



CETESB

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

CETESB - CIA. DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL
BIBLIOTECA Prof. Dr. Lucas Nogueira Garcez
Av. Prof. Frederico Hermann Junior, 345 - Pinheiros
05489-900 - SÃO PAULO - BRASIL

SELEÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR

87
As79s(RCET)
019768



09330



019768

SÃO PAULO
1997

Coordenação Técnica

João Vicente de Assunção
Engenheiro

Docentes

João Vicente de Assunção
Roberto Kenji Suhara
Engenheiros

Diagramação

Paulo Celso dos Reis
Setor de Multimídia

Revisão ortográfica

Sônia Regina K. Palombo
Bióloga

87/As79s(RCET)/019768

099330

Selecao de equipamentos de controle de pol...

Este material destina-se ao uso exclusivo dos participantes dos Cursos e Treinamentos Práticos Especializados, sendo expressamente proibida a sua reprodução total ou parcial, por quaisquer meios, sem a autorização da CETESB — Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental.

SUMÁRIO

Parte I

INTRODUÇÃO AO CONTROLE DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

1.	Introdução	1
2.	A atmosfera	2
3.	Poluição do ar — Definição e níveis de referência	3
4.	Aspectos históricos	4
5.	Principais poluentes atmosféricos	8
6.	Fontes de poluição do ar	8
7.	Dispersão de poluentes na atmosfera	10
8.	Efeitos da poluição do ar	13
8.1.	Efeitos relacionados à saúde	14
8.1.1.	Efeitos à saúde pelo monóxido de carbono (CO)	14
8.1.2.	Efeitos à saúde pelo dióxido de enxofre (SO ₂)	15
8.1.3.	Efeitos à saúde pelo dióxido de nitrogênio (NO ₂)	16
8.1.4.	Efeitos à saúde por hidrocarbonetos e outros compostos orgânicos voláteis	16
8.1.5.	Efeitos à saúde pelo ozônio (O ₃) e outros oxidantes fotoquímicos	17
8.1.6.	Efeitos à saúde por material particulado (MP)	17
8.1.7.	Chumbo	18
8.2.	Efeitos da poluição do ar sobre os materiais	18
8.3.	Efeitos da poluição do ar sobre a vegetação	19
8.4.	Efeitos globais da poluição do ar	20
8.4.1.	Chuva ácida	20
8.4.2.	Redução da camada de ozônio	21
8.4.3.	Efeito estufa	22
8.5.	Repercussões econômicas da poluição do ar	23
9.	Controle da poluição do ar	24
9.1.	Medidas indiretas	24
9.2.	Medidas diretas — Retenção dos poluentes após geração	26
9.3.	Equipamentos de controle de poluição do ar	28
9.3.1.	Eficiência e mecanismos de coleta	28
9.3.2.	Câmara de sedimentação gravitacional	32
9.3.3.	Ciclones	33
9.3.4.	Filtro de tecido	34
9.3.5.	Lavadores (<i>scrubbers</i>)	42
9.3.6.	Precipitadores eletrostáticos	49
9.4.	Equipamentos de controle de gases e vapores	55
9.4.1.	Mecanismos de coleta	55
9.4.2.	Adsorventes	55
9.4.3.	Incineradores	62
	Parâmetros básicos	64
9.4.4.	Absorvedores	68
10.	Os veículos automotores e a poluição do ar	71

11.	Legislação referente à poluição do ar	72
12.	Programas de controle e suas características	73
12.1.	Nível federal	73
12.1.1.	Programa PROCONVE	73
12.1.2.	Programa PRONAR	73
12.2.	Nível estadual	74
12.3.	Programas de intervenção em situações de emergência	75
13.	Participação da sociedade	75
14.	Áreas críticas e ações desenvolvidas — Exemplos	76
14.1.	Plano de controle de dióxido de enxofre — Região Metropolitana de São Paulo	76
14.2.	Cubatão	76

Parte 2

SELEÇÃO DE SISTEMAS DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR

1.	Introdução	79
2.	Fatores envolvidos	79
2.1.	Características do problema	79
2.2.	Possíveis soluções	82
2.3.	Aspectos econômicos de cada alternativa	83
3.	Vantagens e desvantagens das alternativas	84
3.1.	Câmara de sedimentação gravitacional	84
3.2.	Coletores centrífugos secos (ciclones)	84
3.3.	Filtro-manga	85
3.4.	Lavador para coleta de partículas	86
3.5.	Precipitador eletrostático	87
3.6.	Absorvedor de enchimento e de pratos	88
3.7.	Adsorvedores	89
3.8.	Incineradores de gás	89
3.9.	Condensação	90
4.	Custo do equipamento de controle de poluição do ar	90
	Anualização de custos	91

Parte 3

SEQUÊNCIA SUGERIDA PARA A SELEÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DE SISTEMA DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR

1.	O problema e a posição da empresa	93
2.	Características da emissão	93
3.	Redução necessária	93
4.	Possíveis soluções	93
5.	Seleção preliminar	94
6.	Análise econômica	94
7.	Comparação final	94

Parte 4

FATORES DE EMISSÃO — FUNDIÇÃO DE FERRO CINZENTO

1. Descrição do processo	95
2. Emissões	95
Referências bibliográficas	97
Bibliografia básica	100

Parte 1

INTRODUÇÃO AO CONTROLE DA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

1. INTRODUÇÃO

A poluição do ar é um fenômeno decorrente principalmente da atividade humana em vários aspectos, dentre os quais destacamos: o rápido crescimento populacional, industrial e econômico; a concentração populacional e industrial; os hábitos da população e o grau de controle ou seja, as medidas adotadas para o controle da poluição.

Apesar de já ser sentida há muito tempo, foi no século XX, principalmente na sua segunda metade, que a poluição do ar atingiu papel de destaque e de preocupação junto à população em geral, junto à comunidade técnico-científica e junto aos governantes.

Neste século ocorreram grandes inovações tecnológicas com rápida industrialização que, juntamente com a explosão demográfica ocorrida, fizeram com que a poluição do ar atingisse este papel de destaque, consequência do uso intensivo do petróleo nas indústrias e carvão nas termoeletricas; do transporte automotivo, o qual se constitui atualmente na grande fonte de poluição atmosférica dos centros urbanos; do transporte aéreo e de processos industriais poluidores. O grande desenvolvimento da indústria química, com milhares de produtos, contribuiu para o aumento dos riscos para a saúde da população e para o meio ambiente em geral.

Nossos três recursos naturais básicos — cerca de 149 milhões de quilômetros quadrados de superfície sólida, 361 milhões de quilômetros quadrados de superfície líquida, e cerca de 5,7 milhões de toneladas de ar atmosférico — sempre foram capazes de diluir as concentrações aceitáveis todas as substâncias neles lançadas por processos naturais normais, tais como evaporação em geral, ventos e tormentas, decomposição de vegetais e animais, e incêndios. Contudo, as emissões antropogênicas começam a ameaçar nosso planeta pelo esgotamento desta capacidade de autodepuração, conforme já é notado para vários poluentes, dentre os quais merece destaque o dióxido de carbono, cuja concentração, a nível global aumentou em cerca de 20% neste século, dando origem à preocupação com o efeito estufa.

A decisão do ser humano de viver cada vez mais nos centros urbanos restringe o volume de ar disponível por habitante nessas regiões, além de aumentar a quantidade de resíduos nele lançados, aumentando os níveis da poluição do ar.

Tais fatos, associados à não solução concomitante dos problemas decorrentes do atendimento dessas necessidades naturais ou criadas, levou-nos aos grandes desafios que enfrentamos atualmente. Levando em consideração que cada um dos recursos naturais disponíveis — ar, água e solo — possui capacidades finitas de assimilação, nossas chances de uma boa qualidade de vida resumem-se em: minimizar a geração de resíduos; definir e aplicar formas corretas de tratamento e de disposição dos resíduos gerados; desconcentrar os grupos humanos e suas atividades econômicas poluidoras, de forma a ganhar tempo e espaço para a sua autodepuração, o que, em última análise, significa mudanças no estilo de vida da sociedade e da sua relação com a natureza.

Devemos considerar também que o desenvolvimento da ciência e as conquistas tecnológicas têm permitido uma sobrevida cada vez maior das pessoas, como, por exemplo, os transplantes de órgãos e as operações cardíacas, bem como nos conduzem a condições de maior conforto, criando microclimas

artificiais e possibilitando a conservação de alimentos, como é o caso do desenvolvimento dos sistemas de refrigeração e de ar condicionado.

