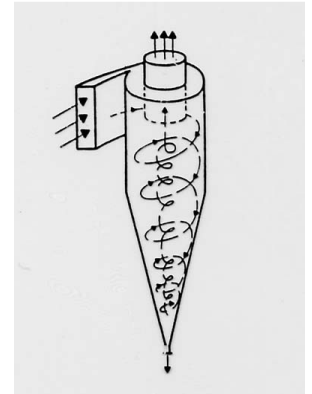


Figura 7. 12 – Ciclone.

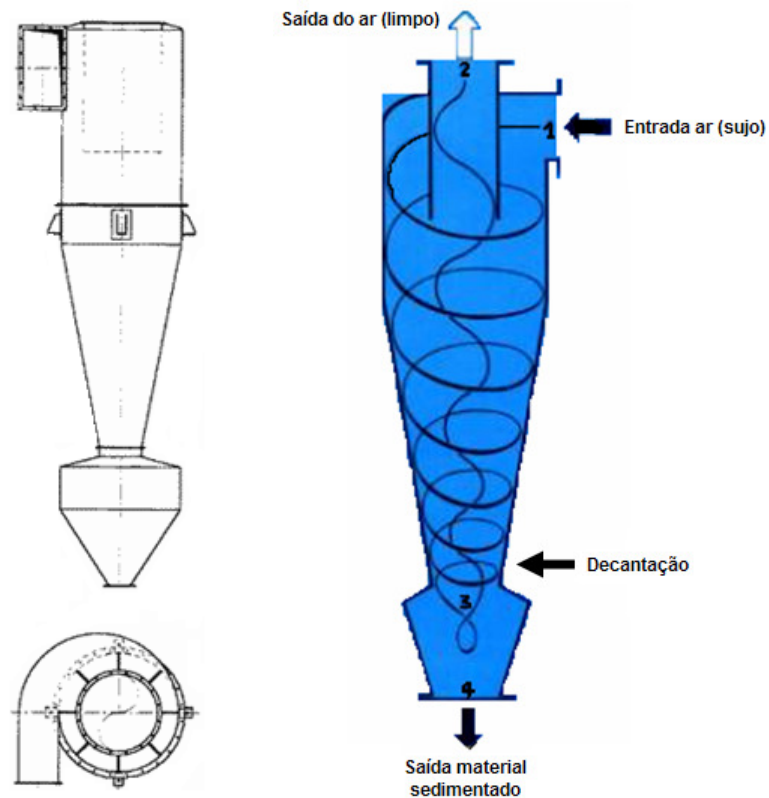


Figura 7. 13 – Detalhes de construção de um ciclone.

O ciclones são de grande uso em controle de poluição do ar, principalmente como pré-coletores. Devido a sua eficiência baixa para partículas pequenas, o seu uso nesses casos apresenta restrições face à impossibilidade de atender normas de emissão mais exigentes. Em geral são utilizados para a coleta de material particulado com diâmetro maior que 5 μm . Ciclones de pequeno diâmetro com entrada axial são utilizados em conjunto, trabalhando em paralelo, formando os multiciclones – Figura 7. 15.

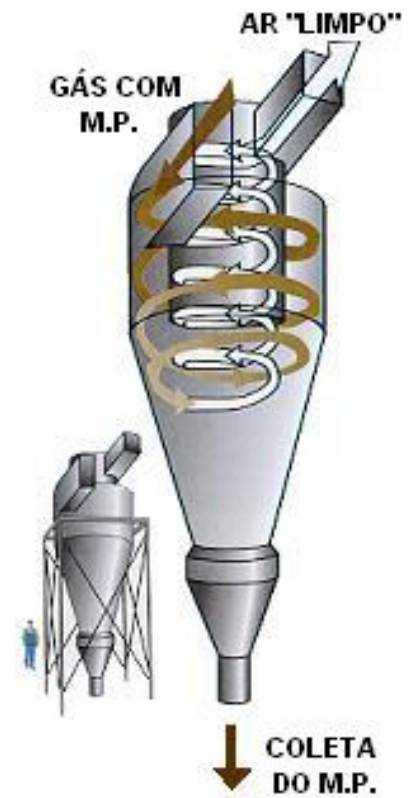


Figura 7. 14 – Funcionamento do ciclone.

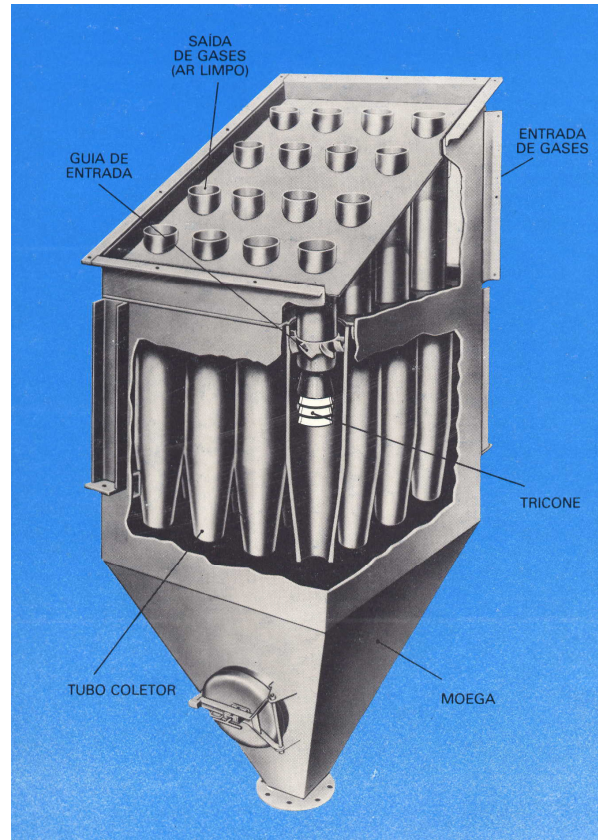


Figura 7. 15 – Multiciclones.

Os ciclones podem ser classificados segundo a sua eficiência e perda de carga da seguinte forma:

- ciclones de baixa eficiência: $5 < PC < 10 \text{ cm H}_2\text{O}$
- ciclones de média eficiência: $10 < PC < 20 \text{ cm H}_2\text{O}$
- ciclones de alta eficiência (cone longo): $20 < PC < 25 \text{ cm H}_2\text{O}$

A eficiência de ciclones é muitas vezes caracterizada pelo seu "diâmetro crítico" ou pelo seu "diâmetro de corte". O diâmetro crítico refere-se ao diâmetro da partícula que o ciclone coleta com 100% de eficiência. Similarmente, o diâmetro de corte refere-se ao diâmetro da partícula coletada com 50% de eficiência. Podem ser obtidos pelas seguintes expressões (Lapple) (CETESB, 1990):

$$d_{(100)} = \left(\sqrt{\frac{18\mu_g \cdot b}{2 \cdot \pi \cdot V_i \cdot \rho_p \cdot N_v}} \right) \times 10^6 \quad d_{(50)} = \left(\sqrt{\frac{9\mu_g \cdot b}{2 \cdot \pi \cdot V_i \cdot \rho_p \cdot N_v}} \right) \times 10^6$$

sendo:

d corte = $d_{(50)}$ [μ]

b = largura da entrada do ciclone [m]

V_i = velocidade do gás na entrada do ciclone, de 15 a 21 [m/s] (velocidade das partículas)

N_v = número de voltas do "vortex" (3 a 10) - os maiores valores devem ser utilizados para ciclones de alta eficiência (numero de revolução dadas pela partículas no interior do ciclone)

μ_g = viscosidade do gás [kg/m.s]

ρ_p = densidade da partícula [kg/m³]

Os ciclones convencionais, bem projetados, apresentam diâmetro de corte da ordem de 8 μm , enquanto os de alta eficiência apresentam diâmetro de corte da ordem de 3 μm .

A eficiência fracionada pode ser calculada pela equação de De Paola e Theodore, qual seja:

$$\eta = \frac{1}{1 + (d_{50} / d)^2}$$

Onde, d - diâmetro da partícula

O dimensionamento de ciclones é comumente realizado utilizando-se relações geométricas já conhecidas. A Figura 7. 16 e o Quadro 7. 2 apresentam as relações geométricas para ciclones de entrada tangencial segundo vários autores (CETESB, 1990).

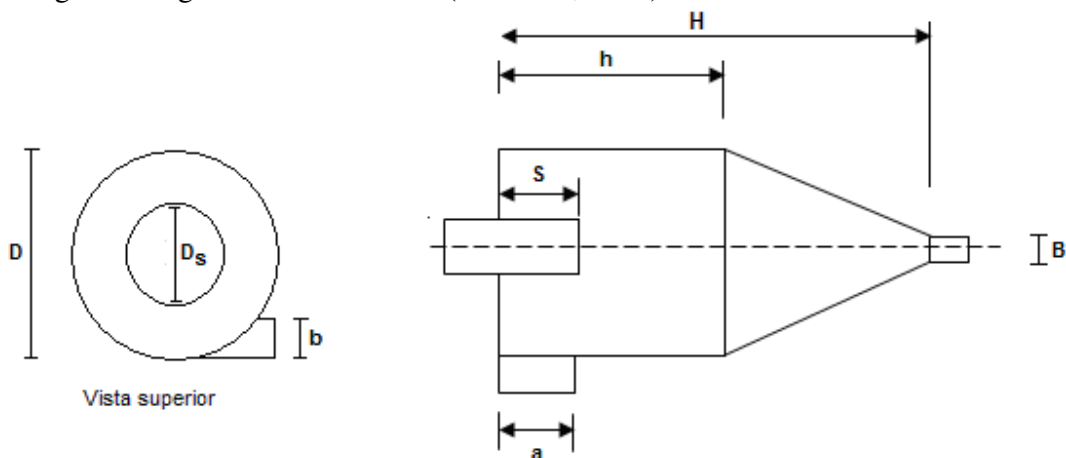
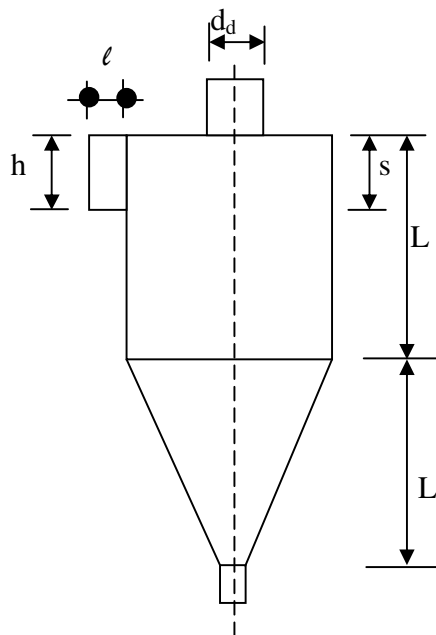


Figura 7. 16 – Relações geométricas para dimensionamento de um ciclone tangencial.



As dimensões estão em pés e o fator K depende do tipo de entrada e perda de carga Δp em polegadas de coluna d'água.

K = 0,5 para entrada simples sem guias

K = 1,0 para entrada com guias retas

K = 2,0 para entrada com guias expansoras

Figura 7. 17– Dimensões do ciclone

Os ciclones podem também serem divididos em dois grupos:

- normais
- alta eficácia

Esses últimos são de pequeno diâmetro (menor que 25 cm), e possuem maior capacidade de separação.

Um tipo de ciclone muito utilizado na prática são os multiciclones ou multi-clones – Figura 9. Os multiciclones são constituídos por um agrupamento de pequenos ciclones da ordem de 25 cm de diâmetro, que trabalham em paralelo e que possuem entrada radial. Os multiciclones apresentam as seguintes vantagens em relação aos ciclones convencionais:

- apresentam menor perda de carga para eficiências equivalentes
- são mais eficientes
- custam menos
- ocupam menor espaço (se comparar aos vários ciclones que seriam necessários para alcançar a mesma eficiência);
- resistem melhor à erosão

Os multiciclones apresentam eficiência muito alta e uma excelente qualidade de separação, devido a pequenos diâmetros, perda de carga aceitável, conseguida por elevado número de unidades que o compõe. No entanto, apresentam um problema sério que é o entupimento frequente.

Em geral, pode-se afirmar que a eficiência de um ciclone aumenta com o diâmetro e a densidade da partícula; a velocidade dos gases; comprimento do cone e diâmetro de saída; diminuindo em função do aumento da viscosidade do gás e o diâmetro do corpo do ciclone.

Na descarga do resíduo deve-se levar em conta a forma mais contínua e rápida possível, existem para isso diversos métodos. A tendência atual tem por base empregar de “rodillos” contínuos

que permitem para o caso de granulometria finas, evacuar rapidamente o resíduo depositado - Figura 7. 18. Existem sistemas automatizados que permitem evacuar o resíduo em função da massa depositada (Figura 7. 19) e dos fenômenos de arrastes - Figura 7. 20 (CETESB, 1990).

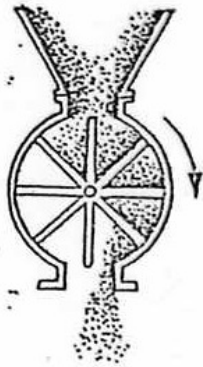


Figura 7. 18 - Rosca rotativa.

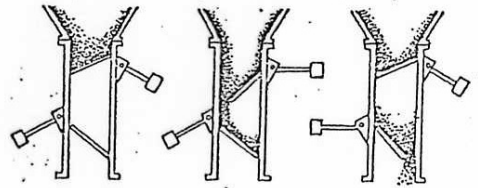


Figura 7. 19 - Compartimentos de descarga.

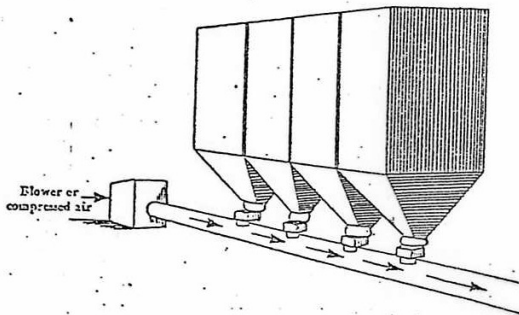


Figura 7. 20 - Sistema pneumático.

➔ USOS, VANTAGENS E DESVANTAGENS:

- USOS: - em geral como pré-coletor de partículas médias a grandes ($> 10 \mu$);
- coletor final em alguns casos (ex: trabalhos com madeira/exceto lixamento)

No campo de aplicação normal de separadores centrífugos, emprega-se em instalações funcionando em regime contínuo, destacando-se:

- Fornos de cimento
- Siderurgias e fundições
- Indústrias Químicas

• VANTAGENS:

- baixo custo de construção e manutenção;
- perda de carga média a baixa (2 a 6" coluna d'água);

- projeto relativamente simples e fácil de operar;
- exige espaço relativamente pequeno para instalação;
- não tem limitação de temperatura e pressão, exceto pelo material de construção (o ciclone serve como um excelente eliminador de fagulhas que podem incendiar filtros de tecido).

• **DESVANTAGENS:**

- baixa eficiência para partículas pequenas;
- possibilidade de entupimento no caso de partículas adesivas ou higroscópicas (mais sério em multiciclones);
- possibilidade de abrasão para determinadas partículas e determinadas velocidades;
- não deve ser utilizado para partículas adesivas.
- em geral necessita de segundo coletor para atender emissão exigida.

A longo prazo um fator que influi no rendimento de ciclone é a erosão devido ao impacto e rolizamento das partículas. A abrasão alcança um valor máximo para as concentrações altas, a dureza e tamanho das partículas (partículas de diâmetro compreendido entre 5 e 10 μ m produzem efeitos abrasivos máximos. As partes mais delicadas do ciclone são pontos e linhas de soldagem, e a parte cônica do depósito acumulado. Para protegê-los deve-se recorrer a revestimentos especiais.

Uma comparação entre coletores gravitacionais e ciclônicos é apresentado no Quadro 7. 3.

Quadro 7. 3 - Comparação entre coletores gravitacionais e ciclônicos.

CÂMARA DE SEDIMENTAÇÃO	CICLONE
<p>USO</p> <ul style="list-style-type: none"> • pré-coletor de partículas grandes (>40μm) • Reduz a carga poluidora 	<p>USO</p> <ul style="list-style-type: none"> • em geral pré-coletor de partículas médias a grandes (>10μm) • coletor final em alguns casos
<p>VANTAGENS</p> <ul style="list-style-type: none"> • baixa perda de carga (10-25mm ca) • projeto, construção e instalação simples • baixo custo de instalação e de manutenção • não tem limitação de temperatura • coleta a seco: permite recuperação mais fácil 	<p>VANTAGENS</p> <ul style="list-style-type: none"> • perda de carga média baixa (2 a 6"ca) • baixo custo da construção • simples de operar • pouca manutenção • projeto relativamente simples • espaço relativamente pequeno para instalação • não tem limitação de temperatura e pressão, exceto para o material de construção.
<p>DESVANTAGENS</p> <ul style="list-style-type: none"> • baixa eficiência para pequenas partículas (<10μm) • requer espaço relativamente grande para a instalação 	<p>DESVANTAGENS</p> <ul style="list-style-type: none"> • Baixa eficiência de partículas pequenas • possibilidades de entupimento no caso de partículas adesivas ou higroscópicas • possibilidade de abrasão para determinadas partículas e determinada velocidade • não deve ser utilizado para partículas adesivas • em geral necessita do segundo coletor para atender emissão exigida

Exemplo 1: Dimensionamento de ciclones e determinação da eficiência.

Quadro 7.4 - Dados da Fonte.

Vazão dos gases:	37,5 m ³ .s ⁻¹
Temperatura dos Gases:	230 °C
Pressão dos Gases:	1 atm
Concentração de Partículas:	5260 mg.m ⁻³
Condições normais:	0° C e 1 atm
Viscosidade dos gases :	2,6.10 ⁻⁵ Kg.(m.s) ⁻¹
Densidade da Partícula :	2650 Kg.m ⁻³

Considerar as dimensões de um ciclone convencional, segundo Lapple
Adotar v= 15 m.s⁻¹ e 8 ciclones em paralelo.

Tabela 7.2 - Distribuição de tamanho das partículas.

0 - 20 μm	20 - 30 μm	30 - 40 μm	40 - 50 μm	50 - 60 μm	60 - 80 μm	> 80 μm
2,7 %	6,9 %	9,4 %	10,5 %	10,5 %	16,5 %	43,5 %

Solução:

$$\text{Área de Entrada do Ciclone (A}_1\text{): } A_1 = \frac{Q/8}{v} = \frac{37,5/8}{15} = 0,312 \text{ m}^2$$

$$\text{Como } A_1 = (\text{altura de entrada}) \times (\text{largura de entrada}) : A_1 = 0,25D_c \times 0,5D_c = 0,125D_c^2$$

$$\text{Portanto } D_c = \sqrt{\frac{A_1}{0,125}} = \sqrt{\frac{0,312}{0,125}} = 1,58 \text{ m}$$

Outras dimensões (Quadro 7.5):

Quadro 7.5 – Dimensões do ciclone projetado.

Dimensões	Relação	Dimensão (m)
Altura de entrada	0,5 D	0,790
Largura de entrada	0,25 D	0,395
Profundidade do duto de saída	0,625 D	0,987
Diâmetro do duto de saída	0,5 D	0,790
Altura do corpo cilíndrico	2,0 D	3,160
Altura total	4,0 D	6,320
Diâmetro do duto de descarga do pó	0,25 D	0,395

Agora determinando a eficiência:

Diâmetro de corte do ciclone (d₅₀). Adotar N_v entre 3 e 10.

$$N_v = 6$$

$$d_{50} = \left(\sqrt{\frac{9 \cdot \mu_g \cdot b}{2 \cdot \pi \cdot V_i \cdot \rho_p \cdot N_v}} \right) \times 10^6 = \left(\sqrt{\frac{9.2,6 \times 10^{-5} \cdot 0,395}{2 \cdot \pi \cdot 15.2650.6}} \right) \times 10^6 = 7,86 \mu m$$

Eficiência total de coleta (η_t):

Segundo De Paola e Theodore
$$\eta_i = \frac{1}{1 + (d_{50} / d_i)^2}$$

Calcular a eficiência fracionada (η_i) – Tabela 7. 3.

Tabela 7. 3 - Eficiência fracionada.

d_i (μm)	d_i (μm)	m_i (%)	η_i	$m_i \times \eta_i$
0 – 20	10	2,7	0,618	0,0167
20 – 30	25	6,9	0,910	0,0628
30 – 40	35	9,4	0,952	0,0895
40 – 50	45	10,5	0,970	0,102
50 – 60	55	10,5	0,980	0,103
60 – 80	70	16,5	0,987	0,163
> 80	90	43,5	0,992	0,431
		$\Sigma = 100\%$		$\Sigma m_i \times \eta_i = 0,968$

Eficiência total de coleta = $\eta_t = \Sigma m_i \times \eta_i = 96,81 \%$

Emissão final (E_f)

- Sem controle : $E_i = Q \times C_i = \frac{37,5 m^3 / s \cdot 5260 mg / m^3 \cdot 3600 s \cdot 1 g \cdot 1 Kg}{1 h \cdot 10^3 mg \cdot 1000 g} = 710,1 Kg / h$

- Com controle : $E_f = E_i \cdot (1 - \eta_t) = 710,1 (1 - 0,968) = 22,72 \frac{Kg}{h}$

- Concentração na saída do ciclone (C_s) a 230°C e 1atm

$$C_s = C_i (1 - \eta_t) = 5260 (1 - 0,968) = 168,32 \frac{mg}{m^3}$$

Corrigir C_s para as condições normais (0° e 1 atm)

$$C_{S(CNTP)} = C_s \cdot \left[\frac{T + 273}{273} \right] \cdot \frac{1}{P} = 310,12 mg / Nm^3$$

Exemplo 2: Dimensionamento de ciclones e determinação da eficiência

Dados da fonte

Vazão de gases : 25 m³/s
 Temperatura dos gases : 230 °C
 Pressão dos gases : 1 atm
 Concentração de partículas : 5260 mg/ m³
 Condições padrão (normal) : 0 °C e 1 atm
 Viscosidade dos gases : 2,6 x 10⁻⁵ kg .(m.s)⁻¹
 Densidade da partícula : 2650 kg. m⁻³
 Distribuição de tamanho das partículas – Tabela 7. 4.

Tabela 7. 4 - Distribuição de tamanho das partículas.

0 - 20 μm	20 - 30 μm	30 - 40 μm	40 - 50 μm	50 - 60 μm	60 - 80 μm	> 80 μm
2,7 %	6,9 %	9,4 %	10,5 %	10,5 %	16,5 %	43,5 %

Dimensões de um ciclone (ciclone convencional) / Lapple

Adotar V = 15 m/s

Solução:

Area de entrada do ciclone → $A = \frac{Q}{V}$ $A_1 = 1,67 \text{ m}^2$

Como $A_1 = 0,25 D_c \times 0,5 D_c = 0,125 D_c^2$

Portanto $D_c = \sqrt{\frac{A_1}{0,125}} = \dots\dots\dots \text{ m}$

Outras dimensões –

Tabela 4

Dimensões	Relação	Dimensão (m)
Altura de entrada	0,5 D	
Largura de entrada	0,25 D	
Profundidade duto de saída	0,625 D	
Diâmetro duto de saída	0,5 D	
Altura do corpo cilíndrico	2,0 D	
Altura total	4,0 D	
Diâmetro do duto de descarga do pó	0,25 D	

Diâmetro de corte do ciclone (d₅₀) Adote N_v entre 3 e 10. Adote N_v = 10.

$d_{50} = \sqrt{\dots\dots\dots} \times 10^6 \text{ (d}_{50} \text{ em } \mu\text{m)} \rightarrow d_{50} = \dots\dots\dots \mu\text{m}$

Eficiência total de coleta (η_t)
 Segundo De Paola e Theodore $\eta_i = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{50}}{d_i}\right)^2}$

Portanto, calcule a eficiência para cada faixa granulométrica $\eta_{10} = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{50}}{10}\right)^2}$

E daí

Tabela 7.5 - Eficiência fracionada (η_i)

d_i (μm)	d_i (μm)	m_i (%)	η_i	$m_i \times \eta_i$
0 - 20 μm	10	2,7 %		
20 - 30 μm	25	6,9 %		
30 - 40 μm	35	9,4 %		
40 - 50 μm	45	10,5 %		
50 - 60 μm	55	10,5 %		
60 - 80 μm	70	16,5 %		
> 80 μm		43,5 %		
		100 %		Σ

Eficiência total de coleta = $\eta_t = \Sigma (m_i \times \eta_i)$

$\eta_t =$ %

Emissão final (E_f)

Sem controle $E_i = Q \times C_i =$ Kg/h $E_i = \frac{25 \cdot 3600 \cdot 5260}{10^6} = 473,4$ Kg/h

Com controle $E_f = E_i \times (1 - \eta_t) =$ Kg/h

Concentração na saída do ciclone (C_s) a 230 °C e 1 atm

$C_s = C_i \times (1 - \eta_t) = 5260 \times (1 - \quad) \text{ mg/m}^3$

Nas condições normais (0 °C e 1 atm)

$C_{S(N)} = C_s \cdot \frac{(T_A + 273)}{273} \times \frac{1}{P_A}$

$C_{S(N)} = \dots\dots\dots \text{mg/Nm}^3$

7.5.1.3 FILTROS DE TECIDO

Os filtros de tecido são os sistemas de filtragem mais comumente utilizados. Sua utilização se dá não só para o controle de poluição do ar, mas também como parte integrante do processo industrial, como é o caso do processo de produção do óxido de zinco.

O princípio de funcionamento de um filtro de tecido é simples. Trata-se da passagem da mistura gasosa que contém partículas através de um tecido, sendo que o gás atravessa os poros do tecido e as partículas, na sua maioria, ficam retidas na sua superfície, que de tempos em tempos tem que ser retiradas para evitar uma camada muito espessa, o que dificultará a passagem do gás (aumento da perda de carga). No começo do processo de filtragem a coleta se inicia com a colisão das partículas contra as fibras do meio filtrante e sua posterior aderência às mesmas. A medida que o processo continua a camada de partículas coletadas vai aumentando tornando-se, então, o meio de coleta. Em determinado momento, torna-se necessária a remoção das partículas coletadas, afim de impedir a redução da eficiência do processo.

Os mecanismos envolvidos na coleta de partículas em filtros de tecido são principalmente a impactação inercial, a difusão, a atração eletrostática e a força gravitacional e secundariamente, a intercepção. O filtro de tecido é um equipamento enquadrado na categoria dos de alta eficiência de coleta, chegando em alguns casos, a valores maiores que 99,9%.

Os filtros de tecido são classificados primeiramente segundo o formato do meio filtrante ou seja: *tipo manga* ou tipo *envelope*.

➔ **Filtro de mangas:** Tem a forma de saco alongado, tubular. Segundo o mecanismo de limpeza das mangas os filtros de manga podem ser classificados da seguinte maneira:

- sacudimento mecânico: neste método, o pó é removido por agitação mecânica, horizontal ou vertical; o sacudimento mecânico não tem muito êxito quando o material particulado consiste de partículas aderentes, pois a agitação excessiva pode fazer com que as mangas girem ou se soltem dos ganchos de sustentação - Figura 7.21. O ar normalmente penetra pela parte interna, quando a boca do saco fica embaixo, e sai deixando as impurezas do lado de dentro.

