CETESB

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL
DIRETORIA DE DESENVOLVIMENTO E TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA
SETOR DE TREINAMENTO

TECNOLOGIAS E SELEÇÃO DE SISTEMAS DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR: MATERIAL PARTICULADO, GASES, VAPORES E ODORES

SÃO PAULO
2001

COORDENAÇÃO TÉCNICA

Engº Carlos Eduardo Komatsu
Dr. João Vicente de Assunção

DOCENTES

Dr. João Vicente de Assunção

SUMÁRIO

Parte 1

POLUIÇÃO DO AR - ALGUNS CONCEITOS

João Vicente de Assunção

Folha em branco

POLUIÇÃO DO AR - ALGUNS CONCEITOS

João Vicente de Assunção

1. POLUENTE ATMOSFÉRICO

Poluente atmosférico é toda e qualquer forma de matéria sólida, líquida ou gasosa e de energia que, presente na atmosfera, pode torná-la poluída. Os poluentes atmosféricos em forma de matéria podem ser classificados inicialmente em função do estado físico, em dois grupos: **material particulado; gases e vapores**.

De acordo com a sua origem, os poluentes em forma de matéria podem ser classificados em **poluentes primários**, emitidos já na forma de poluentes, e **poluentes secundários**, que são formados na atmosfera por reações químicas ou mesmo fotoquímicas como é o caso da formação de ozônio no *smog* fotoquímico. Esses poluentes podem também ser classificados, segundo a classe química, em **orgânicos e inorgânicos**.

Material Particulado - As partículas sólidas ou líquidas emitidas por fontes de poluição do ar ou mesmo aquelas formadas na atmosfera, como as partículas de sulfatos, são denominadas de material particulado e, quando suspensas no ar, são denominadas de aerossóis. As partículas de maior interesse para a saúde pública são as chamadas partículas inaláveis, ou seja, com diâmetro aerodinâmico equivalente (diâmetro que incorpora a densidade da partícula pela comparação com a velocidade de queda de uma partícula de densidade 1 g/cm^3) menor que 10 micrômetros (1 micrômetro é igual a um milionésimo do metro). O material particulado pode ser classificado, segundo método de formação, em **POEIRAS** (poeira de cimento, poeira de amianto, poeira de algodão, poeira de rua), **FUMOS** (fumos de chumbo, fumos de alumínio, fumos de zinco, fumos de cloreto de amônia), **FUMAÇA** - partículas da combustão de combustíveis fósseis, materiais asfálticos ou madeira, contém fuligem, partículas líquidas e, no caso de madeira e carvão, uma fração mineral (cinzas); **NÉVOAS** - Partículas líquidas.

Gases e vapores - são poluentes na forma molecular, quer como gases permanentes, como por exemplo, o dióxido de enxofre, o monóxido de carbono, o ozônio, os óxidos nitrosos, quer como aqueles na forma gasosa transitória de vapor, como os vapores orgânicos em geral (vapores da gasolina, vapores de solventes etc.).

Classificação Complementar - Independentemente do estado físico, tem importância sub-classificações como as substâncias causadoras de **odores incômodos** (gás sulfídrico, mercaptanas, solventes orgânicos, etc.), e os **poluentes altamente tóxicos** (dioxinas, furanos, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos - HPAs, metais em geral, metais pesados, etc.)

Dioxinas e Furanos - As dibenzo-p-dioxinas policloradas [*PCDDs - polychlorinated-p-dibenzodioxins*] e os dibenzofuranos policlorados [*PCDFs - polychlorinated-p-dibenzofurans*] comumente chamadas de dioxinas e furanos são duas classes de compostos aromáticos tricíclicos, de função éter, com estrutura quase planar e que possuem propriedades físicas e químicas semelhantes. Os átomos de cloro se ligam aos anéis benzênicos possibilitando a formação de um grande número de congêneres: 75 para as dioxinas e 135 para os furanos , totalizando 210 compostos. Os isômeros com substituições de cloro na posição 2,3,7 e 8 são de interesse especial devido a sua toxicidade, estabilidade e persistência. As PCDDs e os PCDFs 2,3,7,8-substituídos são encontrados em quase todo o meio ambiente.

Pesquisas têm mostrado que estes compostos não ocorrem naturalmente, são frutos principalmente da era industrial, em especial no Século XX, formados como subproduto não intencional de vários processos envolvendo o cloro ou substâncias e/ou materiais que o contenham, como a produção de diversos produtos químicos, em especial os pesticidas, branqueamento de papel e celulose, incêndios, processos de combustão (incineração de resíduos de serviços de saúde, incineração de lixo urbano, incineração de resíduos industriais, veículos automotores), etc.

Na faixa de temperatura de 250 °C a 400 °C ocorre a maior formação de dioxinas (PCDDs e PCDFs), na combustão de resíduos químicos, como PCBs (Bifenilas policloradas). Isso ressalta a necessidade de que a passagem das emissões de incineradores passem de forma muito rápida nessa "janela", evitando formação ou reformação de PCDDs e PCDFs.

Das 210 dioxinas e furanos existentes, 17 compostos com substituições na posições 2,3,7 e 8 destacam-se sob o ponto de vista toxicológico. A toxicidade aguda mais elevada é para a 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-dioxina (2,3,7,8-TCDD) que é ultrapassada somente por algumas outras toxinas de origem natural.

Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos – HPAs: são compostos formados por dois ou mais anéis aromáticos condensados, contendo somente átomos de carbono e hidrogênio e que podem estar arranjados em linha reta, angular ou na forma de *cluster*. Quanto contém átomos de outros elementos, como nitrogênio, oxigênio e enxofre, passam então a serem denominados de compostos policíclicos aromáticos. Sua formação se dá principalmente por combustão incompleta ou pirólise de matéria orgânica. Dos muitos HPAs que podem existir, dezessete deles são considerados prioritários pela USEPA, por causa do seu potencial tóxico, vários dos quais tem sido reconhecidos como carcinogênicos. Os dezessete mais importantes são: acenafteno, acenaftileno, antraceno, fenantreno, benzo[a]antraceno, benzo[a]pireno, benzo[e]pireno, benzo[b]fluoranteno, benzo[k]fluoranteno, benzo[ghi]perileno, criseno, dibenzo[a,h]antraceno, fluoranteno, fluoreno, indeno[1,2,3-cd]pireno, pireno, e naftaleno.

2 . NÍVEIS DE REFERÊNCIA

2.1. Padrões de Qualidade do Ar

A poluição do ar ocorre quando a alteração da composição da atmosfera resulta em danos reais ou potenciais. Dentro deste conceito, pressupõe-se a existência de níveis de referência para diferenciar a atmosfera poluída da atmosfera não poluída. O nível de referência sob o aspecto legal é denominado Padrão de Qualidade do Ar.

No Brasil, os Padrões de Qualidade do Ar vigentes foram estabelecidos pela resolução CONAMA no. 3 de 28/6/1990 e são os atualmente válidos para todo o território nacional. Os poluentes considerados nessa resolução foram: partículas totais em suspensão (PTS); dióxido de enxofre (SO_2); monóxido de carbono (CO); ozônio (O_3); fumaça; partículas inaláveis e dióxido de nitrogênio (NO_2). Foram estabelecidos Padrões Primários, destinados à proteção da saúde pública e Padrões Secundários, para proteção do meio ambiente em geral e do bem-estar da população.

Tabela 1 -Padrões Nacionais de Qualidade do Ar

(Resolução CONAMA 03 de 28.6.90).

Poluente	Tempo de exposição	Padrão Primário ($\mu g/m^3$)*	Padrão Secundário ($\mu g/m^3$)*
Partículas Totais em Suspensão (PTS)	24 horas anual	240 80	150 60
Partículas Inaláveis (PI, PM10 ou MP10)	24 horas anual	150 50	150 50
Fumaça	24 horas anual	150 60	100 40
Dióxido de Enxofre (SO_2)	24 horas annual	365 80	100 40
Monóxido de Carbono (CO)	1 hora 8 horas	40.000 10.0000	40.000 10.000
Ozônio (O_3)	1 hora	160	160
Dióxido de Nitrogênio (NO_2)	1 hora anual	320 100	190 100

* $\mu g/m^3$ significa micrograma do poluente por metro cúbico de ar.

2.2. Padrão de Emissão

Padrão de Emissão é um limite estabelecido legalmente e que deve ser respeitado para a emissão na fonte. Estes podem estar expressos em concentração (ex.: mg/Nm^3 base seca a 12% de oxigênio),

em taxa de emissão (ex.: kg/hora) ou em função de um parâmetro da fonte (ex.: kg/tonelada incinerada).

Os padrões de emissão em geral são fixados a nível estadual. Um exemplo de padrões de emissão para incineração está mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Exemplo de Padrões de Emissão para Incineradores de Resíduos de Serviços de Saúde (mg/Nm^3 base seca, corrigida a 7% de O_2)

Poluente	Capacidade do incinerador (kg/dia)		
	< 200	200 a 1500	> 1500
Material Particulado	120	70	50
óxidos de enxofre – SOx (medido como SO_2)	250	250	250
Óxidos de nitrogênio – NOx (como NO_2)	400	400	400
Acido clorídrico	100 e 1,8 kg/hora	100 e 1,8 kg/hora	70
Acido fluorídrico	5	5	5
Inorgânicos classe I (Cádmio, Mercúrio e Tálio)[a]	0,28	0,28	0,28
Inorgânicos classe II (As, Co, Ni, Se e Te)[a]	1,4	1,4	1,4
Inorgânicos classe III (Sb, Pb, Cr, CN^-, F^-, Mn, Pt, Pd, Rh, V e Sn)[a]	7	7	7
Dioxinas e furanos[b]	-	0,14[c]	0,14[c]
Monóxido de carbono	125	125	125

[a] somatório das emissões dos elementos ou compostos relacionados na classe.
[b] concentração expressa em 2,3,7,8 TCDD, corrigida pelo fator de equivalência de toxicidade
[c] ng/Nm^3 base seca, corrigida a 7% de O_2 (ng = nanograma = 10^{-9} gramas = 10^{-6} mg)
Fonte: CETESB, 1997

2.3. Padrão de Condicionamento e Projeto

Representa exigência legal em relação à fonte, que limitam seu uso ao atendimento de determinados parâmetros de projeto, ou exigências, como temperatura de incineração, tipo de combustível, localização da fonte, etc. Um exemplo prático destes padrões é o da legislação de São Paulo (artigo 38 do decreto 8468/76) que exige o uso de pós-queima das emissões de incineradores hospitalares, obedecida a temperatura mínima de 850 °C, bem como tempo de residência mínimo de 0,8

segundos na câmara de pós-queima, ou outro sistema de tratamento de eficiência igual ou superior, bem como o uso de combustível gasoso em função da localização do incinerador.

2.4. Fator de Emissão

Os Fatores de Emissão expressam a emissão em função de um parâmetro da fonte, como por exemplo, kg/t de combustível, kg/t de produto. A Agência de Proteção Ambiental dos EUA (USEPA) tem uma publicação específica de fatores de emissão tanto para fontes estacionárias como para fontes móveis (*Compilation of Air Polluttant Emission Factors* – AP 42), sendo que essa publicação tem sido aceita pelos órgãos ambientais para previsão da emissão de determinadas fontes, na ausência de dados nacionais confiáveis. Os fatores de emissão em geral representam valores médios de emissão para a fonte de poluição do ar específica. Ela é muito útil, por exemplo, no inventário de emissões de determinada região. A Tabela 3 mostra os fatores de emissão para queima de óleo em caldeiras.

3. MÉTODOS DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR

Historicamente tem-se utilizado o termo "controle de poluição" para todas as ações que eliminam ou reduzem a geração de poluentes e para aquelas de tratamento das emissões. Dentro deste enfoque as medidas de controle da poluição do ar envolvem desde o planejamento do assentamento de núcleos urbanos e industriais e do sistema viário, até a ação direta sobre a fonte de emissão. As medidas usualmente utilizadas para controlar este tipo de poluição são:

3.1. Medidas para impedir a geração do poluente

Em muitos casos os poluentes podem ser eliminados totalmente através da substituição de combustíveis, matérias-primas e reagentes que entram no processo, mudança de equipamentos e de processos. A substituição de combustíveis com enxofre por combustíveis sem enxofre elimina a formação e a emissão de compostos de enxofre à atmosfera. O gás natural é praticamente isento de enxofre e pode substituir os óleos combustíveis que contêm teores altos de enxofre.

3.2. Medidas para reduzir a geração de poluentes

A diminuição da quantidade de poluentes gerada pode ser conseguida pelas seguintes medidas:

- Uso de equipamentos dentro da sua capacidade nominal;
- Boa operação e manutenção adequada de equipamentos produtivos;
- armazenamento adequado de materiais pulverulentos e/ou fragmentados, evitando a ação dos ventos sobre o mesmo;
- adequada limpeza do ambiente, em especial aqueles onde há possibilidade de ação de microorganismos e conseqüente geração de odor, como é o caso de diversos tipos resíduos urbanos;
- utilização de processos, equipamentos e operações de menor potencial poluidor. utilização de

combustíveis de menor potencial poluidor.

- Ruas pavimentadas e limpas reduzem a emissão de poeira para a atmosfera, o que pode ser reduzido ainda mais pela umectação; evitar deixar áreas com solo sem vegetação, mantendo-as pelo menos gramadas, o que contribui inclusive para reduzir a erosão e o assoreamento.

As medidas acima necessitam, sem dúvida, de adequado esclarecimento dos responsáveis pelas fontes poluidoras, sendo que a participação da população é de fundamental importância no processo. A educação ambiental da população e dos empresários é de grande importância para que a ação de controle funcione. Não adianta ter boas leis se a população não estiver engajada no processo e se os meios empresariais não estiverem motivados para esta ação.

3.3. Tratamento das Emissões

Após esgotados todos os esforços com as medidas anteriormente mencionadas, sem que tenha sido conseguida a redução necessária na geração de poluentes, deve-se então utilizar os equipamentos para tratamento das emissões (equipamentos de controle de poluentes – "filtros").

Pode também resultar que a escolha recaia na implantação nesses equipamentos porque são mais econômicos ou mais disponíveis ou mais viáveis para casos específicos.

Sempre em conjunto com o equipamento de controle de poluição industrial existe um sistema de exaustão (captores, dutos, ventilador e chaminé), cuja função é captar, concentrar e conduzir os poluentes para serem "filtrados", com posterior lançamento do residual no ar.

Os equipamentos de controle de poluição do ar são divididos em função do estado físico de poluente a ser considerado, ou seja, **Equipamentos de Controle de Material Particulado** e **Equipamentos de Controle de Gases e Vapores**.

O material particulado pode ser removido do fluxo gasoso poluído por sistemas secos (coletores mecânicos inerciais e gravitacionais; coletores centrífugos, como os ciclones; precipitadores eletrostáticos secos e filtros de tecido, como, por exemplo, os filtros tipo mangas) e por sistemas úmidos (lavadores dos mais variados tipos e precipitadores eletrostáticos úmidos).

Os gases e vapores podem ser removidos do fluxo poluído através de absorvedores (lavadores de gases), de adsorvedores (carvão ativado), ou por incineração térmica ou catalítica, como os combustores catalíticos dos automóveis, por condensadores, biofiltros e por processos especiais.