É um contra-senso, mas é isto que vem ocorrendo, de um lado estamos degradando a qualidade do nosso meio ambiente, expondo-nos cada vez mais a doenças que reduzem a nossa vida e, ao mesmo tempo, realizando desenvolvimentos que nos conduzem ao aumento da vida média das pessoas.

Felizmente os desenvolvimentos tecnológicos vêm sofrendo alterações, pensando-se atualmente cada vez mais em submeter os novos processos e produtos a análises de custo/benefício, como a "Análise do Ciclo de Vida do Produto", dentro da filosofia de se ter processos e produtos de menor impacto ambiental (Tecnologias Limpas).

2.3.1 A ATMOSFERA

Atmosfera é a denominação dada à camada de gases que envolve a Terra que se estende até a altitude de 9.600 quilômetros e que é constituída principalmente de nitrogênio (78%) e oxigênio (20,9%).

Metade da massa da atmosfera está contida dentro da altitude de 5 quilômetros e 99% dela está contida dentro da altitude de 30 quilômetros.

A densidade e a pressão da atmosfera diminuem com a altitude, sendo que a sua temperatura varia para mais ou para menos dependendo da altitude considerada.

O maior interesse do aspecto poluição do ar estava, até recentemente, relacionado com a troposfera, a camada da atmosfera que vai do solo até a altitude de cerca de 12 quilômetros (10 km sobre os pólos e 15 km sobre o equador). Mais recentemente, passou a ter interesse a ação de emissões antropogênicas sobre a estratosfera, que é a camada compreendida entre cerca de 12 e 50 quilômetros de altitude. Este interesse é principalmente em relação à camada de ozônio nela contida, que serve de filtro de raios ultravioletas, protegendo a Terra de níveis indesejáveis dessas radiações.

A temperatura na troposfera, na sua condição normal, decresce com a altitude, fato este importante para a diluição das substâncias lançadas no ar, uma vez que essa condição favorece a ascensão da poluição, ou seja, propicia uma melhor condição de dispersão na atmosfera.

Processos naturais podem alterar esta condição, reduzindo ou aumentando a taxa de decréscimo, chegando mesmo a invertê-lo, em geral por pouco tempo (algumas horas), ocasionando o fenômeno denominado inversão térmica, muito prejudicial à dispersão dos poluentes.

A atmosfera seca é constituída por 78,09% em volume de nitrogênio, 20,94% de oxigênio, 0,93% de argônio, 0,0345% de dióxido de carbono (gás carbônico) e por vários outros gases em pequenas concentrações. Várias substâncias naturais ou artificiais, como por exemplo os CFCs (clorofluorcarbonos) estão se concentrando na atmosfera, modificando esta composição básica, mas sem alterar a predominância do nitrogênio e do oxigênio. A atmosfera contém quantidades bastante variáveis de vapor de água, dependendo do local, hora, estação do ano, etc., chegando a 0,02% em volume nas regiões áridas e 4% em regiões equatoriais úmidas.

A atmosfera contém também partículas sólidas e líquidas em suspensão (aerossóis), de composição química e concentração variáveis e inclusive matéria viva (pólen, microorganismos, partes de insetos, etc.).

As unidades usualmente utilizadas para expressar a concentração de gases na atmosfera são o ppm, partes da substância por milhão de partes de ar, e o $\mu\text{g}/\text{m}^3$, micrograma da substância por metro cúbico de ar. A conversão de uma unidade para a outra pode ser feita pela seguinte fórmula, considerando-se a temperatura do ar de 25°C e a pressão barométrica de 1 atmosfera (760 mm de Hg):

$$C (\text{mg}/\text{m}^3) = 40,9 \cdot M \cdot C (\text{ppm em volume})$$

Sendo M a massa molecular do gás.

3. POLUIÇÃO DO AR — DEFINIÇÃO E NÍVEIS DE REFERÊNCIA

A poluição do ar pode ser definida como o resultado da alteração das características físicas, químicas ou biológicas normais da atmosfera, de forma a causar danos ao ser humano, à fauna, à flora, aos materiais ou restringir o pleno uso e gozo da propriedade, ou afetar negativamente o bem-estar da população.

TABELA 2.1. — COMPOSIÇÃO TÍPICA DOS PRINCIPAIS GASES DA ATMOSFERA SECA, AO NÍVEL DO MAR

Gás	Concentração (%)	Concentração (ppm)	Concentração ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Nitrogênio (N_2)	78,084	780.840	
Oxigênio (O_2)	20,946	209.460	
Argônio (Ar)	0,934	9.340	
Dióxido de carbono (CO_2)	0,0345	345	620.862
Neônio (Ne)	0,0018	18	14.856
Hélio (He)	0,00052	5,2	851
Metano (CH_4)	0,00013	1,3	850
Kriptônio (Kr)	0,00011	1,1	3.770
Óxido Nitroso	0,00005	0,5	900
Hidrogênio (H_2)	0,00005	0,5	41
Monóxido de carbono (CO)	0,00001	0,1	115
Xenônio (Xe)	0,000008	0,08	430
Ozônio (O_3)	0,0000025	0,025	49

Portanto, a poluição ocorre quando a alteração 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 foram estabelecidos pela primeira vez em 1976 através da Portaria 231/76 do Ministério do Interior, os quais se basearam em padrões internacionais e recomendações da Organização Mundial da Saúde, discutidos em *Workshop* realizado em São Paulo em 1976.

Esta portaria foi revogada em 1990 e substituída pela Resolução CONAMA nº 3 de 28/6/1990, que estabeleceu os novos padrões, válidos para todo o território nacional. Os poluentes considerados foram: partículas totais em suspensão (PTS); dióxido de enxofre (SO₂); monóxido de carbono (CO); ozônio (O₃); fumaça; partículas inaláveis e dióxido de nitrogênio (NO₂). 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, bem como os Métodos de Referência a serem utilizados nas medições (Tabela 3.1.).

TABELA 3.1. — PADRÕES NACIONAIS DE QUALIDADE DO AR
(RESOLUÇÃO CONAMA Nº 03 DE 28/06/1990)

<i>Poluente</i>	<i>Tempo de amostragem</i>	<i>Padrão primário (µg/m³)</i>	<i>Padrão secundário (µg/m³)</i>	<i>Método de medição de referência</i>
Partículas totais em suspensão	24 horas MGA	240 80	150 60	amostrador de grande volume
Dióxido de enxofre (SO ₂)	24 horas MAA	365 80	100 40	pararosanilina
Monóxido de carbono (CO)	1 hora 8 horas	40.000 (35 ppm) 10.000 (9 ppm)	40.000 (35 ppm) 10.000 (9 ppm)	infravermelho não dispersivo
Ozônio (O ₃)	1 hora	160	160	luminescência química
Fumaça	24 horas MAA	150 60	100 40	refletância
Partículas inaláveis	24 horas MAA	150 50	150 50	separação inercial/ filtração
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	1 hora MAA	320 100	190 100	luminescência química
<i>Nota:</i> MGA = média geométrica anual; MAA = média aritmética anual				

No caso de poluentes altamente tóxicos (“perigosos”), causadores de mutagenicidade, tumores cancerígenos, como o amianto (asbestos), o benzeno e o cloreto de vinila, é usual a utilização do conceito de risco associado a qualquer concentração do poluente, por menor que seja esta concentração, não sendo usual o estabelecimento de Padrões de Qualidade do Ar para estes poluentes.

4. ASPECTOS HISTÓRICOS

Vários eventos de graves consequências, ocorridos principalmente neste século, demonstraram que a poluição do ar constitui-se numa ameaça grave à saúde pública. Tais eventos, denominados de Episódios Agudos de Poluição do Ar, caracterizam-se pela pequena duração, de minutos a alguns dias, e por provocarem consequências graves.

Muitos destes episódios ocorreram devido à permanência de condições desfavoráveis à dispersão dos poluentes por vários dias, como inversão térmica, ausência de chuvas, ventos calmos, aliados à emissão

continuada de poluentes e topografia desfavorável (um vale por exemplo). Alguns destes episódios ocasionaram a morte de centenas e até milhares de pessoas, como descrito a seguir.