- ar reverso: neste caso, as partículas se desprendem do tecido pela inversão no sentido do fluxo de ar. É mais utilizado quando operado com baixas vazões.

- jato pulsante de ar comprimido: é o sistema mais utilizado em relação aos demais; comumente, um tubo de Venturi acoplado ao topo de cada manga gera um jato de ar que percorre (como uma onda) toda a extensão da manga, expandindo-a e fazendo com que a camada aderida ao tecido se desprenda do mesmo (Figura 7. 22) Neste tipo de filtro o ar normalmente penetra pela parte interna, como na Figura 7. 23, o ar poluído é empurrado de fora pra dentro, deixando o MP aderido à parede externa do saco. Para que não ocorra estrangulamento dos sacos os mesmos possuem uma estrutura metálica de suporte - Figura 7. 23.

Este último tipo de limpeza é o que tem sido mais utilizado atualmente, pois apresenta a vantagem de exigir uma área de filtragem menor que os que utilizam por sacudimento mecânico ou ar reverso, possibilitando limpeza contínua e automática das mangas.

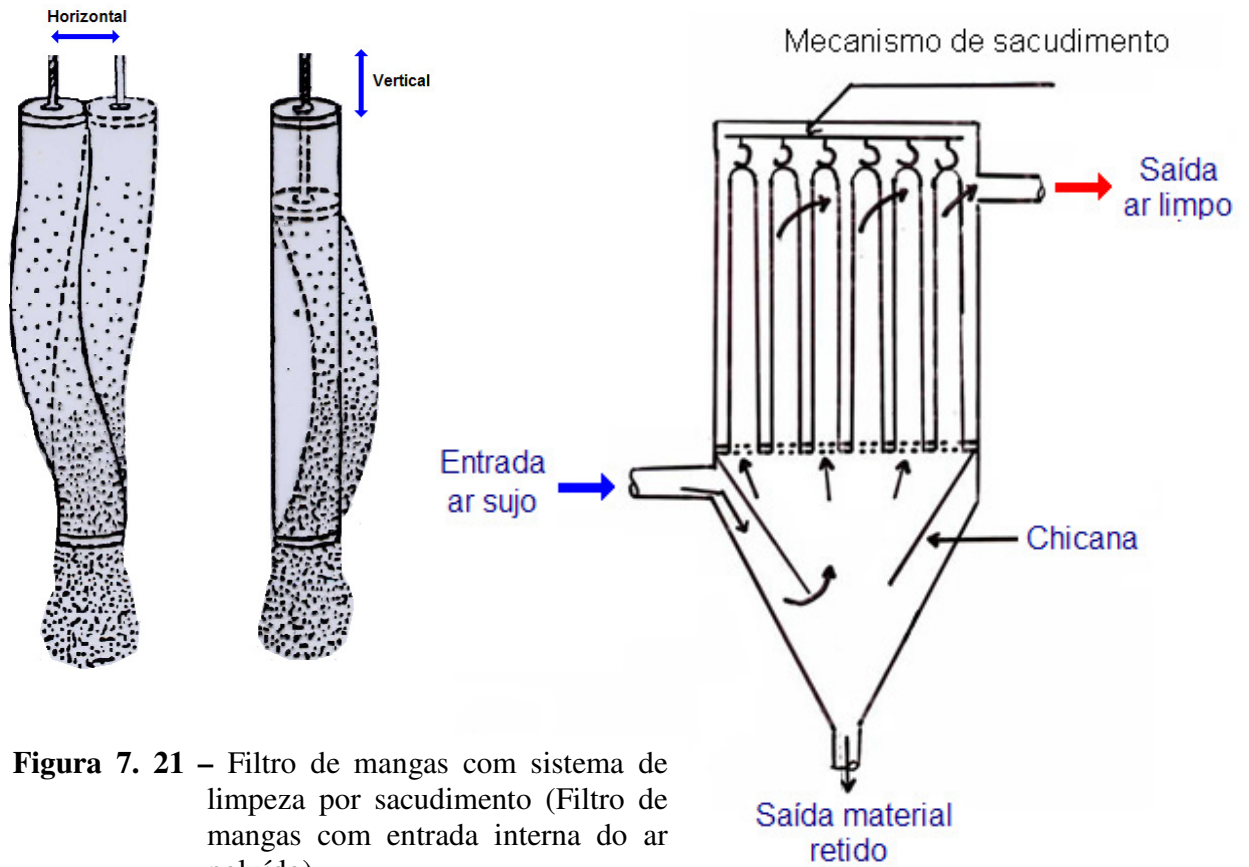


Figura 7. 21 – Filtro de mangas com sistema de limpeza por sacudimento (Filtro de mangas com entrada interna do ar poluído).

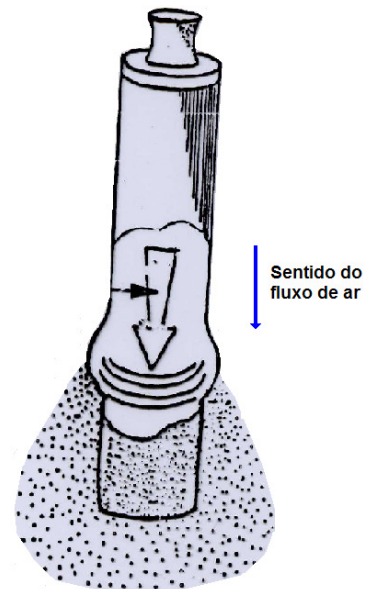
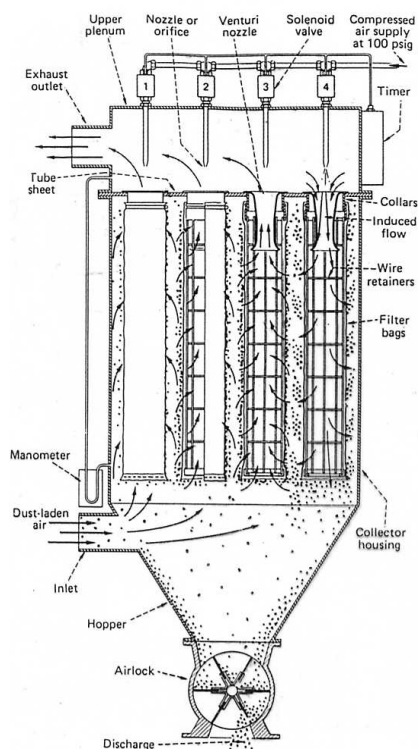


Figura 7. 22– Filtro de mangas com sistema de limpeza por jato pulsante

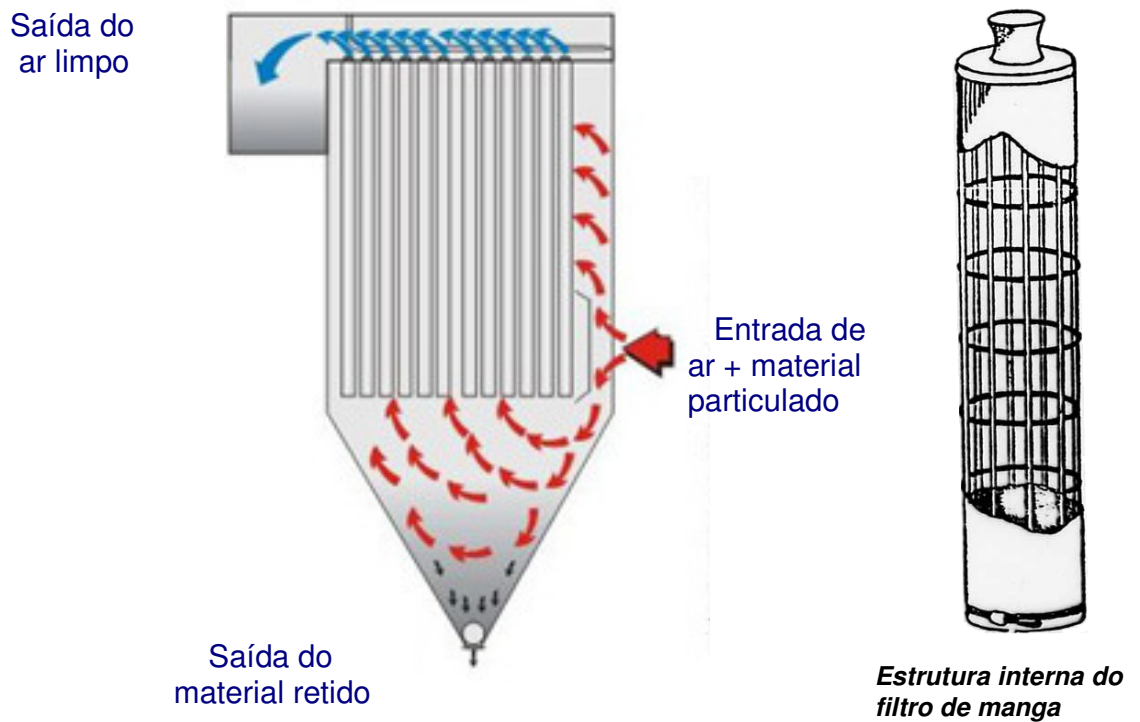


Figura 7. 23 – Filtro de mangas com entrada externa do ar poluído.

Os filtros de manga são geralmente dispostos em baterias ou conjuntos, de modo a conseguir a área de filtragem necessária.

→ **Filtro tipo envelope:** Quando a concentração de partículas é muito elevada, usa-se, antes do filtro, um separador do tipo inercial para retenção das partículas maiores. As Figuras 24 e 25 ilustram este equipamento.

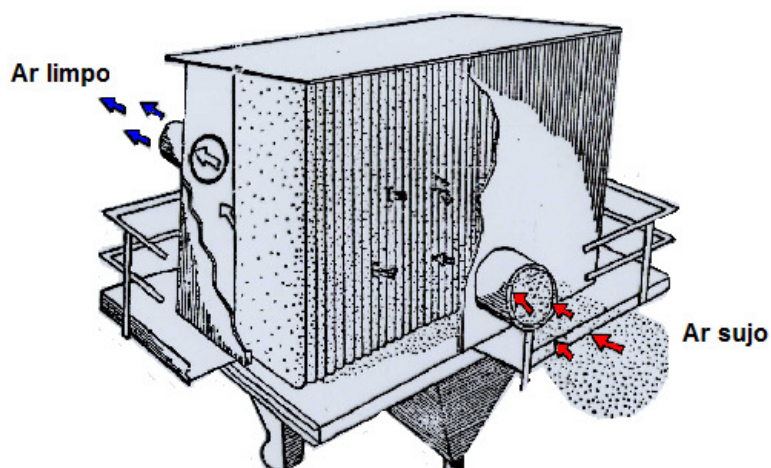


Figura 7. 24 – Mecanismo de limpeza do ar num filtro de tecido tipo envelope vertical.



Figura 7. 25 - Filtro de tecido tipo envelope horizontal

ESCOLHA DO MEIO FILTRANTE

A escolha do meio filtrante a ser utilizado dependerá das características do gás transportador (temperatura, umidade, alcalinidade e acidez), das características das partículas a serem filtradas (concentração, distribuição de tamanhos, abrasividade) do tipo de limpeza a ser utilizado, do custo e da disponibilidade do mercado. O Quadro 7. 6 apresenta as características dos meios filtrantes mais usuais disponíveis no mercado para filtros de mangas.

Os filtros de tecido são de elevada eficiência para fumos e poeiras acima de $0,1 \mu\text{m}$ e são usados na captação de poeira de moagem; mistura e pesagem de grãos de cereais; moagem de pedra, argila e minerais; trituração de cimento; limpeza por abrasão; pesagem e peneiramento de produtos químicos em grãos; trabalhos em madeira, cortumes, fertilizantes, papel, etc.

Os materiais tradicionalmente usados na fabricação de pano são o algodão e a lã, desde que utilizados em temperaturas de até 82 e $90 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente, e para correntes de ar sem umidade. Para temperaturas mais elevadas e poluentes agressivos a esses materiais, é necessário recorrer a tecidos de outros materiais, como poliamida, poliéster, polipropileno, fios metálicos, fibras de vidro, etc. Os filtros com feltro de poliéster duram cerca de 3 vezes mais do que os de algodão, e por isto são também muito usados.

Quadro 7. 6 – Materiais de tecidos usados em filtros industriais.

Fibra	Temp de fusão °C	Temp máxima de oper contínua	Resist. a ácidos	Resist. a álcalis	Resist. à abrasão e flexão
Algodão	Decompõe a 150	82	ruim	Muito boa	Muito Bom
Creslon	246	121	Bom em ácidos minerais.	Bom em álcalis fracos	Bom a muito bom
Dacron	250	135	Bom para a maior parte dos ácidos minerais. Dissolve em H ₂ SO ₄ conc.	Bom para álcalis fracos. Razoável em forte	Muito Bom
Dynel	162	71	Pouco efeito mesmo em alta concentração	Pouco efeito mesmo em alta concentração	Razoável a bom
Fiberglass	798	237	Razoável a boa	Razoável a boa	Razoável
Fibra de vidro	800		Razoável a boa	Razoável a boa	Razoável
Lã	300	93	Muito boa	ruim	Razoável a bom
Nilon G.G.	250	93	Razoável	Excelente	Excelente
Niomex	257	218	Bom	Excelente a baixas temper.	Excelente
Orlon	250	126	Boa a excelente em ácidos minerais	Razoável para álcalis fracos	Bom
Poliéster HT-1	371	204	Melhor que Oniton, pior que Orlon e Dracon	Não tão boa qto o nylon, melhor que Orlon e Dracon	Bom
Poliamida	250		Razoável	Excelente	Excelente
Polipropileno	167	93	Excelente	Excelente	Excelente
Teflon	Decompõe a 400 °C	260 °C mas emite gase tóxicos a 232 °C	Inerte, excet a fluor	Inerte exceto a cloro e flúor (tri) e metais alcalinos fundidos	Razoável

DIMENSIONAMENTO

O projeto de equipamentos de controle tipo filtro de tecido envolve basicamente a escolha do tipo de filtro a ser utilizado (manga ou envelope), a escolha do sistema de limpeza, o meio filtrante a ser utilizado e o dimensionamento da área de filtragem necessária. O fluxo gasoso deve ser adequadamente condicionado antes de entrar no filtro de tecido, no que diz respeito à temperatura e umidade.

O dimensionamento da área filtrante depende da velocidade de filtragem (razão vazão de gás/área filtrante) recomendada para o caso específico. A velocidade de filtragem depende do tipo de partícula a ser coletada, da sua concentração, do material filtrante e do sistema de limpeza. Para limpeza por sacudimento mecânico os valores variam de $0,3 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a $1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Para limpeza por jato reverso com meio filtrante tipo feltro, os valores variam de $2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a $5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Os valores mais baixos devem ser utilizados para os casos de altas concentrações de partículas ou partículas muito pequenas, como por exemplo os fumos metálicos. A área de filtragem necessária deve levar em consideração também a condição do meio filtrante no momento da limpeza. Se a limpeza for feita com o filtro em operação, a área de filtragem deve ser calculada em relação às unidades que permanecerem em operação de forma a não exceder a velocidade de filtragem recomendada.

A velocidade de filtração é recomendada, pela prática, para cada tipo de poluente. O Quadro 7.7 mostra a velocidade recomendada para a limpeza com jato reverso.

Quadro 7.7 - Velocidade recomendada para filtração com jato reverso.

MATERIAL	VELOC.FILTRAÇÃO MÁXIMA (pés/min)	MATERIAL	VELOC.FILTRAÇÃO MÁXIMA (pés/min)
óxido de alumínio	9	ferro cromo britagem	9
bauxita	8	argila	8
carbono calcinado	7	granel (porcelana)	10
carbono verde	5	farinha	10
carbono mist. banburi	7	grãos	12
cimento	9	grafite	5
gesso	8		

➔ USOS, VANTAGENS E DESVANTAGENS:

- **USOS:**
 - coletor final de partículas de todos os tamanhos, inclusive submicrômicas, exceto partículas adesivas;
- **VANTAGENS:**
 - proporciona altas eficiências de coleta, chegando a mais de 99,9%;
 - pouco sensível a flutuação de vazão e concentração;
 - coleta a seco possibilitando recuperação fácil do material;
 - não apresenta problemas de resíduos líquidos;
 - manutenção simples;
 - operação simples;
 - perda de carga e custo de operação moderados;
 - vida útil longa, chega a 20 anos.
- **DESVANTAGENS:**
 - temperatura máxima restringida pelo material da manga;
 - custo de manutenção alto;
 - pode requerer tratamento especial das mangas para determinadas aplicações;
 - espaço requerido razoável especialmente no caso de limpeza por fluxo reverso (pq a velocidade é menor)
 - localização das mangas furadas relativamente difícil (ex: U.Siderúrgica Tubarão ⇒ 1200 mangas ou 300 por compartimento);
 - não pode ser utilizado em condições onde haja condições de condensação de umidade.

A perda de carga em filtros de tecido é a somatória da perda de carga do filtro limpo (após ciclo de limpeza) mais a resistência imposta pela camada de partícula depositada no filtro, a qual varia em função do material coletado. Na prática pé fixado um valor de perda de carga máximo e após atingido esse limite o sistema de limpeza é acionado. Em geral a perda de carga varia de 10 cm H₂O a 20 cm de H₂O.

EXERCÍCIO: Dimensionamento de filtro manga

Determinar o número de mangas necessárias para controlar as partículas do efluente gasoso cuja vazão é igual a $4,72 \cdot 10^6 \text{ cm}^3/\text{seg.}$, sendo dados:

$$v_f = 4 \text{ cm/s} \quad \text{dimensões das mangas} \quad \phi = 0,203 \text{ m} \\ H = 3,66 \text{ m}$$

Primeiro calcula-se área total de uma manga da seguinte maneira:

$$A(\text{total}) = A(\text{lateral}) + A(\text{base}) \rightarrow \text{Figura 7. 1.}$$

$$A(\text{total}) = 2 \pi r h + \pi r^2$$

$$A(\text{total}) = (2 \pi \times 0,1015 \text{ m} \times 3,66 \text{ m}) + (\pi \times R^2)$$

$$A(\text{total}) = (2 \times \pi \times 0,1015 \times 3,66) + [\pi \times (0,1015)^2]$$

$$A(\text{total}) = 2,334 + 0,03236$$

$$A(\text{total}) = 2,3665 \text{ m}^2 \text{ por manga}$$

$$\text{Area filtrante} = Q \text{ gás} / V_f$$

$$\text{Area filtrante} = \frac{4,720 \text{ m}^3/\text{seg}}{0,04 \text{ m/seg}} \rightarrow A \text{ filtrante} = 118 \text{ m}^2$$

$$\text{Número de mangas} = 118 \text{ m}^2 / 2,3665 \text{ m}^2.\text{manga}$$

$$\text{Número de mangas} = 49,86 = 50 \text{ mangas}$$

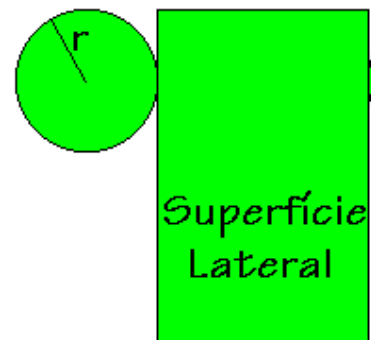


Figura 7. 26 – Área total de uma manga: lateral mais fundo

A QUESTÃO DOS PÓS EXPLOSIVOS:

O projeto envolvendo pós explosivos² deve ser cuidadosamente analisado. Se houver a ocorrência simultânea de vapores e pós explosivos pode-se ter uma explosão mesmo com a concentração de ambos estando abaixo do Limite Inferior de Explosividade.

² Leituras recomendadas: ver. Apostila Operação e Manutenção de equipamentos de controle de poluição do ar. CETESB, 1990 Vol 1/2.

Houve caso em que se projetou um filtro manga para manuseio de areia, um caso aparentemente inofensivo. A areia no entanto estava contaminada com óleo, farinha de sílica e palha de milho, materiais altamente explosivos, que acarretam grandes danos às instalações. Conceitos básicos sobre o assunto (CETESB, 1990):

- Energia de ignição :é a energia necessária para iniciar a deflagração do explosivo.
- Deflagração: é o processo de explosão passível de controle.
- Detonação : é o processo de explosão quase instantâneo, sendo, portanto, incontrolável.
- Pressão máxima de explosão - é a pressão máxima atingida, no processo de deflagração.
- Incremento máximo de pressão : é o valor máximo do quociente entre a variação de pressão e o tempo decorrido nessa variação.

Pode-se ter pressão máxima de 08 Kgf/ cm² e um incremento máximo de 7,6 Kgf/cm² em 0,02 seg. teremos um valor de incremento máximo de pressão de :

$$\frac{7,6 \text{ Kgf/cm}^2}{0,02 \text{ seg.}} = 380 \text{ Kgf/cm}^2 \text{ seg.}$$

Existem quatro meios de controlar o risco de explosão (CETESB, 1990):

- Uso de gás inerte: Esse método é usado no sistema de controle quando o processo também emprega gás inerte. Normalmente se usa o **nitrogênio**.
- Contenção de explosão: O filtro manga é construído de maneira tal a evitar danos maiores. Ele é danificado, porém, devido à sua construção resistente ele diminui o impacto da explosão, minimizando os riscos. Projeto europeu adota uma resistência à pressão de choque, que é de 10 a 20 % acima da pressão máxima de explosão. No exemplo anterior, por exemplo, o filtro seria construído para resistir a uma pressão de 8,6 a 9,6Kgf/ cm², uma vez que a pressão máxima de explosão é de 8 Kgf/cm².
- Supressão da explosão: Consiste na supressão da explosão após detecção, pela injeção de um agente de supressão. Nos EUA, usa-se haletos e na Europa pós inertes. O sistema é confiável mas exige uma rígida manutenção. O sistema é também a solução para uma ocorrência, e se o problema ocorrer novamente, logo em seguida, ele estará desarmado.
- Uso de vents de descarga: Instala-se vents, de disco de ruptura, para alívio da pressão. É o método mais adotado apesar de apresentar algumas desvantagens. Os principais problemas são:
 - Localização dos vents: A descarga deve ser feita a atmosfera e não no ambiente de trabalho.
 - Os discos podem ser danificados por corrosão, abrasão ou outro problema, comprometendo o sistema.

O dimensionamento do vents é empírico e o NFPA fornece tabelas e nomógrafos. Todos eles se baseiam na lei cúbica, que expressa o seguinte:

$$(dp / dt)_{\text{max.}} \cdot V^{1/3} = C^{\text{te}}$$

- dp / dt = incremento máx. de pressão – Kgf / m²/s
- V = volume do filtro (m³)

A constante K é chamada de K_{mt} para Pó e Kg para gases. Com base nisso se dimensiona o vent de acordo com a relação:

$$F_2 = F_1 \cdot \frac{V_2^{2/3}}{V_1^{2/3}}$$

Onde: F₁ = Área do vent no vaso de teste necessária para evitar que a pressão suba acima de certo valor.

F₂ = Área do vent no filtro manga para as mesmas condições

V₁ = Volume do vaso de teste

V₂ = Volume do filtro manga

O Quadro 7. 8 mostra a classificação de risco para pós, de acordo com a energia de ignição. O Quadro 7. 9 mostra os valores para alguns pós levantados em testes. É sabido também que o valor K_{mt} é indiretamente proporcional ao diâmetro da partícula e ao seu formato. A pequena energia de ignição do Quadro 7. 8 é comparável aquela liberada em uma faísca elétrica ou por uma superfície quente.

Quadro 7. 8 – Classificação de pós quanto ao risco de explosão.

CLASSE DE RISCO	KST	
	Fonte fraca de ignição (E 10 W.s)	Fonte forte de ignição (E 10.000 W.s)
1	100	200
2	101-200	201-300
3	>200	>300

A grande energia de ignição corresponderia por exemplo a uma língua de fogo transportada pelos dutos.

Outras recomendações são as seguintes:

- As mangas situadas próximas ao vent interferem no seu funcionamento, portanto a área do vent deve ser livre.
- Os painéis de alívio de explosão não devem ter mais que 10 Kgf/m² de pressão de abertura, devendo ser presos para não serem arremessados à distância.

Quadro 7. 9 – Valores de pressão máxima de exploração e incremento máximo de pressão (KST) para a alguns pós

PÓ	IGNIÇÃO QUÍMICA (E 500 W.s)		FAÍSCA ELÉTRICA (E = até W.s)	
	Pmax (bar)	KST (BAR.m.S-1)	Pmax (bar)	KST BAR.M.s-1)
CARVÃO	7.7	85	s/ignição	---
DEXTRINA	8.7	200	8.5	100
PIGMENTO	10.0	300	9.7	200
ALUMÍNIO	11.5	550	11.0	450
FARINHA	8.6	57		
METILCELOULOSE	10.0	160		
RESINA EPOXI	8.2	180		
PRODS. FARMAC.	9.0	200		
MADERIRA	9.0	200		
POLIETILENO	7.8	160		
AÇÚCAR	----	230		

7.5.1.4 PRECIPITADORES ELETROSTÁTICOS

Os precipitadores eletrostáticos vem sendo utilizados há muitos anos como um meio efetivo para o controle de emissões atmosféricas na forma de partículas - Figura 7. 27.

A história do precipitador se inicia em 1824 quando Hohlfeld consegue tornar límpido o conteúdo de um cilindro contendo névoas utilizando para tanto um ponto eletrificado no seu interior. Em 1850, Guitard, em experimento análogo consegue o mesmo efeito utilizando fumaça de tabaco. Em 1907 Frederick Gardner Cottrell constrói um precipitador eletrostático de sucesso comercial. Em 1908 Cottrell patenteia um precipitador eletrostático utilizado com sucesso em uma fábrica de ácido sulfúrico de Pinole, Califórnia - USA. As instalações industriais pioneiras se deram no período de 1907 a 1920 (CETESB, 1987).

O mecanismo de coleta principal obviamente é a força elétrica. O processo de precipitação eletrostática se inicia com a formação de ions gasosos pela descarga do corona de alta voltagem no eletrodo de descarga. A seguir as partículas sólidas e/ou líquidas são carregadas eletricamente pelo bombardeamento dos ions gasosos ou eletrons. O campo elétrico existente entre o eletrodo de descarga e o eletrodo de coleta faz com que a partícula carregada migre para o eletrodo de polaridade oposta, descarregue a sua carga, ficando coletada. De tempos em tempos a camada de partícula se desprende do eletrodo de coleta, pela ação do sistema de "limpeza" e por gravidade se deposita na tremonha de recolhimento de onde então é transportada para o local de armazenamento para posterior condicionamento e/ou reutilização e/o reposição final. O processo de carregamento e coleta de partícula é mostrado na Figura 7. 28 (CETESB, 1987).