Para cada fonte de poluição deve ser estudada a melhor solução, tanto do ponto de vista de custo, como do ponto de vista ambiental. A tecnologia de controle de poluição do ar disponível permite que a poluição seja reduzida muitas vezes em mais de 99%.

3.4. Planejamento urbano

Este método consiste basicamente numa melhor distribuição espacial das fontes potencialmente

poluidoras do ar, aumentando a distância fonte-receptor, diminuindo a concentração de atividades poluidoras próximas a núcleos residenciais, melhorando o sistema viário, proibindo a implantação de fontes de alto potencial poluidor em regiões críticas, localizando as fontes preferencialmente à jusante dos ventos predominantes na região, em relação a assentamentos residenciais, e controle da circulação de veículos em áreas congestionadas.

3.5. Diluição através de chaminés altas

A utilização de chaminés altas visa a redução da concentração do poluente ao nível do solo, sem a redução da quantidade emitida. Trata-se, portanto, de medida cuja eficácia fica dependente da distribuição espacial das fontes e das condições meteorológicas e topográficas da região. É uma técnica recomendável como medida adicional para melhoria das condições de dispersão dos poluentes residuais na atmosfera, mas somente após a tomada de outras medidas para reduzir a geração de poluentes ou a sua emissão.

Bibliografia:

Assunção, JV de. Poluição do ar. In: Castellano, E.G e Chaudhry, FH. (eds.). **Desenvolvimento Sustentado: Problemas e Estratégias**. São Carlos: EESC-USP, 2000 pp 139-168.

Assunção JV de; Pesquero, RC. Dioxinas e furanos: origens e riscos. **Rev. de Saúde Pública 33**(5), 1999; 523-30.

[IPCS] International Programme on Chemical Safety. **Polychlorinated dibenzo-para-dioxins and dibenzofurans**. Geneva: WHO, 1989.

[USEPA] United States Environmental Protection Agency. **Compilation of air pollutant emission factors, AP-42**. Research Triangle Park: USEPA , 1998.

Tabela 3

FATORES DE EMISSÃO (kg/m^3)[a] PARA QUEIMA DE ÓLEO COMBUSTÍVEL

TIPO DE EQUIPAMENTO	MATERIAL PARTICULADO (MP)	DIÓXIDO DE ENXÔFRE (SO_2)	TRIÓXIDO DE ENXOFRE (SO_3)	MONÓXIDO DE CARBONO (CO)[c]	ÓXIDOS DE NITROGÊNIO (NO_X)[d]	ORGÂNICOS VOLÁTEIS NÃO-METÂNICOS (e)	METANO (e)	GÁS CARBÔNICO (CO_2)
CALDEIRAS DE TERMELÉTRICAS $>106x10^9$ J/h	1,25xS + 0,38 (b)	19xS (b)	0,34xS (b)	0,6	5,0 a 12,6 (f)	0,09	0,03	2964
CALDEIRAS INDUSTRIAIS $> 10,6x10^9$ a $106x10^9$ J/h (óleo pesado)	1,25xS + 0,38	19xS	0,24xS	0,6	6,6	0,034	0,12	2964

NOTAS:

a) grau de confiabilidade = A;

b) S = % em peso de enxôfre no óleo;

c) pode aumentar por um fator 10 a 100 para equipamento operado e mantido inadequadamente;

d) valores expressos em NO_2. Do total, 75% a 95% em peso corresponde a NO. Parte do NO_X é devido ao N do óleo e o restante é pelas condições de combustão (NO_X térmico). Para óleo residual com mais de 0,5% de N em peso, use fator de 15 kg NOx/m^3;

e) essas emissões podem aumentar muito para equipamento operado e mantido inadequadamente;

f) use 5 para queima tangencial, 12,6 para queima vertical e 8,0 para os demais, considerando 15% de excesso de ar e plena carga.

Fonte: U.S.EPA. Compilation of Air Pollutants Emission Factors. Washington, USEPA. Publicação AP-42.

Parte 2

EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE POLUIÇÃO DO AR

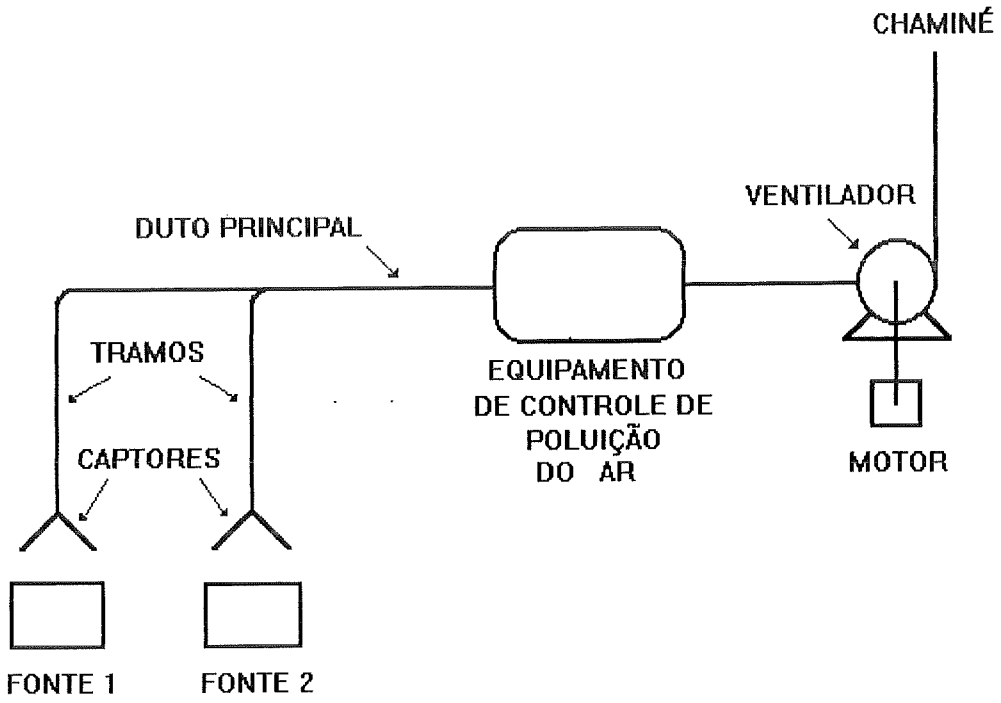
João Vicente de Assunção

SISTEMA DE EXAUSTÃO

Exerce papel importante na captação e transporte do poluentes até o equipamento de controle de poluição do ar e o lançamento das emissões residuais na atmosfera.

É constituído de captores, dutos, moto-ventilador e chaminé.

Parâmetros importantes: tipo de captor, velocidade de captura do poluente na fonte, velocidade de transporte dos poluentes no duto e velocidade dos gases na chaminé



Componentes de um sistema de controle de poluição do ar.

CLASSIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE POLUIÇÃO DO AR

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

A) EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE MATERIAL PARTICULADO:

. Coletores secos

- coletores mecânicos inerciais e gravitacionais
- coletores centrífugos (ex. ciclones)
- precipitadores (filtros) eletrostáticos secos
- filtros de tecido (ex: filtro de mangas)

. Coletores úmidos

- lavadores com pré-atomização (ex.: lavador tipo spray)
- lavador com atomização pelo gás (ex.: lavador-venturi, lavador de orifício)
- lavador do leito móvel
- lavadores com enchimento
- precipitadores eletrostáticos úmidos
- precipitadores dinâmicos úmidos

B) EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE GASES E VAPORES:

- condensadores
- absorvedores
- adsorvedores
- incineradores térmicos ou de chama direta
- incineradores catalíticos
- biofiltros
- processos especiais

DIÂMETRO DE PARTÍCULA

- **Diâmetro Área Projetada (d_{ap}):**

É o diâmetro de um círculo de área igual ao perfil da área projetada da partícula.

- **Diâmetro de Stokes (d_s):**

É o diâmetro de uma esfera que tem a mesma velocidade terminal de sedimentação e a mesma densidade da partícula em estudo e corrigida para o fator de escorregamento de Cunningham.

- **Diâmetro Aerodinâmico Equivalente (d_{ae}):**

É o diâmetro de uma esfera de densidade unitária (ρ_p = 1 g/cm^3), que tem a mesma velocidade terminal de sedimentação da partícula em estudo, corrigida pelo fator de escorregamento de Cunningham (Ch).

- Conversão de Diâmetro de Stokes para Diâmetro Aerodinâmico Equivalente:

$$d_{ae} = d_s \cdot \sqrt{\rho_p . Ch}$$

Para condições de pressão próxima da normal Ch pode ser expresso por:

$$Ch = 1 + \frac{6{,}21\text{x}10^{-4}\, xT\,(K)}{d_p(\mu m)},$$

Fatores de Forma

As partículas em geral não são esféricas. Assim, são utilizados o fator de forma de área (α_s) e fator de volume (α_v), que permitem determinar a área superficial e o volume da partícula, através do seu diâmetro médio.

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

- Os aerossóis seguem geralmente uma distribuição log-normal.

- Os dois parâmetros que definem a distribuição são a média geométrica (dg) e o desvio-padrão geométrico (σ_g).

- trabalho de obtenção desses parâmetros pode ser facilitado se a freqüência acumulada dos diâmetros for plotada no papel log-probabilidade, onde são representados graficamente a porcentagem de partículas menores que um determinado diâmetro e a correspondente porcentagem acumulada de partículas, geralmente em número ou em massa.

- diâmetro médio geométrico (d_g) é o valor correspondente a 50% da frequência acumulada e o desvio-padrão é determinado por:

$$\sigma_g = (d_{84,13}) / (d_g) \quad \text{ou} \quad \sigma_g = (d_g) / (d_{15,87})$$

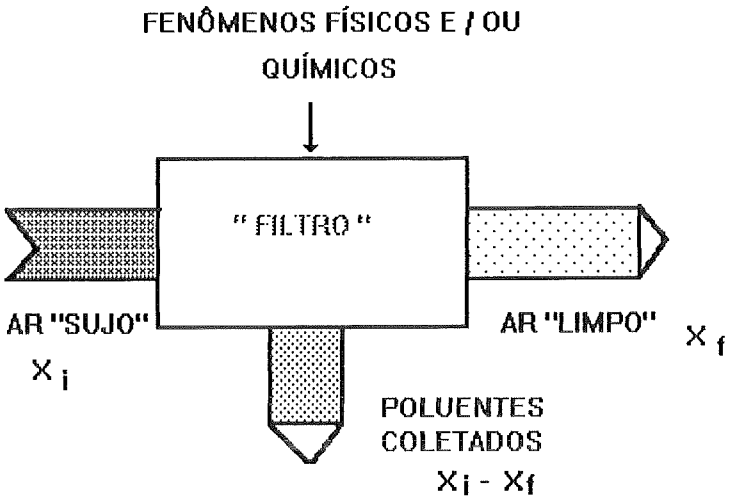
$d_{84,13}$ =diâmetro correspondente a 84.13%,
$d_{15,87}$ = diâmetro correspondente a 15,87%,

- Uma distribuição em número (contagem de partículas) pode ser convertida em distribuição em massa das partículas pela seguinte fórmula:

$$\ln d_g \text{ (em massa)} = \ln d_g \text{ (em número)} + 3 \ln^2 \sigma_g$$

CONCEITO DE EFICIÊNCIA DE COLETA

A eficiência de controle de um equipamento de controle de poluição do ar indica a quantidade de poluentes que o equipamento remover (coleta) ou tem condições de remover (coletar). O esquema a seguir mostra o processo de coleta de poluentes.



Esquema do Processo de Coleta do Poluente

Matematicamente e eficiência de controle pode ser expressa por:

$$\eta = \frac{X_i - X_f}{X_i} \times 100$$

η = eficiência de controle (%)
X_i = quantidade de poluentes existentes na entrada do ECP
X_f = quantidade de poluentes existentes no fluxo gasoso após o ECP
$X_i - X_f$ = quantidade de poluentes coletados pelo ECP

A penetração (P) é definida como a quantidade de poluentes que passa através do equipamento de controle sem ser coletada (residual). Matematicamente, a penetração é expressa por:

$$P = 1 - \eta \text{ (base 1)}$$
$$\text{ou } P = 100 - \eta \text{ (base 100)}$$

EFICIÊNCIA EM SÉRIE E EFICIÊNCIA TOTAL

Na prática existem muitos casos de utilização de equipamentos de controle em série, para o mesmo poluente, como por exemplo um ciclone seguido de um lavador para coleta de material particulado. Nesse caso a Eficiência Global (η_g)de Coleta é expressa por:

$$\eta_g = [1 - (1-\eta_1).(1-\eta_2)(1-\eta_i)] \times 100$$

onde:

η_g = eficiência global (%)

η_1 = eficiência de controle do equipamento 1 (base 1)

η_2 = eficiência de controle do equipamento 2 (base 2)

η_i = eficiência de controle do iézimo equipamento (base 1)

Conhecendo-se a distribuição granulométrica das partículas e a eficiência fracionada, pode-se calcular a eficiência global de coleta por:

$$\boxed{\eta_t = \sum_{1=1}^{n} m_i . \eta_i}$$

Nesta fórmula m_i é a fração em massa de partículas de tamanho i, que representa uma faixa de tamanho de partículas e η_i a eficiência de coleta para partículas de tamanho i, usualmente representada pela eficiência do diâmetro médio da faixa considerada.

EFICIÊNCIA FRACIONADA

É a eficiência do equipamento numa determinada faixa de tamanho de partículas.

Exemplo de eficiência fracionada (em porcentagem)

Tipo de Equipamento	FAIXAS DE DIÂMETROS (μm)				
	0 - 5	5 -10	10 - 20	20 - 44	> 44
Câmara de sedimentação	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
Lavadores de média energia	80,0	90,0	98,0	100,0	100,0
Lavadores Venturi (lavador de alta energia)	95,0	99,5	100,0	100,0	100,0
Filtro de tecido (Filtro de Mangas)	99,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Precipitador eletrostático	97,0	99,0	99,5	100,0	100,0

NOTA - Valores somente para fins comparativos. Valores reais dependem do projeto e de condições de operação e de manutenção do equipamento.

MECANISMOS DE COLETA DE PARTÍCULAS

- sedimentação gravitacional
- força centrífuga
- impactação inercial
- intercepção
- difusão
- força elétrica

Sedimentação Gravitacional

Expressa em termos de velocidade terminal da partícula, dada por:

$$\boxed{u_t = \frac{d^2 . g . (\rho_p - \rho_g) . Ch}{18 . \mu_g}}$$

onde:

u_t = velocidade terminal da partícula; d = diâmetro da partícula;
g = constante gravitacional; ρ_p = densidade da partícula;
ρ_g = densidade do gás carreador; μ_g = viscosidade do gás carreador
Ch = fator de correção de Cunningham

A sedimentação gravitacional é um mecanismo de deposição importante somente para partículas grandes (maiores que 30 μ**m**).

FORÇA CENTRÍFUGA

A força centrífuga (F_c) age sobre partículas que estejam em movimento numa trajetória circular, fazendo, com que a partícula se afaste do centro do circulo e no caso de ciclones, se dirigir as paredes do mesmo. Matematicamente a força centrífuga é expressa por:

$$F_c = \frac{m_p . v_t^2}{R}$$

sendo m_p a massa da partícula, v_t a sua velocidade tangencial e R o raio da curva. A coleta por força centrífuga na prática é limitada a fonte de poluição do ar que emitem quantidades razoáveis de partículas maiores que 5 a 10 μm. Em geral os coletores centrífugos (ciclones) são utilizados como pré-coletores.