Vale do Meuse — Bélgica, 1 a 5 de dezembro de 1930: episódio com duração de cinco dias, tendo como consequência a morte de sessenta pessoas, principalmente idosos. As fontes prováveis das emissões foram indústrias siderúrgicas, aciarias e fundições de zinco. Os poluentes causadores do problema foram principalmente o dióxido de enxofre e o material particulado. O episódio provocou congestão intensa das vias respiratórias, especialmente de pessoas idosas e de crianças. Em termos meteorológicos, a situação por ocasião do episódio era de inversão térmica, alta pressão e neblina.

Donora — Pensilvânia (USA), 26 a 31 de outubro de 1948: episódio com duração de cinco dias, tendo como consequência a morte de 18 pessoas e o adoecimento de cerca de 5.000 pessoas. A região é um vale contendo indústrias siderúrgicas e fundições de zinco. A emissão principal era de dióxido de enxofre e material particulado. A situação meteorológica durante o episódio era de inversão térmica, alta pressão e neblina. Ocorreu intensa congestão das vias respiratórias nas pessoas atingidas.

Los Angeles (USA) — década de 40: nesta década ocorreram os principais *smogs* (*smog* = *smoke* + *fog*) fotoquímicos na região de Los Angeles, devidos à reação na atmosfera de hidrocarbonetos e outros compostos orgânicos voláteis e óxidos de nitrogênio, formando os poluentes denominados de oxidantes fotoquímicos, em especial o ozônio. A principal causa desta poluição são os veículos automotores, em especial os carros a gasolina, cujos poluentes reagem na atmosfera, em presença de luz solar, e de condições desfavoráveis à dispersão dos poluentes (inversão térmica, calmaria a topografia adversa). Deve-se ressaltar que naquela década já eram colocados no mercado dos EUA mais de 4 milhões de veículos por ano, sendo Los Angeles a de maior densidade de veículos por habitante.

Poza Rica — México, 24 de novembro de 1950: episódio com duração de 25 minutos, ocasionando a morte de 22 pessoas e 320 hospitalizações de pessoas acometidas de doenças respiratórias e nervosas. A causa do episódio foi o lançamento de gás sulfídrico (H_2S) de uma refinaria de petróleo, em condições meteorológicas de inversão térmica e neblina.

Bauru — Estado de São Paulo, agosto de 1952: este episódio teve como consequência 9 óbitos e 150 casos de doença respiratória aguda do tipo obstrutivo. A causa foi o lançamento na atmosfera de poeira do processamento de mamona (*Ricinus communis*) de uma indústria local.

Houve nesta época uma reprodução experimental das crises respiratórias no Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina da USP. A paralisação do processo industrial resolveu o problema.

Londres — Inglaterra, 1952, 1957 e 1962: em dezembro de 1952 ocorreu um episódio com duração de cinco dias, tendo como consequência a ocorrência de cerca de 4.000 mortes em excesso, em relação à taxa de mortalidade normal da cidade. As mortes ocorreram principalmente na faixa etária dos idosos. Este episódio é um exemplo clássico na literatura e deveu-se à presença de altas concentrações de fumaça (material particulado) e dióxido de enxofre na atmosfera e também à presença de condições meteorológicas desfavoráveis, tais como inversão térmica, calmaria e neblina (fog), dando origem ao termo *smog londrino*.

Outros episódios agudos ocorreram em Londres, neste mesmo ano, ocasionando a morte de centenas de pessoas. Em 1957 um episódio ocasionou a morte de 800 pessoas e em 1962 outro episódio resultou na morte de 700 pessoas.

New York — USA, 24 a 30 de novembro de 1966: episódio com ocorrência de 168 mortes em excesso.

Tóquio — Japão, início da década de 70: várias situações sérias de poluição do ar ocorreram em Tóquio, fazendo com que a população reclamasse providências das autoridades, inclusive com manifestações com máscaras anti-gases.

São Paulo — Capital, 1972: ocorre o primeiro *smog* fotoquímico que se tem notícia na cidade de São Paulo, provocado principalmente por emissões de veículos, inversão térmica e ausência de vento e de chuvas.

Santo André — São Paulo, 1976: no segundo semestre de 1976 ocorreu um episódio crítico de poluição do ar na cidade de Santo André, região do ABC, que perdurou por uma semana, ocasionado pela ocorrência de inversão térmica, ausência de vento e de chuva, aliados à presença de altas concentrações de dióxido de enxofre e material particulado emitidos pelas indústrias da região em especial as siderúrgicas e fundições. Não se tem informações sobre possíveis mortes ocasionadas pelo episódio mas, foi verificado na ocasião um aumento significativo de hospitalizações no período, principalmente por doenças e problemas respiratórios.

Cubatão — São Paulo, década de 80: parque industrial de grande porte registra altos níveis de poluição de ar, principalmente material particulado. O Estado de Atenção vira rotina, chegando muitas vezes ao Estado de Alerta e algumas vezes ao Estado de Emergência. O governo estadual implanta plano controle para resolver a situação.

Bhopal — Índia, março de 1984: em 12 de março de 1984 ocorreu o acidente de Bhopal, onde houve a liberação acidental de isocianato de metila, resultando na morte de cerca 2.000 pessoas.

Lago Nyos — Camarões, África — 1986: morte de 1.700 pessoas causada pela emissão natural proveniente de um lago. Supõe-se que a emissão tenha sido de gás carbônico, segundo uma equipe internacional que pesquisou o caso.

Cidade do México, janeiro-fevereiro de 1987: poluição do ar severa na Cidade do México, provocada por emissão de veículos e condições meteorológicas desfavoráveis, que entre outras consequências ocasionou a morte de milhares de pássaros (cerca de 5.000).

Os episódios acima fizeram com que a procura de soluções se fizesse de forma mais intensa. A Inglaterra é um exemplo disto. Após os episódios agudos de 1952 em Londres, as autoridades iniciaram um intenso programa de controle, sendo que, em 1956, foi promulgada a primeira Lei do Ar Limpo naquele país. Pela ação intensiva desenvolvida, a poluição de Londres foi reduzida em termos de fumaça, de 175 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ em 1958 para 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ em 1968. Nos Estados Unidos da América, a primeira Lei do Ar Limpo data de 1955.

No Japão, a poluição do ar começou a crescer bastante na década de 60, sendo que, no início da década de 70 ela se apresentava de maneira ostensiva, principalmente em Tóquio. O Japão, no entanto, agiu rapidamente para controlar esta poluição e o fez com sucesso, estando hoje com níveis de poluição do ar bastante aceitáveis e ostenta atualmente uma tecnologia altamente desenvolvida no campo.

No Brasil o problema surgiu na década de 60, na Região do ABC, pela sua rápida industrialização, principalmente em função da implantação da indústria automobilística naquela área. Foi nesta região também que surgiu o primeiro organismo de controle da poluição no Brasil, a CICPAA — Comissão Intermunicipal de Controle da Poluição das Águas e do Ar, criada em 1960, entidade mantida pelas prefeituras e indústrias da região.

Na década de 70 a poluição do ar aparece em várias regiões do Brasil, principalmente nas Regiões Metropolitanas de São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Porto Alegre, sendo então criados vários

organismos cuidar do assunto, como a SUSAM — Superintendência de Saneamento Ambiental em São Paulo (1971) e a FEEMA — Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente, no Rio de Janeiro, que trata de todas as formas de poluição ambiental.

Em 30.10.73 foi criada a SEMA --- Secretaria Especial do Meio Ambiente, ligada ao Ministério do Interior, para tratar de todos os assuntos relativos ao meio ambiente a nível nacional.

Em maio de 1975 a CETESB passa a ter poderes também para o controle da poluição do ar no Estado de São Paulo.

Em 14.08.75 foi promulgada a primeira lei federal com vistas ao controle da poluição industrial (decreto-lei 1.413). Em 31.05.76 o Governo do Estado de São Paulo aprova a sua primeira Lei Estadual de Controle da Poluição (Lei 997).

Em 1981 a Lei 6.938 estabelece a estrutura e as regras gerais da política ambiental brasileira, criando o CONAMA — Conselho Nacional de Meio Ambiente, órgão normativo e deliberativo em relação aos grandes problemas nacionais.

Em 22/2/1989 foi criado o IBAMA — Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, vinculado ao Ministério do Interior, extinguindo-se a SEMA.