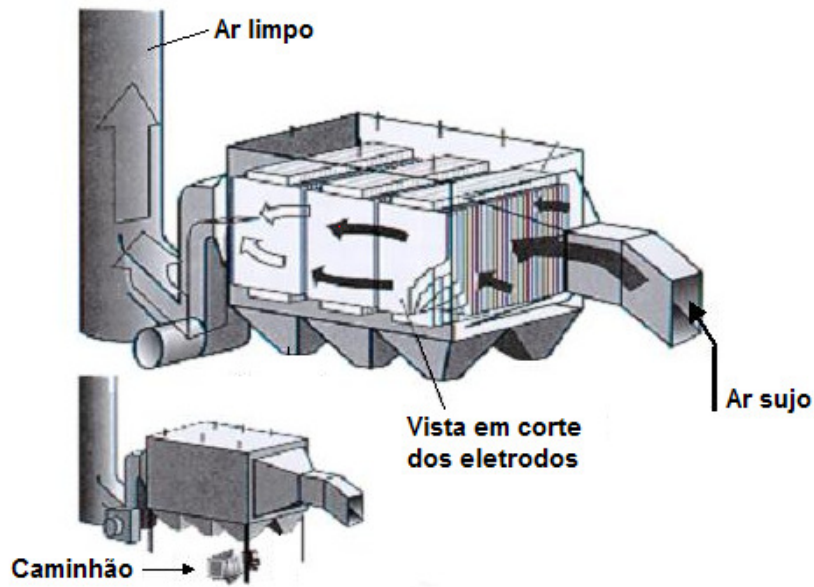


Figura 7. 27 – Processo de purificação do ar em um P.E. e disposição final.

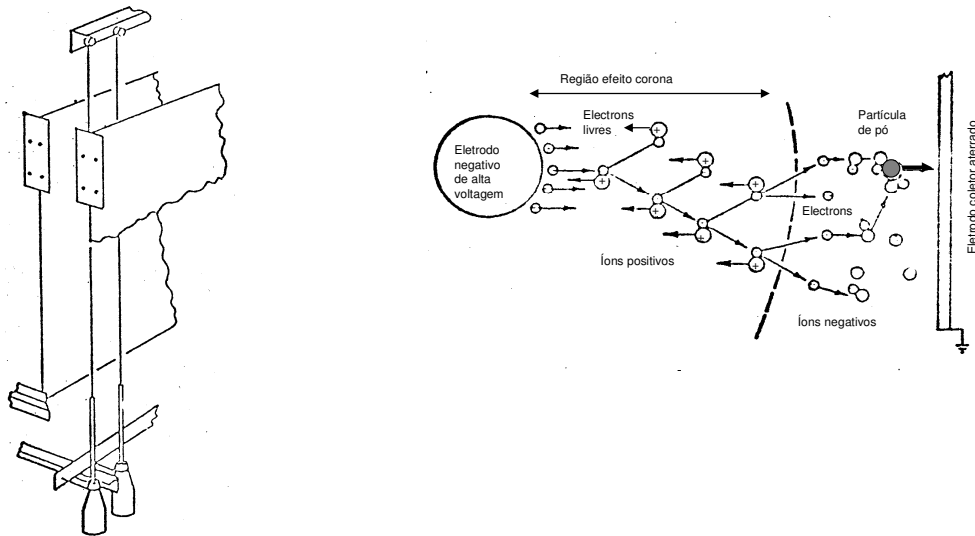


Figura 7. 28- Processo de carregamento e coleta de partículas.

- O aerosol passa entre dois eletrodos onde existe uma grande diferença de potencial elétrico. As partículas do aerosol precipitam-se sobre o eletrodo de baixo potencial – Figura 7. 29.
- coletor
 - de alta voltagem → arame
 - de baixa voltagem → superfície plana

- remoção de partículas $< 1 \mu$
- eficiência - 95 - 99%

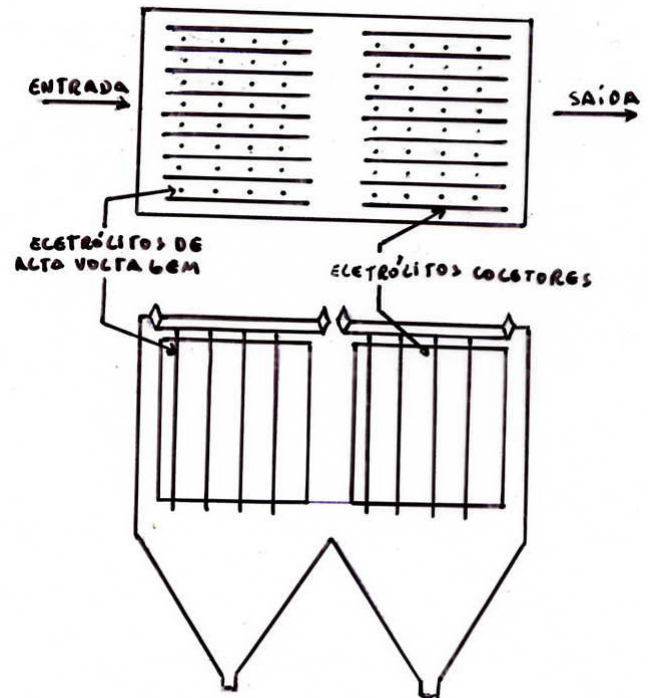


Figura 7. 29 – Precipitador eletrostático

Os precipitadores eletrostáticos podem ser classificados da seguinte forma:

a) Quanto à voltagem

- baixa voltagem : voltagem menor ou igual a 30Kv
- alta voltagem : voltagem maior que 30 Kv

b) Quanto à polaridade do eletrodo de descarga

- corona positivo
- corona negativo

c) Quanto ao número de estágios

- simples estágio com carga e disposição simultâneos
- duplo estágio, com carga em um primeiro estágio e a deposição num estágio posterior

d) Quanto à geometria de eletrodo de coleta:

- tubulares
- em forma de placas

Os precipitadores podem ainda serem classificados em secos e unidos dependendo da utilização ou não de líquido de lavagem no mesmo.

Os precipitadores de baixa voltagem, com corona positivo e duplo estágio em geral tem empregos não industriais e são de pequeno porte, como por exemplo aqueles utilizados em conjunto com sistemas de ar condicionado.

A Figura 7. 30 mostra um precipitador eletrostático de aplicação industrial que apresenta eletrodo de descarga tipo arame e eletrodo de coleta tipo placas. A Figura 7. 31 mostra as formas de eletrodos de descarga e coleta usualmente utilizados.

O carregamento das partículas se dá por dois processos. Para partículas maiores que $0,5 \mu\text{m}$ em diâmetro tem-se o carregamento pelo campo elétrico. Para partículas de diâmetro menor que $0,2 \mu\text{m}$ predomina o carregamento por difusão iônica. Para partículas com diâmetro entre $0,2 \mu\text{m}$ e $0,5 \mu\text{m}$ agem os dois mecanismos.

Figura 7. 30 - Precipitador eletrostático de aplicação industrial

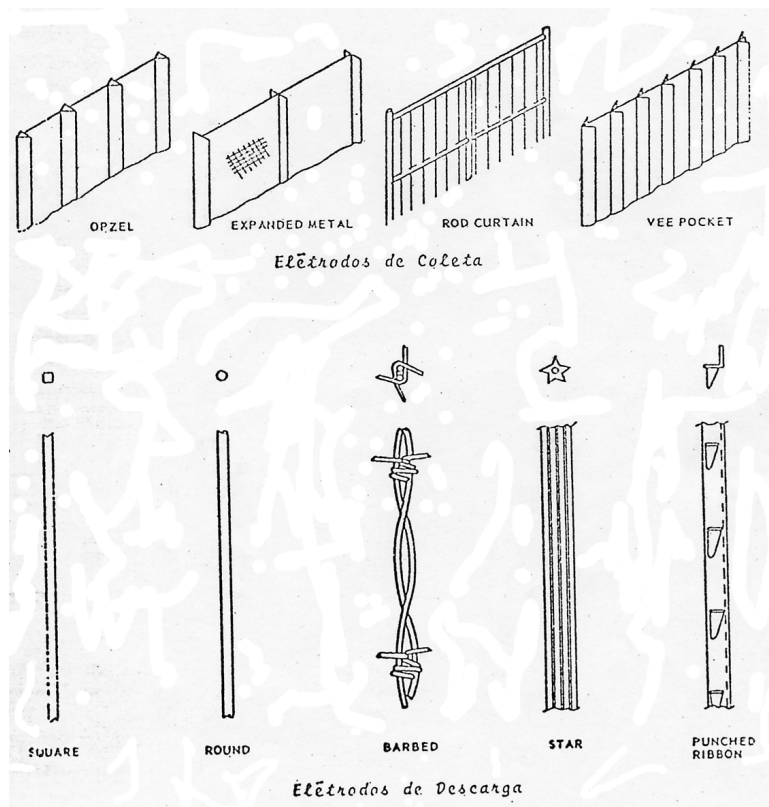
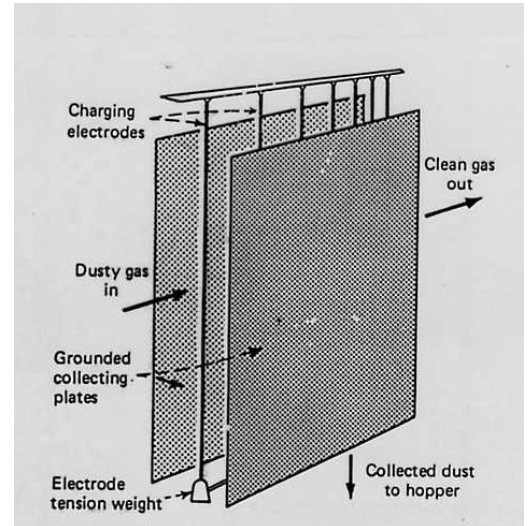


Figura 7. 31 - Formas de eletrodos de descarga e coleta usualmente utilizados.

A eficiência de coleta de precipitadores eletrostáticos é usualmente expressa pela fórmula de Deutatsch-Anderson qual seja (CETESB, 1987).:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{A}{Q} \times W\right)$$

sendo:

n = eficiência de coleta

Q = vazão de gás

A = área de coleta

W = velocidade de migração

A velocidade de migração é função dos seguintes parâmetros: diâmetro das partículas, voltagem aplicada, campo elétrico, constante dielétrica da partícula, viscosidade do gás e temperatura de operação. Existem fórmulas para o cálculo da velocidade de migração no entanto, na prática ela é obtida experimentalmente principalmente em modelos reduzidos. Os valores usuais se situam na faixa de 1 cm s^{-1} a 15 cm s^{-1} (CETESB, 1987).

Uma característica importante da partícula que influencia a sua coleta em precipitadores eletrostático e a sua resistividade elétrica. Partículas de baixa resistividade se carregam facilmente mas também cedem sua carga com facilidade ao atingir o eletrodo de coleta podendo em consequência retornar ao fluxo gasoso. Já em relação às partículas de resistividade muito alta ocorre o inverso podendo gerar o processo denominado "back-corona" que é uma descarga localizada no eletrodo de coleta, devido à formação de uma camada de material não condutor. A faixa ideal da resistividade para utilização em precipitadores está entre $5,0 \times 10^3 \text{ } \Omega\text{cm}$ e $2,0 \times 10^{10} \text{ } \Omega\text{cm}$ (CETESB, 1987).

Existem formas de condicionamento da resistividade sendo a principal o uso de controle de temperatura e umidade.

Um sumário das vantagens, desvantagens e usos do precipitador eletrostático é mostrado abaixo:

Vantagens:

- Alta eficiência de coleta. Pode exceder a 99,9%;
- Coleta partículas muito pequenas. Teoricamente não há limite inferior do tamanho de partícula possível de ser coletado;
- Baixo custo operacional;
- Baixa perda de carga. Em geral não excede $1,25 \text{ cm H}_2\text{O}$;
- Existem poucas partes móveis o que implica em redução de manutenção;
- Podem coletar partículas sólidas ou líquidas que são difíceis de coletar por outros equipamentos;
- Podem operar a temperaturas de até $650 \text{ }^\circ\text{C}$;
- A eficiência de coleta pode ser aumentada pela inclusão de novos módulos;
- Coleta o material a seco;
- Podem ser operados continuamente com pouca manutenção em períodos de tempo longos;
- Pode processar altas vazões de gases e com uma faixa ampla de concentrações;
- Pode ser utilizado para gases a pressões de até 10 Kg cm^{-2} e também em condições de vácuo;
- Vida útil longa. Chega a mais de vinte anos.

Desvantagens:

- Investimento inicial alto;
- Exige grandes espaços para sua instalação, principalmente para precipitadores quentes;
- Apresenta riscos de explosões quando processa gases ou partículas combustíveis;
- Exige medidas especiais de segurança para evitar acidentes com alta voltagem;
- Alguns materiais são extremamente difíceis de coletar por apresentarem resistividade muito baixa ou muito alta;
- Não são adequados para casos que apresentam muita variação de condições, exigindo controle automático fino".

Usos:

- Coletor final de partículas de todos os tamanhos
- Para fontes médias a grandes
- Em geral para razões grandes

Aplicações dos Precipitadores Eletrostáticos:

1. Indústria de Cimento : - limpeza dos gases dos fornos

2. Fábrica de Papel

- recuperação de sais de enxofre dos gases das chaminés das caldeiras do processo Kraft

3. Indústria do Aço

- limpeza das correntes de gases dos fornos para permitir o uso como combustível
- remoção do alcatrão de gases de coquearias

4. Indústrias Gerais

- coleta de resíduo em suspensão

5. Indústria de Metais Não-Ferrosos

- recuperação de materiais dos gases das chaminés
- coleta da névoa ácida
- limpeza das correntes de gás para as indústrias de ácidos

6. Indústria Química

- coleta da névoa de ácido sulfúrico e fosfórico
- limpeza de vários tipos de gás como H₂, CO₂, SO₂
- remoção de pó de fósforos elementares no estado de vapor

7.5.2 COLETORES ÚMIDOS

No caso de coletores úmidos, os exemplos mais característicos são os lavadores. Estes equipamentos têm, basicamente, como princípio básico de funcionamento, a absorção do material particulado (absorbato) presente em fluxo gasoso por meio de um líquido (absorvente), mediante contato (mistura entre essas duas fases), o qual pode ocorrer de diferentes maneiras, dependendo do tipo de lavador. O líquido retém o material particulado onde, posteriormente, tem essa parte sólida separada, retornando ao processo para dar continuidade à lavagem da corrente gasosa.

- Utilizam um meio líquido para aumentar o tamanho das partículas do aerosol para facilitar a remoção das corrente de ar.
- Desvantagem → necessidade de tratamento do resíduo líquido ou sólido.

LAVADORES (SCRUBBERS)

Os lavadores são equipamentos de controle de poluição de ar que podem ser utilizados tanto para o controle de material particulado como para o controle de gases e vapores. Nesta seção será tratado de lavadores utilizados para o controle de material particulado. Os lavadores utilizados para o controle de gases e vapores recebem a denominação de absorvedores (CETESB, 1987).

Uma primeira classificação de lavadores é baseada na energia requerida (perda de carga) para fazer o fluxo gasoso passar através do mesmo. Nessa classificação tem-se (CETESB, 1987):

- lavadores de baixa energia : perda de carga (ΔP) de até 7,5 cm H₂O
- lavadores de média energia : perda de carga (ΔP) de 7,5 cm H₂O a 25 cm H₂O
- lavadores de alta energia : perda de carga (ΔP) maior de 25 cm H₂O

Existe um número grande de tipos de lavadores disponíveis no mercado. Abaixo são citados os mais usuais:

- **câmara de spray (borrifo) gravitacional**
- **coletores dinâmicos úmidos**
- **lavadores ciclones de spray**
- **torres de enchimento (não se aplicam a MParticulado)**
- **lavadores de impactação**
- **lavadores auto-induzidos (de orifício)**
- **lavador venturi**

Nas Figura 7. 32 e 7.33 são mostrados alguns tipos de lavadores disponíveis no mercado.

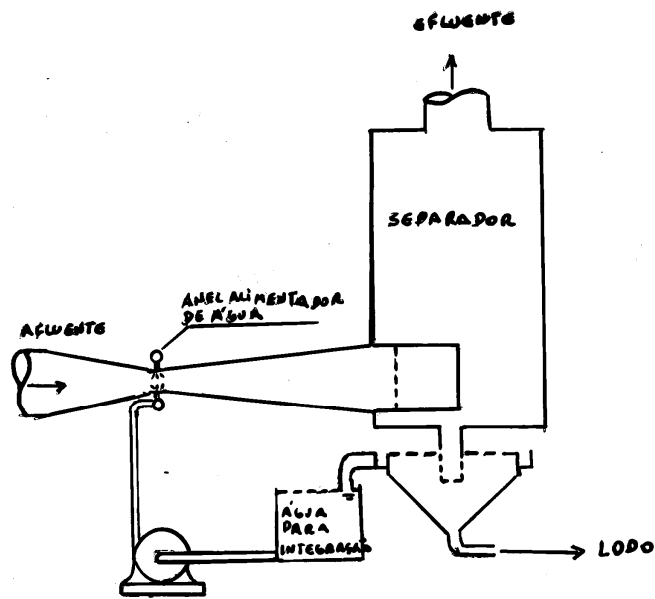


Figura 7.32 - Lavador venturi:

- água é injetada em um estreitamento de tipo venturi por meio de um anel alimentador.
- remoção de partículas < 1 μ
- eficiência 99%

Os lavadores auto-induzidas e o lavador venturi são também denominados de "lavadores gás-atomizador" face ao processo de atomização do líquido que ocorre pela passagem do gás a ser tratado.

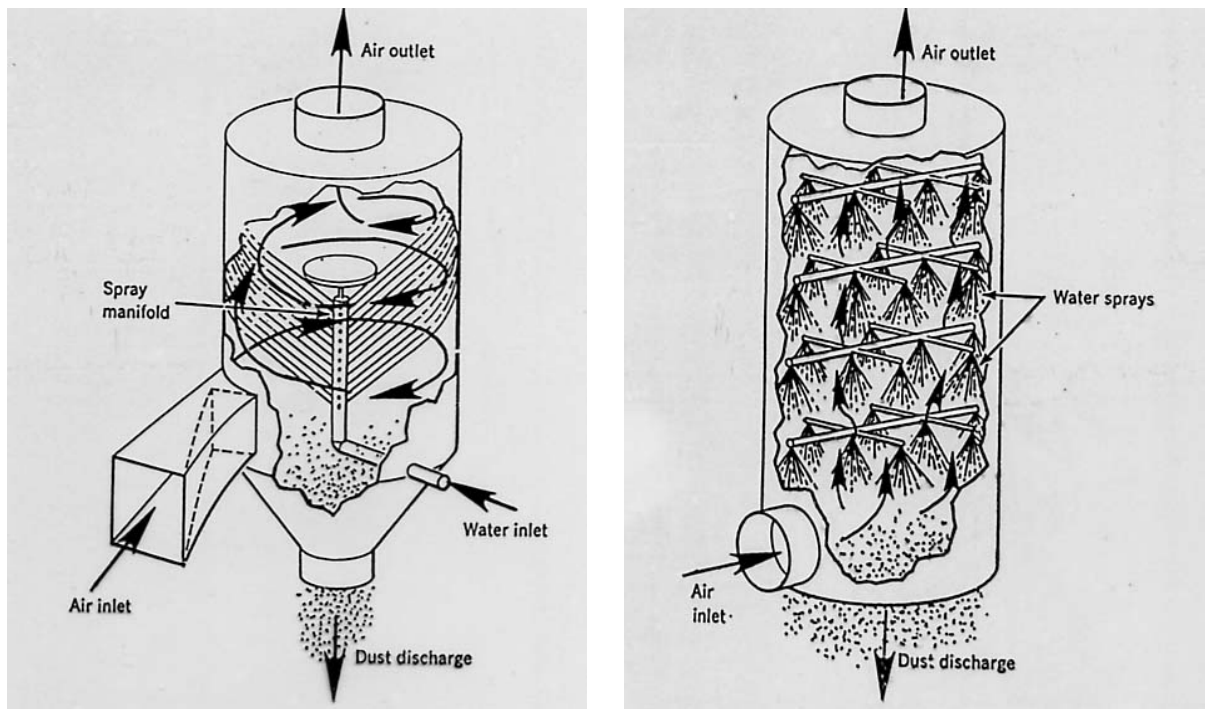


Figura 7.33 - Lavadores ciclônicos de spray.

Além da geometria, perda de carga e velocidade do gás outro parâmetro importante de lavadores é a quantidade de água utilizada, a qual usualmente é expressa em termos de razão líquido-gás. A razão líquido-gás determina a quantidade de água (absorvente) a ser utilizada em função do volume de gás tratado. O Quadro 7. 10 apresenta os principais parâmetros operacionais para alguns tipos de lavadores. Uma outra classificação destes equipamentos baseia-se na forma de contato partícula/líquido absorvente. Neste caso, pode-se citar os lavadores do tipo câmara de aspersão (“spray”) gravitacional, ciclones de aspersão, dinâmicos úmidos, de impactação ou de orifício, Venturi e torre de enchimento. Detalhes de algumas destas modalidades serão abordados mais adiante, quando se tratar de absorvedores (lavadores de gás).

Quadro 7. 10 - Principais parâmetros operacionais de alguns lavadores. Fonte: CETESB, 1987.

Tipo de lavador	Velocidade do gás (cm s ⁻¹)	Perda de carga cm H ₂ O	Razão líquido / gás (l. m ⁻³) *	Eficiência para partículas < 2 µm
Câmara de spray gravitacional	90 a 150	2,5	0,3 a 2	Baixa
Ciclônico	100 a 250 (na câmara)	6 a 15	0,4 a 0,7	Média
Auto induzido	1.500 a 10.000 (no orifício)	10 a 25	1,3 a 5,3	Média
Venturi	6.000 a 18.000	25 a 250	0,3 a 1,3	Alta

* a água em geral é recirculada após sofrer tratamento

O mecanismo de coleta predominante no caso de lavadores para coleta de MP é a impactação inercial. Outros mecanismos são a força centrífuga, no caso de lavadores centrífugos e a força gravitacional. A impactação em lavadores ocorre principalmente entre as partículas e as gotas de líquido (CETESB, 1987).

Existem vários modelos e teorias para a determinação da eficiência de lavadores. A mais abrangente é a "Teoria do Poder de Contato" desenvolvida por Lapple (1955). A assumida fundamental dessa teoria é a seguinte (CETESB, 1987):

** Quando comparados com o mesmo consumo de energia, todos os lavadores apresentam substancialmente a mesma eficiência de coleta para uma mesma distribuição de tamanho de partículas, independentemente do mecanismo envolvido e independentemente do meio fornecedor de energia, seja líquido ou gás.**

Matematicamente a eficiência, segundo essa teoria é expressa por (CETESB, 1987):

$$\eta = 1 - e^{(-A \cdot P_T^B)}$$

sendo:

η = eficiência de coleta (base 1)

P_T = energia total fornecida ao lavador (HP/1000CFM)

A e B = são constantes empíricas que dependem do material particulado a coletar

A energia total P_T pode ser calculada por:

$$P_T = \text{Energia fornecida pelo líquido} + \text{Energia fornecida pelo gás}$$

$$P_T = 0,1575 P_l + 0,583 \Delta p (Q_l/Q_g)$$

Sendo:

ΔP = perda de carga do lavador	(pol. H ₂ O)
P_1 = pressão de injeção do líquido	(lb/pol ²)
Q_1 = vazão de líquido	(gal/min)
Q_g = vazão de gás	(pe ³ /min)

Lavador venturi:

Lavadores Venturi e de orifício são também chamados de “lavadores gás-atomizador”. Nesses casos, o contato entre o gás e o líquido dá-se por meio de nebulização da água no caminho do fluxo de ar (contaminado). Assim, funcionam apenas como aglomeradores do material particulado, necessitando, portanto, de um equipamento em série que colete este material. O lavador Venturi situa-se entre os mais usados, dada sua elevada eficiência. Além disso, requer pouco espaço de instalação sendo ainda de fácil operação (Figura 7. 34).

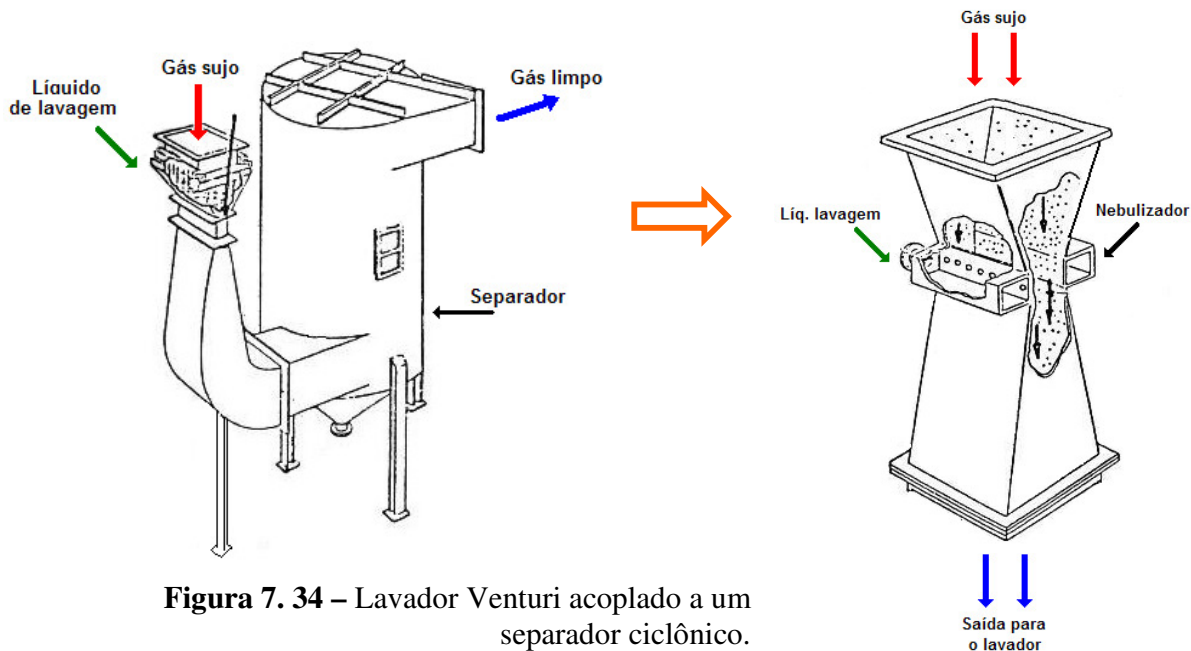


Figura 7. 34 – Lavador Venturi acoplado a um separador ciclônico.

No caso do lavador venturi existem modelos matemáticos específicos para a determinação da eficiência, sendo os principais o modelo de Calvert e o de Johnston. O modelo de Calvert é o que tem sido mais utilizado, no entanto face à sua complexidade e o objeto deste curso apresentaremos só o de Johnston. De acordo com este modelo a eficiência é dada por (CETESB, 1987):

$$\eta = 1 - e^{(-kQ_1/Q_g \sqrt{k_1})}$$

sendo:

- η = eficiência de coleta
- K = constante empírica (0,1 a 0,2)
- Q_1 = vazão de líquido (gal/min.)
- Q_g = vazão de gás (1000 pé³/min)
- K_1 = parâmetro de impactação inercial

O lavador venturi é um equipamento que necessita ter em série um equipamento que coletará as partículas que tiveram o seu tamanho aumentado ao passar pela garganta do venturi. Nota-se, portanto, que o venturi age como um aglomerador de partículas. O equipamento de coleta final em geral é um coletor ciclônico que separará as gotas e as partículas do fluxo gasoso. O venturi é um equipamento de coleta de uso bastante difundido pela alta eficiência de coleta que o mesmo pode atingir, pela sua simplicidade operacional e por ser um sistema compacto (CETESB, 1987).