Impactação Inercial

A impactação representa a "batida" da partícula contra um obstáculo fazendo com que a partícula que estava em movimento diminua a sua energia e se separe do fluxo gasoso. É um mecanismo importante para partículas de diâmetros maiores que 0,5 μm

O controle de partículas por impactação é geralmente conseguido através de pequenos obstáculos secos (fibra do tecido por exemplo) ou úmidos (gotas). O Parâmetro de Impactação (K_I), que indica a eficiência de coleta por este mecanismo, é dado por:

$$K_I = \frac{Ch.d_p^2 . \rho_p . v_p}{18.\mu_g . D_c}$$

onde v_p é a velocidade da partícula em relação ao obstáculo (coletor) e Dc o diâmetro ou tamanho do coletor.

INTERCEPÇÃO

A intercepção é um mecanismo de coleta que pode ser considerado como um caso limite da impactação pois representa o mecanismo de coleta para as partículas que ao atingir o coletor (obstáculo) estejam a uma distância igual ao seu diâmetro ou seja, aquelas partículas que tangenciam o coletor.

Quanto maior a relação diâmetro da partícula, diâmetro do coletor maior será o efeito da intercepção. O Parâmetro de Intercepção ($K_{int.}$) é dado por:

$$K_{\text{int}} = \frac{d_p}{D_c}$$

Difusão

Mecanismo de coleta que apresenta importância para partículas de diâmetros menores que 1 **μm**. as partículas menores em função da sua energia térmica estão em constante movimento similarmente ao que ocorre com as moléculas dos gases ("movimento Browniano") o qual é diretamente proporcional à temperatura e inversamente proporcional à velocidade da partícula e ao diâmetro da partícula. A difusividade da partícula é dada por:

$$D_p = \frac{Ch.K_B.T}{3\pi.\mu_g.d_p}$$

Onde D_p é a difusividade em m^2/s, K_B é a constante de Boltzman ($kg.m^2/s^2.K$) e T é a temperatura absoluta do gás (graus Kelvin)

FORÇA ELETROSTÁTICA

A força eletrostática é um mecanismo de coleta predominante em precipitadores (filtros) eletrostáticos.

De acordo com a lei de Coulomb a força eletrostática é expressa por:

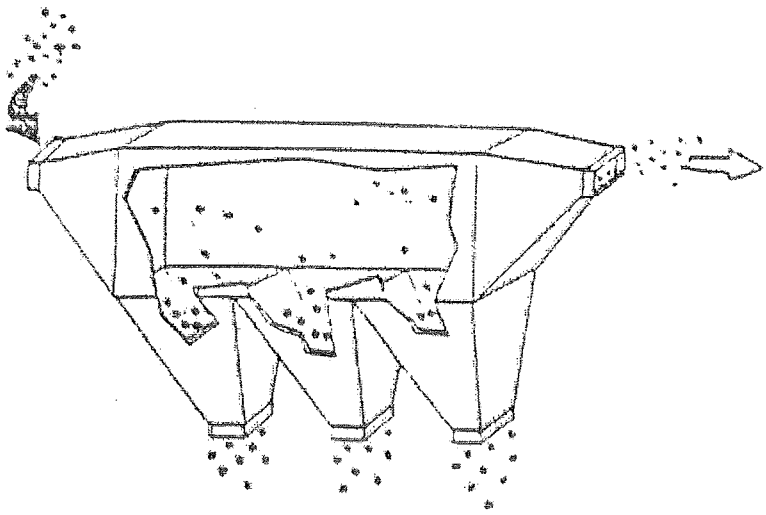
$$F_e = q.E$$

sendo: F_e = força eletrostática; q = carga elétrica da partícula;
E = intensidade do campo elétrico

O carregamento elétrico de partículas ocorre só por ação do campo elétrico, o qual é importante para partículas de diâmetros maiores que 0,5 μm, 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.

CÂMARA DE SEDIMENTAÇÃO GRAVITACIONAL



Mecanismo de coleta: força gravitacional

Uso: pré-coletor para retirada de partículas grosseiras

Vantagens: baixa perda de carga (10 a 25 mmCA) e custo relativamente baixo
Desvantagens: baixa eficiência e espaço ocupado

Fórmula da Eficiência de Coleta:

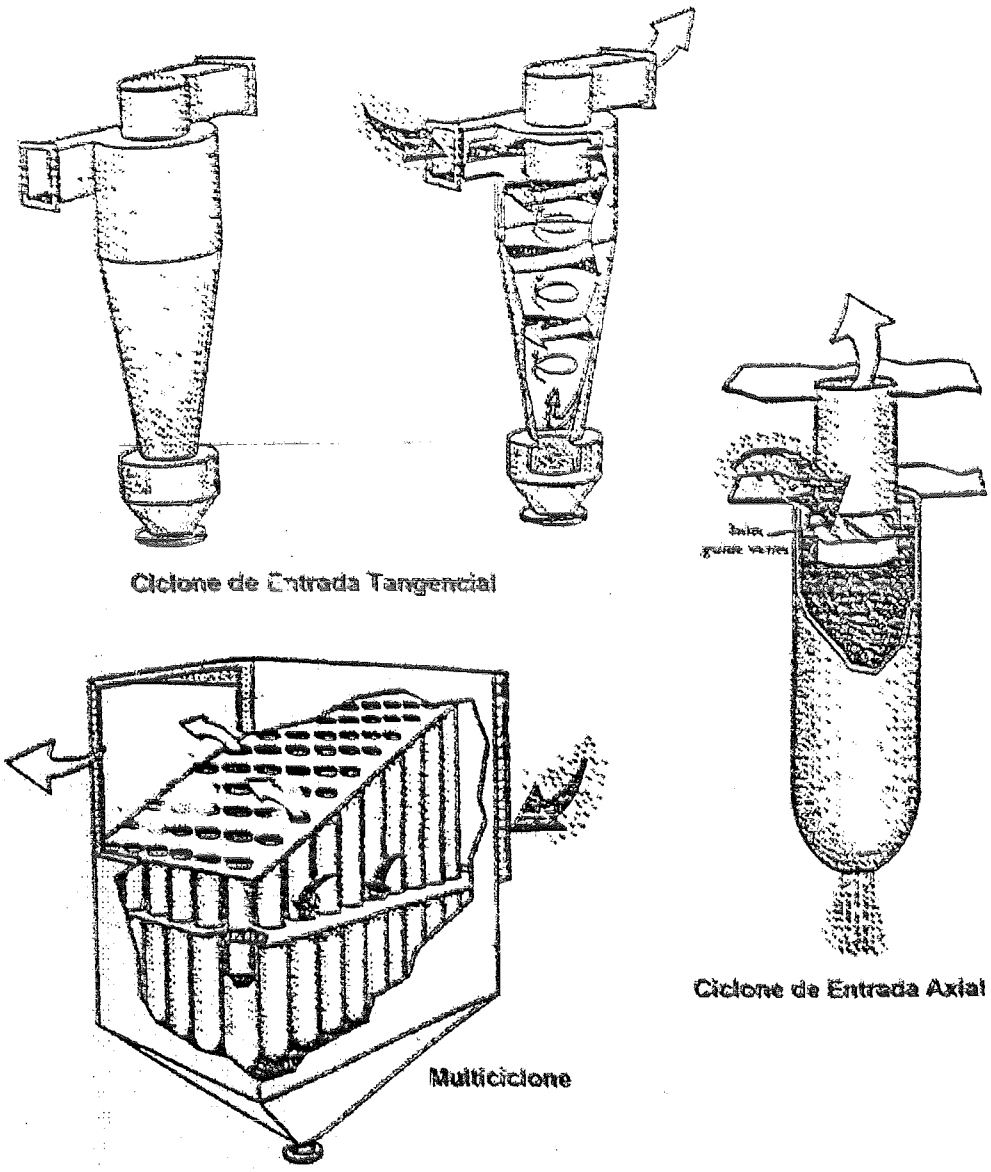
$$\eta_i = \frac{K.g.\rho_p.L_c.B_c.d_{pi}^2}{18.\mu_g.Q}$$

Sendo:

g a aceleração da gravidade; Lc e Bc respectivamente o comprimento e a largura da câmara; Q a vazão de gases através da câmara e K o fator de correção para desvios das condições de Stokes (em geral usa-se K = 0,5).

A velocidade do gás na câmara é limitada ao máximo de 3 m/s para evitar a reentrada das partículas coletadas no fluxo gasoso.

CICLONES



Tipos: Entrada tangencial, entrada axial e multiciclones

Classificação segundo eficiência:

- ciclones de baixa eficiência: perda de carga entre 50 e 100 mmCA;
- ciclones de média eficiência: perda de carga entre 100 e 200 mmCA;
- ciclones de alta eficiência: perda de carga acima de 200 mmCA.

Mecanismo de coleta: força centrífuga

Uso: pré-coletor para retirada de partículas médias a grosseiras

Vantagens: perda de carga média a baixa (50 a 250 mmCA) e custo relativamente baixo

Desvantagens: eficiência baixa a média

Fórmula da Eficiência de Coleta segundo DePaola e Theodore:

$$\eta_i = \frac{1}{1 + \frac{(d_{50})^2}{(d_{pi})^2}} \qquad \text{sendo: } d_{50} = \sqrt{\frac{9.\mu_g.b}{2.\pi.N_v.v_i.\rho_p}}$$

Onde d_{50} é o diâmetro de de corte (diâmetro da partícula coletada com 50% de eficiência) N_v é o número de voltas que o gás dá no ciclone (Nv=(1/a).[h+(H-h)/2], v_i a velocidade da partícula na entrada do ciclone, normalmente fixada na faixa de 10 a 20 m/s e b a largura da seção de entrada do ciclone.

Os ciclones podem ser projetados utilizando relações padronizadas entre suas dimensões, conforme mostrado na tabela, sendo a velocidade de entrada no ciclone o dado inicial para o projeto.

A perda de carga em ciclones é dada pela fórmula de Shepherd e Lapple:

$$\Delta P = 0{,}05.k.\rho_g.v_i^2\left(\frac{a.b}{D_s^2}\right) \quad \text{(mmCA)}$$

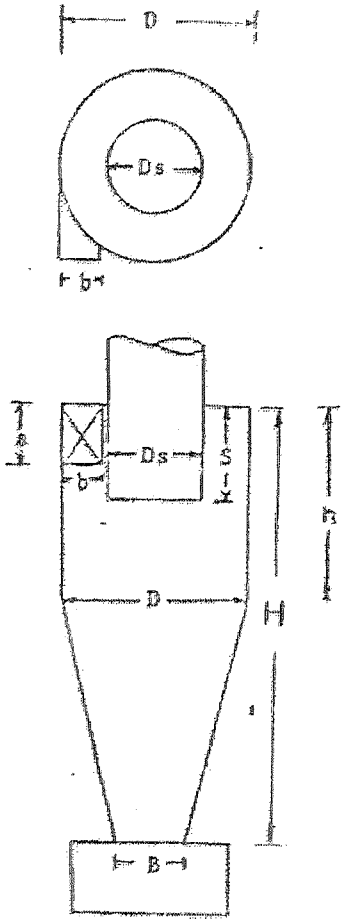
Sendo k=16 para ciclones de entradas tangenciais, k=7,5 para ciclones tangenciais com uma guia na entrada, ρ_g a densidade do gás carreador (kg/m3), v_i a velocidade dos gases na entrada do ciclone (m/s) "a" é a altura da área de entrada dos gases (m), "b" a largura da área de entrada do ciclone (m) e D_S = diâmetro do duto de saída dos gases do ciclone.

Multiciclone

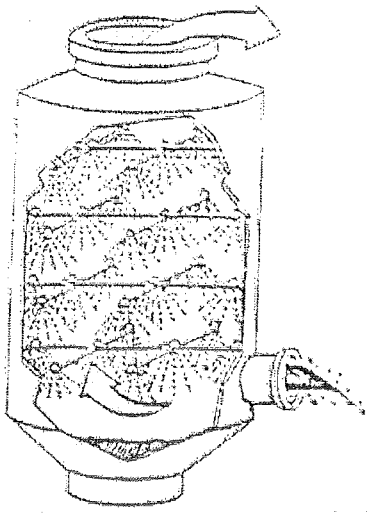
Constituído por um agrupamento de pequenos ciclones da ordem de 20 a 30 cm de diâmetro, que trabalham em paralelo e que possuem entrada radial. Os multiciclones apresentam as seguintes vantagens em relação ao ciclones: são mais eficientes, custam menos, ocupam menos espaço, apresentam menor perda de carga para eficiências equivalentes e resistem melhor à erosão. No entanto, apresentam um problema sério que é o de entupimento frequente.

Relações Geométricas Padronizadas de Ciclones Tangenciais

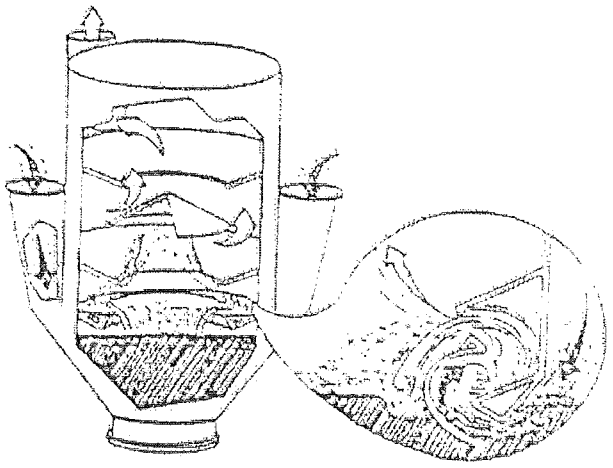
ELEMENTO CARACTERÍSTICO	SÍMBOLO	Autor		
		LAPPLE	STAIRMAND	SWIFT
Diâmetro do Corpo Cilíndrico	D	1,0	1,0	1,0
Altura de Entrada	a	0,5 D	0,5 D	0,44 D
Largura de Entrada	b	0,25 D	0,2 D	0,21 D
Profundidade do Duto de Saída	S	0,625D	0,5 D	0,5 D
Diâmetro do Duto de Saída	Ds	0,5 D	0,5 D	0,4 D
Altura do Corpo Cilíndrico	h	2,0 D	1,5 D	1,4 D
Altura Total	H	4,0 D	4,0 D	3,9 D
Diâmetro do Duto de Descarga do Pó	B	0,25 D	0,375 D	0,4 D



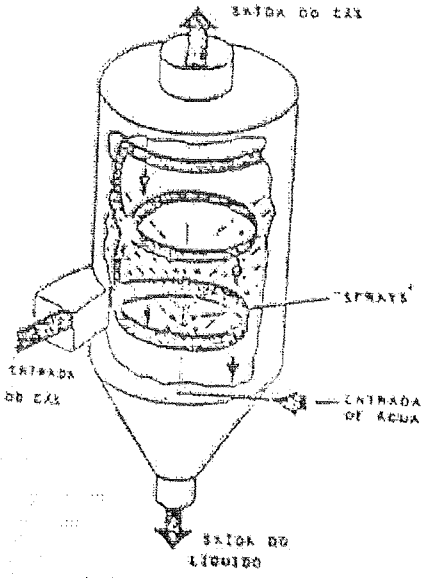
LAVADORES (*SCRUBBERS*)



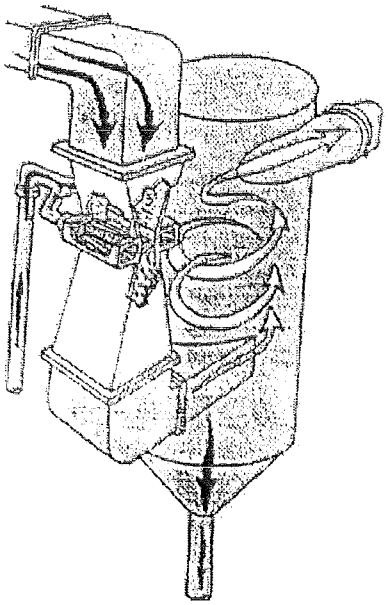
Lavador Tipo Spray Gravitacional



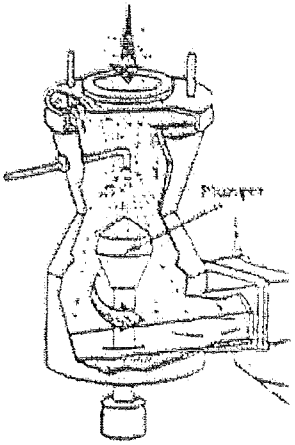
Lavador Tipo Orifício (auto-induzido)



Lavador Ciclônico



Lavador Venturi Clássico



Lavador Venturi com Garganta Ragulável

Tipos: com pré-atomização e com atomização pelo gás

Classificação segundo eficiência (energia):

- Baixa energia: perda de carga até 75 mmCA;
- Média energia: perda de carga entre 75 e 250 mmCA;
- Alta energia: perda de carga acima de 250 mmCA.