Em março de 1990, foi criada Secretaria Nacional de Meio Ambiente, ligada diretamente à Presidência da República, que transformou-se em Ministério do Meio Ambiente em 19/11/92, ficando o IBAMA com a função de órgão executivo da política ambiental brasileira.

A década de 80 foi marcada por vários fatos importantes em relação à questão ambiental, tanto no aspecto positivo como negativo. No aspecto negativo podem ser citados: o problema de Cubatão; o acidente de Bhopal na Índia; a ocorrência de *smogs* em várias partes do mundo, como cidade do México, Berlim, Santiago do Chile, além do crescimento da poluição no Brasil; a ocorrência de chuvas ácidas em várias partes do globo, em especial a costa leste dos EUA e vários países da Europa; o desmatamento e as queimadas da Amazônia; o crescimento do problema do efeito estufa e a redução da camada de ozônio da estratosfera.

No aspecto positivo, tivemos, a nível mundial, uma maior preocupação com o problema da poluição por parte da ONU — Organização das Nações Unidas, como é o caso da reunião de Montreal — Canadá, em 1987, que resultou no Protocolo de Montreal que fixa metas para a redução da emissão de gases destruidores da camada de ozônio. No Brasil ocorreu maior conscientização e participação da comunidade no processo e o desenvolvimento de corpo técnico e infra-estrutura laboratorial capacitadas a lidar com o assunto, aliados ao desenvolvimento e à transferência de tecnologias para a solução do problema e a melhoria das condições ambientais de Cubatão; a maior participação da área médica em estudos toxicológicos e epidemiológicos dos efeitos da poluição; o início de estudos de efeitos da poluição na vegetação; a existência de legislação que se compara às melhores do mundo; a conscientização cada vez maior dos empresários quanto à necessidade de controlar a poluição; a existência, atualmente, de organismos de controle de poluição em praticamente todos os Estados brasileiros e finalmente, a participação cada vez maior da sociedade civil organizada na luta pela preservação ambiental que, eliminados os excessos e os interesses menores, são de fundamental importância para que as ações ambientais reflitam o pensamento da sociedade.

5. PRINCIPAIS POLUENTES ATMOSFÉRICOS

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

De acordo com a sua origem, os poluentes 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.

Os poluentes podem também ser classificados segundo a classe química em poluentes orgânicos e poluentes 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 dispersas no ar formam os chamados Aerossóis. O tamanho das partículas de interesse em poluição do ar está na faixa de 0,01 a 100 micrômetros. Para fins de comparação, o diâmetro de um fio de cabelo é da ordem de 100 micrômetros. As partículas de maior interesse para a saúde pública são as chamadas Partículas Respiráveis, ou seja, com diâmetro menor que 10 micrômetros (diâmetro aerodinâmico equivalente).

O material particulado pode ser classificado segundo método de formação como segue:

- **Poeiras:** partículas sólidas, geralmente formadas por processos de desintegração mecânica, tais como moagem, britagem, abrasão, ação dos ventos, etc. As partículas formadas são geralmente não esféricas com diâmetro equivalente em geral com predominância na faixa acima de 1 micrômetro. Exemplo: poeira de cimento; poeira de amianto (asbestos); poeira de algodão; poeira de rua.
- **Fumos:** partículas sólidas formadas por condensação ou sublimação de substâncias gasosas originadas da vaporização/sublimação de sólidos. A formação dos fumos é usualmente acompanhada de reações químicas, como por exemplo, a oxidação no caso de fumos metálicos. As partículas formadas são de pequeno tamanho, e em geral de formato mais esférico. Exemplo: fumos de chumbo; fumos de alumínio; fumos de zinco; fumos de cloreto de amônia.
- **Fumaça:** partículas principalmente sólidas usualmente da combustão de combustíveis fósseis, materiais asfálticos ou madeira. Contém fuligem, partículas líquidas e, no caso de madeira e carvão, uma fração mineral (cinzas). São caracterizadas por partículas de pequeno diâmetro.
- **Névoas:** partículas líquidas produzidas por condensação ou por dispersão de um líquido, por exemplo, por atomização. Possuem tamanho de partícula em geral maior que 5 micrômetros. As neblinas são aquelas partículas de água com tamanho entre 5 e 40 micrômetros. Exemplos: névoas de tanques de tratamento superficial (galvanoplastia); névoa de ácido sulfúrico; névoas de óleo de operações de corte de metais; névoas de pesticidas geradas nas operações de pulverização.

A Tabela 5.1. apresenta os principais poluentes atmosféricos de acordo com a classificação usual.

6. FONTES DE POLUIÇÃO DO AR

As fontes de Poluição são entendidas como qualquer processo natural ou artificial que possa liberar ou emitir substâncias para a atmosfera de forma a torná-la poluída.

As fontes naturais são caracterizadas pelas erupções vulcânicas que lançam partículas e gases para a atmosfera, como os compostos de enxofre (gás sulfídrico e dióxido de enxofre); decomposição de vegetais e animais; ressuspensão de poeira do solo e areia pelos ventos; ação biológica de microorganismos no solo; formação de metano principalmente nos pântanos (gás grisu); aerossóis marinhos; descargas elétricas na atmosfera dando origem à ozona; incêndios florestais naturais; outros processos naturais como as reações na atmosfera entre substâncias de origem natural.

Ocorrência recente em Porto Alegre (1993) mostrou que as cinzas vulcânicas podem atingir grandes distâncias e se constituir em importante fonte de poluição do ar. As cinzas de vulcão localizado no Chile caíram sobre a cidade de Porto Alegre formando camada significativa de pó sobre o solo, casas e veículos.

Entre as fontes antropogênicas estão os diversos processos e operações industriais; a queima de combustível para fins de transporte nos veículos a gasolina, a álcool a diesel ou a qualquer outro tipo de combustível; queimadas; queima de lixo ao ar livre; incineração de lixo; limpeza de roupas a seco; poeira fugitiva em geral provocada pela movimentação de veículos, principalmente em vias sem pavimentação; poeiras provenientes de demolições na construção civil e movimentações de terra em geral; comercialização e armazenamento de produtos voláteis como gasolina e solventes; equipamentos de refrigeração e ar condicionado e *sprays*.

TABELA 5.1. — CLASSIFICAÇÃO DOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS	
<i>Classificação</i>	<i>Exemplos</i>
Material particulado	Poeiras: poeira de rua, pó de pedra, pó de cerâmica. Fumos: fumos de chumbo, de alumínio, de zinco. Fumaça: fumaça da queima de óleo combustível, de óleo diesel, de carvão. Névoas: névoas ácidas, névoas alcalinas
Gases e vapores	Monóxido de carbono, gás carbônico, dióxido de enxofre, ozônio, óxidos de nitrogênio, hidrocarbonetos, amônia, cloro, gás sulfídrico.
Poluentes primários	Monóxido de carbono, dióxido de enxofre, cloro, amônia, gás sulfídrico, metano, mercaptanas.
Poluentes secundários	Ozônio (ou ozona), aldeídos, sulfatos, ácidos orgânicos, nitratos orgânicos.
Poluentes orgânicos	Hidrocarbonetos, aldeídos, ácidos orgânicos, nitratos orgânicos, partículas orgânicas.
Poluentes inorgânicos	Monóxido de carbono, gás carbônico (CO ₂), cloro, dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio, poeira mineral, névoas ácidas e alcalinas
Compostos de enxofre	SO ₂ , SO ₃ , H ₂ S, Sulfatos
Compostos nitrogenados	NO, NO ₂ , HNO ₃ , NH ₃ , Nitratos
Carbonados orgânicos	Hidrocarbonetos, aldeídos, álcoois
Compostos halogenados	HCl, HF, CFC, cloretos, fluoretos
Óxidos de carbono	Monóxido de carbono, gás carbônico

Em relação às indústrias em particular, é muito grande a gama de poluentes emitidos por diversos tipos de indústrias.

Alguns tipos de indústrias se caracterizam pela emissão principalmente de material particulado como a mineração e a indústria de minerais não metálicos, (pedreiras, cerâmica, produção de cimento) a indústria de fertilizantes, e outras se caracterizam mais pela emissão de gases e vapores como as indústrias químicas e a petroquímica. Outras indústrias emitem vários tipos de poluentes.