O lavador venturi em como desvantagem principal a alta perda de carga necessária para seu funcionamento. A perda de carga no lavador venturi, segundo Hesketh, pode ser determinada pela seguinte expressão (CETESB, 1987):

$$\Delta p \cong \frac{V_t^2 \cdot g \cdot A_t^{0,133} \cdot (Q_l / Q_g)^{0,78}}{3,87}$$

Onde

- Δp = perda de carga no venturi (cm H₂O)
- V_t = velocidade do gás na garganta (cm/s)
- A_t = área de secção transversal da garganta (cm²)
- Q_l = vazão de líquido (litro)
- Q_g = vazão de gás (m³)

Vantagens e desvantagens dos lavadores em geral:

• Vantagens :

- podem ser utilizados em gases a altas temperaturas;
- podem ser utilizados para coleta de partículas adesivas (sticky);
- não há restrições de utilização quanto à umidade do efluente a ser tratado;
- em geral, podem controlar tanto gases como partículas;
- podem ser conseguidas altas eficiências de coleta.

• Desvantagens :

- apresentem alta perda de carga quando se necessita alta eficiência de coleta, o que implica em custo operacional mais alto;
- descarregam gases tratados úmidos o que implica em uso de materiais resistentes à corrosão;
- necessitam do uso de materiais resistentes à corrosão no lavador;
- possível formação de pluma visível proveniente da condensação da umidade contida nos gases;
- o material coletado (resíduo sólido) está na forma úmida e em geral necessita tratamento adequado para sua reutilização e/ou disposição adequada;
- necessita tratamento de efluentes líquidos;
- apresenta elevado custo operacional decorrente de itens como:
 - . necessidade de um sistema de ventilação mais potente para vencer as perdas de carga do sistema;
 - . exigência de materiais estruturais mais “nobres” capazes de resistir à umidade (corrosão);
 - . sistema de tratamento para o líquido absorvente e MP coletado.

7.6 EQUIPAMENTOS PARA REMOÇÃO DE GASES E VAPORES

7.6.1 ABSORVEDORES

Os absorvedores são equipamentos utilizados para a absorção de gases ou vapores. A absorção é uma transferência de massa de fase para uma fase gasosa para uma fase líquida. Ela consiste na transferência de um componente (absorbato) presente em fase gasosa (gás de arraste) para um líquido (absorvente). Mais especificamente, no controle de poluição do ar, a absorção envolve a remoção de um contaminante gasoso de uma corrente gasosa por sua dissolução em um líquido. A absorção é um processo de transferência de massa que se dá devido a uma diferença de concentração entre os meios presentes. Esta transferência ocorre até que continue havendo diferença de concentração nos meios envolvidos. Entretanto, o equilíbrio não é tão facilmente atingido, uma vez que a diferença de concentração depende da solubilidade do soluto (KHAN e GHOSHAL, 2000; MME, 1997; SCHIRMER e LISBOA, 2004).

Princípio: Os gases efluentes passam através de absorvedores (lavadores) que contêm líquidos absorvedores que removem, tratam ou modificam os poluentes

Eficiência de Remoção – depende:

- Tempo de Contato;
- Concentração do meio absorvente;
- Velocidade de reação entre o absorvente e os gases;
- Coeficiente de transferência de massa.

A absorção efetiva do gás depende do contato íntimo entre as fases gasosa e líquida. Assim, solubilidade do contaminante no solvente é um parâmetro muito importante a ser avaliado. Se o soluto é bastante solúvel em água, então altas taxas de absorção podem ser conseguidas (MME, 1997). Entretanto, em alguns casos, um reagente químico pode ser adicionado ao líquido absorvente afim de elevar o percentual de eficiência na remoção do soluto. Estes reagentes podem aumentar a solubilidade física do contaminante ou podem ainda reagir quimicamente com este contaminante. É o que ocorre, por exemplo, com os chamados neutralizadores de odor que, aumentando a eficiência de absorção dos gases, acabam por eliminar gases odorantes da corrente gasosa. Neste caso, comumente aplica-se a solução (água+neutralizador) via nebulização. Recomenda-se, neste caso, trabalhar-se com gotículas de solução (na saída dos aspersores) com diâmetro médio inferior a 25 μm , afim de aumentar a eficiência do processo (MME, 1997; USEPA, 1995). A absorção necessita de um tratamento secundário, uma vez que apenas recupera o contaminante gasoso.

Tipos de reatores:

O processo de absorção pode dar-se ainda em equipamentos específicos: os absorvedores ou lavadores (MME, 1997). Tratam-se de dispositivos nos quais realiza-se a separação de um poluente gasoso por intermédio da lavagem do mesmo com água (ou uma solução química conveniente), que na maioria dos casos é nebulizada para formar pequenas gotículas (STUETZ e FRENCHEN, 2001). A faixa usual de eficiência de absorvedores é de 80% a 99% (até 99,7%), para equipamentos adequadamente projetados (BELLI *et al*, 2001; SCHIRMER, 2004). Os lavadores são equipamentos de controle de poluição do ar que podem ser utilizados tanto para o controle de material particulado (MP) como para o controle de gases e vapores (CETESB, 1987). Os lavadores utilizados

para o controle de gases e vapores recebem a denominação de **absorvedores**. Assim, os absorvedores são uma categoria especial de lavador úmido. Torres de absorção são relatadas nesta seção, sendo que elas podem ser mais eficientes para absorção de gases do que de particulados (HESKET e CROSS, 1989). Elas utilizam métodos mecânicos para obtenção de bom contato entre as fases líquida e gasosa de modo a promover transferência de massa favorável. As torres de absorção são colunas utilizadas industrialmente há anos em operações unitárias tal como destilação, absorção e extração.

Vários benefícios podem ser obtidos com a adição de produtos químicos (absorventes) ao líquido lavador. O uso de cátions básicos (sódio, magnésio e cálcio) para reagir com SO_2 reduzindo-o a sulfitos e sulfatos tem sido adotado, gerando um aumento da remoção do SO_2 e prevenindo corrosão, no caso de um componente ácido na corrente poluente. Outros materiais servem como oxidantes, inibidores e catalisadores e podem melhorar a lavagem. No caso de lavadores a seco, os químicos injetados são usualmente hidróxidos que por sua vez reagem com os poluentes de caráter ácido, ou ainda o contrário (poluente básico e absorvente ácido).

Na questão da poluição atmosférica, são comuns absorvedores cujas correntes líquida e gasosa agem em contracorrente, concorrente e em corrente cruzada. Embora haja diferenças nestes 3 casos, tanto o gás quanto o líquido devem distribuir-se uniformemente ao longo do leito. No caso da absorção em contracorrente, o líquido absorvedor é distribuído uniformemente ao longo da coluna por gravidade. A corrente de gás contendo os poluentes entra pelo fundo da coluna e é forçada a subir. A absorção do gás poluente se faz pelo contato do gás ascendente com o líquido absorvedor descendente. No caso do fluxo concorrente, a corrente gasosa apresenta a mesma direção de fluxo do líquido absorvedor (neste caso descendente). Os lavadores Venturi são exemplos de absorvedores que operam com regime de fluxo concorrente. No caso de corrente cruzada, o poluente entra por uma lateral da torre saindo pela outra passando pelo meio absorvedor (este último descendente). O fenômeno de transferência de massa ocorre de forma análoga aos dois casos anteriores (SCHIRMER, 2004; SCHIRMER e LISBOA, 2004; USEPA, 1995).

Os tipos de absorvedores usualmente utilizados são:

- **Torres com enchimento:** Constituem-se de um cilindro preenchido com material de enchimento (suporte) sustentado tanto no topo quanto na base de modo a permitir a separação das fases (Figura 7.35).

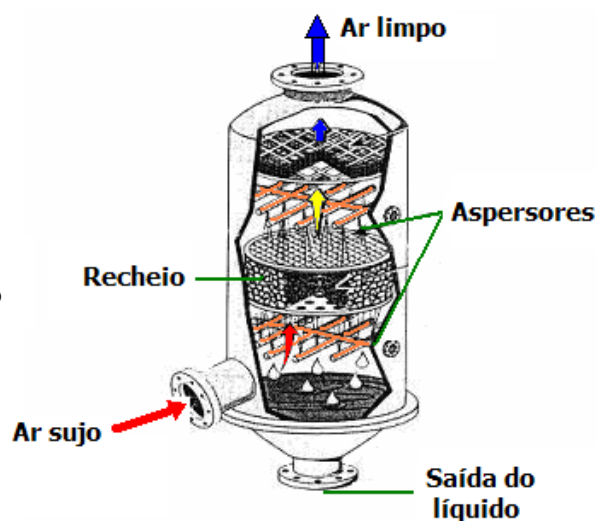


Figura 7.35 – Absorvedor com enchimento operando em fluxo contracorrente.
Fonte: SCHIRMER (2002)

O preenchimento é geralmente feito de carbono, cerâmica, vidro, plástico, teflon, aço inoxidável e outros materiais. Algumas das formas comercialmente disponíveis são as selas Berl e Celenox (Figura 7. 36), os anéis de Raschig, anéis Cross-partition, anéis de Pall e Lessing (todos na Figura 7. 37), e o enchimento Cannon. Existem variações no tamanho destes suportes. Em geral, materiais de enchimentos com tamanho inferior a 2,5 cm (1 in) são usados em torres com menos de 30 cm de diâmetro; materiais de enchimentos inferiores a 3,8 cm (1,5 in) para torres com menos de 91 cm de diâmetro e preenchimentos com tamanho superior a 5 cm (2 in) são usados em torres de diâmetro superior a 91 cm (STUETZ e FRENCHEN, 2001; USEPA, 1995).



Figura 7. 36 – Selas Celenox e Berl.

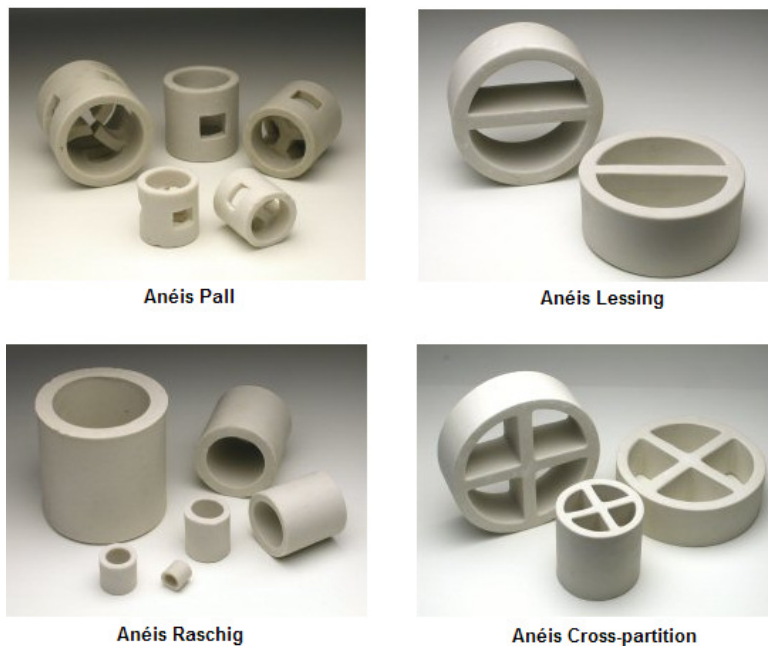


Figura 7. 37 - Anéis de Raschig, anéis Cross-partition, anéis de Pall e Lessing.

Entre as principais características e funções do preenchimento estão:

- aumentar a área superficial de contato entre os fluidos (aumentam a transferência de massa; no entanto, podem ser também um foco de ocorrência de encrustações e entupimento);
- reduzir a perda de carga do gás;
- promover boa distribuição dos fluidos ao longo da torre;
- não reagir com nenhuma das fases líquida ou gasosa;

- ter resistência mecânica suficiente para manter sua forma original na coluna;
- viabilidade econômica diante dos demais parâmetros de construção da torre;
- ser resistente à abrasão originada por atrito no interior da coluna.

As Torres com enchimento: podem ser obstruídas se o gás contiver material sólido – Figura 7. 38.

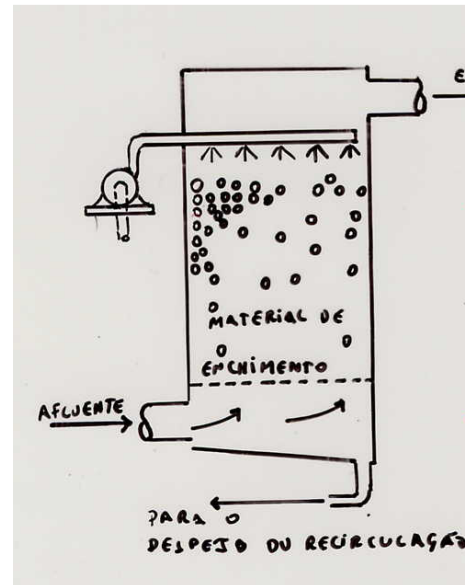


Figura 7. 38 - Torres com enchimento.

b) Torre de pratos: Este tipo de absorvedor não apresenta grelhas (suporte) ou qualquer tipo de enchimento, mas furos distribuídos uniformemente nos pratos que o constituem (Figura 7. 39). O número de furos, sua forma e arranjo varia de acordo com a coluna, mas eles têm freqüentemente 3 mm (1/8 in) de diâmetro. Neste caso, o gás em ascensão promove uma resistência à passagem do líquido (descendente) de forma a manter um acúmulo em cada prato onde há um contato entre as fases. O nível de líquido no prato é função tanto do fluxo da fase líquida quanto da gasosa. É necessário manter pratos com tamanho e número de furos consistentes de modo a manter uma altura de líquido equilibrada em cada prato - Figura 7. 40

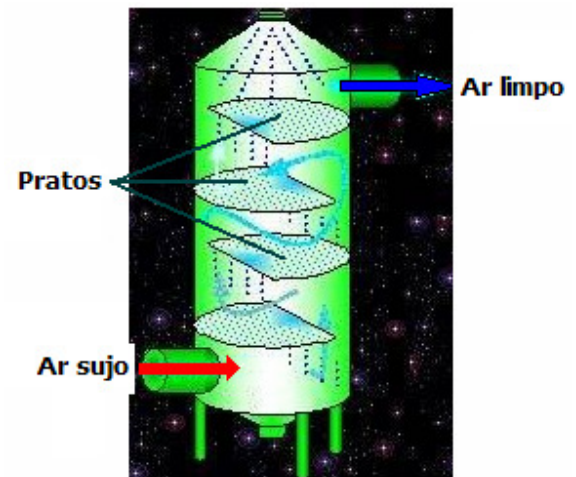


Figura 7. 39 – Lavador de pratos.

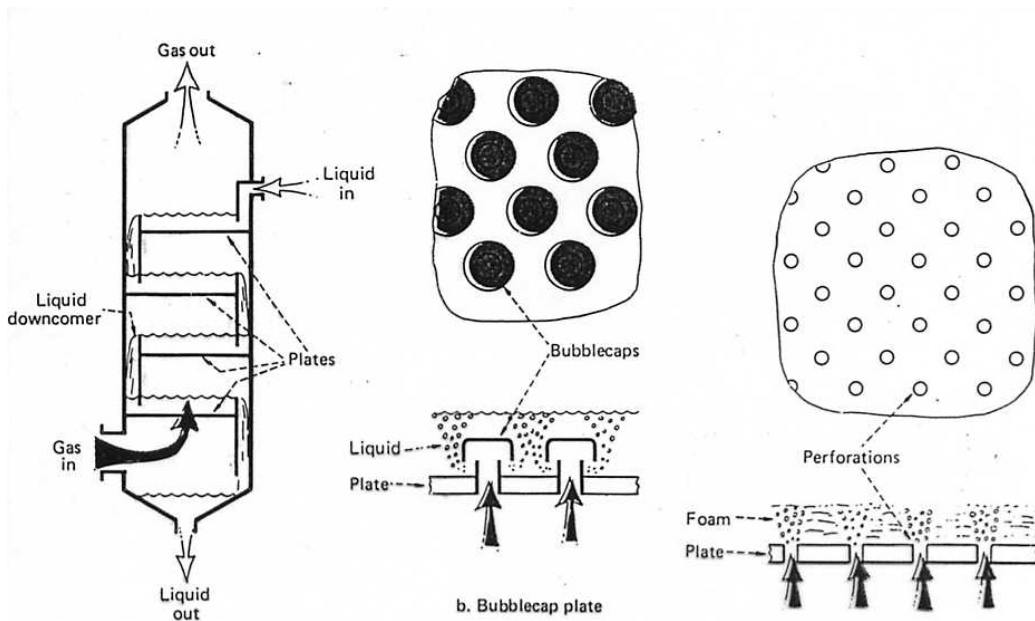


Figura 7. 40 - Torres de prato : o contato é feito através dos borbulhadores.

c) Lavador Venturi: Embora os lavadores Venturi sejam comumente utilizados para o controle de particulados, podem também ser utilizados como absorvedores. Operam em regime concorrente sendo que as perdas de carga ao longo destes equipamentos variam de 5 a 350 cmH₂O. A absorção do gás ocorre a velocidades de contato mais baixas do que no caso de remoção de particulados. No caso do lavador Venturi, o contato entre o gás e o líquido é feito através da superfície das gotas formadas (na região da “garganta”) sendo recomendados apenas para gases altamente reativos no absorvente escolhido.

A Figura 7. 41 mostra o esquema geral de um lavador Venturi. Recomenda-se uma boa atomização para o bom desempenho do Venturi (velocidades superiores a 4575 cm.s⁻¹ são recomendadas para uma atomização completa) (SCHIRMER, 2002).

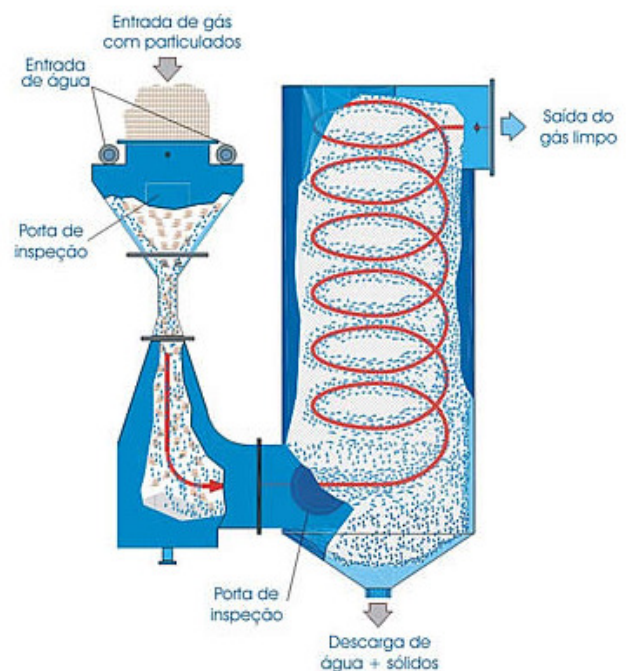


Figura 7. 41 – Esquema geral do lavador Venturi.

O Venturi é um equipamento de coleta de uso bastante difundido pela alta eficiência de coleta que o mesmo pode atingir, pela sua simplicidade operacional e por ser um sistema compacto. Tem como desvantagem principal a alta perda de carga necessária para seu funcionamento.

d) Lavador de aspersão: Tal como o lavador Venturi, as torres de aspersão (ou “spray” – Figura 7. 42) também são utilizadas tanto para particulados como para gases. Podem operar em regime de fluxo contracorrente e concorrente. Ainda a exemplo do Venturi, o contato entre o gás e o líquido é feito através de superfície de gotas (atomização) formadas. Aqui, os parâmetros mais importantes são granulometria do particulado, velocidade do gás, razão líquido-gás e o comprimento do lavador. Estes parâmetros podem variar dependendo do regime de fluxo (Quadros 7.11 e 7.12).

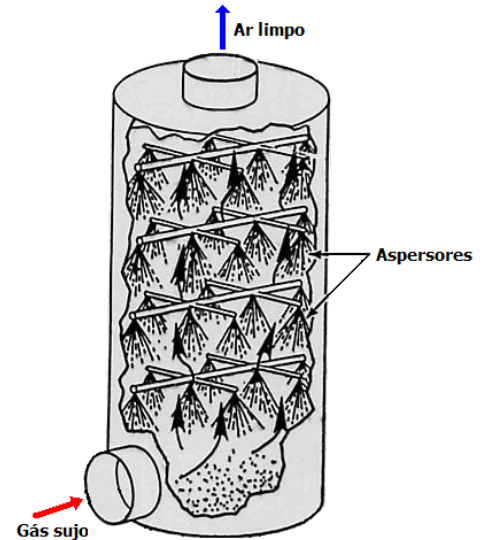


Figura 7. 42 – Lavador de aspersão (“spray”).

Quadro 7. 11 – Parâmetros de funcionamento para torre “spray” em fluxo concorrente.

Variável	Range
Diâmetro do particulado, [μm]	2,5 – 4,0
Diâmetro gotículas spray, [μm]	700 – 900
Comprimento do lavador, [ft]	35 – 45
Velocidade do gás, [ft.s^{-1}]	18 – 22

Quadro 7. 12 – Parâmetros do projeto para torre spray em fluxo contracorrente.

Variável	Range
Diâmetro gotículas spray, [μm]	700 – 1420
Comprimento do lavador, [ft]	8 – 16
Velocidade do gás, [ft.s^{-1}]	9 – 11

e) Roto clone: O gás a ser tratado é forçado a entrar em contato com o meio líquido mediante a passagem em selo líquido – Figura 7. 43.

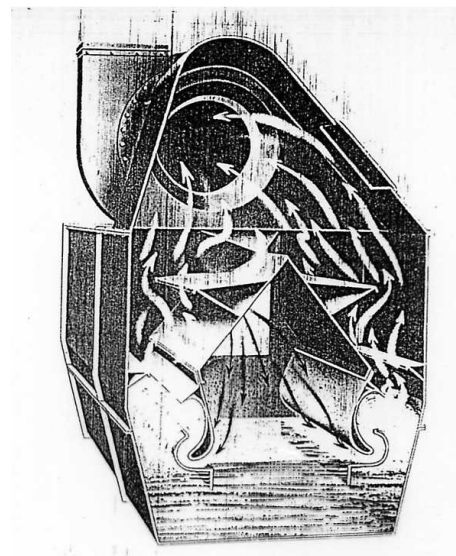


Figura 7. 43 – Lavador tipo Roto clone.

Considerações finais sobre absorvedores

Usos típicos : absorção de enxofre (SO₂), sulfeto de hidrogênio (H₂S), gás clorídrico (HCl), amônia (NH₃), gás fluorídrico (HF) e hidrocarbonetos leves.

Inicialmente deve ser escolhido aquele que propicie a maior área de transferência de massa, de funcionamento simples e de menor custo. A eficiência de controle de absorvedores é dependente do projeto específico. O dimensionamento é feito em função da emissão residual desejada, a qual é fixada *a priori*.

No caso dos odores emitidos numa refinaria, por exemplo, a maior parte deles pode ser controlado por permanganato de potássio (no absorvedor). Estes odores estão relacionados ao grupo funcional que os compõem – o enxofre divalente de uma mercaptana ou ainda o grupo carbonila dos aldeídos. Estes grupos funcionais geralmente podem ser oxidados rapidamente formando diferentes tipos de compostos inodoros ou pelo menos não tão desconfortáveis. O permanganato é capaz de oxidar (sob condições rigorosas de reação) qualquer composto orgânico formando dióxido de carbono, água, sulfatos, amônia e nitratos. Alguns compostos suscetíveis a este tratamento são: aldeídos, compostos sulfurosos reduzidos, hidrocarbonetos insaturados, fenóis, aminas, dióxido de enxofre. Entre aqueles que resistem à oxidação sob estas condições estão: ácidos orgânicos e hidrocarbonetos em geral, cetonas e hidrocarbonetos clorados.

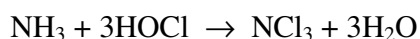
Muitos químicos podem oxidar compostos odoríferos, como por exemplo o H₂S e a amônia (NH₃). O próprio oxigênio pode desempenhar tal tarefa, mas a velocidade de reação é muito baixa, a menos que um catalisador esteja presente. Cloro, peróxido de hidrogênio, permanganato de potássio podem rapidamente oxidar o H₂S. O cloro pode estar na forma gasosa, como hipoclorito, clorito ou dióxido de cloro. A oxidação do H₂S pelo cloro pode ser expressa por (STUETZ e FRENCHEN, 2001):



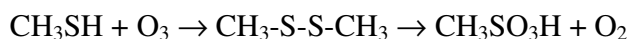
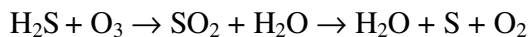
A reação com hipoclorito de sódio é:



Já a cloração da amônia é dada por:



A oxidação química de compostos orgânicos e odoríferos em lavadores pode ainda ser efetuada pelo ozônio (ozonação) de acordo com:



As vantagens em se usar KMnO₄ (permanganato de potássio) para o controle de odores são facilmente percebidas: fácil manuseio, estabilidade em condições normais de estocagem, não é carcinogênico e não é corrosivo para a maioria dos materiais. Para problemas devido a contaminantes fortemente odoríferos em baixas concentrações ou para correntes de ar altamente carregadas, a lavagem com permanganato oferece vantagens econômicas sobre a incineração. Devido à propriedade do KMnO₄ destruir ou alterar gradativamente os compostos responsáveis por muitos odores, os odores não aparecem com tanta frequência tal como ocorre com as técnicas de neutralização ou mascaramento. No lavador, o líquido contendo o permanganato é recirculado e o permanganato não

reage até o contaminante ser absorvido no líquido de lavagem. A reação então continua a uma taxa determinada pela natureza do contaminante e pelo pH da solução, até este contaminante ser completamente oxidado. Na oxidação total, o consumo de permanganato geralmente corresponde à estequiometria requerida para a degradação a dióxido de carbono e água.

Os absorvedores em geral apresentam as seguintes limitações: corrosão, trabalham com temperatura inferior a 100 °C, saturação do material absorvente com o gás efluente. Usos: controle de gases e vapores solúveis em água ou em outro solvente adequado (amônia, ácido fluorídrico, hidrocarbonetos leves, dióxido de enxofre, gás sulfídrico, estes dois últimos com reação química).

Devido ao fato do gás de saída possuir alto teor de umidade, um dos problemas associados aos lavadores, em geral, é a pluma visível, emissão sobretudo de água condensada - Figura 7. 44.

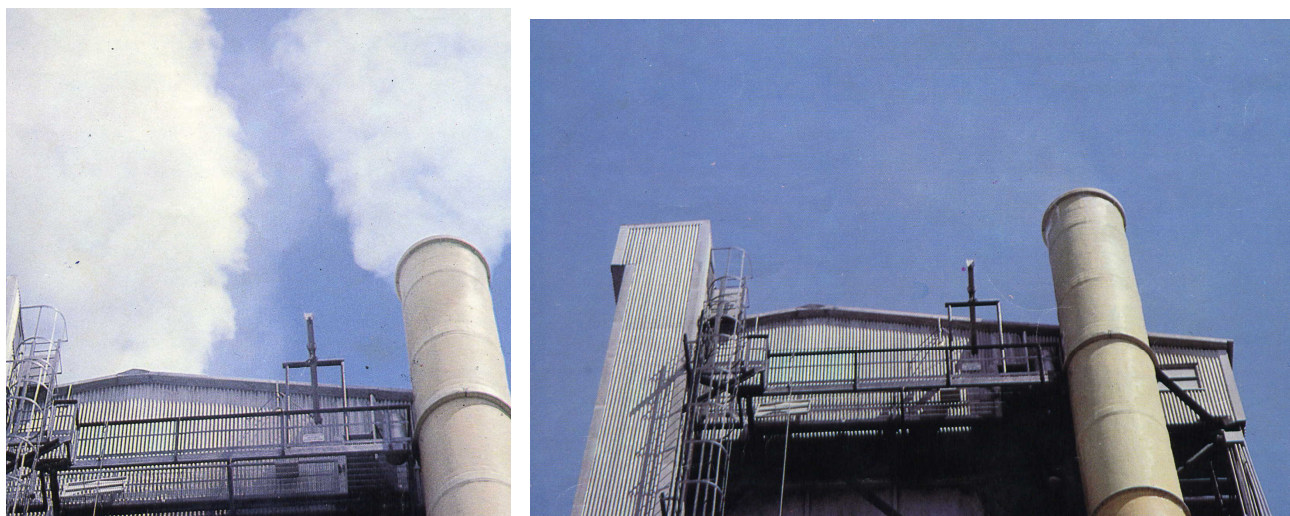


Figura 7. 44 - Problema estético: PLUMA VISÍVEL.