Mecanismo de coleta principal: impactação inercial

Uso: pré-coletor ou coletor final para ampla faixa de tamanho de partículas

Vantagens: Não apresentam restrição quanto à temperatura e umidade dos gases, podem ser utilizados para partículas e alguns gases, podem controlar partículas adesivas, em geral são compactos, podem ser conseguidas altas eficiências de coleta.

Desvantagens: Alto consumo de energia quando se necessita eficiência alta, exigem tratamento de efluentes líquidos, vida útil em geral menor por causa da umidade, necessita água. necessitam de materiais resistentes à corrosão, no lavador e após o mesmo; formação de pluma visível nos dias frios, pela condensação da umidade; o material coletado está na forma úmida e, em geral, necessita tratamento para sua reutilização;

Exemplos: lavadores de spray, lavadores ciclônicos, torres de enchimento, lavadores de impactação, lavador venturi, lavador ejetor.

Principais parâmetros operacionais de alguns lavadores

TIPO DE LAVADOR	VELOCIDADE DO GÁS (m/s)	PERDA DE CARGA (mmCA)	RAZÃO LÍQUIDO/GÁS (l/m^3)	EFICIÊNCIA DE COLETA PARA PARTÍCULAS PEQUENAS*
Câmara de spray gravitacional	0,9 a 1,5	25	0,3 a 2	baixa
Ciclônico	1 a 2,5 (na câmara)	60 a 150	0,4 a 0,7	média
Venturi	60 a 180	250 a 2500	0,3 a 1,3	alta

* Eficiência para partículas de 2 μm

Eficiência de Coleta:

Nos lavadores é diretamente proporcional à energia fornecida ao mesmo, tanto pela resistência à passagem do gás (perda de carga) quanto pela energia fornecida pelo líquido. Em geral a eficiência se correlaciona bem com a perda de carga. Assim, quanto maior a perda de carga maior será a eficiência de coleta do lavador.

Eficiência de Coleta para lavador venturi segundo Johnstone:

$$E_{c_i} = \left[1 - \mathrm{EXP}(-k.\frac{Q_L}{Q_g}.\sqrt{K_I})\right] \quad \text{e} \quad K_I = \frac{\rho_P.v_g.(d_p)^2.C_f}{18.D_G.\mu_g}$$

Sendo :

E_{c_i} = Eficiência de coleta para partícula i (base 1)

k = constante empírica (750 a 1500)

$Q_L / Q_g = m^3 / m^3$

K_I = parâmetro de impactação (adimensional)

Diâmetro da gota segundo Nukyiama & Tanasawa

$$D_G = \left(\frac{50}{v_g}\right) + 91{,}8\left(\frac{Q_L}{Q_g}\right)^{1,5}$$

Sendo:

D_G = diâmetro médio das gotas (cm)

v_g = velocidade do gás na garganta (cm / s)

$\frac{Q_L}{Q_g}$ = razão líquido / gás (m^3 / m^3)

Perda de Carga em Lavadores Venturi segundo Calvert

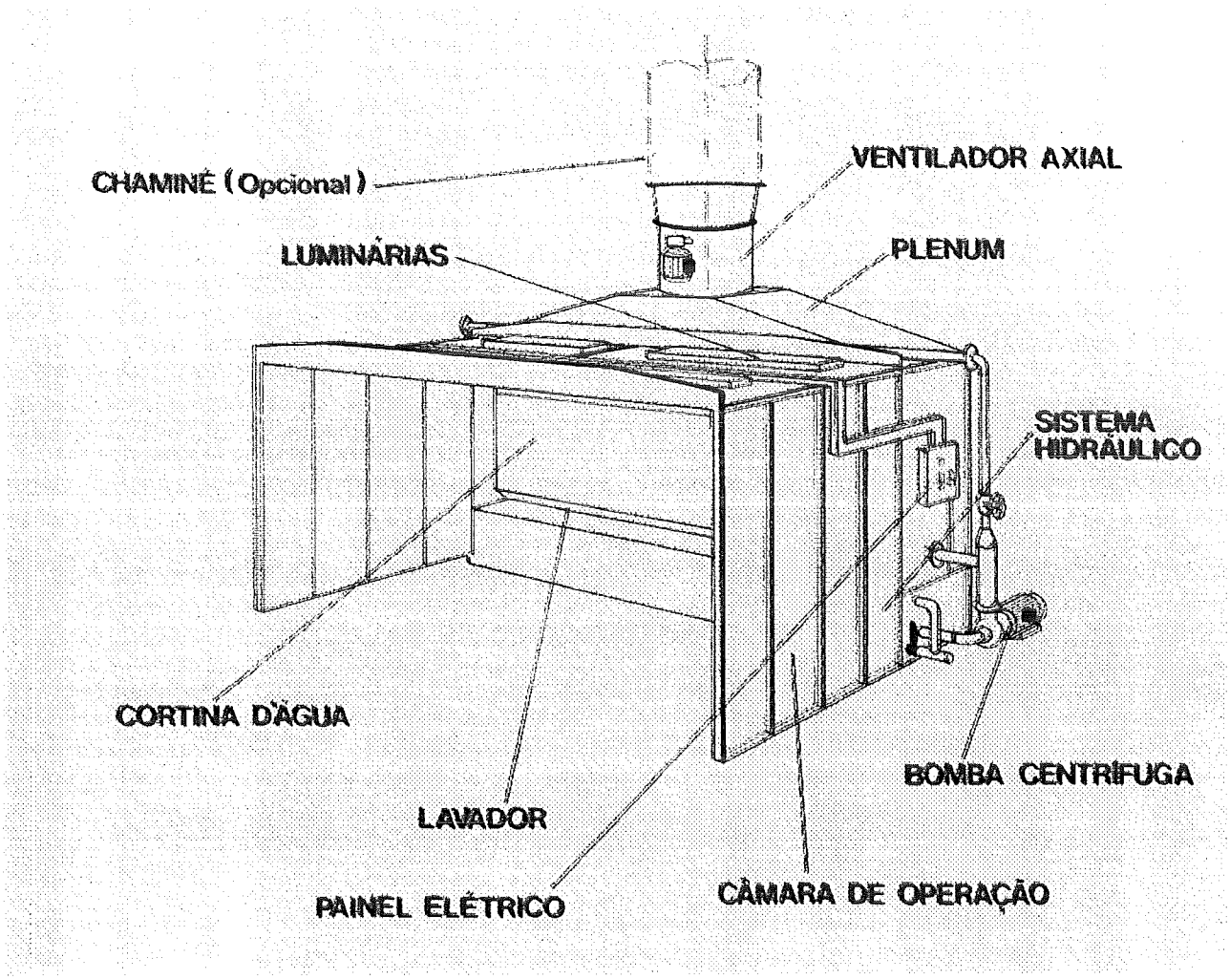
$$\Delta P = 0{,}0008(v_g)^2(\frac{Q_L}{Q_g})$$

Sendo :

ΔP = perda de carga no venturi (cmH_2O)

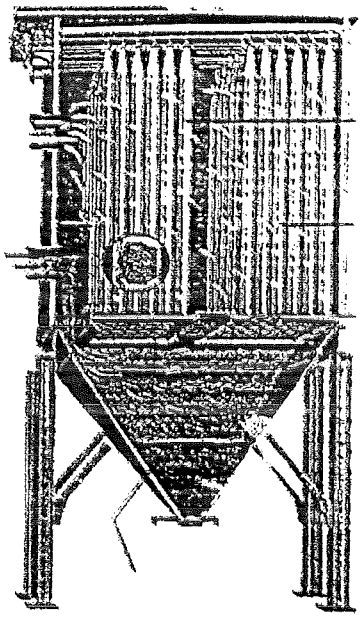
v_g = cm/s e $\frac{Q_L}{Q_g} = m^3 / m^3$

CABINE DE PINTURA COM CORTINA DÁGUA

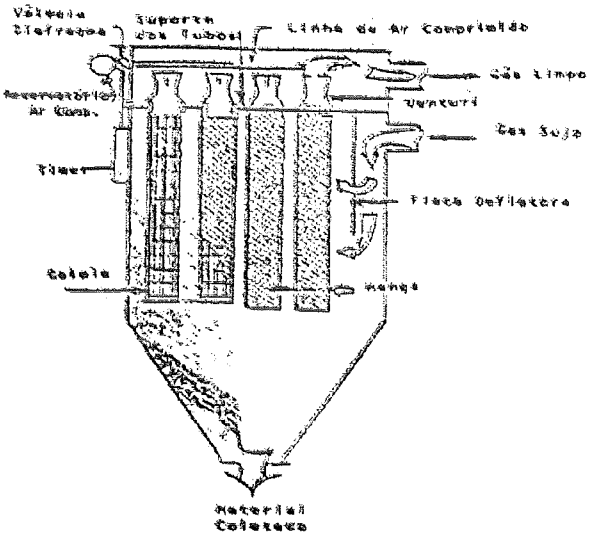


FILTRO DE TECIDO

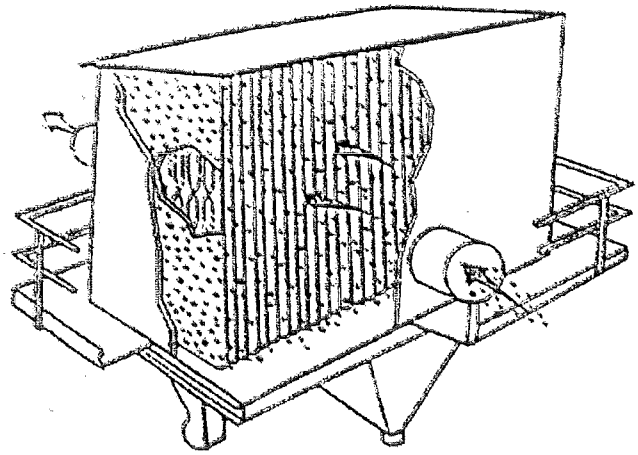
Filtro Manga com Limpeza por Vibração



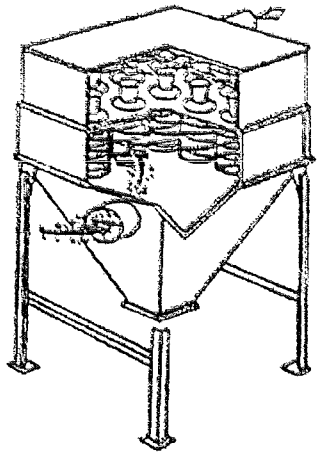
Filtro-Manga com Limpeza por Jato Pulsante



Filtro Tipo Envelope (bolsa)



Filtro Tipo Cartucho



Tipos: Filtro de mangas, filtro de bolsas, filtro tipo cartucho.

Tipo usual na indústria: Filtro de mangas.

Classificação segundo sistema de limpeza das mangas: vibração mecânica, fluxo reverso e jato pulsante.

Mecanismos de coleta: **impactação inercial, difusão e intercepção.**

Princípio de funcionamento: passagem da mistura gasosa que contém as partículas através de um material filtrante, sendo que o gás atravessa os seus poros 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, que dificultaria a passagem do gás (aumento da perda da 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 e aumentando a eficiência do processo.

Eficiência: O filtro de tecido é um equipamento enquadrado na categoria "alta eficiência de coleta", chegando em alguns casos a valores de eficiência maiores que 99,9% . A eficiência num filtro de tecido é obtida, por experiência anterior em utilizações similares. Em geral não existe modelo matemático prático para a determinação da eficiência de coleta em filtros de tecido. Adota-se concentração de saída da ordem de 50 mg/Nm^3.

Projeto: O projeto de equipamentos de controle tipo filtro de tecido envolve basicamente a escolha do formato do meio filtrante a ser utilizado (manga por exemplo), a escolha do sistema de limpeza, o material do meio filtrante a ser utilizado e o dimensionamento da área de filtragem necessária. O fluxo gasoso deve ser adequadamente condicionado antes de entrar em contato com o filtro de tecido no que diz respeito à temperatura e umidade, em função da resistência do meio filtrante e da possibilidade de empastamento.

A escolha do meio filtrante a ser utilizado dependerá das características do gás transportador (temperatura, umidade, alcalinidade e acidez), das caraterísticas das partículas a serem filtradas (concentração, distribuição de tamanhos, abrasividade), do custo e da disponibilidade do mercado.

A tabela a seguir apresenta as características dos meios filtrantes mais usuais. Em certos casos o meio filtrante recebe tratamento especial como por exemplo a aplicação de silicone, grafite e de mebrana de teflon.