Um exemplo de fontes de poluição do ar e respectivos poluentes principais, para uma região urbano-industrial como a da Grande São Paulo, é mostrado na Tabela 6.1. que é o resultado do inventário de fontes de poluição do ar realizado em 1976 e sua atualização para 1992.

Comparando-se as fontes naturais e artificiais verifica-se que a quantidade de gases e vapores lançados ou formados na atmosfera por processos naturais é muitas vezes maior que a quantidade proveniente de fontes antropogênicas, conforme mostra a Tabela 6.2.

7. DISPERSÃO DE POLUENTES NA ATMOSFERA

Os poluentes lançados na atmosfera sofrem o efeito de processos complexos, sujeitos a vários fatores, que determinam a concentração do poluente no tempo e no espaço. Assim, a mesma emissão, sob as mesmas condições de lançamento no ar, pode produzir concentrações diferentes num mesmo local, dependendo das condições meteorológicas presentes. Os fatores meteorológicos que influenciam o fenômeno são, principalmente, a velocidade e direção dos ventos, o perfil vertical de temperatura, a umidade do ar, a intensidade da radiação solar e o regime de chuvas.

A topografia da região exerce papel importante no comportamento do poluentes na atmosfera. Fundos de vale são locais propícios para o aprisionamento dos poluentes, principalmente quando da ocorrência de inversões térmicas que impedem a subida dos poluentes, transformando esses locais em verdadeiras câmaras de concentração e de reação sobretudo na ocorrência do *smog* fotoquímico. A reatividade dos poluentes é importante para suas condições de transformações no ar.

As chuvas influenciam a qualidade do ar de maneira acentuada sendo um importante agente de autodepuração da atmosfera, principalmente em relação às partículas nela presentes, bem como aos gases solúveis ou reativos com a água. Não se deve esquecer no entanto que a lavagem da atmosfera significa a transposição dos poluentes para o solo e águas superficiais, podendo ocasionar efeitos deletérios, em especial às águas de chuva consideradas ácidas ("chuvas ácidas").

**TABELA 6.1. — PARTICIPAÇÃO DAS DIVERSAS FONTES
NA EMISSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS NA REGIÃO
METROPOLITANA DE SÃO PAULO EM 1976 E 1992 (%)**

<i>Fonte</i>	<i>MP 1976</i>	<i>MP 1992</i>	<i>SO_x 1976</i>	<i>SO_x 1992</i>	<i>CO 1976</i>	<i>CO 1992</i>	<i>NO_x 1976</i>	<i>NO_x 1992</i>	<i>HC 1976</i>	<i>HC 1992</i>
Processos e operações industriais	59,2	—	2,6	—	1,8	—	desp.	—	14,2	—
Queima de combustíveis em fontes estacionárias	13,3	47,8	87,3	36,2	1,3	2,2	23,5	3,4	1,1	3,0
Veículos diesel	2,3	26,4	6,5	58,5	3,4	26,8	32,6	81,7	3,8	19,1
Veículos a gasolina	5,5	9,0	3,5	5,0	90,8	45,5	41,7	7,7	71,5	50,2
Veículos a álcool	—	3,4	—	—	—	22,9	—	6,5	—	20,9
Queima de lixo ao ar livre	7,6	13	0,11	0,3	2,5	2,6	2,1	0,7	5,5	3,5
Outras fontes	12,1	—	—	—	—	—	—	—	3,8	3,3
Total (1.000 T/ano)	154	92	321	122	1.715	1.739	124	416	257	397

MP = material particulado; **SO_x** = óxidos de enxofre; **CO** = monóxido de carbono; **NO_x** = óxidos de nitrogênio; **HC** = hidrocarbonetos e demais compostos orgânicos voláteis; **desp.** = desprezível. **Outras fontes:** incluem comercialização de produtos voláteis e fontes de poeiras fugitivas (tráfego em ruas sem asfalto, construção civil e obras de pavimentação).

Fonte: CETESB

**TABELA 6.2. — COMPARAÇÃO ENTRE EMISSÕES
ATMOSFÉRICAS NATURAIS E ARTIFICIAIS**

<i>Poluente</i>	<i>Fontes antropogênicas principais</i>	<i>Fontes naturais principais</i>	<i>Emissão antrópica (10⁶ T/ano)</i>	<i>Emissão natural (10⁶ T/ano)</i>
Dióxido de enxofre (SO ₂)	Queima de combustíveis fósseis (carvão e óleo)	Vulcões; reações biogênicas	212	20
Monóxido de carbono (CO)	Veículos	Incêndios florestais; reações fotoquímicas	700	2.100
Óxidos de nitrogênio (NO e NO ₂)	Combustão	Ação bacteriana no solo; <i>lightning</i>	75 (como NO ₂)	180 (como NO ₂)
Hidrocarbonetos, exceto metano (HC)	Combustão	Processos biogênicos no solo e vegetação	40	0,02
Gás carbônico (CO ₂)	Combustão	Processos biológicos	22.000	1.000.000
Óxido nitroso (N ₂ O)	Pequenas quantidades da combustão	Processos biogênicos no solo	3	340
Amônia (NH ₃)	Tratamento de resíduos; combustão	Ação biogênica no solo	6	260
Gás sulfídrico (H ₂ S) e sulfetos orgânicos	Processos químicos; tratamento de esgoto	Vulcões; ação biológica no solo e na água	3 (como enxofre)	84 (como enxofre)

Fonte: STERN, A. C. *et al. Fundamentals of air pollution.* Academic Press, 1982.

Nota: 10⁶ T/ano = milhões de toneladas emitidas por ano.

A turbulência da atmosfera exerce um papel importante no transporte e difusão e conseqüente diluição da poluição no ar. A movimentação dos poluentes na horizontal é determinada pela turbulência mecânica provocada pelo vento na sua instabilidade direcional e de velocidade, associada às características topográficas da região. A movimentação na vertical pode ser atribuída à turbulência térmica resultante de parcelas de ar aquecido que ascende da superfície terrestre, sendo substituídas pelo ar mais frio em sentido descendente.

Pasquill dividiu as condições de estabilidade em seis classes a saber:

- **Classe A:** atmosfera extremamente instável
- **Classe B:** atmosfera instável
- **Classe C:** atmosfera ligeiramente instável
- **Classe D:** atmosfera neutra

- *Classe E*: atmosfera ligeiramente estável
- *Classe F*: atmosfera estável

As condições para a ocorrência de instabilidade são alta radiação solar e ventos de baixa velocidade. A estabilidade ocorre na ausência de radiação solar, ausência de nuvens e ventos leves. Céu nublado ou ventos fortes caracterizam a condição neutra da atmosfera.

É comum observar-se diferentes formatos das plumas (“fumaça”) que saem de uma chaminé, mesmo para a mesma condição de emissão. Isso se deve às várias condições de estabilidade da atmosfera. Os movimentos verticais de massas de ar dependem, fundamentalmente, do perfil vertical de temperatura ou seja, da variação da temperatura do ar com a altitude. Ar seco resfria-se à taxa de 1°C para cada 100 metros de subida na atmosfera (taxa adiabática seca). Quando a temperatura do ar aumenta com a altitude diz-se que há *inversão térmica*, fenômeno este de origem natural e não em decorrência da poluição do ar.

Em algumas ocasiões a temperatura do ar não varia com a altitude, condição esta que recebe a denominação de *isoterma*. Em outras ocasiões a temperatura do ar decresce mais rapidamente com a altitude do que a taxa normal. A essa condição denomina-se *condição super-adiabática*.

A pluma ao ser emitida tem tendência ascensional ditada por condições da própria emissão e pelas condições meteorológicas reinantes no local. A seguir, a pluma adquire um movimento predominantemente na horizontal, com dispersão em torno da linha de centro da pluma, caracterizando então as fases de transporte e difusão propriamente ditas.

A altura máxima que a pluma atinge na atmosfera, medida na sua linha de centro, corresponde à sua altura efetiva que é igual à altura física da chaminé mais a elevação acima da mesma, ou seja:

$$H = h + h'$$

Onde:

H = altura efetiva da pluma

h = altura física da chaminé

h' = elevação adicional da pluma

8. EFEITOS DA POLUIÇÃO DO AR

Os efeitos da poluição do ar se caracterizam tanto pela alteração de condições consideradas normais como pelo aumento de problemas já existentes. Os efeitos podem ocorrer a nível local, regional e global.