Exemplo de lavagem de gases para o tratamento do NO₂ mediante colunas de prato pode ser encontrado na literatura recente³. A seguinte reação ocorre na fase líquida, observando-se o consumo de água e a produção de ácido nítrico:



Passos para o projeto- O projeto de absorvedores envolve os seguintes passos:

1. Seleção do Solvente
2. Obtenção de dados de equilíbrio e de reação
3. Seleção do tipo de absorvedor
4. Determinação da vazão de líquido
5. Dimensionamento do absorvedor
6. Escolha de materiais de construção

³ LEITE BÚRIGO, A. et all – Absorção química de dióxido de nitrogênio. Revista Eng. Sanit. Amb., vol.10, n.1, jan/março 2005, 49-57.

Seleção do absorvente - O absorvente ideal deve obedecer aos seguintes requisitos:

1. O gás deve ser prontamente solúvel no mesmo ou deve ser altamente reativo para ter-se altas taxas de transferência de massa de forma a diminuir a quantidade de líquido absorvente.
2. O absorvente deve ser não volátil para evitar emissões secundários e aumento no consumo do absorvente.
3. Deve ser não corrosivo, para reduzir custo com materiais de construção especiais
4. Deve ser barato e facilmente disponível
5. Deve ter baixa viscosidade para aumentar a absorção e reduzir o "flooding" (inundação)
6. Deve ser de baixa toxicidade, não inflamável e quimicamente estável

O líquido absorvente mais comum é a água. No caso de dióxido de enxofre são utilizados principalmente a solução de soda cáustica (NaOH), suspensão aquosa de carbonato de cálcio ou cal, solução amoniacal. A absorção de hidrocarbonetos é realizada com solventes orgânicos.

Líquidos absorventes :

- **reativos** → absorvem o gás ou vapor através de reação química.

Ex.1: HCl é absorvido pela água formando a solução de ácido clorídrico que pode ser neutralizado com NaOH (hidróxido de sódio ou soda).

Ex.2: $\text{SO}_2 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_3$ (sulfito de sódio) + H_2O (Cetesb, Trat. SO_2 , p.8)

- **não reativos** → são líquidos em que o gás ou vapor se dissolvem sem reação química (gases muito solúveis)

Ex.: H_2 , O_2 , N_2 , CH_4 não mudam a forma molecular em solução
 NH_3 em H_2O ; HF em H_2O

OBS₁: H_2S - é mais fácil queimar do que absorver (cheira a ovo podre em pequenas concentrações).

$\text{H}_2\text{S} + 3/2(\text{O}_2) \rightarrow \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ SO_2 → não tem odor em baixa concentração.

OBS₂: Mercaptanas: $\text{CH}_3\text{SH} + 6\text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

Seleção do Absorvedor : Vários fatores ditam a seleção do absorvedor. Inicialmente deve ser escolhido aquele que propicie a maior área de transferência de massa, de funcionamento simples e de menor custo. Os enchimentos em torres de enchimento são utilizados para aumentar a orla disponível para transferência de massa; no entanto podem ser também um foco de ocorrência encrustações e entupimento. No caso de torres de prato o contato é feito através dos borbulhadores. No caso do lavador venturi ou lavador spray o contato entre gás e líquido é feito através da superfície das gotas formadas sendo recomendados somente para gases altamente reativos no absorvente escolhido. O lavador venturi apresenta a vantagem de coletar também e com alta eficiência as partículas presentes no fluxo e geralmente tem o coletor de gotas preenchido com enchimento e provido com aspersão de líquido para aumentar a eficiência de absorção.

Em relação às torres prato as torres de enchimento apresentam as seguintes vantagens:

1. Apresentam estrutura mínima: somente um suporte do enchimento e um redistribuidor de líquido a cada 3 metros.
2. São mais versáteis: O enchimento pode ser trocado para aumentar a eficiência, diminuir a perda de carga ou aumentar a capacidade.
3. Processamento de fluidos corrosivos pode ser feito com enchimentos de cerâmica ou plástico

4. A perda de carga é baixa
5. Custo relativamente baixo quando se utiliza enchimento plástico e para torres pequenas
6. Pode trabalhar com líquidos com tendência à formação de espuma

A torre de prato por sua vez apresenta as seguintes vantagens:

1. É mais fácil de ser limpa
2. Menor peso
3. Melhor quando há grande variação de temperatura pois resiste mais à contração e expansão térmica
4. Menos problema de entupimento quando o gás contém partículas
5. Não apresentam o problema de "channeling" do líquido (tendência do líquido a se dirigir para as paredes do absorvedor de enchimento)

Eficiência de Controle : A eficiência de controle de absorvedores é dependente do projeto específico. O dimensionamento é feito em função da emissão residual desejada, a qual é fixada a priori. A faixa usual de eficiência de absorvedores é de 80% a 95%, para equipamentos adequadamente projetados.

Limitações :

- corrosão
- temperatura < 100 °C
- carregamento do material absorvente com o gás efluente

USOS: • Controle de gases e vapores solúveis em água ou em outro solvente adequado.
• Amônia; dióxido de enxofre (*); ácido fluorídrico; gás sulfídrico (*); hidrocarbonetos leves. (*) com reação química

Exemplo ⁴ : **O uso de torres de enchimento (ou torres de lavagem) para o tratamento de gases mal cheirosos :**

A- Em estações de tratamento de esgotos:

As torres de lavagem retêm os produtos mal odorantes, transferindo-lhes da fase gasosa para a fase líquida. No caso das estações de tratamento de esgotos, o odor constitui uma das maiores reclamações da parte da vizinhança. Em 80% dos casos o tratamento escolhido constitui na lavagem físico-química (França, 1996).

O ar viciado é canalizado até uma primeira torre de lavagem à ácido sulfúrico, que garante a neutralização dos compostos de azoto (amoníaco e aminas), após uma ou duas outras torres oxidam os gases com enxofre em meio básico (muitas vezes o oxidante é o hipoclorito de sódio – água sanitária – que pode ser produzida por eletrólise numa solução salina). Por fim, uma quarta instalação pode reduzir a proporção de aldeídos e cetonas.

Toda a dificuldade da desodorização reside, principalmente, mais nas canalizações do ar viciado do que no tratamento em si. Nas modernas e compactas estações de tratamento de esgotos esta

⁴ VAN DEN BOS – *De nouveaux procédés pour piéger les mauvaises odeurs*. L'Usine Nouvelle, n.2569, pag.80-81, 1996

questão é minimizada pela existência de cobertura, o que não acontece com as estações mais antigas, desprovidas da mesma.

B – Na fabricação da gelatina :

Em Saint Denis, próximo de Paris, a indústria Saria utiliza a lavagem de gases para tratar 27.000 m³/h de ar viciado. O objetivo é o de reduzir os odores provenientes da secagem da farinha dos ossos utilizada no processo de fabricação da gelatina.

7.6.2 ADSORVEDORES

A adsorção é um processo seletivo e bastante apropriado para a remoção de gases e vapores presentes em baixas concentrações, principalmente substâncias causadoras de odor. No entanto, a adsorção também é empregada para a recuperação de solventes, como no caso de limpeza de roupas a seco. Ela leva significativa vantagem em relação aos incineradores de gases pela não necessidade de uso de combustível auxiliar, além de possibilitar a recuperação de solventes, quando se utiliza o processo regenerativo. A presença de material particulado no fluxo de gás a ser tratado prejudica o material adsorvente, encurtando o seu tempo de vida. O mesmo pode ocorrer com a condensação de líquidos.

O processo de adsorção envolve a remoção de um ou mais componentes gasosos do fluxo de gás através de aderência dos mesmos na superfície de um sólido. As moléculas de gás removidas denominam-se ADSORBATO, e o sólido que retém, ADSORVENTE – Figura 7. 45.

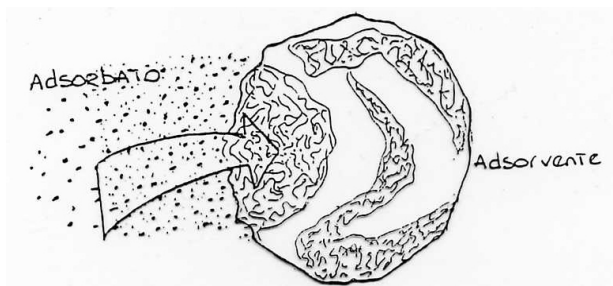


Figura 7. 45 - Processo de adsorção.

Mecanismo de adsorção : Ocorre em 3 etapas (Figura 7. 46):

- Os contaminantes propagam sobre a superfície da partícula do adsorvente;
- A molécula do contaminante migra para os poros da partícula do adsorvente;
- A molécula do contaminante adere na superfície do poro.

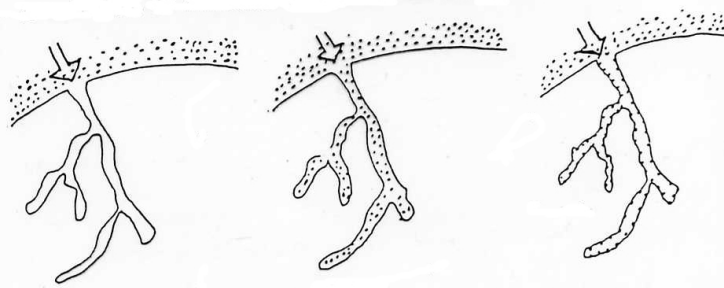


Figura 7. 46 - Mecanismo de adsorção.

O movimento de gases/vapores através de um leito adsorvente é frequentemente referido como um processo dinâmico. O termo dinâmico, neste caso, refere-se tanto ao movimento da corrente gasosa através do leito quanto às alterações de concentração da corrente à medida que o adsorbato vai ficando retido no adsorvente. A configuração mais comum de adsorção consiste na passagem de uma corrente gasosa (gás a ser tratado) através de um volume fixo ou leito de adsorvente (Figura 7. 47).

A corrente gasosa contendo o adsorbato (a uma concentração inicial C_0) é passada através do leito (inicialmente livre de qualquer contaminante). A maior parte da fase sólida é rapidamente adsorvida no topo do leito (situação A da Figura 7. 47). Após um certo período, a parte superior do leito torna-se saturada com o adsorbato e o mecanismo de adsorção, neste caso, passa a ocorrer nas camadas imediatamente inferiores do leito; a esta estreita faixa de adsorção dá-se o nome de *zona de transferência de massa* (ZTM, ou zona de adsorção).

Esse processo ocorre sucessivamente conforme a corrente gasosa avança no leito até que a ZTM atinja a saída do adsorvente, ocorrendo o *ponto de ruptura* (ou de quebra, em t_{rup} , conforme a situação C da Figura 7. 47). A partir deste ponto, a concentração na saída é cada vez maior até que todo o leito fique saturado; neste caso, diz-se que o sistema atingiu o *ponto de equilíbrio* (em t_{eq}), pois a concentração do gás na saída passa ser igual à concentração do gás na entrada do adsorvedor ($C=C_0$, situação D da Figura 7. 47). Outro termo importante a ser considerado neste caso é o *tempo estequiométrico* (t_{est}), definido como o tempo decorrido de adsorção onde a concentração num determinado ponto do leito é de 50% da concentração inicial ($C=0,5.C_0$) (CIOLA, 1981; COULSON e RICHARDSON, 2004; OBERZINER, SOARES e MOREIRA, 2005; RODRIGUES e DIAS, 2004; RUTHVEN, 1984).

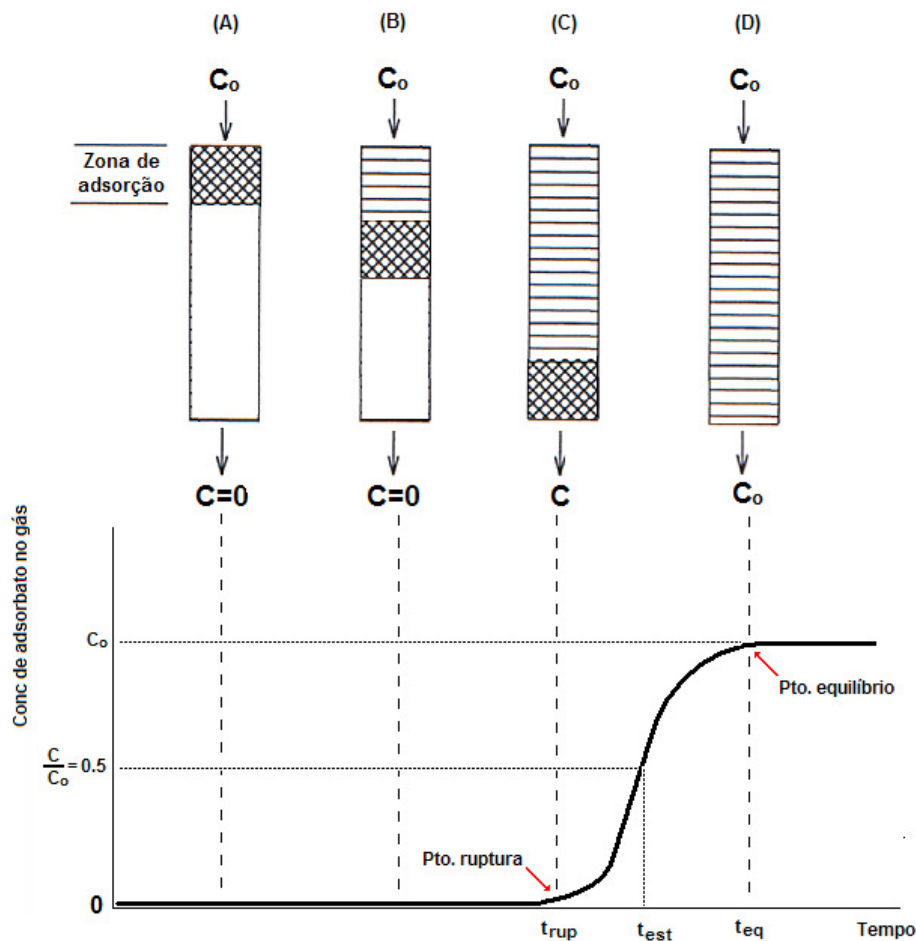


Figura 7. 47 – Mecanismo de transferência de massa no adsorvedor e curva equivalente.
 Fonte: MME (1997)

A taxa e o mecanismo do processo de adsorção, a natureza do equilíbrio de adsorção, a velocidade do fluido, a concentração de soluto na alimentação, e a altura do leito de adsorvente contribuem para a forma da curva de ruptura. Via de regra, o tempo de ruptura diminui com o decréscimo da altura do leito, com o aumento do tamanho da partícula do adsorvente, com o aumento da velocidade do fluido através do leito e com o aumento da concentração inicial do soluto na alimentação (RODRIGUES e DIAS, 2004; RUTHVEN, 1984).

Muitos sistemas adsorventes para o controle de odores têm sido focados na remoção de gás sulfídrico e COV. Uma neutralização ácido-base ou oxidação pelo ar, quer em fase líquida ou em leito adsorvente, pode desodorizar alguns destes compostos. Como a conversão química não é aplicada em todos os casos, a adsorção física utilizando carvão ativado granular (preferencialmente com a impregnação de químicos) é o método mais adequado para o controle de odores gerados em estações de tratamento. Evidentemente um tratamento químico prévio pode auxiliar na redução da concentração de determinados gases antes do tratamento com carvão ativado. Os adsorvedores são extremamente efetivos na remoção de poluentes gasosos. Mesmo a baixas concentrações, os mesmos podem ser projetados e operados para eficiências próximas a 100% (LE CLOIREC, 1998).

Substâncias adsorventes : O adsorvente apresenta a característica de ser um material sólido, poroso e de grande área superficial específica. Como exemplo pode-se citar que a área ativa de muitos adsorventes atinge a 10^7 cm^2 por grama de adsorvente (aproximadamente 1000 m^2 em cada grama de adsorvente). Os principais adsorventes utilizados em poluição do ar são:

- **carvão ativado**
- **alumina ativada**
- **peneiras moleculares**
- **sílica gel**

Os três primeiros são substâncias amorfas enquanto as peneiras moleculares são substâncias cristalinas constituídas basicamente de aluminos-silicato de metais (potássio, magnésio, sódio ou cálcio). As peneiras moleculares são relativamente novas, tendo o seu uso comercial se iniciado por volta de 1954. Possuem a vantagem de poderem ser feitas sob medida para uma aplicação específica.

O carvão ativado (Figura 7. 48) é produzido pelo aquecimento de sólidos orgânicos (carvão, madeira dura, côco, etc.) a aproximadamente 900°C em atmosferas redutoras. Esse adsorvente é um dos mais antigos e é muito utilizado face à sua versatilidade, disponibilidade e custo. A densidade está na faixa de $0,08$ a $0,5 \text{ g/cm}^3$.



Figura 7. 48 – Carvão ativado.

Os adsorventes em geral tem tamanhos na faixa de 4 a 20 mesh ($4,76 \text{ mm}$ a $841 \mu\text{m}$) e são descritos como "pellets" ou "beads". Outra característica importante de um adsorvente é a sua alta temperatura de oxidação para prevenir oxidação e adequada resistência de forma a manter-se estruturalmente estável.

O Quadro 7. 13 apresenta algumas características do carvão ativado, sílica-gel e alumina ativada assim como das terras diatomáceas e fuller para fins de comparação.

Quadro 7. 13 - Características de adsorventes.

ADSORVENTE	ÁREA ATIVA m^2/g	VOLUME DOS POROS cm^3/g	DIÂMETRO MÉDIO DOS POROS - Angstrom (A°)
Carvão ativado	500 a 1500	0,6 a 0,8	20 a 40
Sílica-gel	200 a 600	0,4	30 a 200
Alumina ativada	175	0,39	90
Terras diatomáceas e Fuller	4,2	1,14	22000

A impregnação do carvão ativado com substâncias químicas adequadamente escolhidas pode aumentar a afinidade adsorvente para certas substâncias. Um exemplo é o uso de carvão ativado impregnado com acetato de chumbo para a adsorção de gás sulfídrico. Nesse caso ocorre uma reação

química resultando na formação de sulfeto de chumbo o qual não pode ser recuperado sem a destruição do adsorvente que deve e então ser descartado.

Capacidade de adsorção:

Existem dois tipos de capacidade de adsorção. Um refere-se à capacidade em relação a saturação. O outro à capacidade de trabalho. Uma camada de adsorvente adsorve uma determinada substância durante um certo período de tempo sem grande variação na concentração de saída (eficiência relativamente constante). A partir de um certo tempo de operação a concentração de saída começa a aumentar rapidamente até atingir eficiência de retenção zero, ou seja a concentração de saída é a mesma de entrada. O ponto em que a concentração começa a aumentar rapidamente é chamado de "breaking point" – Figura 7. 49. Quando esse ponto é atingido o adsorvente deve ser regenerado ou trocado. A capacidade de trabalho refere-se à capacidade de adsorção até atingir o "breaking point". A capacidade de adsorção de saturação é referida ao ponto em que a eficiência passa a ser nula.

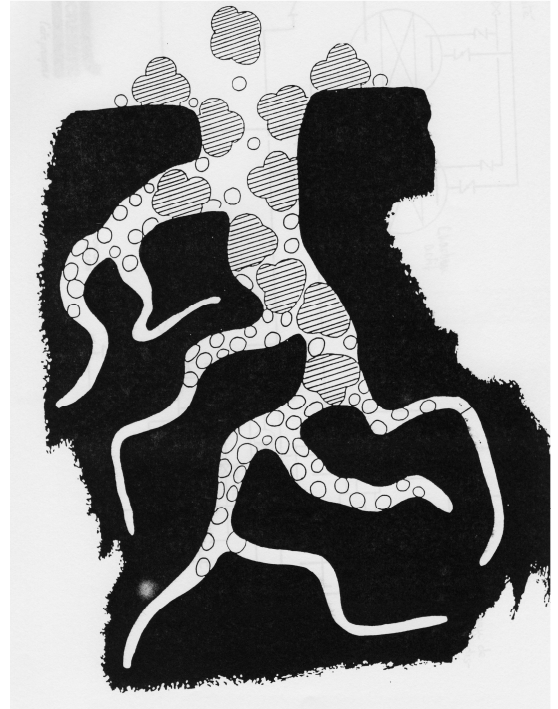


Figura 7. 49 - Breaking point.

No Quadro 7. 14 é mostrada a capacidade de adsorção relativa do carvão ativado para várias substâncias. Esse quadro é importante para verificar a viabilidade de utilização do carvão ativado para adsorção de uma substância específica. A capacidade de adsorção e a retentividade do carvão ativado para algumas substâncias orgânicas é mostrada no Quadro 7. 15. A retentividade refere-se à quantidade de substância que permanece no adsorvente após a desorção.

A adsorção, sempre que possível, deve ser feita a temperatura relativamente baixas.

A capacidade de adsorção aumenta à medida que a quantidade de desorção é aumentada. A desorção, que é a retirada do poluente adsorvido do leito do adsorvedor, aumenta à medida que a temperatura de desorção é aumentada em relação à temperatura de adsorção. A desorção também pode ser aumentada pelo aumento do tempo de desorção.

O tempo para a saturação do adsorvente pode ser calculado pela expressão de Turk, qual seja (CETESB, 1990^B):

$$t = \frac{2,9 \cdot 10^5 m}{Q Y_e M}$$

sendo,

t = tempo para atingir saturação, min

m = massa de adsorvente, g.

Q = vazão de gás, m³/h

M = massa molecular média dos vapores adsorvidos

Ye = concentração do vapor a ser adsorvido na entrada do adsorvedor (ppm)

Quadro 7. 14 - Capacidade de adsorção relativa do carvão ativado para várias substâncias orgânicas.

POLUENTE	ÍNDICE	POLUENTE	ÍNDICE
Acetaldeído	2	Gás carbônico	1
Ácido acético	4	Monóxido de carbono	1
Acetona	3	Tetracloro de carbono	4
Acroleína	3	Cloro	3
Álcool	4	Cloropicrina	4
Aminas	2	Fumaça de cigarro	4
Amônia	2	Cresol	4
Anestésicos	3	Fumaça de óleo Diesel	3
Odores animais	3	Desinfetantes	4
Benzeno	4	Acetato de etila	4
Odores Corporais	4	Etileno	1
Butano	2	Óleos essenciais	4
Álcool Butílico	4	Formaldeido	2
Ácido Butírico	4	Gasolina	4
Odor de cancer	4	Odores hospitalares	4
Ácido caprílico	4	Cheiro caseiro	4
Gás sulfúrico	3	Álcool isopropílico	4
Agentes mascaradores	4	Mercaptanas	4
Ozona	4	Perfumes e cosméticos	4
Suor	4	Fenol	4
Propano	2	Piridina	4
Frutas amadurecidas	4	Smog	4
Solventes	3	Abafado(lugar)	4
Tolueno	4	Turpentina (Terebintina)	4

Fonte: CETESB, 1990^B.

SIGNIFICADO DO ÍNDICE:

4. Alta capacidade para todos os materiais dessa categoria. Uma libra adsorve 20 a 50% de seu próprio peso (média 33%). Essa categoria engloba quase todos os odores.
3. Capacidade satisfatória. Adsorve entre 10 e 25% do peso (média 16,7%)
2. Razoável em função das condições de operação, requerendo estudos específicos
1. Baixa capacidade de adsorção por carvão ativo, não sendo recomendado seu uso

O tempo para atingir o "breaking point" (capacidade de trabalho) é menor que o dado pela expressão de Turk e deve ser obtido com base em experimentos. É importante obter dados específicos do fabricante.

Quadro 7. 15 - Capacidade de adsorção e retentividade de carvão ativado para algumas substâncias orgânicas. Fonte: CETESB, 1990^B.

Substâncias	Capacidade de adsorção % peso	Retenção após remoção % peso
Tetracloro de carbono	180 - 110	27 - 30
Gasolina	10 - 20	2 - 3
Benzeno	45 - 55	5,9
Metanol	50	1,2
Etanol	50	1,05
Isopropanol	50	1,15
Acetato de etila	57,5	4,87
Acetona	51	3,0
Ácido acético	70	2,5

Regeneração:

Os adsorvedores podem operar com sistema de regeneração ou o material adsorvente pode ser descartado após a exaustão. A regeneração é conseguida em geral pela passagem em fluxo contrário de vapor a baixa pressão, o qual será condensado, juntamente com o adsorbato (substância adsorvida) num sistema de condensação adequado. Caso o adsorbato não seja de fácil condensação o mesmo deverá ser incinerado ou controlado por outro meio. A regeneração é importante para reduzir os custos do sistema quando o produto tem valor comercial e está presente em concentrações razoáveis, de preferência em altas concentrações.

Tipos de adsorvedores: Os adsorvedores podem ser de leito único ou múltiplos, fixo ou móvel.

- a) **Adsorvedor de leitos múltiplos:** A Figura 7. 50 mostra um adsorvedor de leitos múltiplos, fixos. Alguns podem ser divididos em camadas com o uso de pratos suportes. O gás então penetra na coluna (na metade da altura da coluna) e é distribuído entre as camadas. Passando pelo leito adsorvente, o gás deixa os poluentes conforme os mecanismos de adsorção descritos anteriormente.

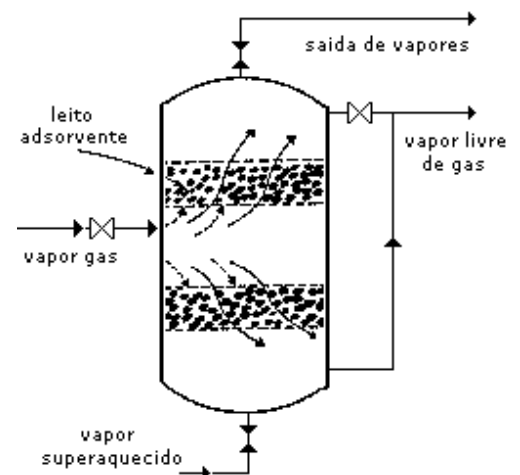


Figura 7. 50 - Adsorvedor de leitos múltiplos, fixos.
Fonte: SCHIRMER (2000)

b) **Adsorvedor leito fixo de carvão ativado:** A Figura 7. 51 mostra um adsorvedor de leito fixo de carvão ativado (dois adsorvedores em paralelo). Neste caso, o ar entra sujo pelo topo e sai limpo pelo fundo. Muitos adsorvedores parecem ser mais curtos e mais largos quando comparados com a torre de absorção.