Características dos meios filtrantes usuais de Filtros de Tecido

Fibra	Composi-ção química	Tempera-tura máxima (°C)	resis-tência a ácidos	resis-tência a álcalis	resis-tência a hidrólise	resis-tência a oxidação	Preço relativ o ao poliés ter	resis-tência a abrasão
Algodão	**Celulose**	82	P	B				B
Nylon	Poliamida alifática	115	B	E				E
Acrílico, Crylor	Poliacri-lonitrila	120	R	R	B	B	1,7	**B**
Dacron, Trevira	Poliéster	150	R	**P**	P	B	1	B
Polipro-pileno	Olefina	100	E	E	E	**P**	1,3	E
Conex, Nomex	Poliamida aromática	200	R	R	R	B	5,2	E
Fibra de vidro	Sílica	290	R a B	R a B				R
Teflon, Toyoflon e Profilen	Politetra-fluor-etileno	280	E**	E*			25,1	R
Ryton, Procon	Polifenil-sulfeto	200	**E**	E	E	R	6,3	**B**
P84	Poliimida	250	B	R	B	B	9,4	

Nota: E=excelente; B=boa; R=regular; P=pequena.
(*) Exceto a trifluoretos, cloro e metais alcalinos fundidos.
(**) Inerte exceto a fluoretos

A área de filtragem necessária é obtida pela relação ar-pano (velocidade de filtragem) recomendada a qual é função da aplicação específica, do tipo de meio filtrante e do tipo de sistema de limpeza. Em geral as velocidades de filtragem estão na seguinte faixa:

Tipo de Limpeza	Relação ar-pano ($m^3/min./m^2$)*
Jato pulsante	**1,5 a 4,6**
Vibração	**0,6 a 1,2**
Ar reverso	**0,3 a 0,7**

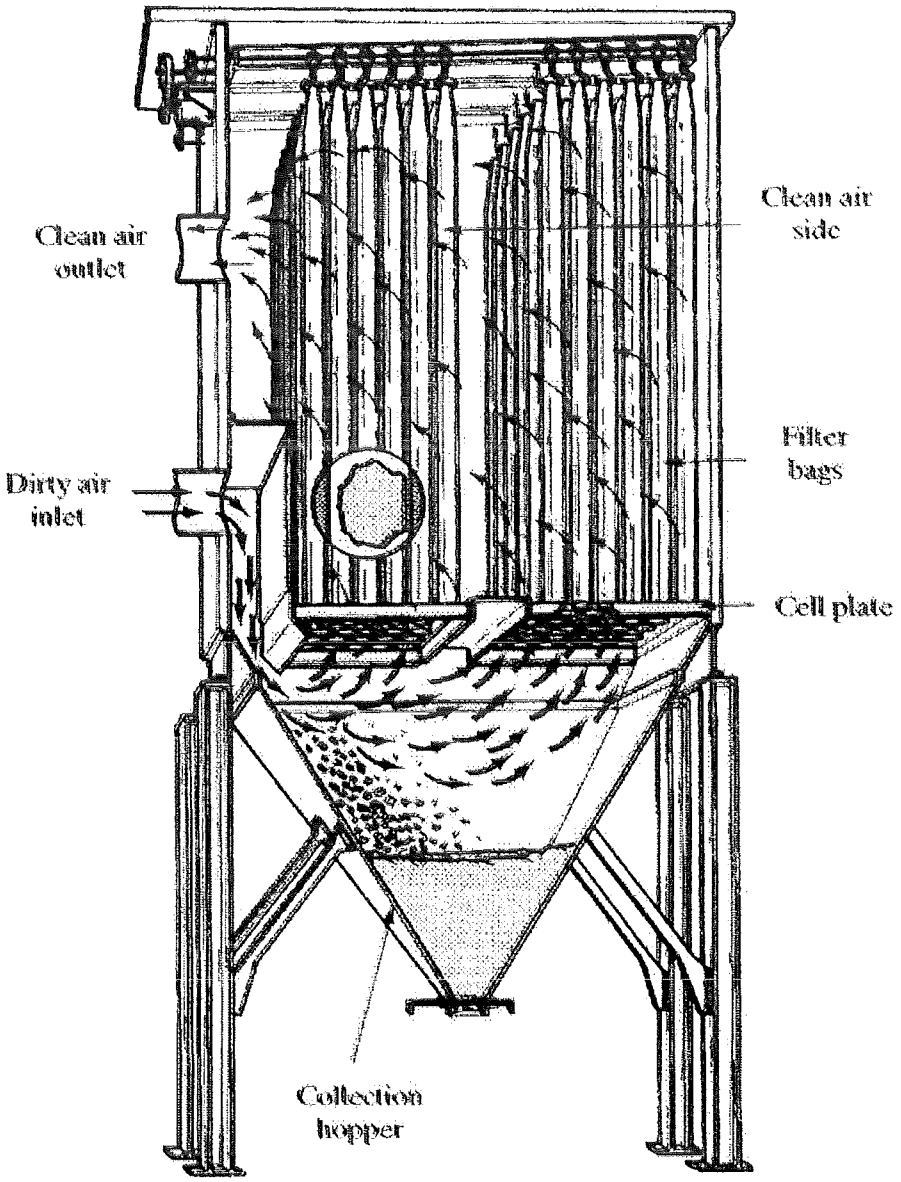
* Pode ser entendida como velocidade através do meio filtrante (m/min.)

Principais Vantagens do Filtro de tecido:

- apresenta alta eficiência de coleta
- coleta material a seco e em forma reutilizável
- perda de carga e custo de operação moderados

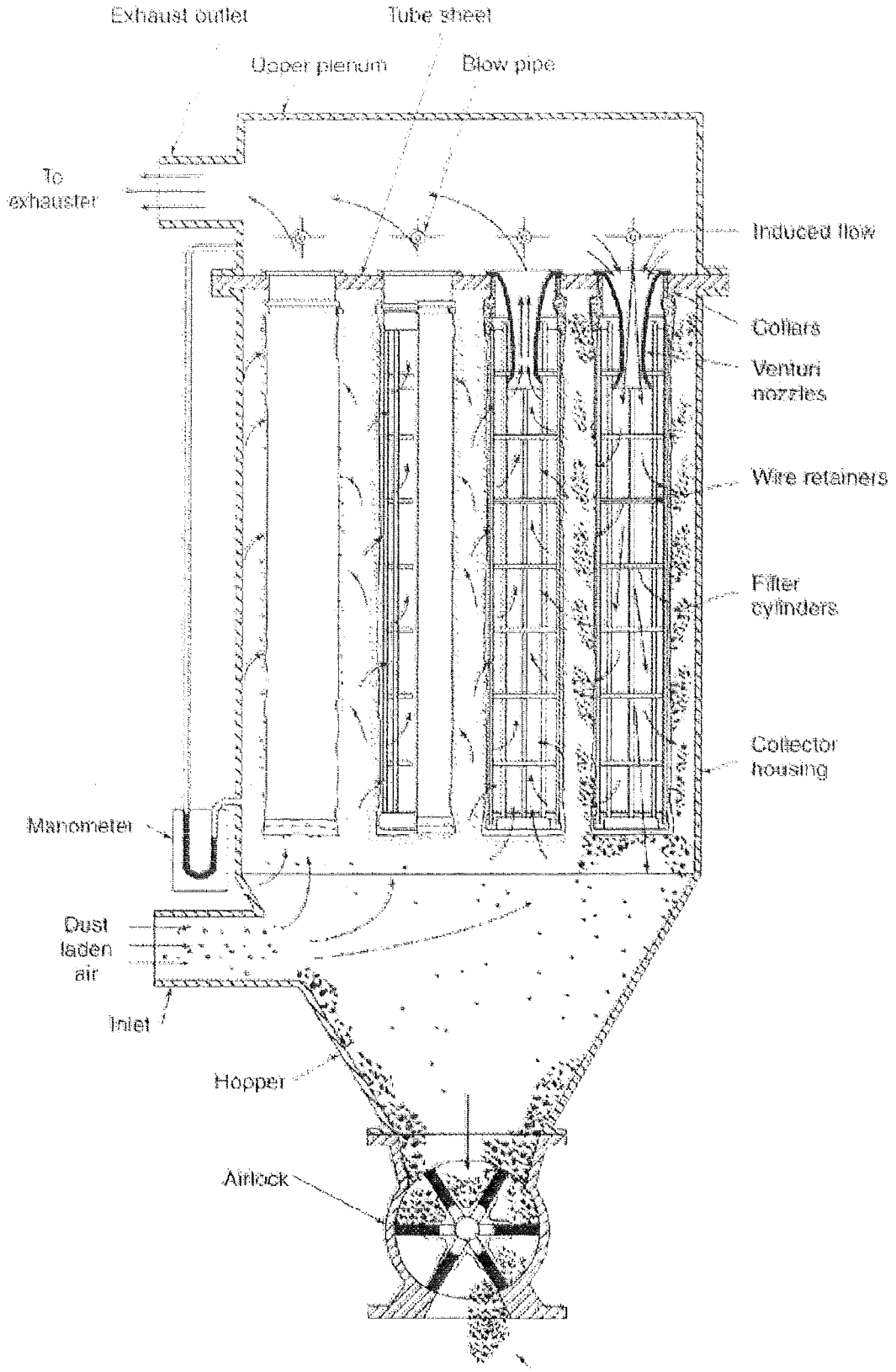
Principais Desvantagens:

- custo de manutenção geralmente alto
- exige controle de temperatura
- exige material filtrante ou controles especiais nos casos de possibilidade de condensação de umidade no filtro.
- exige espaço médio para sua instalação

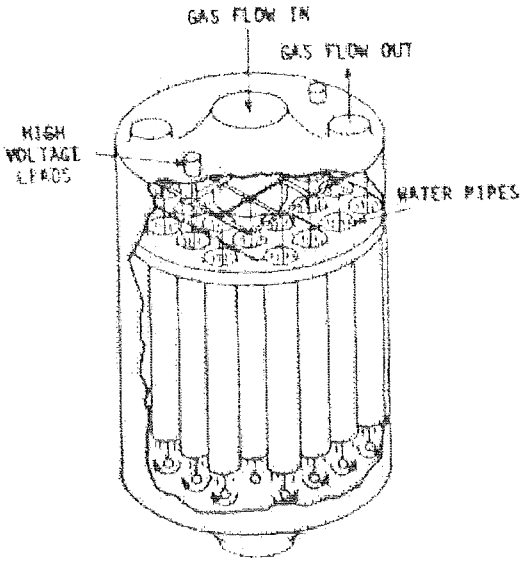


Filtro de Mangas Tipo Limpeza por Vibração Mecânica

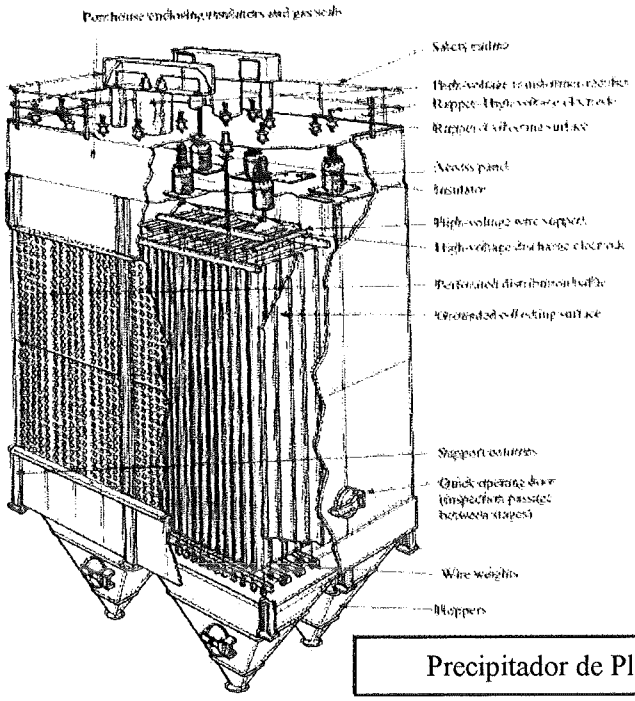
Filtro de Mangas Tipo Jato Pulsante



PRECIPITADORES ELETROSTÁTICOS



Precipitador Tubular



Precipitador de Placas

Tipos: tubulares e de placas / um estágio e dois estágios.

Classificação segundo voltagem: baixa voltagem (8 a 35 kV) e alta voltagem (35 a 75 kV).

Tipo usual na indústria: alta voltagem, tipo placas com um estágio.

Mecanismo de coleta: força elétrica e em menor escala a difusão iônica.

Princípio de funcionamento:

O processo de precipitação eletrostática se inicia com a formação de íons gasosos pela descarga do corona de alta voltagem no eletrodo de descarga. A seguir as partículas sólidas e/ou líquidas são carregadas elétricamente pelo bombardeamento dos íons gasosos ou elétrons. 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, reutilização ou disposição final.

Projeto

O projeto tem como base a experiência do fabricante com a realização de testes com os efluentes do caso em estudo ou pela experiência em casos similares. Trata-se de equipamento onde o "know-how" é muito importante. As placas de coleta rm geral são "corrugadas", para evitar a reentrada do material particulado coletado, e os eletrodos de coleta dão do tipo arame, com seção circular, quadrada, tipo arame farpado etc. e podem estar simplesmente pendurados um a um ou em molduras.

História

A história do precipitador se inicia em 1824 quando Hohfeld consegue tornar límpido o conteúdo de um cilindro contendo névoas utilizando fumaça de tabaco. Em 1907 Frederick Gardner Cottrell construiu um precipitador eletrostático utilizado com sucesso em uma fábrica de ácido sulfúrico de Pinole, Califórnia - EUA. As instalações industriais pioneiras se deram no período de 1907 a 1920.

Influência da resistividade da partícula

Uma característica importante da partícula que influência a sua coleta em precipitadores eletrostáticos é a sua resistividade elétrica. Partículas de baixa resistividade se carregam facilmente mas também cedem sua carga com muita facilidade ao atingir o eletrodo de coleta, podendo, em conseqüência, retornar ao fluxo gasoso. 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 em precipitadores está entre 10^7 e 10^{10} ohm.cm.

Existem formas de condicionamento da resistividade, como o controle de temperatura e umidade, injeção de substâncias químicas como trióxido de enxpfre e amônia, sendo a forma mais usual o controle de temperatura e umidade.