Estes efeitos podem se manifestar na saúde, no bem estar da população, na vegetação e na fauna, sobre os materiais, sobre as propriedades da atmosfera passando pela redução da visibilidade, alteração da acidez das águas da chuva (Chuva Ácida), aumento da temperatura da Terra (Efeito Estufa) e modificação da intensidade da radiação solar (aumento da radiação ultravioleta pela Diminuição da Camada de Ozônio), etc.

8.1. EFEITOS RELACIONADOS À SAÚDE

Em relação à saúde e correlatos, os efeitos vão desde o desconforto até a morte, passando pelo aumento da taxa de morbidade (doenças); aumento da procura do sistema de saúde (centros de saúde, hospitais, pronto socorros); aumento do absenteísmo ao trabalho; irritação dos olhos e das vias respiratórias; redução da capacidade pulmonar; diminuição da performance; redução da atenção; dor de cabeça; alterações motoras; alterações enzimáticas; doenças do aparelho respiratório (asma, bronquite, enfizema, edema pulmonar, pneumoconioses); danos ao sistema nervoso central; efeitos teratogênicos; alterações genéticas e câncer.

É importante ressaltar que o dano depende da dose (concentração x volume aspirado x tempo de exposição).

8.1.1. EFEITOS À SAÚDE PELO MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

O monóxido de carbono é um gás incolor, inodoro e insípido e é o poluente característico dos grandes centros urbanos. Sua fonte principal são os veículos automotores, em especial os automóveis, mas estão presentes em qualquer combustão, em maior ou menor quantidade, dependendo da qualidade da combustão. A presença de monóxido de carbono indica combustão incompleta.

Este poluente apresenta efeitos significativos somente à saúde, de acordo com os conhecimentos atuais. Seu principal efeito é a redução da habilidade do sistema circulatório transportar oxigênio, devido à sua maior afinidade pela hemoglobina do que o oxigênio (cerca de 210 vezes maior afinidade), formando a carboxihemoglobina (COHb) ao invés da oxihemoglobina, que leva oxigênio para os tecidos.

Os fumantes são os mais expostos ao monóxido de carbono. O nível de COHb neste grupo varia de 4% a 20%, com uma média de 5% a 6% para os fumantes de um maço de cigarro por dia. Os não fumantes e não expostos a este poluente, tem nível de COHb de 0,4% a 0,7%, produzido endogenamente. Pessoas fumantes expostas ao trânsito intenso de veículos, como os policiais de trânsito, chegam a apresentar o dobro de COHb no sangue em relação aos não fumantes, o mesmo ocorrendo com trabalhadores de garagens de veículos.

Para os trabalhadores em geral, exposição a concentração de 50 ppm, por oito horas normais de trabalho, com descanso, resultaria em níveis de COHb de 5% a 6%.

AÇÃO DO MONÓXIDO DE CARBONO NO SER HUMANO	
Nível de COHb no sangue (%)	Sintomas/efeitos associados
0 a 1	Nenhum
2,5	Redução da capacidade de discriminar intervalos de tempo
2,8	Início de dor por <i>angina pectoris</i> , em pacientes sob exercício físico
4,5	Aumento do tempo de reação para estímulos visuais
10	Alteração da performance na condução de veículos
10 a 20	Dor de cabeça, fadiga, tontura, perda de coordenação motora
60	Perda da consciência; morte se exposição continuada persistir

Para a população em geral, que envolve pessoas idosas, pessoas portadoras de doenças cardiorrespiratórias e crianças, o nível máximo estabelecido na legislação brasileira (Padrão de Qualidade do Ar) é de 35 ppm para 1 hora de exposição e de 9 ppm para 8 horas de exposição.

8.1.2. EFEITOS À SAÚDE PELO DIÓXIDO DE ENXOFRE (SO₂)

O dióxido de enxofre é um gás incolor, que provém principalmente da queima de combustíveis fósseis (carvão mineral, óleo combustível, óleo diesel e gasolina), que contém enxofre, o qual, na combustão, se transforma em óxidos de enxofre, sendo estes constituídos principalmente de dióxido de enxofre.

Os estudos toxicológicos têm mostrado que o SO₂ é principalmente um gás irritante das vias respiratórias. É reconhecida a sua capacidade de produzir bronco-constricção com conseqüente aumento da resistência ao fluxo de ar nos pulmões.

A relação entre doenças respiratórias e poluição do ar por dióxido de enxofre foi observada no Japão, na cidade de Isozu, sendo que, uma redução de 50% nos níveis de SO₂ de 1964 a 1968 significaram uma redução de cerca de 50% nos casos de bronquite crônica e asma bronquial, reduzindo mais ainda quando a poluição teve uma redução substancial em 1970.

Dados ingleses mostram uma correlação entre níveis de poluição do ar e casos de bronquite, conforme Tabela 8.1.

TABELA 8.1. — TAXA DE PREVALÊNCIA DE BRONQUITE, EM RELAÇÃO A NÍVEIS DE POLUIÇÃO DO AR, PADRONIZADOS POR IDADE E HÁBITO DE FUMAR, EM %		
<i>Nível de poluição do ar</i>	<i>Incidência em homens</i>	<i>Incidência em mulheres</i>
Alto	118	115
Moderado	117	97
Baixo	91	94
Muito baixo	88	95

Um estudo realizado em Cubatão por pesquisadores da Faculdade de Saúde Pública da USP, no período de 1983 a 1989, mostrou que a condição ventilatória dos pulmões nas crianças escolares estudadas tem piorado.

Quando em presença de material particulado este poluente tem seus efeitos aumentados, sendo este aumento função do tipo e da concentração do material particulado presente. Aumentos da ordem de três a quatro vezes já foram observados na presença de material particulado capaz de oxidar o dióxido de enxofre a ácido sulfúrico.

Na Região Metropolitana de São Paulo já foi constatado um aumento da taxa de mortalidade associado a períodos de altos níveis de dióxido de enxofre e material particulado, ocasionados por condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão de poluentes (inversão térmica e calmaria).

Um estudo da função ventilatória em escolares vivendo em áreas com diferentes níveis de poluição do ar, na Região Metropolitana de São Paulo, concluiu pelo aumento da resistência ao fluxo aéreo na população da área mais poluída, na qual predominava a poluição por dióxido de enxofre e material particulado.

AÇÃO DO DIÓXIDO DE ENXOFRE NO SER HUMANO		
<i>Concentração de SO₂ no ar (ppm)</i>	<i>Tempo de exposição</i>	<i>Sintomas e/ou efeitos</i>
0,07	1 ano	Agravamento de doenças respiratórias crônicas em crianças
0,19	24 horas	Agravamento de doenças respiratórias em adultos
0,5	10 minutos	Aumento da resistência à passagem do ar nas vias respiratórias de asmáticos em exercício físico
1	10 minutos	Idem, em descanso, e em adultos saudáveis em exercícios físicos
5	10 minutos	Idem em adultos, em descanso
10	10 minutos	Bronco-espasmo
15	1 hora	Diminuição da atividade mucociliar
400	—	Edema pulmonar; inflamação bronquial

8.1.3. EFEITOS A SAÚDE PELO DIÓXIDO DE NITROGÊNIO (NO₂)

O dióxido de nitrogênio faz parte da família dos óxidos de nitrogênio presentes na atmosfera (NO, NO₂, N₂O) das quais o NO é o de maior emissão. No entanto, o NO₂ é considerado o mais tóxico. O NO₂ é um gás, cuja fonte principal é a combustão, onde o nitrogênio do combustível ou do ar se associa ao oxigênio do ar, nas altas temperaturas da câmara de combustão, formando óxidos de nitrogênio, NO e NO₂, monóxido e dióxido de nitrogênio.

Em relação à saúde, os efeitos dizem respeito ao aumento da resistência à passagem do ar nas vias respiratórias, danos ao transporte normal de gases entre o sangue e os pulmões e bronquiolite, diminuição do sistema de defesa contra infecções pulmonares, aumentando a incidência de infecções virais, pneumonia, bronquite e desenvolvimento de enfizema. Grandes incertezas ainda existem em relação aos possíveis efeitos do dióxido de nitrogênio à saúde.