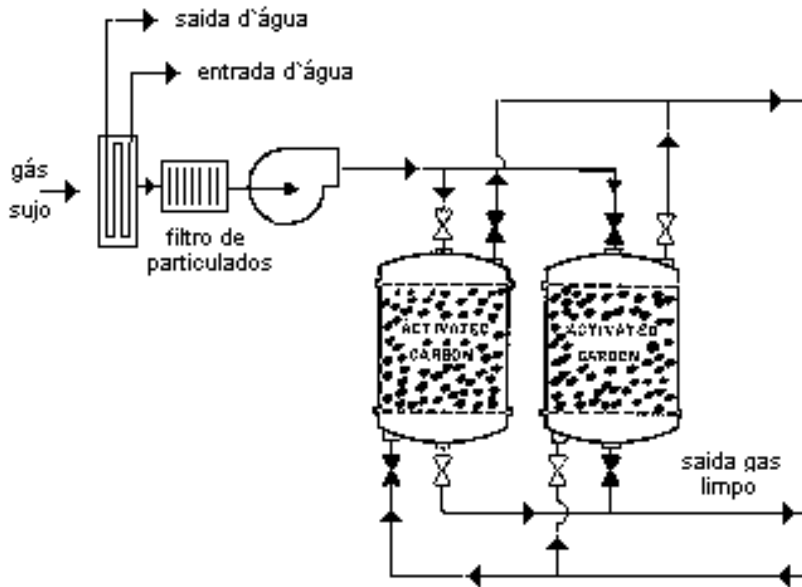


Figura 7. 51 - Adsorvedor de leito fixo de carvão ativado.
Fonte: SCHIRMER (2000)

c) **Adsorvedor de leito móvel:** A Figura 7. 52 mostra um adsorvedor de leito móvel. Neste caso, a corrente de ar contendo o poluente passa em fluxo horizontal através da coluna vertical adsorvedora.



Figura 7. 52 - Adsorvedor de leito móvel.
Fonte: SCHIRMER (2000)

Perda de Carga : A perda de carga do adsorvedor é função do tipo e granulometria do material adsorvente e da velocidade superficial na entrada do leito adsorvente.

Eficiência : Os adsorvedores são extremamente efetivos na remoção de poluentes gasosos. Mesmo à baixas concentrações, os mesmos podem ser projetados e operados a eficiências próximas a 100%. Dados empíricos necessitam ser usados para cada sistema para estabelecer as condições de projeto e operação necessárias para atingir a eficiência requerida. O Quadro 7.16 apresenta os parâmetros de construção de um adsorvedor de compostos orgânicos voláteis (COV) tendo carvão ativado como adsorvente. O limite inferior de explosividade (LIE) é a concentração de COV necessária para produzir uma explosão. Uma concentração inferior a 10% é desejada devendo, entretanto, ficar sempre inferior a 50%.

Quadro 7.16 – Parâmetros de projeto adsorvedor .

Parâmetro	Range
Ponto ebulição COV, [°C]	20 – 175
Concentração COV, ppm	< 5000
Velocidade superficial do gás, [cm.s ⁻¹]	40,7 – 50,8
Profundidade zona de transferência, [cm]	15 – 46
Perda de carga, [cmH ₂ O]	25 – 125
Densidade do carbono, [g.cm ⁻³]	0,43 – 0,48
Limite profundidade do leito, [m]	1,22

Fonte: SCHIRMER (2000)

7.6.3 INCINERADORES DE GASES E VAPORES

A incineração é um método bastante eficaz para a eliminação de gases e vapores de origem orgânica. A combustão, que é o processo utilizado na incineração, transforma os contaminantes combustíveis (exemplo da oxidação de compostos orgânicos voláteis) em dióxido de carbono e vapor d'água, que não são considerados poluentes. A incineração também pode ser utilizada para a oxidação de compostos inorgânicos como por exemplo o gás sulfídrico (H₂S) que é um gás de odor bastante desagradável, transformando-o em dióxido de enxofre (SO₂) e vapor d'água. Neste último caso tem-se a transformação de um gás poluente em outro também poluente porém, dependendo da quantidade de dióxido de enxofre que será formada, é melhor que se tenha este último do que o odor desagradável do gás sulfídrico (CETESB, 1990^B).

Para se ter uma idéia da importância do controle de compostos orgânicos combustíveis é bastante citar que milhares de diferentes tipos destes compostos são emitidos para a atmosfera os quais são provenientes de diferentes operações em diversos tipos de indústrias.

Muitas emissões industriais tem sido controladas com sucesso pelo uso da incineração, especialmente quando poluentes orgânicos estão envolvidos seja como gás, vapor ou aerossol. Algumas dessas operações são: secadores de sangue animal, digestores utilizados na produção de farinha de carne, farinha de osso, farinha de penas e farinha de peixe; torrefações de café, secagem de pintura de veículos e outros artefatos; secagem de chapas envernizadas, defumação de carne, etc.

A combustão também tem sido utilizada na redução das emissões de monóxido de carbono e hidrocarbonetos por fontes móveis (veículos).

Combustão é uma oxidação conseguida através do mecanismo de rápidas reações em cadeia. As reações em cadeia ou passos envolvidos em reduzir substâncias combustíveis indesejáveis a dióxido de carbono e vapor d'água são numerosos e variam para cada composto presente no efluente gasoso. Entretanto, a existência de numerosas reações em cadeia não é prejudicial para a combustão controlada pois esta é mais influenciada por fatores externos, tais como concentração, temperatura inicial do gás, volume ou vazão, e turbulência (CETESB, 1990^B).

A maioria dos combustíveis utilizados na combustão são compostos de carbono e hidrogênio (C_aH_b). O processo de combustão transforma os contaminantes combustíveis em dióxido de carbono (CO_2), vapor d'água e um componente ácido (HX sendo X=F, Cl, Br, I) de halogênios, SO_x de compostos sulfurados, NO_x de nitrogenados, nitrilas, heterocíclicos nitrogenados e P_2O_5 de compostos fosforados, que não são considerados poluentes (STUETZ e FRENCHEN, 2001).

Para uma combustão eficiente, deve haver um contato íntimo entre oxigênio e combustível. Para tanto, as seguintes condições devem ser satisfeitas: *temperatura* alta o bastante para o início e desenrolar do processo; *tempo de residência* suficiente entre oxigênio e combustível; *turbulência* na mistura ar-combustível. Na realidade, tempo, temperatura e turbulência são de tal modo predominantes nessas reações que até são chamados de os "3 T" da combustão – Figura 7.53. A velocidade e a eficiência da reação de combustão está diretamente aos "3 T" no fato de que o oxigênio precisa entrar em íntimo contato com a molécula combustível a uma temperatura e tempo suficientes para que a reação se realize completamente. A ocorrência de combustão incompleta pode resultar na formação de aldeídos, ácidos orgânicos, partículas de carbono (fuligem), monóxido de carbono ou outros produtos menos desejáveis que aqueles inicialmente existentes no efluente gasoso (CETESB, 1990^B).

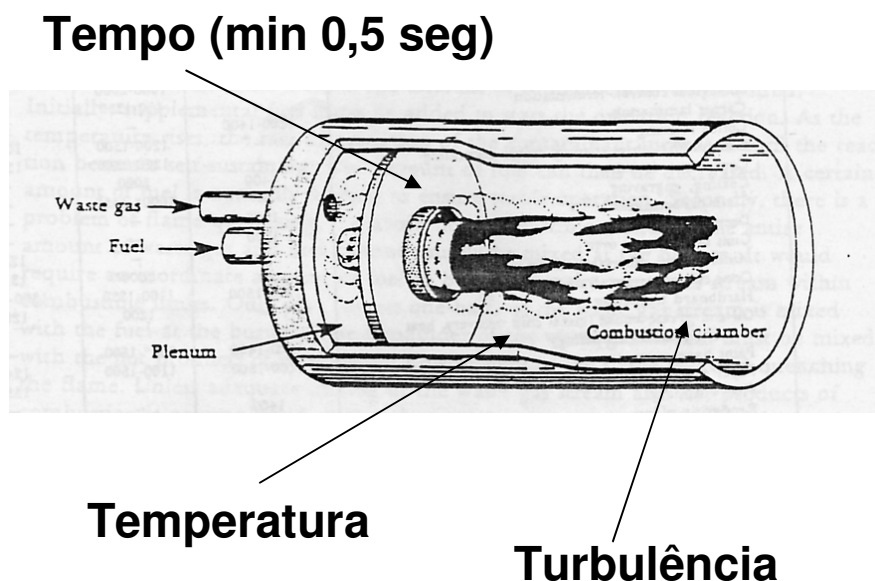


Figura 7.53 - Os "3 T" da combustão.

Uma mistura somente é capaz de auto-combustão ou explosão quando os constituintes necessários estão dentro de uma faixa de concentração limitada. Esta faixa é importante porque o calor de combustão possuído pela mistura fornece energia suficiente para propagar o processo de oxidação. A faixa de concentração limitada está definida por valores conhecidos como limites de inflamabilidade

inferior e superior. Estes limites usualmente referem-se a misturas de ar e gás ou vapor combustível, e são expressos em porcentagens em volume a temperatura ambiente.

No caso de fontes de poluição do ar, os poluentes geralmente estão presentes a baixas concentrações e necessitam do fornecimento de energia suplementar. A energia adicional ou suplementar pode ser suprida na forma de pré-aquecedores, queimadores alimentados a óleo ou gás, ou "flares". Pré-aquecimento da mistura ar-gás antes de entrar no maçarico pode sustentar uma chama do mínimo necessário porque o limite inferior de inflamabilidade diminui com o aumento de temperatura.

O principal fator de projeto para se obter combustão auto-sustentável é o conhecimento da temperatura mínima requerida para queimar vapores orgânicos na presença de oxigênio em quantidade adequada. Esta temperatura é conhecida como a de combustão.

Parâmetros Básicos (CETESB, 1990^B):

a. Temperatura : Temperatura suficientemente alta deve ser provida na câmara de combustão para que se processe a completa oxidação dos poluentes combustíveis. O Quadro 7.17 fornece algumas recomendações para a temperatura de operação de incineradores para determinadas fontes de poluição do ar. Em geral a temperatura varia do mínimo de 650 °C ao máximo de 815 °C.

Deve-se ressaltar que a temperatura deve ser mínima necessária porque o custo de operação está baseado no consumo de combustível auxiliar.

Quadro 7. 17 - Temperatura de operação recomenda para incineradores de chama direta.

Fonte ou Operação	Temperatura Recomendada (°C)
Controle de Solvente	700 - 815
Controle de Odor	700 - 815
Defumação	650
Cozimento de Verniz	650
Cura de Plastisol Vinílico	650 - 760
Digestão de Matéria Animal	650
Fumaça de óleo e graxa	650 - 760
Cura de Pintura	650 - 815
Torrefação de café	650 - 815
Fritura em gordura	650

b. Tempo de Residência : O tempo de residência é definido como o tempo em que o gás permanece na câmara de combustão e é matematicamente igual:

$$t = \frac{\text{Volume da câmara de combustão}}{\text{Vazão de gás na camada de combustão}}$$

O tempo de residência recomendado pela prática varia de 0,3 a 0,5 segundos.

c. Velocidade na Câmara de Combustão : A velocidade deve ser adequada de modo a promover uma boa mistura. Velocidades de 6 m/s a 12 m/s são satisfatórias na prática.

d. Contato entre contaminante e chama : O contato entre contaminante e chama na câmara de mistura depende de modo de entrada do combustível auxiliar e do ar com o contaminante e também da posição relativa destas entradas. A câmara de mistura deve prover boa mistura entre contaminantes e a chama. As velocidades usuais para a câmara de mistura variam de 7,5 a 15 m/seg. Essa faixa de velocidade também é suficiente para evitar a volta de chama no duto, pois é maior que a velocidade de propagação da chama. Ela é influenciada pelo tipo de matéria combustível, conteúdo de oxigênio, conteúdo de energia, velocidade de passagem, e outras condições. O tipo de catalizador usado nos sistemas catalíticos é um fator adicional na temperatura de combustão catalítica.

Equipamentos de Incineração de Gases e Vapores:

Os processos de incineração abrangem basicamente três: incineração de chama direta ou térmica, incineração catalítica e os “flares”, que permitem o tratamento eficaz de compostos orgânicos de maneira relativamente econômica. Isto, no entanto, só é verdadeiro se o poluente a ser tratado não estiver muito diluído na corrente gasosa e, ainda, se a mesma não estiver significativamente úmida. Embora os três tipos de incineradores sejam fisicamente similares, os parâmetros sob os quais eles operam são bastante distintos. Em geral, consistem de: queimadores, que propiciam a queima do combustível e dos vapores orgânicos; e câmara de combustão, que promove o tempo de residência apropriado para o processo de oxidação. Os incineradores conseguem eficiências de remoção de orgânicos na faixa de 90 a 98%.

Portanto, três tipos básicos de equipamentos de incineração são utilizados para o controle das emissões de gases e vapores combustíveis, quais sejam:

- a) Incinerador de chama direta b) Incinerador catalítico c) "Flare"

Além desses três tipos também é utilizada, ainda que de forma limitada, a incineração em uma câmara de combustão já existente, como é o caso da utilização de câmaras de combustão de caldeiras.

a) Incinerador Térmico ou de Chama Direta:

O incinerador de chama direta consiste de uma câmara de combustão com paredes revestidas com material refratário, um ou mais queimadores, indicador-controlador de temperatura, equipamento de segurança. Algumas vezes contém equipamento para recuperação do calor, como os trocadores de calor. A seção transversal deste tipo de equipamento é em geral cilíndrica ou retangular. A Figura 7.54 mostra dois incinerador de chama direta de seção cilíndrica. O funcionamento do incinerador de chama direta depende do contato da chama e de temperaturas relativamente altas para queimar os contaminantes. Em princípio qualquer tipo de combustível pode ser utilizado como combustível

auxiliar, contudo, para propósitos de controle de poluição do ar o combustível mais indicado é gasoso, sendo que o combustível líquido também tem sido usado (CETESB, 1990^B).

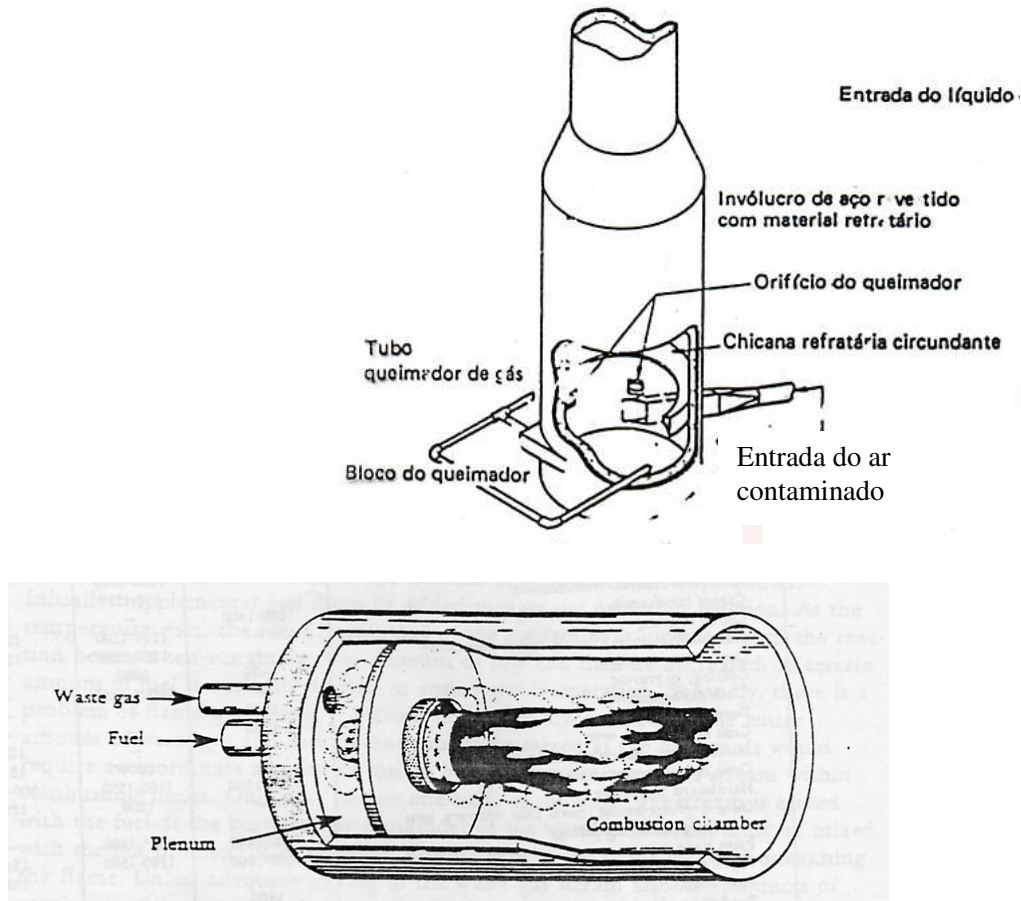


Figura 7. 54 – Incineradores de chama direta

A quantidade de calor a ser provido ao sistema para atingir a temperatura de operação especificada é calculada pela diferença entre as entalpias do gás na saída e na entrada do incinerador. No caso de controle de poluição do ar, geralmente pode-se assumir o gás como sendo o próprio ar, uma vez que as concentrações dos poluentes são baixas. Também devido a este fato, pode-se desprezar o calor de combustão produzido pela queima dos poluentes. No caso de altas concentrações de poluentes no gás carreador, deve-se levá-los em consideração para um projeto mais preciso. Essa quantidade de calor será suprida pelo calor produzido pela queima do combustível, na temperatura desejada. O consumo de combustível auxiliar dependerá do tipo de combustível porque depende do poder calorífico do mesmo. Previsão deve ser feita para possíveis perdas de calor. O Quadro 7. 18 mostra alguns parâmetros de funcionamento de um incinerador térmico.

A oxidação térmica é geralmente mais aplicável para correntes gasosas com concentrações de gases (como os COV – compostos orgânicos voláteis) superiores a 1000 ppm. Para concentrações inferiores a esta, pode ser necessário uma quantidade de calor (e conseqüentemente combustível) muito grande a ser produzido, inviabilizando o processo economicamente (ENGLEMAN, 2000). A utilização

destas técnicas necessita uma série de precauções e um bom conhecimento do efluente a ser tratado (LE CLOIREC, 1998). Uma desvantagem do tratamento por combustão é que o mesmo exige um equipamento de controle secundário afim de tratar os resíduos desta combustão (KHAN e GHOSHAL, 2000).

Quadro 7. 18 – Parâmetros de funcionamento de um incinerador térmico.

Parâmetro	Range
Temperatura, [°C]	500 – 870
Tempo médio retenção, [s]	0,3 – 0,5
Eficiência, %	98
Velocidade, [m.s ⁻¹]	6-12

Fonte: HESKET e CROSS (1989); YOUNG e CROSS (1982)

O Quadro 7. 19 mostra o resultado de um teste (com 4 situações) com um incinerador térmico (regenerativo)⁵ numa das fábricas da Digital Equipment Corporation, de Cupertino (CA, EUA), usado na incineração de COV. O equipamento consiste de 3 leitos empacotados de cerâmica que são alternadamente aquecidos e resfriados durante o ciclo de troca térmica. Em todas as 4 variações do teste, a eficiência global de destruição dos COV foi superior a 98%. A corrente de alimentação era composta por vários orgânicos voláteis.

Quadro 7. 19 – Dados do teste com COV na fábrica da Digital Equipment.

Teste	Temperatura (°C)	Concentração COV (ppm)		Eficiência de destruição
		Entrada	Saída	
1	816	80	1,3	98,1
2	816	70	0,2	99,8
3	816	63	0,9	98,4
4	816	71	0,8	98,8

Fonte: USEPA (1995)

Teste com o mesmo equipamento (usado também para abatimento de COV) realizado na Mobil Company (empresa da área petrolífera), planta situada em Bakersfield (CA, EUA), é mostrado no Quadro 7. 20. O orgânico monitorado foi o isopentano, numa concentração de 100 ppm na corrente de entrada. O percentual de destruição deste composto a 816 °C ficou entre 98% e 99%. A eficiência térmica do sistema foi de 94,7%.

Quadro 7. 20 – Resultados do teste na MOBIL Company.

Composto monitorado	Isopentano
Concentr. entrada (ppm)	100
Concentr. saída (ppm)	1 – 2
Eficiência tratamento (%)	98 – 99
Temperatura (°C)	816
Fluxo gasoso (m ³ /min)	1076

Fonte: USEPA (1995)

⁵ Incinerador produzido pela Smith Engineering System, de Ontário (EUA).

Combustão com chama - utilização de incineradores (transformam os resíduos gasosos em substâncias inócuas):

- temperatura : 400 a 870°C
- tempo médio de retenção: 0,3 a 0,5 segundos
- eficiência: > 98%
- aplicações
 - indústria de tintas e vernizes
 - torrefação de café
 - refinarias
 - indústrias de aproveitamento de resíduos animais
 - oxidação do asfalto

Câmaras de combustão existentes (CETESB, 1990^B):

Câmaras de combustão de caldeiras e aquecedores a combustível podem ser utilizados, sob certas condições, como incineradores de chama direta - Figura 7. 55. Esta é uma condição singular, pelo fato de que uma fonte de poluição do ar é utilizada para controlar poluentes emitidos por outra fonte.



Figura 7. 55 - Caldeira do HU – UFSC.

As condições da câmara de combustão de caldeiras aproximam-se daquelas de um incinerador bem projetado, desde que sejam adequados a temperatura, o tempo de residência, a turbulência e a chama.

A adaptação completamente satisfatória de caldeiras, como incineradores de gases e vapores não é comum. Todos os aspectos de operação devem ser exaustivamente avaliados antes de utilizá-la como equipamento de controle de poluição do ar. A função primordial de uma caldeira é a de fornecer vapor ou água quente e, quando o seu uso como equipamento de controle conflitar com a sua função,

um ou os dois propósitos sofrerão. Algumas das vantagens e desvantagens deste uso estão abaixo mencionadas.

VANTAGENS:

1. O capital dispendido é menor;
2. A caldeira passa a ter duas funções;
3. Não há necessidade de combustível auxiliar para o dispositivo de controle de poluição do ar;
4. Os custos de operação e manutenção ficam limitados a um só equipamento;
5. Economia de combustível.

DESVANTAGENS:

1. Se o volume dos contaminantes for grande para a caldeira a emissão final poderá ser excessiva;
2. Poderá aumentar o custo de manutenção por causa da sujeira do queimador e dos tubos da caldeira;
3. A caldeira terá que ser aquecida a uma taxa adequada durante todo o tempo, independentemente da necessidade de vapor;
4. Normalmente, duas ou mais caldeiras tem que ser utilizadas por causa de paradas para manutenção;
5. A perda de pressão através da caldeira poderá ser excessiva se grandes volumes de efluentes forem introduzidos nela.

b) Incinerador catalítico: Um incinerador catalítico consiste basicamente de uma câmara que contém uma camada de catalizador que promoverá a oxidação do poluente - Figura 7. 56. A incineração catalítica necessita temperaturas mais baixas quando comparada com a da incineração com chama direta, mas na maioria dos casos há necessidade de uma câmara de pré-aquecimento. O incinerador catalítico também deve possuir dispositivos indicadores-controladores de temperatura, dispositivos de segurança e sistema de recuperação de calor (CETESB, 1990^B). A combustão catalítica tem sido usada nas industriais e nos veículos automotores.

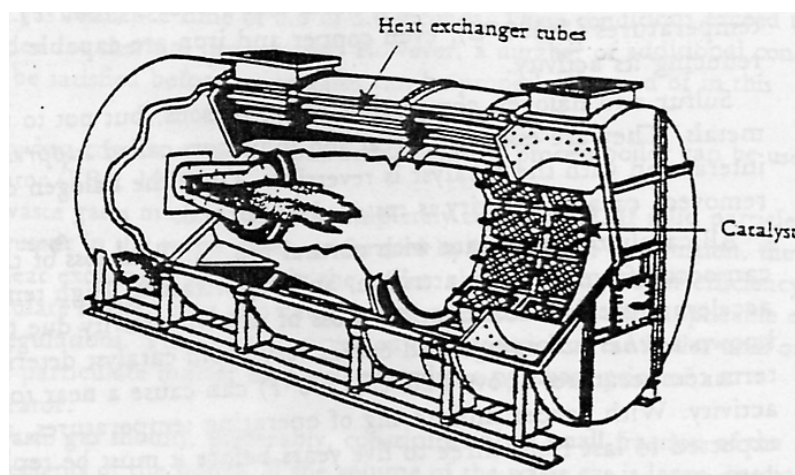


Figura 7. 56 - Incinerador catalítico de uso industrial.

O catalizador é uma substância que aumenta a taxa de combustão e, teoricamente, não é modificado pelo processo. A combustão catalítica ocorre na superfície do catalizador, sem chama e à temperatura mais baixa que a temperatura de combustão com chama. O sistema de combustão com

chama utiliza oxidação à alta temperatura. O sistema de combustão catalítica utiliza oxidação a temperaturas reduzidas.

A combustão catalítica é um fenômeno de superfície que envolve os seguintes passos:

- Difusão dos reagentes para a superfície do catalizador e difusão dos produtos da superfície do mesmo;
- Difusão de reagentes e produtos dentro dos poros do suporte do catalizador;
- Adsorção de reagentes e dessorção de produtos na superfície do catalizador;
- Reação na superfície do catalizador, envolvendo os reagentes adsorvidos.

O fenômeno de adsorção é exotérmico, portanto fornece a energia necessária para combustão dos reagentes, os quais apresentam-se em altas concentrações na superfície do catalizador.

A eficiência do incinerador catalítico é função de várias variáveis, entre as quais pode-se citar:

- . área superficial do catalizador;
- . tipo de catalizador;
- . uniformidade do fluxo dos gases através do leito catalizador;
- . natureza do material a ser queimado;
- . concentração de oxigênio;
- . volume de gases por unidade de catalizador;
- . temperatura dos gases.

Os elementos que tem sido usados como catalizadores são metais e óxidos metálicos da família da platina. Como a catálise é um fenômeno de superfície, pequenas quantidades de catalizador são suportadas por um meio expandido, tal como a alumina, de tal modo que seja conseguida uma grande área superficial.

A temperatura na entrada do leito catalizador está usualmente na faixa de 340°C a 540°C. O peso molecular do hidrocarboneto também exerce influência na eficiência de remoção. Hidrocarbonetos de baixo peso molecular podem reagir mais rapidamente devido às maiores taxas de difusão, contudo a estabilidade da molécula tem que ser levada em consideração. Um hidrocarboneto estável e de baixo peso molecular (metano) é difícil de ser oxidado, na eficiência do incinerador catalítico.

A eficiência do incinerador catalítico deteriora com o tempo de uso e portanto, deve ser feita a reposição periódica dos elementos. Essa reposição varia largamente, desde alguns meses até 2 anos. Em adição, a performance do catalizador é seriamente afetada por materiais que envenenam o catalizador, como por exemplo, mercúrio, arsênio, zinco, e chumbo. Substâncias que cobrem o catalizador, tais como resinas sólidas e óxidos sólidos, necessitam serem evitadas, sendo portanto uma limitação de uso (CETESB, 1990^B).