Eficiência

O precipitador eletrostático pode atingir alta eficiência de coleta, no caso de precipitadores de alta voltagem. Usualmente, a eficiência de coleta é expressa pelo modelo de Deutsch-Anderson:

$$\eta_i = 1 - \exp(-\frac{A_c}{Q} W_i)$$

Sendo:
η_i = eficiência de coleta para partícula de diâmetro d_i (base 1)
A_c = área total de coleta (m^2)
Q = vazão de gases através do precipitador (m^3/s)
W_i = velocidade de migração da partícula de diâmetro d_i para o eletrodo de coleta (m/s)

A velocidade de migração por pela força elétrica é dada por:

$$W_i = \left(\frac{D}{D+2}\right) \frac{\varepsilon_o . E_o . E_p . d_i . Ch}{\mu_f}$$

Sendo:
D = constante dielétrica da partícula
ε_o = permissividade do espaço livre ($8{,}85 \times 10^{-12}$ F/m)
E_o = intensidade do campo elétrico no carregamento (V/m)
E_p = intensidade do campo elétrico na região de coleta da partícula (V/m)
d_i = diâmetro da partícula (m)

As empresas que projetam precipitadores eletrostáticos em geral determinam a taxa de precipitação (W_p) em modelos reduzidos, através da medição da eficiência prática (η_g), para uma determinada relação Ac/Q (área específica de coleta), em condições elétricas conhecidas. Com esses dados pode-se calcular W_p pela equação:

$$W_p = \frac{Q}{A_c} \ln\left(\frac{1}{1-\eta_g}\right)$$

Com o W_p calculado acima determina-se área total de coleta para a vazão total real por:

$$A_c = \frac{Q}{W_p} \ln\left(\frac{1}{1-\eta_g}\right)$$

Taxas de precipitação para algumas fontes de poluição do ar

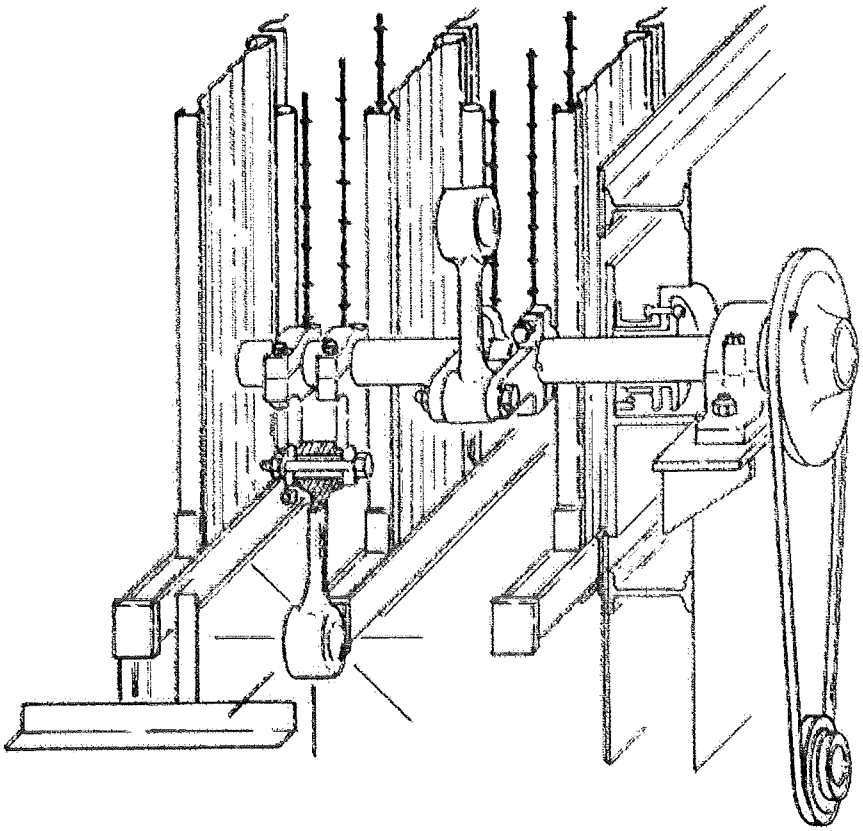
Fonte	W_p (cm/s)
Caldeira a carvão	4,0 a 20,4
Termelétrica a carvão	10,1 a 13,4
Caldeira de recuperação de licor negro	6,4 a 9,5
Névoas da produção de ácido sulfúrico	5,8 a 7,6
Produção de cimento - processo seco	6,4 a 7,0
Produção de cimento - processo úmido	10,1 a 11,3
Produção de gesso	15,8 a 19,5
Forno revérbero de produção de aço	4,9 a 5,8
Alto-forno siderúrgico	6,1 a 14,0
Regeneração de catalisadores na refinação de petróleo	7,6
Fornos cubilô de produção de ferro cinzento	3,0 a 3,7
Incinerador de lixo	6,2 a 15,3
Fornos de produção de vidro	0,5 a 1,6
Sinterização siderúrgica	2,2 a 6,8

Vantagens do Precipitador Eletrostático:

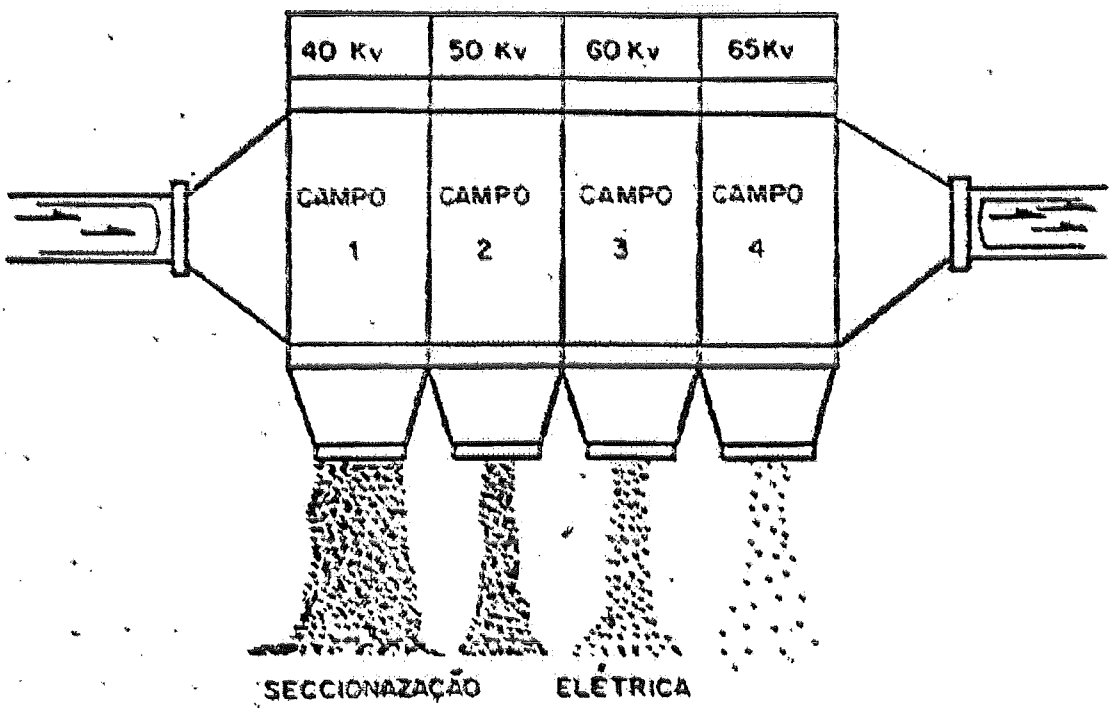
.Alta eficiência de coleta. Pode exceder a 99.95%;
.Coleta partículas muito pequenas;
.Baixo custo operacional;
.Baixa perda de carga, em geral não excede 25 mmCA;
.Existem poucas partes móveis o que implica em redução da manutenção;
.Coleta partículas sólidas ou líquidos difíceis de coletar por outros equipamentos;
.Pode operar a temperaturas altas (até cerca de 650°C);
.A eficiência de coleta pode ser aumentada pela inclusão de novos módulos;
.Coleta material a seco;

.Pode ser operado continuamente com pouca manutenção, em períodos longos;
.Pode processar altas vazões de gases e com uma faixa ampla de concentração;
.Pode ser utilizado para gases a pressão de até 10 kg/cm^2 e em vácuo;
.Vida útil longa. Chega a durar mais de 20 anos.

Desvantagens
.Investimento inicial muito alto;
.Exige grande espaço para sua instalação, principalmente para precipitadores quentes (maior volume de gases);
.Apresenta risco de explosões quando processa gases ou partículas explosivos;
.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.

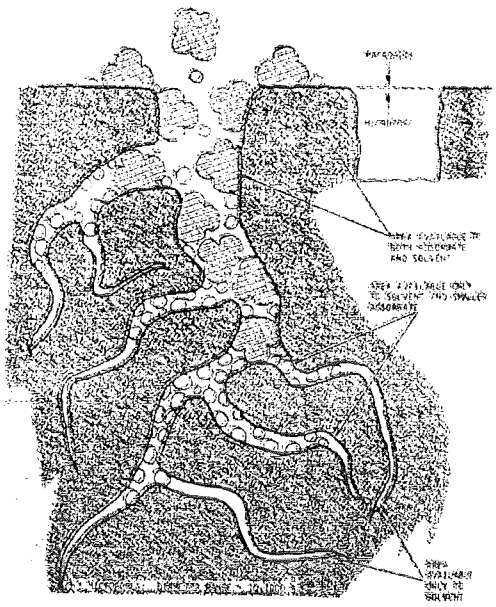


Mecanismo de Limpeza

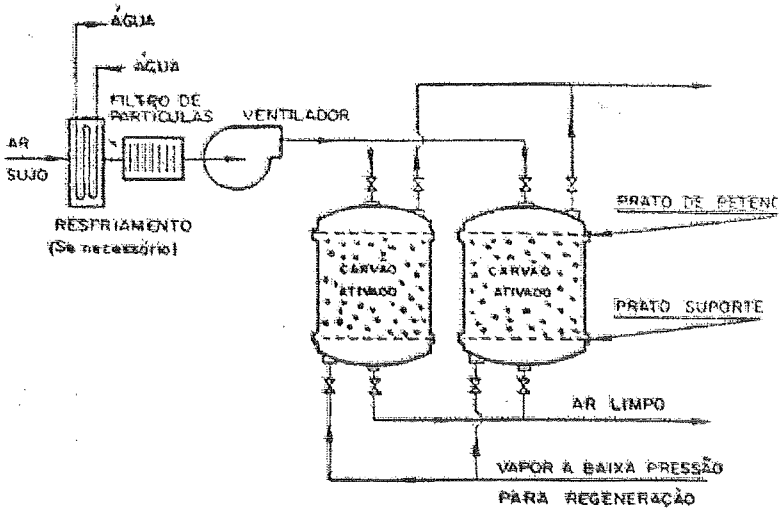


Precipitadores em Série

ADSORÇÃO



Porosidade de Material Adsorvente



Sistema de Carvão Ativado Leito Fix

Mecanismo e Usos

A adsorção é um processo seletivo e bastante apropriado para a remoção de gases e vapores a baixas concentrações. A eliminação de muitos compostos odoríficos, os quais em geral estão presentes em baixas concentrações, pode ser realizada com alta eficiência através da adsorção.

O controle de emissões de solventes, em alguns casos a altas concentrações, pode ser também feita através da adsorção com regeneração do material adsorvente e com recuperação do solvente, como é o caso do controle de solventes emitidos pelo sistema de limpeza de roupas a seco, o qual leva significativa vantagem econômica em relação à incineração pela não necessidade de uso de combustível.

Materiais Adsorventes

Os materiais adsorventes utilizados são o carvão ativado, a alumina ativada (óxido de alumínio) e as peneiras moleculares (aluminosilicatos de sódio, potássio e cálcio).

O carvão ativado pertence ao grupo dos sólidos não polares e é o material mais utilizado na prática. Ele é produzido pelo aquecimento de sólidos orgânicos (carvão, coco, madeira dura, etc.) a aproximadamente 600°C, em atmosfera redutora, com posterior passagem de vapor d'água, ar ou gás carbônico, a altas temperaturas. Esse adsorvente é um dos mais antigos e é muito utilizado face à sua versatilidade, disponibilidade e custo.

Características de alguns materiais adsorventes

Adsorvente	Área ativa (m^2/g)	Volume dos poros(cm^3/g)	Diâmetro médio dos poros. (Angstroms)
Carvão Ativado	500 a 1500	0,6 a 0,3	20 a 40
Silica-gel	200 a 600	0,4	30 a 200
Alumina ativada	175	0,39	90

Eficiência de Remoção

O carvão ativado é eficaz na remoção de vários tipos de poluentes gasosos. Mesmo para gases e vapores presentes em baixas concentrações, os mesmos podem ser projetados e operados a eficiências próximas a 100%.

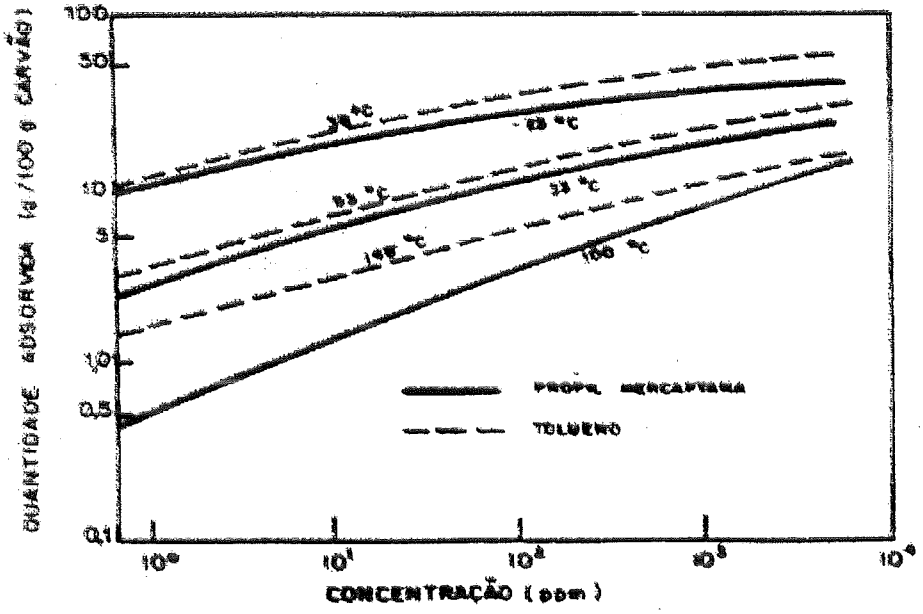
Dados experimentais ou práticos necessitam ser utilizados para estabelecer as condições de operação para atingir à eficiência desejada para uma dada aplicação, bem como para estabelecer o "breaking point", isto é, o ponto em que o material adsorvente começa inicia a fase de saturação.

Capacidade de adsorção e retentividade do carvão ativado

Substância	Capacidade de adsorção (% em massa)	Retentividade após remoção (% em massa)
Tetracloreto de Carbono	110 a180	27 a 30
Vapores de gasolina	10 a 20	2 a 3
Benzeno	45 a 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

Capacidade de adsorção relativa do carvão ativado.

Grau 4. Alta capacidade de adsorção. **Uma grama adsorve de 20 a 50% do seu próprio peso (média de 33%).**		
.Ácido acético **.Álcool** **.Álcool isopropílico** **.Cresol** **.Gasolina** **.Odores hospitalares** **.Ozona** **.Tetracloreto de carbono**	**.Ácido caprílico** **.Álcool butílico** **.Benzeno** **.Fenol** **.Mercaptanas** **.Odores de perfumes** **.Piridina** **.Tolueno**	**.Acetato de etila** **.Álcool butírico** **.Cloropicrina** **.Fumaça de cigarro** **.Odores corporais** **.Óleos essênciais** **.Terebentina**
Grau 3. Capacidade de adsorção satisfatória. Adsorve entre 10 a 25% do seu peso (média de 16,7%).		
.Acetona **.Cheiro de óleo diesel**	**.Acroleína** **.Gás sulfídrico**	**.Cloro**
Grau 2. Capacidade de e adsorção razoável. Requer estudos específicos para sua utilização.		
.Acetaldeído **.Butano**	**.Aminas** **.Formaldeído**	**.Amônia** **.Propano**
Grau 1. Baixa capacidade de adsorção. **Uso não recomendado.**		
.Etileno	**.Gás carbônico**	**.Monóxido de carbono**



Curva de variação da capacidade de adsorção em função da concentração e da temperatura para tolueno e propil mercaptana

Métodos de

Regeneração

Aquecimento através de vapor d'água a 100°C por cerca de 20 minutos é o método mais usual e o mais eficiente na remoção do material adsorvido, chegando a atingir remoção de 98% da substancia adsorvida. Outros métodos são aquecimento com passagem de gás inerte a 100°C, por cerca de 20 minutos; redução da pressão (vácuo) de 50 mmHg, por cerca de 20 minutos.