8.1.4. EFEITOS À SAÚDE POR HIDROCARBONETOS E OUTROS COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS

Os hidrocarbonetos gasosos (HC) como um todo não causam preocupação com relação a efeitos diretos à saúde pública. De forma indireta são importantes pois participam da reação fotoquímica, produzindo outros compostos agressivos à saúde como os aldeídos e o peroxiacetilnitrato (PAN).

Alguns hidrocarbonetos e outros compostos orgânicos voláteis causam preocupação em relação a efeitos diretos à saúde. O benzeno é um exemplo. Ele provém principalmente da emissão de carros a

gasolina, do armazenamento de gasolina, de refinarias de petróleo, de algumas indústrias químicas e do processo de produção de coque (coquerias).

Seus efeitos à saúde estão relacionados com o sistema formador do sangue. Exposição prolongada pode resultar em redução substancial no número de células vermelhas do sangue. Em alguns casos a morte resultou em leucemia. Danos aos cromossomos também tem sido citado na literatura.

Trabalhadores de indústrias com unidades de produção de coque estão sujeitos a uma maior incidência de leucopenia pela presença de benzeno no ar.

Dentre os aldeídos, o aldeído fórmico e a acroleína (acrilaldeído) são os que tem causado maior preocupação em relação à poluição do ar. Estes compostos são primariamente irritantes dos olhos, das vias respiratórias e das mucosas em geral. O aldeído fórmico (formaldeído) pode, em altas concentrações, causar edema pulmonar, inflamação e pneumonia, sendo que ambos são letais a altas concentração. O potencial carcinogênico, mutagênico e teratogênico do formaldeído é desconhecido em seres humanos. Já houve comprovação de mutagenicidade em animais de laboratórios.

8.1.5. EFEITOS À SAÚDE PELO OZÔNIO (O₃) E OUTROS OXIDANTES FOTOQUÍMICOS

Os oxidantes fotoquímicos resultam de uma série de complexas reações químicas que ocorrem na atmosfera, envolvendo principalmente hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio, sob a ação da luz solar e em condições meteorológicas propícias (inversão térmica e calmaria). São constituídos basicamente de ozônio (O₃), peroxiacetilnitrato (PAN) e aldeídos, sendo que o ozônio está presente em maior concentração.

O ozônio é um gás incolor, tendo a propriedade de absorver raios ultravioletas na faixa de 2.000 a 3.000 Angstroms. A principal preocupação em relação ao ozônio é o seu efeito na função pulmonar. Efeitos típicos encontrados incluem aumento da resistência à passagem do ar, aumento da frequência da respiração, e diminuição da capacidade vital. O ozônio pode causar o envelhecimento precoce, provocar danos na estrutura pulmonar e diminuir a capacidade de resistir a infecções respiratórias. Pode causar aumento da incidência e severidade de ataques de asma e agravar doenças cardíacas crônicas, bronquite e enfisema. Em concentrações muito altas pode ocasionar edema pulmonar severo. É também um irritante dos olhos.

Os outros oxidantes fotoquímicos (peroxiacetilnitrato, formaldeído e acroleína) são pelo menos irritantes da vista, sendo que a presença do conjunto denominado Oxidantes Fotoquímicos na atmosfera tem sido associada à redução da performance, pela redução da capacidade pulmonar, e pelo agravamento de doenças respiratórias.

8.1.6. EFEITOS À SAÚDE POR MATERIAL PARTICULADO (MP)

O material particulado presente na atmosfera é de origem diversificada e sua concentração e composição depende do local, hora e período considerado. O efeito à saúde depende da concentração e da composição do material, contudo estudos epidemiológicos tem sido feitos considerando o material particulado presente nos centros urbanos.

As partículas de diâmetro aerodinâmico menor que 10 micrômetros (partículas respiráveis) são aquelas de maior interesse à saúde pois podem atingir os alvéolos pulmonares. Quanto menor o tamanho da partícula mais profundo ela pode se depositar no aparelho respiratório. Partículas maiores que 10 micrômetros são captadas pelas defesas naturais, tais como os pêlos das fossas nasais e mucosa ciliar.

O material particulado, em presença de outros gases, exerce efeito sinérgico para alguns gases como é o caso de dióxido de enxofre, conforme exemplificado a seguir.

- A) Nas concentrações de SO_2 na faixa do $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$, com baixos níveis de material particulado, pode ocorrer aumento da admissão hospitalar de pessoas idosas, por problemas respiratórios.
- B) Na concentração de cerca de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de SO_2 (média anual), acompanhadas de concentrações de fumaça de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, poderá ocorrer aumento na frequência e severidade de doenças respiratórias.
- C) Na concentração de SO_2 da ordem de $115 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 horas), com concentrações de fumaça da ordem de $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$, poderá ocorrer aumento acentuados nos problemas respiratórios de pacientes portadores de bronquite.
- D) Na concentração de SO_2 de $630 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 horas), com concentrações de fumaça da ordem de $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$, poderá ocorrer aumento acentuado nos problemas respiratórios de pacientes portadores de bronquite.
- E) Na concentração de SO_2 de $715 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 horas), acompanhadas de fumaça em concentrações da ordem de $750 \mu\text{g}/\text{m}^3$, poderá ocorrer aumento na taxa de mortalidade normal.

8.1.7. CHUMBO

Um material particulado que ocorre com grande frequência nos centros urbanos, e de grande importância para a saúde, são as partículas de chumbo e seus compostos.

O chumbo é utilizado na produção de baterias eletroquímicas, como aditivo de gasolina (chumbo tetraetila), em cabos elétricos, em pigmentos, produtos semi manufaturados, e ligas. A concentração de chumbo nos centros urbanos está associada principalmente à emissão de veículos a gasolina, que usam chumbo tetraetila como aditivo anti-detonante. Felizmente no Brasil este aditivo tem sido substituído pelo álcool etílico (etanol) anidro, fazendo com que a concentração no ar tenha caído acentuadamente nos últimos anos. O chumbo pode vir também dos alimentos, água e, no caso de crianças, através da terra e outros resíduos que ela possa ingerir.

O chumbo se acumula nos ossos e tecidos moles e, dependendo da concentração e do tempo de exposição ou da dose ingerida, pode causar anemia, distúrbios gastrointestinais; danos ao sistema nervoso central (saturnismo-retardamento mental); danos renais; caimbras intestinais; paralisia dos nervos das pernas e do braço; perda de apetite; fadiga; convulsão; podendo levar a morte.

No Brasil não existe padrão de qualidade do ar específico para o chumbo. Nos EUA o máximo permitido na atmosfera externa é de $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (média de 3 meses).

8.2. EFEITOS DA POLUIÇÃO DO AR SOBRE OS MATERIAIS

O primeiro efeito visível e de reconhecimento popular é a deposição de partículas, principalmente poeira e fumaça, nas edificações e monumentos sujando-os, exigindo portanto uma maior frequência de limpeza ou de pintura.

A corrosão de partes metálicas é causada principalmente pelos gases ácidos, em especial o dióxido de enxofre (SO_2). A corrosão é também influenciada pela umidade e temperatura. Dentre os metais, os ferrosos (ferro e aço), são mais susceptíveis à corrosão por poluentes atmosféricos.

O ataque aos materiais de construção não metálicos ocorre principalmente pela ação do SO_2 que reage com os carbonatos (CaCO_3 — pedra calcária) na presença de umidade formando sulfato de cálcio (CaSO_4) e gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$), que são solúveis em água, causando deterioração do material. O gás carbônico (CO_2), na presença de umidade forma o ácido carbônico que converte a pedra calcária em bicarbonato, que também é solúvel em água e pode ser lixiviado pela chuva. O mármore de monumentos e estátuas sofre efeitos idênticos aos dos materiais de construção, afetando a memória cultural portanto.

A borracha também é afetada pela poluição do ar, em especial pelo ozônio (O_3), que ataca a borracha natural e a borracha sintética de butadieno-estireno. Os efeitos são o *cracking*, com perda de elasticidade e enfraquecimento. Alguns tipos de borracha como a de silicone, são mais resistentes à ozona.

Os tecidos e corantes são também afetados pela poluição do ar, não só pela deposição de partículas (“sujeira”), mas também pela redução da sua resistência, desbotando e reduzindo a sua vida útil, pela maior frequência de lavagem que se faz necessária, nas atmosferas poluídas. Nos grandes centros é típico o escurecimento do colarinho das camisas claras com pouco tempo de uso. Agem sobre os tecidos e os corantes, além da poeira e fumaça, os gases ácidos, SO_2 principalmente, e os oxidantes (ozona, PAN-peroxiacetil nitrato, e óxidos de nitrogênio).