A principal vantagem do incinerador catalítico sobre o incinerador de chama direta é o baixo custo operacional devido à menor quantidade de combustível auxiliar requerida (pelo uso de temperaturas inferiores). Temperaturas mais baixas também reduzem os custos de construção do equipamento.

Como desvantagem podemos citar a eficiência geralmente mais baixa e o problema da disponibilidade do catalizador no mercado interno (KHAN e GHOSHAL, 2000). O incinerador catalítico apresenta ainda o problema da redução ou mesmo perda da atividade catalítica, além de não poder ser utilizado no controle de material particulado, que deposita-se na superfície do catalisador impedindo a adsorção do composto orgânico. Além disso, compostos sulfurados e halogenados agem como venenos catalíticos. Para tanto, devem ser removidos para que a atividade catalítica seja restaurada (MME, 1997). Quanto ao custo, ambos incineradores (chama direta e catalítico) apresentam

basicamente o mesmo preço. O Quadro 7. 21 mostra alguns parâmetros de funcionamento de um incinerador térmico.

Quadro 7. 21 – Parâmetros de funcionamento de um incinerador catalítico.

Parâmetro	Range
Temperatura, [°C]	340 – 540
Eficiência, %	> 98%

Fonte: KHAN e GHOSHAL (2000)

O Quadro 7. 22 apresenta algumas diferenças entre as incinerações térmica e catalítica.

Quadro 7. 22 – Comparação entre incineração térmica e catalítica .

Parâmetro	Chama direta	Catalítico
Temperatura média operação, [°C]	635	440
Área seção transversal, [ft ²]	11,1	6,0
Peso aproximado, [lb]	18600	12000
Solvente a 25% LII, [gph]	36	36
Custo equipamento, (valores relativos)	\$18400	\$19000

Fonte: KHAN e GHOSHAL (2000)

A fábrica da 3M de Saint Paul (EUA) tem um incinerador catalítico de leito fluidizado⁶ no controle de COV emitidos por sua unidade de adesivos. O equipamento consegue ter uma eficiência de remoção da ordem de 95%, num fluxo gasoso de 0,55 m³.min⁻¹ a 360 °C, que passa pelo catalisador (em forma granular) em fluxo ascendente. O equipamento da 3M consta de um catalisador de cromo-alumínio adequado à oxidação de hidrocarbonetos e compostos halogenados.

O projeto do incinerador de leito fluidizado é similar aos demais incineradores catalíticos, excetuando-se o fato de que, naquele, o fluxo do gás tem sentido ascendente ao longo do leito catalítico (USEPA, 1995).

Combustão catalítica : Usada quando a concentração do fluxo gasoso está abaixo do limite de inflamabilidade, grandes volumes de ar frio. Necessidade de menores temperaturas.

- catalizadores: platina e ligas de platina
- temperatura: 340 - 540 °C
- eficiência > 98°C
- Aplicações:
 - indústrias de tintas e vernizes
 - remoção de odores
 - refinarias
 - Processamento de óleos animais e vegetais

- **Uso da combustão catalítica nos veículos automotores:** No automóvel, o catalisador, também conhecido por conversor catalítico, age sobre os gases poluentes promovendo reações químicas entre eles que os transformam em produtos inofensivos à saúde. Os produtos da combustão no motor são:

⁶ Incinerador fabricado pela ARI dos EUA.

- Nitrogênio
- Gás Carbônico
- Água
- Poluentes (aproximadamente 1% do volume)
 - CO + HC + NO_x + Outros

Com o O₂ extraído dos NO_x, o catalisador queima o CO e os HC, produzindo N₂, CO₂ e H₂O, que não se constituem como substâncias tóxicas - Figura 7. 57.

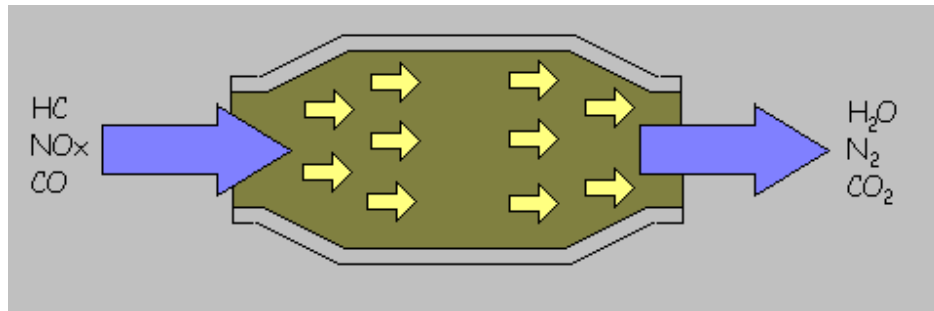


Figura 7. 57 - Combustão catalítica nos veículos automotores.

c) Flares: Flares são equipamentos que estão localizados no ponto de emissão dos poluentes e que promovem a queima destes em espaço aberto. Este tipo de equipamento é utilizado quando os poluentes combustíveis estão em concentrações próximas ou acima do limite inferior de inflamabilidade. - Figura 7. 58.



Figura 7. 58 – Flares. Fonte: home.earthlink.net/~jim.seebold/id1.html

Dois são os tipos de “flares”, os elevados, localizados na chaminé de saída dos poluentes, e os ao nível do solo. Os flares elevados são os mais comumente utilizados e devem ser preferidos devido a melhor condição para dispersão dos poluentes.

Basicamente, o “flare” elevado consiste de um comprimento adicional de chaminé que tem na sua saída um queimador de gases, uma chama piloto, um sistema de ignição e, em alguns casos, um anel de pré-aquecimento e um sistema de injeção de vapor. O anel de pré-aquecimento é utilizado quando o gás está abaixo do limite inferior de inflamabilidade. A injeção de vapor é utilizada para eliminar a fumaça preta, um dos principais problemas no funcionamento de flares. A injeção de vapor melhora a turbulência e faz com que o ar atinja a região de combustão. Também, o vapor d'água reage com os hidrocarbonetos formando compostos oxigenados que queimam a temperaturas mais baixas (CETESB, 1990^B).

Os flares são utilizados principalmente pelas refinarias de petróleo e outras indústrias petroquímicas. Algumas indústrias que lidam com compostos combustíveis tóxicos ou perigosos, podem utilizar este equipamento como dispositivo de segurança quando estes compostos tem que ser lançados na atmosfera devido a condições anormais (CETESB, 1990^B).

Sistemas de recuperação de calor: Devido ao custo elevado de combustível, os sistemas de recuperação de calor nos incineradores podem ser responsáveis por grande parte do seu aquecimento, reduzindo assim o consumo de energia e, portanto, de combustível. Os equipamentos de recuperação de calor são classificados de acordo com seu método de transferência de calor, que pode se dar de forma direta ou indireta. Equipamentos de transferência indireta podem ainda ser recuperativos ou regenerativos.

7.6.4 PROCESSOS BIOLÓGICOS DE TRATAMENTO DE GASES E VAPORES

Segundo Belli *et al* (2001), a biodesodorização de gases (princípio biológico de tratamento) reproduz os processos realizados naturalmente nos solos e na água. Os processos biológicos de tratamento de gases consistem na transferência de compostos voláteis, mal odorantes, para uma fase líquida e, em seguida, na degradação destes compostos por meio de microorganismos (ação bacteriana). Aplica-se este processo em produtos biodegradáveis e relativamente solúveis em solução aquosa. Assim, poluentes biodegradáveis presentes na corrente gasosa passam através de um suporte bacteriano onde são degradados em seus produtos finais (ALONSO *et al*, 1998).

O princípio do tratamento biológico data da década de 20, sendo a primeira patente em 1941. A primeira realização em escala industrial data de 1953. Logo depois, a biodesodorização teve um grande desenvolvimento devido às preocupações quanto aos crescentes problemas de poluição e seus incômodos (FANLO, 1994).

Devido a sua origem biogênica, compostos odorantes podem ser considerados biodegradáveis. A biodegradação é efeito do metabolismo microbiano. A biodegradabilidade de um composto depende das funções químicas que o constituem. O Quadro 7. 23 apresenta uma classificação das principais famílias químicas, de acordo com a sua cinética de biodegradação.

Quadro 7. 23 – Velocidade de biodegradabilidade de compostos voláteis.

Velocidade de biodegradação	Compostos e famílias
Alta	Álcoois, aldeídos, cetonas, ésteres, éteres, ácidos orgânicos, aminas, mercaptanas, H ₂ S, NO _x , SO ₂ , HCl, NH ₃ , PH ₃ , SiH ₄ , HF
Baixa	Hidrocarbonetos, fenóis, cloreto de metila
Muito baixa	HC halogenados, HC poliaromáticos, CS ₂

Fonte: BELLI *et al* (2001)

Compostos tratados biologicamente são primariamente orgânicos voláteis, compostos sulfurados e nitrogenados reduzidos. Teoricamente, químicos altamente voláteis apresentarão baixas cinéticas de degradação. Contudo, compostos alifáticos altamente voláteis como hexano e pentano podem eficientemente ser removidos via biotratamento. Uma lista não-exaustiva de compostos que podem ser eliminados da corrente gasosa pelo biotratamento compreende: amônia, monóxido de carbono, gás sulfídrico, acetona, benzeno, butanol, dietilamina, dimetil-dissulfato, etanol, hexano, etilbenzeno, acetato, indol, escatol, metanol, metil-etil-cetona, estireno, isopropanol, metano, metil mercaptana, óxido e dióxido de nitrogênio, pentano, dimetil sulfato, tiofeno, tolueno, tricloroetano, tetracloroetano, 2-etil-hexanol, xileno, etc. (SWANSON e LOEHR, 1997).

A biodesodorização de gás mal odorante implica no contato da biomassa e do substrato a ser tratado. Os tratamentos biológicos dos compostos gasosos são realizados através de microorganismos e enzimas para oxidar a matéria orgânica, parcialmente ou totalmente até a produção de água e gás carbono. A biodegradação exige a presença de matéria Carbonácea, oxigênio, derivados de nitrogênio, enxofre e de fósforo. Os compostos para degradar são, geralmente, pouco concentrados e são moderadamente hidrossolúveis-e-adsorvidos (KOWAL, 1993).

O princípio que conduz a utilização dos microorganismos ao limite do sistema de tratamento baseia-se nas propriedades e potencialidades dos microorganismos a degradarem os compostos presentes no gás, que serão orgânicos ou não. No caso do tratamento biológico do gás, a degradação biológica permite a transformação dos compostos (orgânicos ou minerais) odorantes e tóxicos; em compostos inodoros e atóxicos. Os microorganismos (a maioria bactérias, mofos, leveduras ou algas

microscópicas) utilizam os compostos orgânicos como fonte de carbono para sua biossíntese, e como fonte de energia para a degradação do substrato. (LE CLOIREC et al, 1991)

A biomassa de depuração é fixada sobre o suporte ou dispersa na água sob a forma de flóculos. O suporte pode ser constituído de material orgânico natural (turfa, composto orgânico, poliestireno, lodo desidratado das ETE) ou inorgânico (pozolona, argila, zeolita) (MARTIN e LAFFORT, 1991).

Características de um reator biológico:

No processo de biotratamento, alguns parâmetros importantes devem ser levados em consideração, tais como disponibilidade de oxigênio, umidade, acidez do meio, etc.:

a) Umidade: o conteúdo de umidade do biofiltro é um dos principais parâmetros de operação deste reator. A faixa de umidade pode variar de acordo com o meio suporte: quando solo é utilizado, um percentual de 10 a 25% é indicado e, quando turfa, 40%. Esta umidade pode ser mantida tanto pela aspersão (acima do suporte) como pela umidade da corrente gasosa que entra no sistema. É importante ressaltar que excesso de umidade no meio pode provocar, por exemplo, zonas anaeróbias no meio, promovendo a formação de odores e baixas taxas de degradação. Por outro lado, carência de umidade pode causar desativação dos microorganismos.

b) Microorganismos: Os materiais filtrantes (de origem orgânica) são normalmente ricos em microorganismos. Entretanto, a adição de uma sementeira como um inóculo adaptado aos compostos a serem degradados é aconselhado para diminuir o tempo de seleção e adaptação da biomassa ao ambiente. Para correntes gasosas contendo contaminantes inorgânicos, os microorganismos mais indicados são os quimioautótrofos, que usam CO_2 como fonte de carbono. Gás sulfídrico (H_2S) é geralmente oxidado por *Thiobacillus*, em condições ácidas de pH (próximo de 2). Contudo, a maioria dos *Thiobacillus* são organismos autotróficos e, contudo, não usam COV como fonte de carbono para crescimento. Por outro lado, COV são degradados por organismos heterotróficos, em condições de pH neutras.

c) Temperatura: É bastante conveniente (para a biomassa) operar o biofiltro com temperaturas numa gama de 25 a 35 °C.

d) pH: Para a maioria dos processos biológicos aeróbios, uma faixa de potencial hidrogeniônico adequada é de 7 a 8. Mesmo que os produtos degradados alterem a acidez do meio (correntes gasosas contendo H_2S , NH_3 e orgânicos clorados, por exemplo, levam à formação de H_2SO_4 , HNO_3 e HCl , respectivamente, elevando o pH do meio), ações corretivas devem ser tomadas para que o reator opere sempre próximo a uma faixa neutra de pH.

e) Concentração: Os biofiltros têm facilidade para degradar compostos em baixas concentrações, mesmo que diluídos em grandes volumes de ar. Para o caso dos COV, por exemplo, fixa-se a concentração de 1 g/m³ de ar como concentração limitante.

f) Tempo de residência do gás: O tempo de residência dos gases dentro do biofiltro é dependente do material suporte. Em geral, torna-se necessário que os compostos contidos na corrente gasosa sejam identificados e quantificados. Apesar de variável, o tempo de residência mínimo é de 30 s (BELLI et

al, 2001; BURGESS, SIMON e STUETZ, 2001; CHUNG *et al*, 1998; COX e DESHUSSES, 2002; SWANSON e LOEHR, 1997).

Tipos de Reatores Biológicos:

Existem basicamente 3 tipos de equipamentos para biotratamento. Eles se diferem segundo as características móveis ou estáticas da fase e da biomassa (células livres ou imobilizadas sobre o suporte) no interior do reator biológico:

- biofiltração;
- lavagem biológica (biolavação) e,
- leitos bacterianos (biopercolação).

a) Biofiltração: A forma mais comum de tratamento biológico é através da biofiltração. O processo simplificado de biofiltração pode ser visualizado na Figura 7. 59. Neste caso, a corrente gasosa (contaminada) é succionada (geralmente por um ventilador centrífugo) onde é jogada na parte inferior do reator biológico (convecção forçada), geralmente através de tubos perfurados; antes de atingir o biofiltro porém, este ar é pré-umidificado. A altura do meio suporte deve ser de no máximo 1 m (alturas superiores a esta poderão provocar compactação do meio). A corrente gasosa atravessa então o meio suporte (contendo a biomassa) em fluxo ascendente; o meio é constantemente umedecido com aspersão de água, afim de manter as condições de umidade necessárias à degradação biológica (um sistema de drenagem também é necessário). Controles de outros parâmetros como pH, temperatura, etc. podem ocorrer concomitantemente.

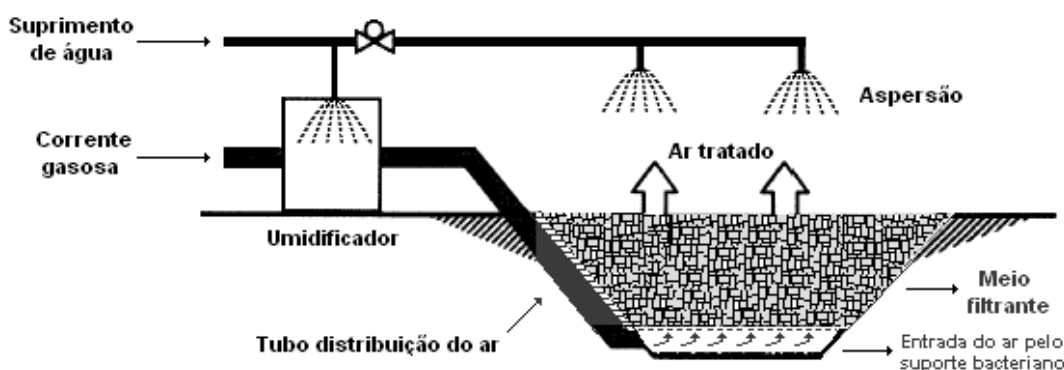


Figura 7. 59 – Esquema simplificado do processo de biofiltração.

Fonte: COX e DEHUSSES (2002)

Geralmente, o processo da biofiltração (Figura 7. 60) consiste em fazer passar os efluentes gasosos a serem tratados através de um suporte sólido de origem natural, povoado de microorganismos, no meio do qual os compostos mal odorantes são absorvidos e servem de substrato ao crescimento de uma microflora especializada (TURGEON *et al*, 1997).

Os biofiltros podem ser constituídos de material orgânico seminatural (turfa, composto orgânico, polystirenos, lodo desidratado de estações de tratamento de efluentes) ou inorgânico (pozolana, argila, zeolita) (MARTIN e LAFFORT, 1991). O meio filtrante deve ser úmido (50 - 80%) e possuir condições de funcionar como suporte bacteriano.

Um biofiltro consiste de um recipiente de material orgânico, povoado de microorganismos, através dos quais os gases odoríferos são passados, geralmente através de um fluxo descendente -

Figura 7. 61. O efluente gasoso pode ser pré-umidificado, mantendo a mistura adequada no leito orgânico. Alternativamente ou, além disso, a água pode ser borrifada em cima da superfície do leito. Esta água pode conter nutriente necessário ao crescimento dos microorganismos (MCNEVIM & BARFORD, 2000).

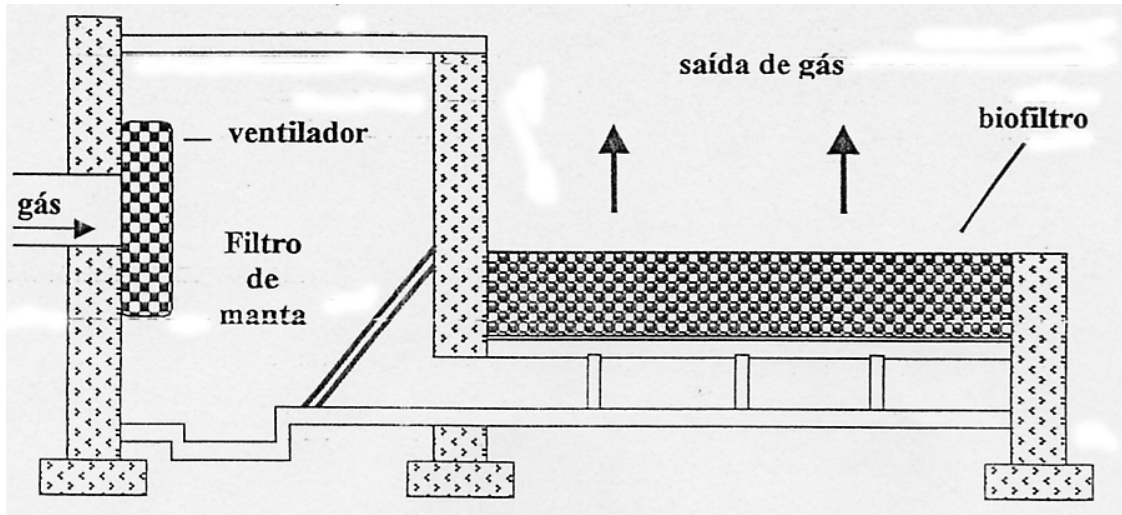


Figura 7. 60 – Biofiltração.

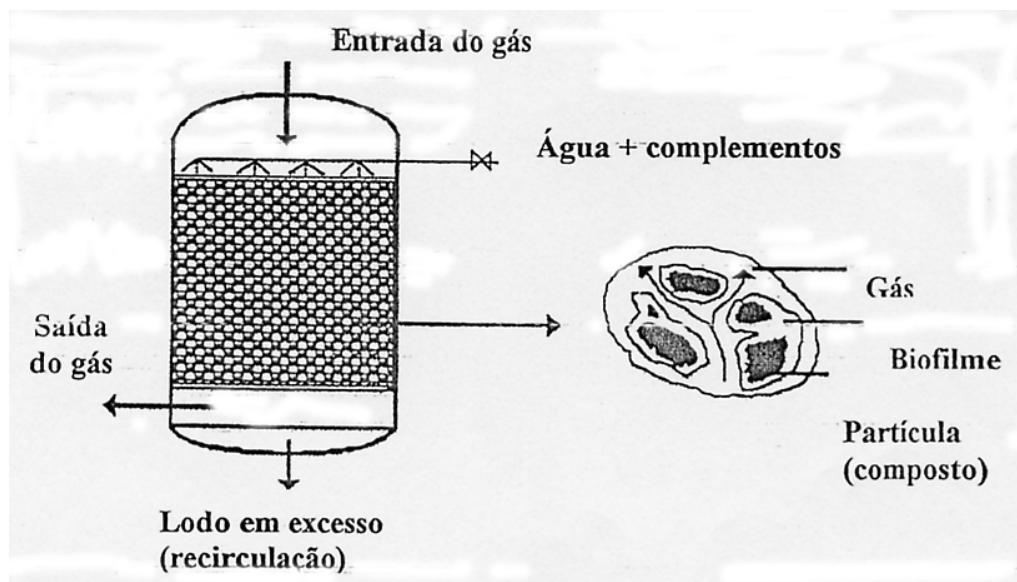


Figura 7. 61 - Um biofiltro consiste de um recipiente de material orgânico, povoado de microorganismos, através dos quais os gases são passados, geralmente através de um fluxo descendente.

Os contaminantes odoríferos são transferidos do meio gasoso para o meio aquoso, onde uma bio-camada (biofilme) cerca as partículas orgânicas no leito. Os contaminantes são, então, aerobicamente degradados em vários produtos finais ou incorporados na biomassa. O produto final dependerá da natureza dos contaminantes. A biofiltração aumenta o processo natural de biorremediação, onde os contaminantes na atmosfera são degradados pelos microorganismos nos solos, após uma difusão nos poros dos solos. Um biofiltro bem projetado provê um contato melhorado entre as partículas orgânicas e o ar contendo os contaminantes. A distinção entre a cobertura orgânica e o filme aquoso é ainda obscuro, porém, eles são freqüentemente e coletivamente chamados de biofilme.

A eliminação do poluente gasoso em um biofiltro é resultado de uma combinação complexa de diferentes processos físico-químicos e biológicos. Os princípios que governam a biofiltração são similares aos processos comuns em biofilmes. Basicamente, três passos ocorrem no leito do biofiltro. A Figura 7. 62 mostra o processo ocorrendo dentro e ao redor do biofilme e apresenta os perfis de concentração representativos para substrato (composto odorante/COV) e oxigênio. Primeiramente, o contaminante na fase gasosa atravessa a interface entre o fluxo gasoso e o biofilme aquoso que circunda o meio sólido. Assim, o contaminante difunde-se através do biofilme atingindo o meio aclimatado com microorganismos aí ocorrendo conversão dos contaminantes em produtos finais como CO₂, H₂O, sais inorgânicos e biomassa. A mesma corrente gasosa que atinge o biofilme (antes de ser descartada) absorve o CO₂, outro composto volátil e produtos (se gerados) e calor emitido das reações bioquímicas ocorridas no leito.

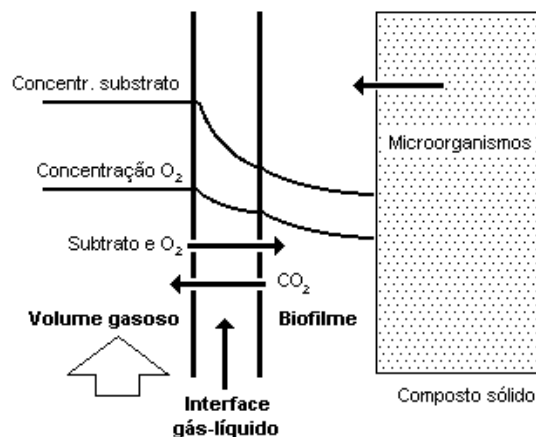


Figura 7. 62 – Mecanismo de ação do tratamento biológico

Fonte: SWANSON e LOEHR (1997)

No biofilme, difusão, biodegradação e (ad/ab)sorção do poluente ocorrem como resultado do crescimento dos microrganismos e interação do contaminante com o suporte. O papel do leito bacteriano é dar suporte aos microrganismos, servindo ainda como adsorvente (dos poluentes e nutrientes em sua superfície) e absorvente (pelo acúmulo de água também em sua superfície).

O primeiro biofiltro foi instalado na Genebra-Villete em 1964 com a finalidade de tratar os gases de usina de compostagem. O material filtrante utilizado foi o solo, seguindo o modelo utilizado em um experimento nos Estados Unidos na remoção de H₂S e mercaptanas (FISCHER e BARDTKE, 1984).

Em 1966 uma usina de compostagem em Duisburg usou o composto como material filtrante pela primeira vez. A utilização do biofiltro no setor agrícola teve um ótimo desenvolvimento,

principalmente, nos setores de armazenagem, indústrias agroalimentares e as indústrias de tabaco.

b) Lavador biológico: A lavagem biológica do gás é análoga ao princípio de lavagem química. Independente das variantes operacionais os dois processos utilizam os mesmos parâmetros clássicos: solubilidade, coeficiente de partição, temperatura, pH, tempo de contato, etc. A lavagem do gás seguida de uma biodepuração conduz ao processo dito de biolavagem. Neste processo, os gases são extraídos com água que os transporta aos microorganismos, adaptados ao meio líquido (LE CLOIREC et al, 1991). A lavagem biológica apresenta duas etapas distintas (FANLO, 1994):

- Uma etapa de absorção, geralmente realizada em uma coluna de transferência de gás-líquido;
- Uma etapa de recuperação dos compostos absorvidos e solúveis na água que serão degradados através da oxidação biológica ao nível do tanque de ativação gerando a biomassa e/ou produtos de oxidação biológica.

Um exemplo de lavagem biológica é apresentado na Figura 7. 63.

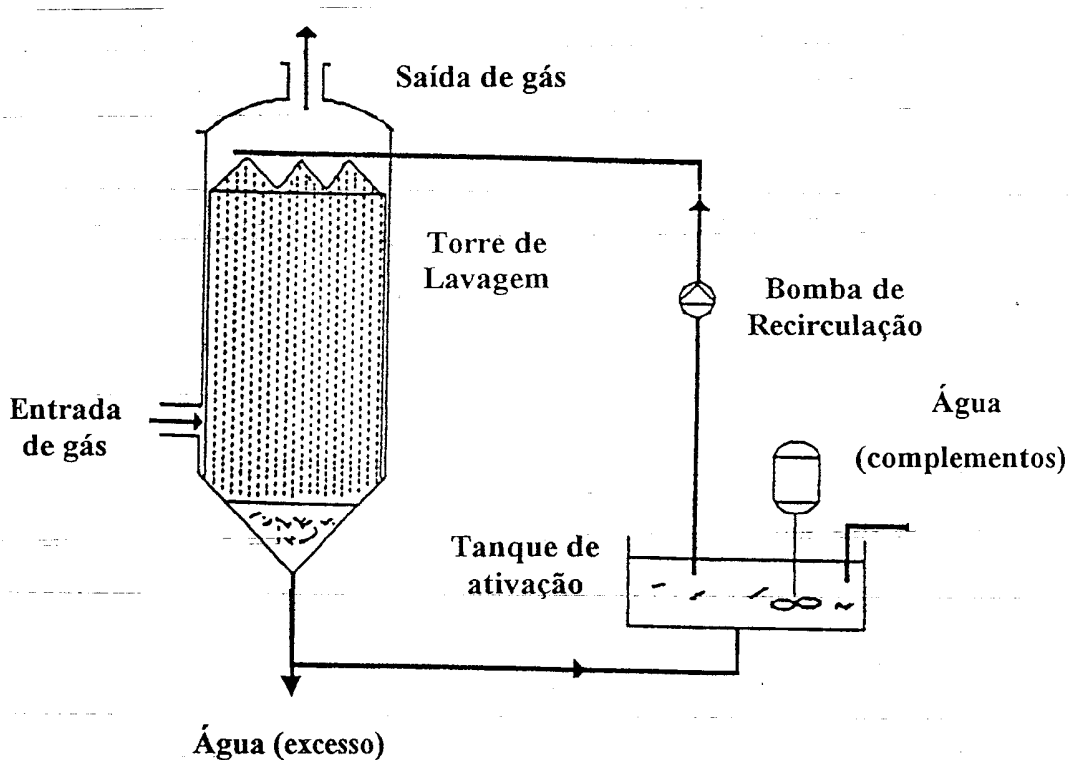


Figura 7. 63 - Lavador biológico.