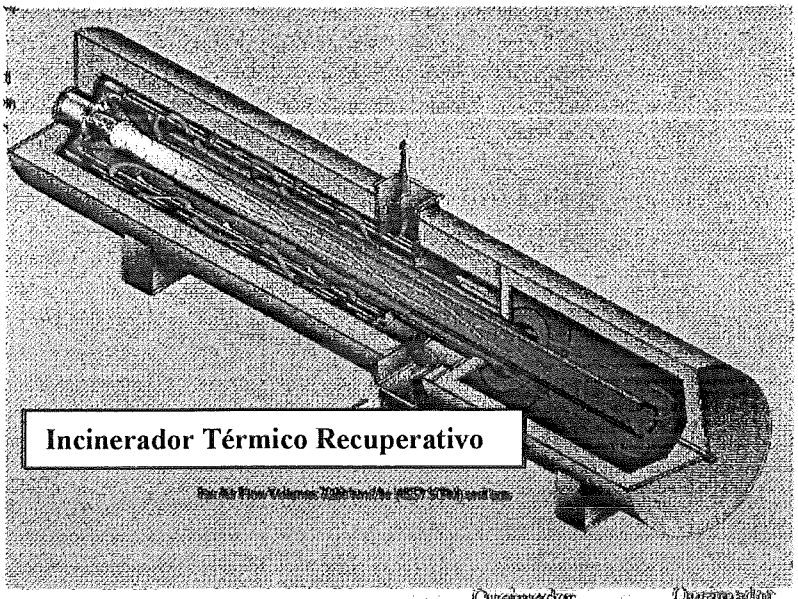
Tipos de Adsorvedores:

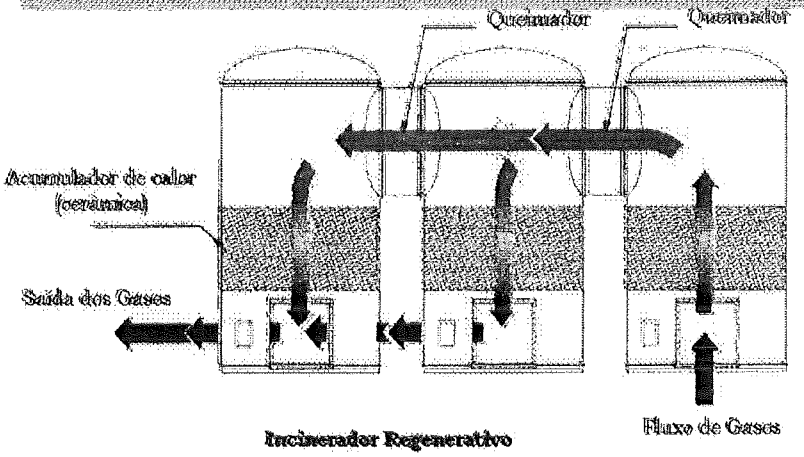
Leito fixo, leito móvel e leito fluidizado.

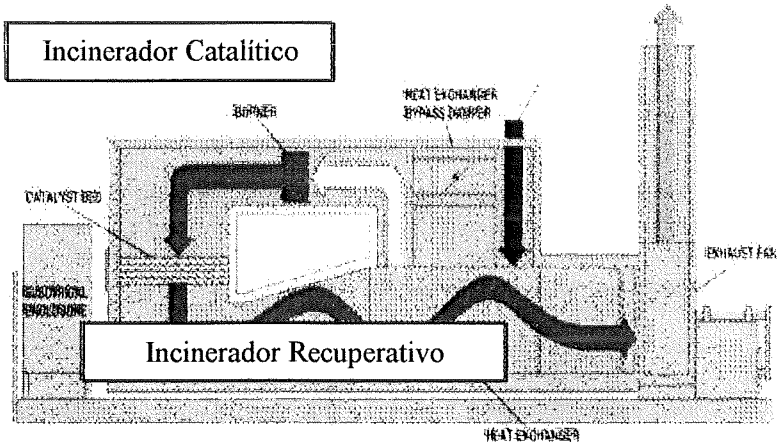
Parâmetros de Projeto

- Velocidade superficial no leito: 0,1 a 0,5 m/s
- Espessura do leito:
  0,2 a 0,6 m (sistemas não regenerativos para filtragem de ar)
  0,3 a 1,2 m (sistemas regenerativos para controle de poluição do ar)
- Perda de carga:
  Carvão 6x10: $\Delta P = 8{,}8 \cdot v^{1{,}38}$
  Carvão 3x6: $\Delta P = 1{,}79 \cdot v^{1{,}56}$
  Carvão 6x8: $\Delta P = 5{,}47 \cdot v^{1{,}42}$
  Sendo: ΔP = mmCA por m de altura do leito;
  v = velocidade superficial em m/min.
- Tempo de saturação: depende da concentração e da capacidade de adsorção do material adsorvente
- Temperatura do gás na entrada do leito: máximo de 50 °C.

INCINERAÇÃO DE GASES E VAPORES







Mecanismo

A combustão, que é o processo utilizado na incineração, transforma os gases e vapores combustíveis em dióxido de carbono e vapor de água, no caso de combustão completa. A incineração também pode ser utilizada para a oxidação de compostos inorgânicos como por exemplo o gás sulfídrico (H_2S), que é um gás de odor desagradável, transformando-o em dióxido de enxofre e vapor de água. Neste caso temos 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.

A combustão também pode ser utilizada na redução das emissões de monóxido de carbono e hidrocarbonetos em automóveis, pelo uso de combustores catalíticos ou térmicos.

Tipos

Três tipos básicos de equipamentos são utilizados para a incineração de gases e vapores, quais sejam:

- Incinerador de chama direta (incinerador térmico)
- Incinerador catalítico
- "Flare" ou tochas (incineração auto-sustentável)

O incinerador térmico ou de chama direta consiste basicamente em uma câmara de combustão onde os gases ou vapores a serem queimados entram em contato com os gases quentes provenientes da queima de um combustível auxiliar

A incineração em uma câmara de combustão já existente, na qual existe um outro uso principal, como é o caso da utilização de câmaras de combustão de caldeiras enquadra-se como incinerador de chama direta.

O incinerador catalítico consiste basicamente de uma câmara que contém o catalisador, num suporte cerâmico usualmente, que promoverá a oxidação do poluente. A incineração catalítica necessita temperaturas mais baixas quando comparada com a incineração com chama direta, mas na maioria dos casos há necessidade de câmara de pré-aquecimento.

O catalisador aumenta a velocidade da reação e, teoricamente, não é modificado pelo processo de combustão. A combustão catalítica ocorre na superfície do catalisador, sem chama.

Os elementos que tem sido utilizados como catalisadores são metais e óxidos metálicos da família dos metais nobres, como a platina, o paládio e o rutênio e ligas de metais nobres. Como a catálise é um fenômeno de superfície, pequenas quantidades de catalisador são suportadas por um meio expandido, tal como a alumina, de tal modo que seja conseguida uma grande área superficial.

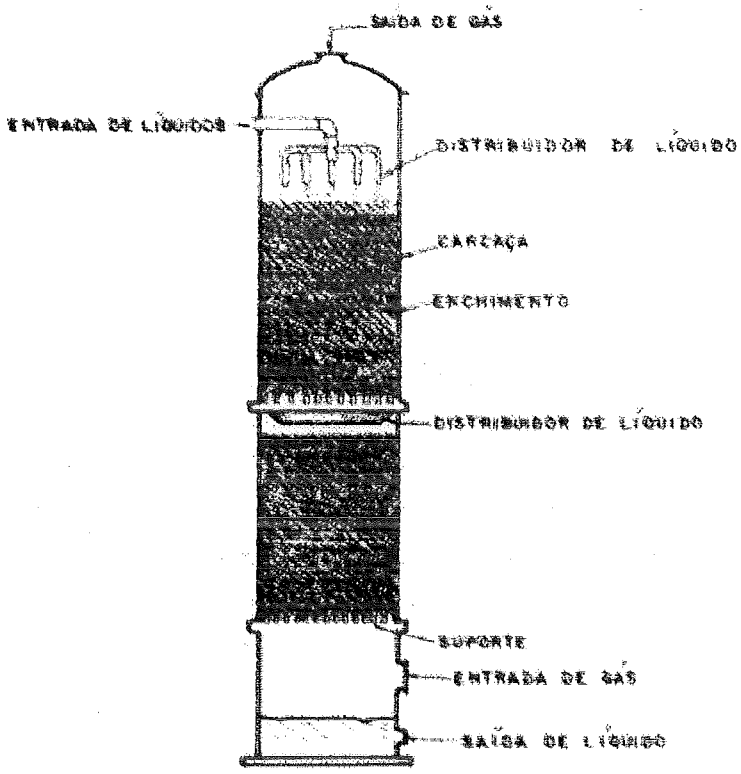
Temperaturas de operação recomendadas para incineradores de chama direta (incineradores térmicos)

FONTE	TEMPERATURA RECOMENDADA (°C)
controle de solventes	700 - 815
defumação	650 a 750
cozimento de verniz	650 a 750
cura de plastisol	650 - 760
digestão de matéria animal	650 a 750
fumaça de óleo e graxa	650 - 760
secagem de tintas	650 - 815
torrefação de café	650 - 815
fritura de gordura	650 a 750

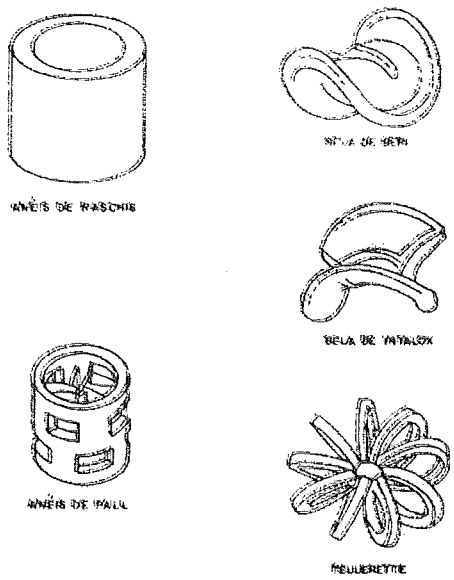
A temperatura na entrada do leito catalisador está usualmente na faixa de 340°c a 540°c. A eficiência do incinerador catalítico deteriora com o tempo de uso e portanto, deve ser feita a reposição periódica do catalisador ou sua regeneração. Essa reposição varia largamente, desde alguns meses até vários anos. Em adição, a performance do catalisador é seriamente afetada por materiais que o envenenam, como por exemplo mercúrio, arsênio, zinco e chumbo. Substâncias que entopem o catalisador, tais como resinas, devem ser evitadas.

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. Como desvantagem podemos citar a eficiência geralmente mais baixa e o problema da disponibilidade do catalisador no mercado interno.

ABSORÇÃO



Torre de Enchimento



Tipos de Enchimentos

Princípio de Funcionamento e Tipos

A absorção é uma transferência de massa (poluentes) da fase gasosa para a fase líquida (absorvente). Os absorvedores podem também ser chamados de lavadores de gases.

Os absorvedores usualmente utilizados são as torres de enchimento e de pratos, lavador de sprays e de imapctação. Na prática qualquer tipo de lavador pode ser utilizado como absorvedor, sendo a eficiência funçào do projeto. As torres de enchimento promovem um ótimo contato entre o filme líquido e os gses.

Usos Típicos

Os usos típicos da absorção são o controle do dióxido de enxofre (SO_2), gás sulfídrico (H_2S), gás clorídrico (HCl), cloro (Cl_2), amônia (NH_3), gás fluorídrico (HF). líquido absorvente mais comum é a água, que é utilizada para HCl, NH_3 e HF.

No caso de absorção de dióxido de enxofre são utilizadas substancias alcalinas, principalmente solução de soda cáustica, suspensão aquosa de carbonato de cálcio ou cal, e solução amoniacal.

O sistema chamado denominado "duplo alcali" processa a reação com soda cáustica, aproveitando a alta reatividade da soda com o SO_2, e em seguida recupera a soda

cáustica reagindo o efluente com cal, diminuindo portanto o consumo de soda, que é mais cara que a cal.

O sistema de controle de SO_2 tipo úmido/seco, que utiliza uma torre (*spray-dryer*) onde se processa a atomização do líquido absorvente alcalino (carbonato de sódio por exemplo), que entra em contato com os gases quentes contendo SO_2, reagindo formando um sal e cristalizando em sequência, podendo então ser coletado a seco por um precipitador eletrostático ou filtro-manga. No Estado de São Paulo, existem vários sistemas desse tipo, instalados em indústrias de produção de vidro. Uma grande vantagem desse sistema é que a coleta é feita a seco, inexistindo efluente líquido, e o sólido coletado pode ser reutilizado em outras indústrias, ou mesmo no próprio processo de produção de vidro, além do que esse sistema controla também o material particulado emitido pelo forno de vidro.

No caso de controle de SO_2 com solução amoniacal, experiência na Região Metropolitana de São Paulo mostrou que o efluente gerado podia se vendido para indústrias de fertilizante, como fonte de nitrogênio e enxofre.

Os gases e vapores orgânicos também podem ser tratados por absorção mas necessitam de liquido absorvente especial, do tipo orgânico, pois em geral não são solúveis em água. Neste caso o uso da absorção é bastante limitada, requerendo testes específicos. Quando a absorção é feita pela solubilidade do gás no líquido, esta denomina-se de Absorção Física. No caso de necessitar de um reagente, é denominada de Absorção com Reação Química.

Os enchimentos das torres são utilizados para aumentar a área disponível para transferência da massa. No entanto, podem se tornar em ponto de incrustação e entupimentos. No caso de torres de pratos o contato é feito através dos borbulhadores. No caso do lavador-venturi ou lavador tipo spray, o contato entre gás e líquido é feito através da superfície das gotas formadas sendo recomendadas somente para gases com boa solubilidade ou boa reatividade no líquido absorvente escolhido.

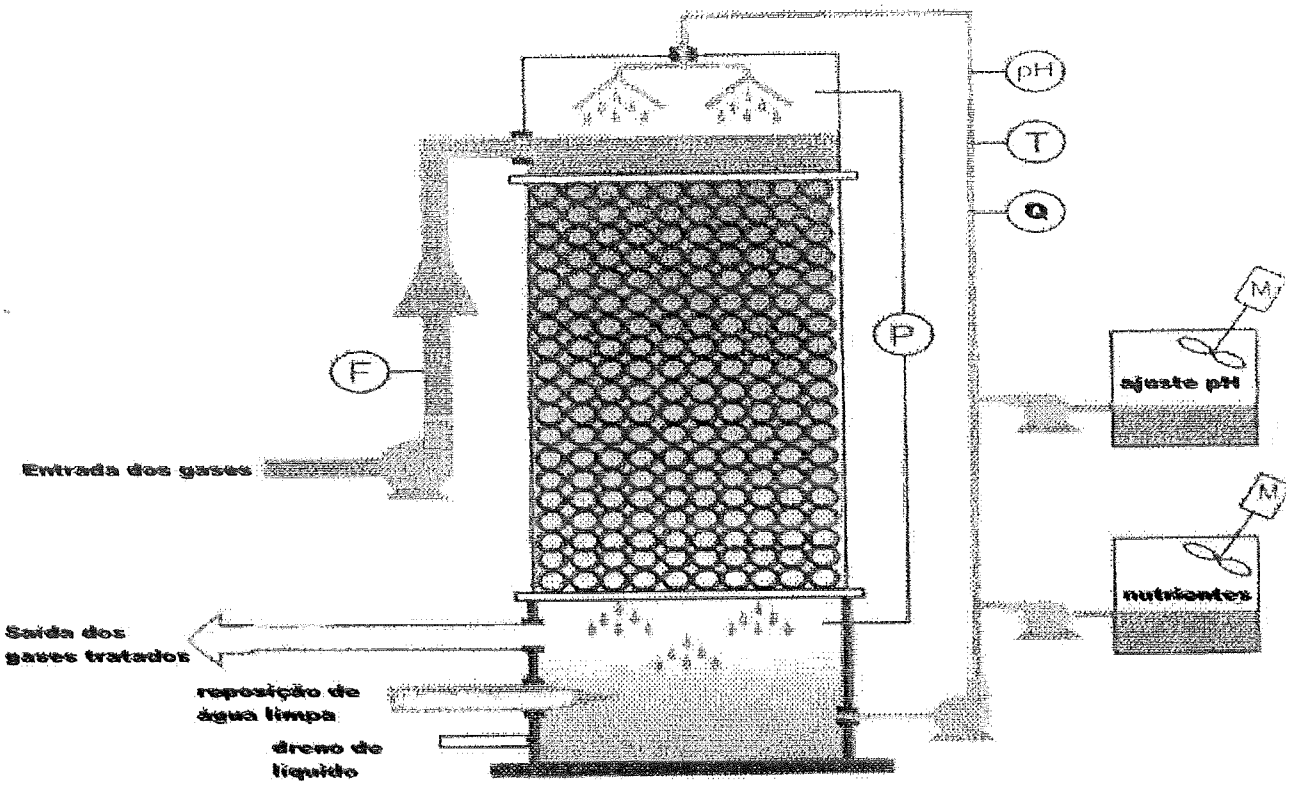
O projeto de uma torre de enchimento para absorção física inicia-se com a seleção do líquido absorvente,. Em seguida, deve-se obter os dados de equilíbrio do poluente versus líquido absorvente. Segue-se a seleção do tipo de enchimento, sendo usual os anéis Rashig ou anéis de Pall. Determina-se a vazão de líquido a ser utilizada, com base na Curva de Equilíbrio, na vazão de gases a serem tratados e na eficiência de controle necessária, para atender a emissão permitida. Dimensiona-se então o diâmetro da torre, com base em características hidráulicas, para não ocorrer o fenômeno de inundação (*flooding*) e condição de alta perda de carga (*loading*). Deve-se determinar então a altura do enchimento (Z). Em geral considera-se a altura total do enchimento como sendo a altura de uma unidade de transferência de massa (H_{og} ou H_{ol}) multiplicada pelo número de unidades de transferências necessárias para atingir a eficiência desejada (N_{og} ou N_{ol}). Para exemplo desse cálculo, sugerimos consultar bibliografia específica como o Air Pollution Engineering Manual (Danielson, 1973 e Davis, 2000).

Uma forma mais confiável de se dimensionar uma torre de absorção é pela obtenção de dados experimentais para o caso específico, determinando-se o coeficiente de transferência de massa numa unidade piloto.

Eficiência de Remoção: A eficiência de remoção (coleta ou controle) do poluente é função do projeto e das condições de operação e de manutenção do sistema. Em geral as eficiências práticas estão na faixa de 70 a 95%.

BIOFILTRAGEM

- TRATAMENTO DE GASES E VAPORES POR AÇÃO MICROBIOLOGICA
- TÉCNICA RECENTE E AINDA EM DESENVOLVIMENTO, EM GERAL PARA CONCENTRAÇÕES BAIXAS
- EXEMPLO DE MATERIAIS DO LEITO:
  - COMPOSTO DE LIXO
  - CAVACOS DE MADEIRA
  - COMPOSTO DE LIXO E TERRA DIATOMÁCEA
  - COMPOSTO DE LIXO E CARVÃO ATIVADO GRANULAR
  - MATERIAIS SINTÉTICOS
- EFICIÊNCIA VARIÁVEL, EM GERAL MENOR QUE 90%
- PARÂMETROS IMPORTANTES: TEMPERATURA, pH E UMIDADE
- ALGUNS POLUENTES QUE TEM SIDO TRATADOS COM BIOFILTRAGEM:
  - ODORES DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO E DE USINAS DE COMPOSTAGEM
  - SOLVENTES ORGÂNICOS (TOLUOL, XILOL)
  - GÁS SULFÍDRICO (H_2S)
  - VAPORES DE ETANOL E DE METANOL
- TEMPO DE RESIDÊNCIA: experimental
- VELOCIDADE SUPERFICIAL NO LEITO BEM BAIXA: experimental
- IMPORTANTE PESQUISAR TRABALHOS PUBLICADOS SOBRE O ASSUNTO ANTES DE SE DECIDIR PELA UTILIZAÇÃO DESTA TÉCNICA.



BIOFILTRO

SELEÇÃO DE SISTEMAS DE CONTROLE DE POLUIÇÃO DE AR

Introdução

A seleção (escolha) do equipamento de controle de poluição de ar a ser utilizado deve ser precedida de análise de viabilidade técnica, econômica e de outros fatores específicos para a fonte (indústria) em questão. Essa escolha depende de vários fatores, entre os quais o tipo e a natureza dos poluentes, eficiência de controle desejada, condições locais e custo.

Custo Anualizado

Para a determinação do custo total anualizado de sistemas de controle de poluição do ar utilizaremos o método do Custo Anual Equivalente, com taxa mínima de atratividade, acrescido dos custos de operação e de manutenção. Considerando-se um valor residual de 10% ao fim da vida útil do sistema tem-se:

$$CTSA = 0{,}9 \,.\, CS \,.\, \left[\frac{i.(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}\right] + 0{,}1 \,.\, CS \,.\, i + COA + CMA$$

Sendo:

CTSA = Custo total anual do sistema
CS = Capital investido para a implantação do sistema
i = taxa de atratividade
n = vida útil do sistema
0,1 CS = valor residual ao fim da vida útil do sistema (10% de valor residual)
COA = Custo de operação anual
CMA = Custo de manutenção anual

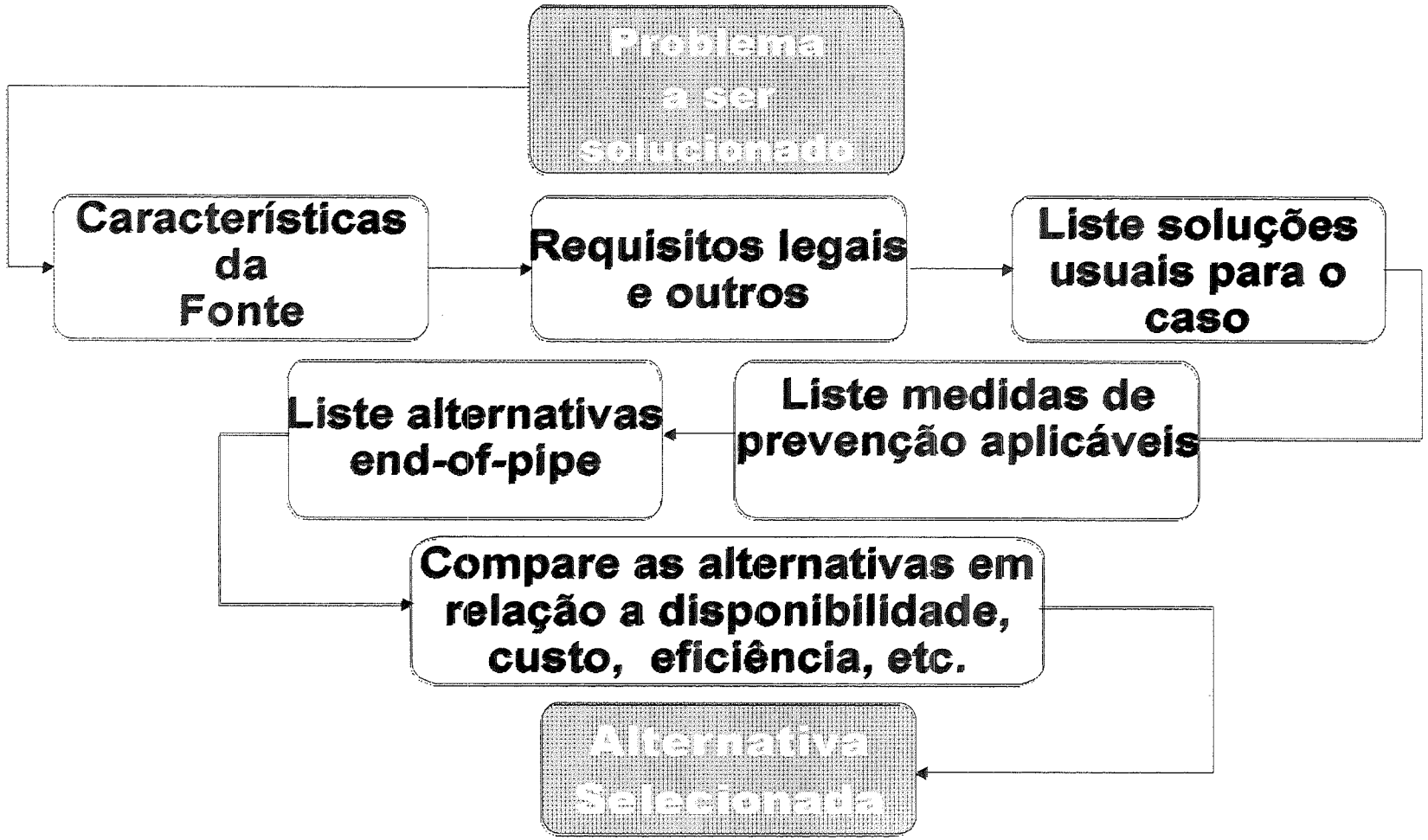
Para taxa de atratividade de 10% (i = 0,1) e n = 10 anos:

$$\left[\frac{i.(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}\right] = 0{,}1627$$

e CTSA = 0,9 x CS x 0,1627 + 0,1 x CS x 0,1 + COA + CMA
Para taxa de atratividade de 10% (i = 0,1) e n = 6 anos:

$$\left[\frac{i.(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}\right] = 0{,}2296$$

e CTSA = 0,9 x CS x 0,2296 + 0,1 x CS x 0,1 + COA + CMA



Fluxograma de eventos para seleção do Sistema de Controle de Poluição do Ar

EXEMPLO DE CUSTO DE IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR (US$) (1)

ÍTENS DE CUSTOS (1)	LAVADOR VENTURI	FILTRO DE MANGAS COM TROCADOR DE CALOR	FILTRO DE MANGAS COM DILUIÇÃO COM AR AMBIENTE
01.Equipamento	125.991	72.608	(2) 600.271
.Torre de condicionamento	50.396		
02.Equipamentos auxiliares			
.Ventiladores	38.209	35.315	
.Motores	9.492		
.Bombas	8.973		
03.Dutos	109.284	90.173	
04.Coifas	25.033	70.344	
05.Peças e ferragens			
.Registros e Válvulas	5.061		
.Instrumento	452		
.Estruturas		56.952	
.Interligação pneumática		6.751	9.705
06.Material Elétrico		38.163	
.Transformadores	7.173	3.814	5.781
.Painéis	6.329		
.Fios, Cabos, Disjuntor	14.388	7.173	28.776
.Mão de Obra	9.705	4.873	19.409
07.Trocador de calor		132.851	
.Pré-separador		17.384	
08.Material Hidráulico	4.486		
.Filtro prensa	26.371		
09.Obras civis	30.357	61.693	
10. Montagem Mecânica	26.534		
11.Fretes seguros	9.358		
12.Imprevistos	25.380	29.567	32.712
TOTAL	532.972	627.661	696.654

(1) Data base: novembro/82

(2) Valor incluindo equipamentos auxiliares, dutos, coifas obras civis, montagem, fretes e seguros

COMPARAÇÃO ENTRE CUSTOS ANUALIZADOS DE SISTEMAS DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR (US$)*

ÍTENS	LAVADOR VENTURI	FILTRO DE MANGAS COM TROCADOR DE CALOR	FILTRO DE MANGAS COM DILUIÇÃO COM AR AMBIENTE
1. Investimento total (a)	586.269	690.427	766.319
2. Custo da capital (b)	127.221	108.190	120.082
3. Custo de operação	94.139	37.392	49.574
4. Custo de manutenção	19.802	20.017	26.755
5.CUSTO TOTAL ANUAL	241.162	165.599	196.411

*Data-base: nov/82
(a) Investimento total considerando aquisição e instalação.
(b) Vida últil estimada para equipamentos de controle:
> filtro de tecido: 10 anos
> lavador venturi: 6 anos.
Taxa de atratividade de 10% ao ano
No final da vida útil o sistema tem valor residual de 10%

COMPARAÇÃO ECONÔMICA ENTRE ALTERNATIVAS DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR, PARA CALDEIRA A ÓLEO (US$)

ÍTEM	MUDANÇA PARA GÁS NATURAL	LAVADOR VENTURI + ADAPTAÇÃO PARA ABSORÇÃO DE SO_2 COM SODA	MUDANÇA PARA ÓLEO BTE + LAVADOR VENTURI
1. Investimento(a)			
- troca de queimador	90.000	-	-
- rede de gás	10.000	-	-
- painel de controle	35.000	-	-
- equip. controle de poluição	-	120.000	90.000
Sub-total	135.000	120.000	90.000
A.Investimento anualizado (b)	21.124	25.998	19.498
2. Custo de operação			
- combustível	554.112	354.632	443.290
- soda cáustica	-	143.919	-
- água	-	11.439	11.439
- energia elétrica	-	27.518	27.518
- tratamento do efluente	-	8.255	4.128
Sub-total	554.112	545.763	486.375
B.Custo de operação anual	554.112	545.763	486.375
3.Custo de manutenção			
-10% do investimento	-	12.000	11.000
C.Custo de manutenção anual	-	12.000	11.000
CUSTO TOTAL ANUALIZADO (A+B+C)	575.236	583.761	516.873

(a) Investimento total considerando aquisição e instalação.
(b) Vida últil estimada: - alterações na caldeira: 10 anos - lavador venturi: 6 anos. Taxa de atratividade de 10% ao ano.
No final da vida útil o sistema tem valor residual de 10%
Dados de 1996

BIBLIOGRAFIA

1. BUONICORE, A.J. & DAVIS, W.T. Air pollution engineering manual. Pittsburgh, Air and Waste Management Association (AWMA), 1992.

2. BUONICORE, A.J. e THEODORE, L. Industrial control equipments for gaseous pollutants. Cleveland, CRC Press, 1975.

3. CALVERT, S. e ENGLUND, H.M. Handbook of air pollution technology. New York, John Wiley & Sons, 1984.

4. CALVERT, S. et al. Wet system study, volume I: Scrubber handbook. Riverside, Califórnia, APT, Inc.1972.

5. DANIELSON, J.A. (ed.). Air pollution engineering manual. Washington, U.S. Environmental Protection Agency, 1973.Publicação AP-40.

6. HESKETH, H.E. Air pollution control. Ann Arbor, Ann Arbor Science, 1981.

7. MACINTYRE, A J. Ventilação industrial e controle da poluição. Rio de Janeiro, Editora Guanabara, 1990.

8. MESQUITA, A.L.S.; GUIMARÃES, F. A.; NEFUSSI, N. Engenharia de ventilação industrial. São Paulo, CETESB, 1988.

9. THEODORE, L. e BUONICORE, A.J. Industrial air pollution control equipments for particulates. Cleveland, CRC Press, 1976.

10. U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Compilation of air pollutant emission factors. Washington DC, USEPA. Publicação AP-42.

11. DAVIS, W.T. Air pollution engineering manual. Pittsburgh, Air and Waste Management Association (AWMA), 2000 (2ª edição)

12. Catálogos da Filtros Renner, Nordifa, Thermo e