Os biolavadores são constituídos de três elementos: uma coluna de transferência gás-líquido ou absorvente, um tanque de lodos ativados (fermentador ou recuperador) na qual se produz a degradação biológica dos poluentes solubilizados em meio mais ou menos ventilado e, um decantador que permite a separação da biomassa e do líquido recirculado (MIGAUD, 1996).

A eficiência do lavador biológico é limitada, quando a solubilidade na água, dos constituintes do ar a serem absorvidos, diminui. Uma solução consiste em adicionar na mistura água/lodo ativado, um solvente orgânico ou mineral (óleos siliconados e hidrocarbonetos superiores), permitindo melhorar a

transferência de massa gás-líquido graças à capacidade de absorção dos poluentes superiores a essa fase aquosa (KOWAL, 1993).

Os lavadores biológicos são pouco utilizados a nível industrial embora apresentem vantagens como baixas perdas de carga, capacidade de absorção às flutuações de vazão ou a concentração dos compostos hidrossolúveis e a facilidade do controle dos parâmetros tais quais o pH e a densidade celular.

c) Biopercolador: O biopercolador (ou leito bacteriano) se distingue do biofiltro pela circulação contínua de uma fase líquida, a favor ou contracorrente, no meio suporte bacteriano. Geralmente o líquido é recirculado ao reator após passar por uma etapa de redução de concentração.

O leito bacteriano (ou filtro percolador) utilizado no tratamento de águas ou gases (Figura 7. 64) consiste em utilizar a propriedade de inúmeros microorganismos a serem adsorvidos, fixos sobre os elementos de preenchimento (anéis de Raschig) ou sobre os suportes estruturados (placas onduladas) - constituídas de materiais inertes (vidros, plásticos, cerâmicos). Após a sementeira, o biofilme se desenvolve na superfície do suporte no decorrer do funcionamento do leito, podendo formar vários milímetros de densidade.

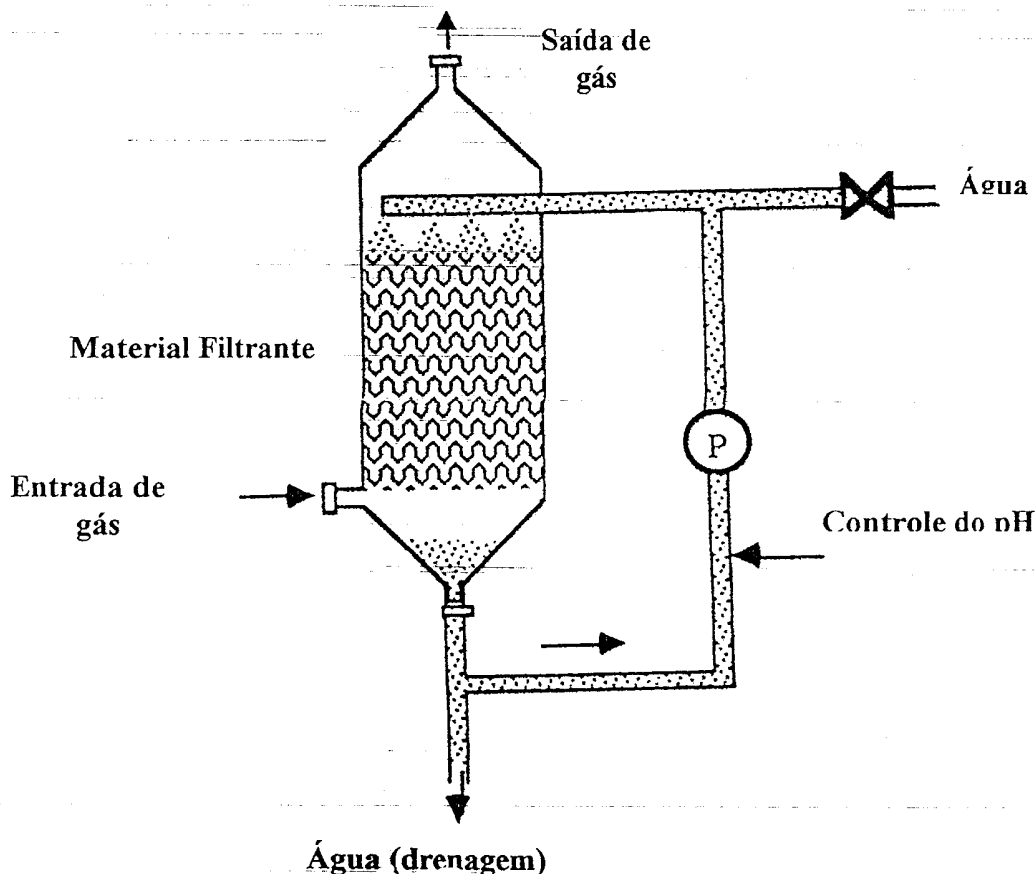


Figura 7. 64 - Esquema de um Leito Bacteriano.

A escolha do material suporte é influenciada pelas preocupações em otimizar a depuração, reduzir a manutenção e o consumo energético. A escolha está em função da natureza, estrutura, tempo

de vida, porosidade, área específica, estabilidade química e capacidade de reter água. (MIGAUD,1996).

No material suporte é semeada a cepa dos microorganismos especificados. As partículas dos materiais são, neste caso, revestidas de uma colcha biológica úmida de vários micrômetros de densidade, dito "biofilme" (MIGAUD, 1996)

Entretanto, o crescimento do biofilme ocorre de acordo com a natureza da microfauna e das moléculas a serem tratadas, correndo-se o risco de colmatagem. Esse risco é contornado através de uma simples decantação da biomassa, que é em parte arrastada pela fase líquida na recirculação, regulando o pH e a temperatura para o aquecimento se necessário (KOWAL,1993).

O leito bacteriano tem como vantagem oferecer uma grande facilidade no controle do pH, temperatura e na eliminação contínua dos produtos de neutralização que podem inibir a formação do biofilme (FANLO,1994). Alguns parâmetros de funcionamento:

- vazão do líquido: maior que $20 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$;
- vazão de descarte do líquido: em função de sua saturação;
- nutrientes e pH: relação C/N/P da ordem de 100/5/1 e pH próximo de neutro.

São raras as aplicações industriais do leito bacteriano no tratamento dos efluentes gasosos. Entretanto, os estudos em escala piloto já realizados ou que ainda estão em andamento, mostram resultados interessantes quanto às aplicações (LE CLOIREC, 1998).

7.6.5 CONDENSAÇÃO PARA TRATAMENTO DE GASES E VAPORES

Condensação é um método de redução de um gás/vapor ao estado líquido. Quando uma corrente gasosa quente contata uma superfície resfriada do condensador, o calor é transferido deste gás/vapor para a superfície fria. Com a redução da temperatura da corrente, reduz-se também a energia cinética das moléculas do gás e, conseqüentemente, o volume que estas partículas ocupam. A redução na velocidade das partículas facilita o choque entre elas (pela proximidade das mesmas) propiciando desta forma a condensação dos compostos a serem tratados. As condições para que a condensação ocorra são:

- baixas temperaturas, para propiciar a redução da energia cinética das moléculas;
- altas pressões, afim de propiciar a aproximação entre as moléculas (caso particular para os gases).

É claro que as condições a que um gás/vapor vai condensar vai depender em muito do seu estado (propriedades físicas e químicas) em questão. A condensação pode ocorrer de 3 formas: primeiro, a uma dada temperatura, a pressão do sistema é aumentada (compressão do volume do gás) até que a pressão parcial do poluente na corrente gasosa iguale à sua pressão de vapor; segundo, a uma dada pressão (fixa), o gás/vapor é resfriado até que a pressão parcial do gás/vapor iguale à sua pressão de vapor; terceiro, pela combinação da relação compressão/resfriamento do gás/vapor até que sua pressão parcial iguale à sua pressão de vapor.

No caso de um condensador, a temperatura é a única variável ajustável, e portanto a que governa o processo de condensação. Em aplicações industriais, o aumento da pressão é um processo muito caro e portanto, raramente utilizado para condensar um gás (MME, 1997; SCHIRMER e DE MELO LISBOA, 2004). No caso dos orgânicos voláteis, a condensação é mais eficiente para compostos com pontos de ebulição acima de $38 \text{ }^\circ\text{C}$ e concentrações superiores a 5000 ppm. Baixos pontos de ebulição

requerem resfriamento extensivo, o que acaba encarecendo o processo. Os percentuais de eficiência na recuperação dos gases vão de 70 a 85% (KHAN e GHOSHAL, 2000).

A condensação é considerada quando o efluente contém substâncias de material condensável, tal como água ou outros vapores. É considerada, normalmente, como Método de Pré-Tratamento.

Condensadores

Os condensadores, geralmente associados a outro equipamento de controle, têm sido utilizados na redução de orgânicos emitidos em indústrias petroquímicas, refino de petróleo, asfalto, indústria farmacêutica, etc. Este equipamento trabalha melhor em correntes que têm elevadas concentrações de COV condensáveis (ENGLEMAN, 2000). As limitações que de certa forma restringem a aplicação comercial dos condensadores são: elevados pontos de ebulição dos COV, altos custos operacionais, quase sempre a operação dá-se sob condições críticas de temperatura e pressão, altas concentrações de gases, etc.

Equipamentos:

- Condensador Tubular Superficial;
- Condensador Tubular de ar frio - Figura 7. 65;
- Condensador de contato direto.

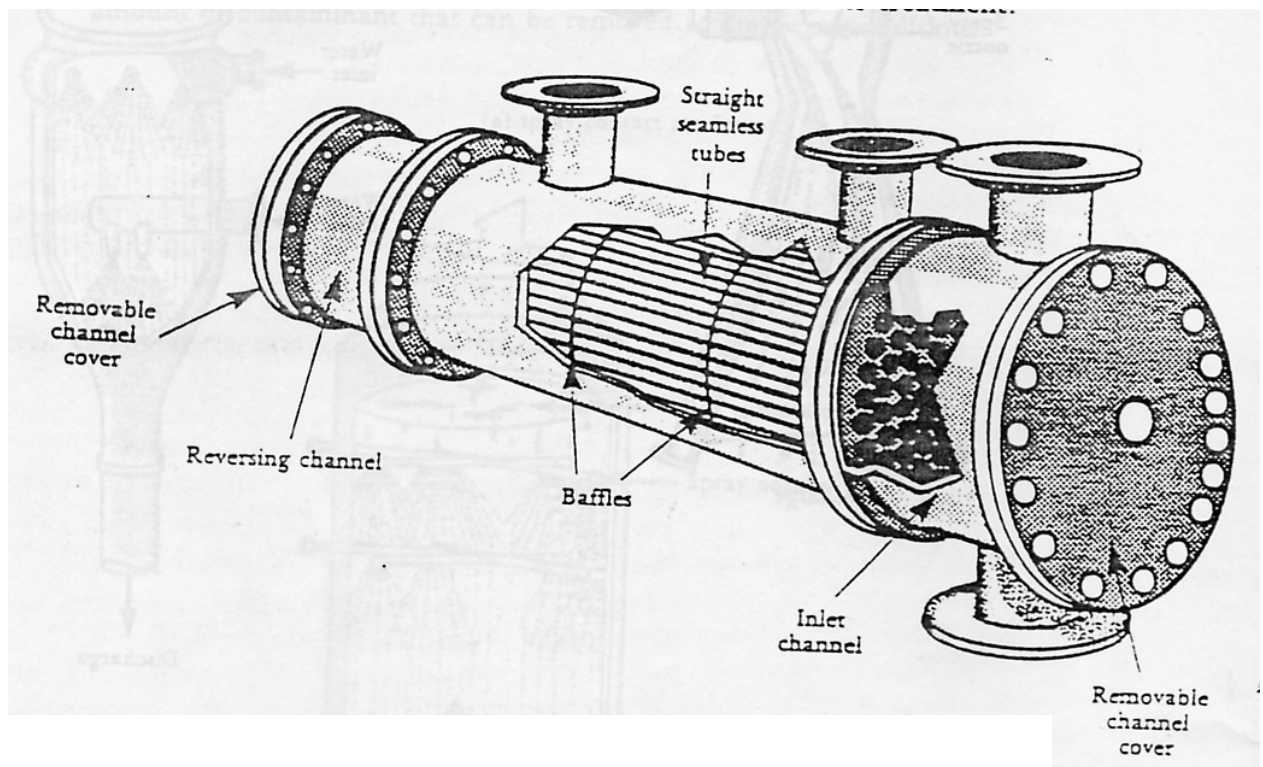


Figura 7. 65 - Condensador Tubular de ar frio.

7.7 FATORES A SEREM VERIFICADOS NA SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR

Um dos principais problemas referentes ao tratamento/controle de poluentes atmosféricos está relacionado à escolha de um equipamento (ou combinação de equipamentos) que consiga remover estes poluentes com a maior eficiência possível (pelo menos reduzi-los a níveis aceitáveis) a um menor custo. Na verdade não existe uma única tecnologia para tal, até porque um caso difere do outro pelas características do processo em questão (fonte emissora, natureza do contaminante, legislação, etc.). Assim, alguns parâmetros principais devem ser observados na escolha de um método específico para o tratamento de poluentes atmosféricos:

- características do gás a ser tratado (temperatura, matéria em suspensão, umidade, volatilidade, vazão, etc.);
- concentração dos poluentes;
- fatores de segurança (explosividade, reatividade, corrosividade, etc.);
- custos de investimento/instalação, funcionamento e manutenção;
- eficiência na remoção destes poluentes, etc.

Cada uma das tecnologias vistas detêm características peculiares para o tratamento de poluentes atmosféricos. O Quadro 7. 24 apresenta algumas das principais vantagens e desvantagens de cada método, no caso de COV. O tratamento mais adequado ao processo é escolhido em função das potencialidades e limitações de cada um (LE CLOIREC, 1998; STUETZ e FRENCHEN, 2001).

Quadro 7. 24 – Principais vantagens e desvantagens dos métodos de tratamento de COV

Técnica	Vantagens	Desvantagens
Oxidação térmica	Possibilidade de recuperação de energia (até 85%); ótimo p/ misturas complexas; baixo custo (p/ correntes pouco concentradas).	Exige trat. secundário p/ eliminar resíduos de combustão.
Oxidação catalítica	Possibilidade de recuperação de energia (até 85%); disponibilidade de tecnologia (larga utilização em refinarias); menor custo operacional que a oxidação térmica; baixo custo (poluente pouco diluído na corrente).	Exige trat. secundário p/ eliminar resíduos de combustão; risco de envenenamento catalítico; disponibilidade de catalisador no mercado.
Biofiltração	Baixo investimento inicial; trata altas vazões com baixas concentrações; não transfere a poluição (oxida biologicamente); baixo custo do processo.	Elevadas dimensões.
Condensação	Recuperação de solventes pode compensar custos de operação	Só para COV com alto P.E.; altos custos operacionais; altas concentrações; opera em condições críticas de P e T.
Absorção	Instalação compacta; baixos custos de manutenção; construção simples; capacidade de coletar partículas submicrônicas.	Requer elevada manutenção; pode requerer remoção mat. particulado; alto consumo de energia; alto consumo de água.
Adsorção (s/ CA)	Recuperação de solventes pode compensar custos de operação; remove baixas concentrações de COV; não necessita combustível auxiliar; trata solventes clorados.	Não trata o gás, só coleta; requer remoção de mat. particulado do leito; suscetível à umidade.

Fonte: ENGLEMAN (2000)

O custo é um parâmetro dos mais importantes no momento do projeto e seleção de um método de tratamento. Cada tecnologia possui parâmetros próprios a serem levados em consideração na questão custo. Os custos de um tratamento biológico, por exemplo, são calculados com base na vazão de ar tratado. Uma estimativa do investimento para os três tipos de biorreatores revela que, a biofiltração, em se tratando de biotratamento, é o método de abatimento de gases mais barato. Além disso, os custos para cada equipamento podem variar numa ampla faixa de valores, dependendo de cada caso específico, vazão a ser tratada, condições do equipamento, etc. (STUETZ e FRENCHEN, 2001). Entretanto, o custo destes equipamentos pode variar em função da concentração dos poluentes contidos no efluente gasoso a ser tratado. O Quadro 7. 25 sumariza o custo para investimento e funcionamento das tecnologias para tratamento de COV e odores.

Quadro 7. 25 – Processos de tratamento de gases, custos de investimento e funcionamento.

Processo	Investimento [U\$/(m³.h⁻¹)]	Funcionamento (U\$/10³m³)
Incineração térmica	5,27 a 6,15	0,61 a 0,75
Incineração catalítica	6,15 a 7,03	0,57 a 0,66
Biofiltração	1,32 a 4,40	0,13 a 0,22
Condensação	5,32 a 6,53	0,31 a 0,48
Absorção	3,52 a 4,40	0,35 a 0,44
Adsorção	2,20 a 8,79	0,22 a 0,44

Fonte: BELLI *et al* (2001)

Assunção (1986) sugere os seguintes passos no processo decisório de escolha de um método ou equipamento de controle de poluentes atmosféricos:

I - CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA :

1. CARACTERIZAÇÃO DA FONTE EMISSORA

⇒ Tipo de poluente emitido :

- Quantidade emitida
- Balanço material
- Fatores de emissão
- Amostragem em chaminés

OBS: - ver “Compilation of air pollutant: emission factors of US Environmental Protection Agency” - fatores de emissão - material didático auxiliar - - ver pág. 11 e 12 – Anexo Ref.C – curso CETESB, 1986.

⇒ Características do fluxo gasoso :

- | | |
|--------------------------|-------------------------------------|
| ■ Composição do gás | ■ Pressão |
| ■ Vazão a ser tratada | ■ Umidade do gás e ponto de orvalho |
| ■ Variabilidade do fluxo | ■ Viscosidade |
| ■ Temperatura | ■ Corrosividade |

■ Explosividade

■ Reatividade

⇒ Características dos poluentes:

■ Concentração

■ Granulometria (partículas)

ver: Particulate pollutant system study - vol. III - Handbook of emission properties - A E. Vandergriff et alli, PB - 203522 - Biblioteca da CETESB.

⇒ Características físicas e químicas

■ Composição

■ Densidade

■ Forma (partículas)

■ Combustibilidade

■ Abrasividade

■ Corrosividade

■ Propriedades elétricas

■ Higroscopicidade

■ Solubilidade

■ Capacidade de aglomeração (partículas)

■ Reatividade

⇒ Condição de lançamento na Atmosfera

■ Altura da chaminé

■ Localização da chaminé

2. CARACTERÍSTICAS DA INDÚSTRIA

⇒ Condições meteorológicas da região

⇒ Localização em relação à áreas residenciais, parques, áreas verdes em geral, outras indústrias mais sensíveis à poluição

⇒ Disponibilidade de insumos (água, energia elétrica, combustíveis);

⇒ Espaço disponível

⇒ Disposição de resíduos

⇒ Necessidade de recuperação de calor

3. POSSÍVEIS EFEITOS DOS POLUENTES

⇒ Danos à saúde

⇒ Danos à vegetação

⇒ Danos à materiais

⇒ Odor

⇒ Natureza das reclamações

4. GRAU DE CONTROLE REQUERIDO

⇒ Exigências legais

- Padrão de emissão
- Padrão de qualidade do ar
- Padrão de condicionamento e projeto
- Eficiência requerida
- Exigência da comunidade
- Condições previsíveis para o futuro
- Exigências legais para os resíduos

II - POSSÍVEIS SOLUÇÕES

⇒ Métodos indiretos

- Impedir a geração do poluente
- Diminuir a quantidade gerada
- Diluição através de chaminé alta
- Adequada localização da fonte

⇒ Métodos diretos

- Ciclones
- Multiciclones
- Lavadores
- Lavador venturi
- Filtro de tecido (filtro manga)
- Precipitadores eletrostáticos
- Absorvedores
- Adsorvedores
- Incineradores de gases
- Condensadores
- Outros

⇒ Combinação de dois ou mais métodos

⇒ Características de cada alternativa;

- Aplicabilidade ao caso
- Eficiência
- Espaço requerido
- Consumo de água
- Consumo de energia
- Controles requeridos
- Simplicidade ou complexidade de construção e operação
- Necessidades de manutenção
- Flexibilidade do sistema
- Aspectos de segurança
- Vida média
- Temperatura máxima de operação
- Limitação de umidade
- Materiais de construção
- Equipamentos auxiliares (ex. trocador de calor, etc)
- Disponibilidade no mercado (equipamentos e peças)
- Assistência técnica
- Sistema de exaustão

III - ASPECTOS ECONÔMICOS DE CADA ALTERNATIVA

⇒ Custo do equipamento;

⇒ Custo de implantação;

- Projeto
- Materiais auxiliares
- Construção civil
- Movimentação de terra

- Estrutura necessária
- Custo de instalação e montagem
- Tratamento de resíduos
- Impostos e outras taxas
- Seguros

⇒ Custo de operação

⇒ Custo de manutenção

⇒ Custo anualizado

7.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, C; SUIDAN, M. T.; KIM, B. R.; KIM, B. J. - **Dynamic mathematical model for the biodegradation of VOC's in a biofilter: biomass accumulation study**. Environmental Science Technology, v.32, n.20, p.3118-3123, 1998

ASSUNÇÃO, J. V. – **Apostila do curso de seleção de equipamentos de controle da poluição do ar (material didático auxiliar)**. CETESB, SP, 1986.

ASSUNÇÃO, J. V. – **Apostila do curso de seleção de equipamentos de controle da poluição do ar (vol. B)**. . CAP.5 - Técnicas de controle direto da poluição do ar.CETESB, 1987.

BELLI Fº, P.; COSTA, R. H. R.; GONÇALVES, R. F.; CORAUCCI Fº, B.; DE MELO LISBOA, H. - **Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios**. Prosab 1ª edição. Belo Horizonte (MG): Rede Cooperativa de Pesquisas, 2001. Cap. 08, p.455-490.

BURGESS, J. E.; SIMON, A. P.; STUETZ, R. M. - **Developments in odour control and waste gas treatment biotechnology: a review**. Biotechnology Advances, v.19, p.35-63, 2001.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - **Apostila do curso de seleção de equipamentos de controle da poluição do ar**. São Paulo, 1987. 45p.

CETESB - **Apostila do curso de Tecnologia de Controle de Poluição por Material Particulado**. São Paulo, 1990.

CETESB - **Tecnologia de controle de emissão de vapores orgânicos e inorgânicos**. Apostila, 1990^B.

CIOLA, R. - **Fundamentos da catalise**. 1ª ed. São Paulo: Ed. USP: Moderna, 1981. 377p.

COULSON, J. M.; RICHARDSON, J. F. - **Tecnologia química**. 4ª ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2004.

DE NEVERS, Noel - **Air Pollution Control Engineering**. New York: Mc Graw Hill, 1995. 506 p.

ENGLEMAN, V. S. - **Updates on choices of appropriate technology for control of VOC emissions**. Metal Finishing, v.98, n.06, p.433-445, 2000.

HESKET, H. E., CROSS, F. L. **Odor control including hazardous/Toxic odours**. Lancaster: Technomic Publishing, 1989.

KHAN, F. I.; GHOSHAL, A. K. - **Removal of volatile organic compounds from polluted air**. Journal of loss prevention in the process industries, v. 13: p. 527-545, set. 2000.

LE COIREC, P. - **Les composés organiques volatils dans l'environnement**. Nantes: Ecole de Mines de Nantes, 1998. 734p.

MACINTYRE, A. J. – **Ventilação industrial e controle da poluição**. Ed. Guanabara, Rio de Janeiro, 404 p., 1990

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA (MME). Eletrobrás. **Tecnologias de Controle de Poluição Ambiental Aérea**. Brasil: Ministério de Minas e Energia, módulo 2-B, mai/1997, 161p.

OBERZINER, A. L. B.; SOARES, J. L.; MOREIRA, R. F. P. M. - **Estudo da adsorção de CO₂ em carvão mineral catarinense**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 6º, 2005, Campinas (SP), Anais... Campinas: COBEQ/IC, 2005. 1 CD-Rom.

RODRIGUES, A. E.; DIAS, M. M. - **Processos de adsorção em leito fixo: fundamentos (Capítulo 1). Em pauta: Adsorbentes em la solución de algunos problemas ambientales**. Madrid (Espanha); Ed. CYTED, pp.01-13, 2004.

RUTHVEN, D. M. - **Principles of adsorption and adsorption process**. New York: John Wiley & Sons, 1984. 976p.

SEINFELD. J. H. **Contaminacion atmosferica: Fundamentos Físicos y Químicos**. Mcgraw-Hill, Madrid- Espanha,1995.

SCHIRMER, W. N. - **Tratamento de COV e odores em refinarias de petróleo**. Florianópolis (SC), 2002.

SCHIRMER, W. N. - **Amostragem, análise e proposta de tratamento de compostos orgânicos voláteis (COV) e odorantes em estação de despejos industriais de refinaria de petróleo**. 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

SCHIRMER, W. N.; DE MELO LISBOA, H. - **Uma revisão dos principais métodos de tratamento de compostos orgânicos voláteis e odorantes**. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE QUALIDADE DO AR, 3º, 2003, Canoas (RS), Anais... Canoas: ABES, 2003. 1 CD-Rom.

STUETZ, R.; FRENCHEN, F. B. - **Odours in Wastewater Treatment**. Cornwall (UK): IWA Publishing, 2001. 437p.

SWANSON, W. J.; LOERH, R. C. - **Biofiltration: fundamentals, design and operations principles, and applications**. Journal of Environmental Engineering, v.123, n.06, p.538-546, jun.1997.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA)- **Air pollution control technology fact sheet**. 2002a (EPA-454/R-93-048). Disponível em: <http://www.epa.gov/ttn/catc/products.html> Acessado em: 06 abr. 2005.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) - **Survey of control technologies for low concentration organic vapors gas streams**. 1995 (EPA-456/R-95-003).

YOUNG, R. A. e CROSS, F. L. - **Specifying Air Pollution Control Equipment**. Marcel Dekker Inc.; New York (USA); 1982. 281p.

AGRADECIMENTOS

Este capítulo foi possível graças ao apoio do CNPQ na forma de bolsa pós-doutoral do autor principal.