O ataque ao couro e ao papel também se verifica, com a desintegração da superfície e enfraquecimento do material. Os agentes são o dióxido de enxofre e o ácido sulfúrico.

Nas tintas, a poluição do ar causa escurecimento, descoloração e sujeira, que resultam no aumento na frequência de pintura. As partículas e o gás sulfídrico (H_2S) são os principais agentes sobre as tintas.

8.3. EFEITOS DA POLUIÇÃO DO AR SOBRE A VEGETAÇÃO

O efeito adverso da poluição do ar no Brasil já é bem conhecido devido ao problema ocorrido com a vegetação da encosta da Serra do Mar junto ao pólo industrial de Cubatão. A vegetação danificada tem sido restaurada através do replantio com espécies da região, mais resistentes.

Metade das árvores existentes nas reservas florestais da Alemanha estão danificadas em função dos gases poluentes, em especial os óxidos de enxofre e de nitrogênio presentes na chuva ácida.

Os principais efeitos da poluição do ar na vegetação são: alteração do crescimento e da produtividade da planta; colapso foliar; envelhecimento precoce; descoloração; clorose e outras alterações da cor e necrose do tecido foliar.

Os danos podem ocorrer de forma aguda ou crônica. Os mecanismos de ação dos poluentes são representados pela redução da penetração da luz, com conseqüente redução da capacidade fotossintetizadora, geralmente por deposição de partículas nas folhas; penetração de poluentes pelas raízes após deposição (partículas) e dissolução (gases) no solo; penetração dos poluentes pelos estômatos, principal porta de entrada, que são pequenos poros na superfície das plantas, em geral, nas folhas e na parte inferior, onde se dá a troca de gases (O_2 — CO_2).

Fatores extra-poluição devem ser considerados na análise da vegetação presumivelmente danificada pela poluição do ar. Os principais fatores são a quantidade e tipos de nutrientes presentes, a quantidade de umidade, temperatura, idade das plantas e presença de insetos e doenças.

Os principais poluentes presentes na atmosfera e que são fitotóxicos são o ozônio e o peroxiacetilnitrato (PAN), formados no *smog* fotoquímico, o dióxido de enxofre, o dióxido de nitrogênio e os fluoretos (altamente fitotóxicos).

A sensibilidade dos poluentes e o tipo de dano variam de acordo com o poluente considerado, o tipo de vegetação exposta a dose de poluição recebida (concentração *versus* tempo de exposição). Os fluoretos por exemplo, causam necrose na ponta da folha de gladiolas, pessegueiras e videiras, enquanto o dióxido de enxofre pode causar clorose intervenal e branqueamento das folhas, quando em doses médias, na alfafa, no algodão e na aveia. Concentrações altas de dióxido de enxofre podem causar ressecamento dos tecidos, resultando no branqueamento ou escurecimento das folhas, que podem atingir a cor marrom-avermelhado.

Alguns poluentes causam um efeito visual bastante interessante como é o caso PAN (peroxicetilnitrato), que em doses médias causam mudança de cor da folha para cor bronze na sua parte inferior, enquanto na parte superior a aparência permanece normal. Neste caso as folhas mais jovens são as mais susceptíveis, afetando o espinafre, certos tipos de alface e certas flores e outras espécies provavelmente.

Outro fator que deve ser levado em consideração é a presença de vários poluentes ao mesmo tempo que podem aumentar o efeito ou mesmo alterar o aspecto visual em relação àquele resultante da exposição a um poluente específico.

8.4. EFEITOS GLOBAIS DA POLUIÇÃO DO AR

Os efeitos da poluição do ar em escala global, ou seja, em todo planeta Terra, estão atualmente caracterizados pela chuva ácida, redução da camada de ozônio e efeito estufa. A grande emissão de poluentes à atmosfera, que caracteriza o estilo de vida da sociedade moderna e desenvolvida, faz prever a possibilidade de ocorrência de outros efeitos globais, tendo em vista que a concentração de poluentes na atmosfera vem ocorrendo para diversos poluentes.

8.4.1. CHUVA ÁCIDA

A chuva ácida provém da lavagem da atmosfera pelas chuvas que arrastam os óxidos de enxofre e de nitrogênio nela presentes, alterando a acidez da água (redução do pH), pela formação de ácidos (sulfuroso, sulfúrico, nitroso e nítrico), com conseqüências indesejáveis para o meio ambiente, e em especial as plantas e os materiais de construção, como é o caso do aumento da corrosão de metais, bem como afeta a vida aquática.

Normalmente a chuva tem pH (acidez) próximo de 5,6 em função da presença de CO₂ no ar. A chuva é considerada ácida quando o seu pH é menor que 5,6. Na região oeste dos EUA, 60 a 70% da acidez da chuva é atribuída ao ácido sulfúrico/sulfuroso e o restante principalmente ao ácido nítrico/nitroso.

O impacto da chuva ácida em relação aos sistemas aquáticos tem sido verificado especialmente quando o pH de lagos mais recentes torna-se menor que 4,0. Em áreas problemáticas do Canadá e EUA, a chuva é 30 a 40 vezes mais ácida do que a chuva considerada normal. Um lago que tem o seu pH reduzido a 4,5 por repetidas doses de chuva ácida, tem a sua condição de pesca prejudicada. Um lago com pH 2,0, tem a mesma acidez do suco de limão. Em relação à agricultura, as informações existentes indicam que os danos ocorrem com pH bem menor que 5,0 e principalmente em torno de 3,0 ou menor.

Em alguns casos a chuva ácida pode trazer efeitos positivos. Numa pesquisa da Agência de Proteção Ambiental (EPA) dos EUA, verificou-se que efeitos adversos para algumas culturas, mas o crescimento de legumes e frutas foi estimulado. Os solos alcalinos também se beneficiam da chuva ácida.

Na parte leste dos Estados Unidos e Canadá, bem como na região sul da Escandinávia, ocorrem chuvas ácidas com pH próximo de 4,0. Em curtos períodos de tempo o pH pode descer para valores entre 3,0 e 4,0, principalmente nas primeiras águas de chuva ou no início da ocorrência de neve.

No Brasil já se sente a existência de preocupação em relação a este problema, no entanto, os valores até aqui conhecidos não indicam a existência de chuva ácida severa. Um fato que contribui para que a chuva ácida não seja intensa no Brasil é a origem em grande parte hidroelétrica da nossa energia elétrica, sendo pequena a utilização de termoeletricas movidas a combustíveis fósseis, como acontece nos países desenvolvidos.

Um estudo feito em 1984, em Cubatão, concluiu que a acidez das águas de chuva na região não parece ser o indicador suficiente para o alto grau de poluição encontrado nas chuvas, visto que elas “não se encontravam anormalmente ácidas, embora estivessem anormalmente poluídas”.

Uma campanha preliminar de amostragem de água de chuva na região de Cubatão, também de 1984, revelou que as águas de chuvas estavam muito ácidas em Cubatão — Centro (pH 3,7 a 4,70), não ocorrendo o mesmo em Vila Parisi (vila residencial próxima às indústrias) onde a acidez estava na faixa de 5,80 a 6,80.

Em Niterói, medições realizadas em curto período de tempo em 1986, mostraram valores de pH variando de 4,3 a 5,3. Na Floresta da Tijuca, na cidade do Rio de Janeiro, o pH da chuva apresentou média ponderada de 4,7.

Também na Amazônia tem sido observados valores de pH da chuva abaixo do nível normal, similares aos observados em regiões altamente urbanizadas como Rio de Janeiro e São Paulo, parte devido a condições naturais e parte pela emissão de substâncias ácidas nas queimadas.

Regiões com termoeletricas a carvão mineral são fortes candidatas a apresentar águas de chuva ácidas, sendo de interesse o estudo destes locais neste aspecto.

8.4.2. REDUÇÃO DA CAMADA DE OZÔNIO

A redução da camada de ozônio da estratosfera tem aumentado principalmente nos últimos anos, em especial na Antártida, dando origem ao chamado Buraco de Ozônio, que ocorre principalmente na primavera austral, nos meses de setembro e outubro, conforme observações científicas, principalmente da NASA.

A teoria atualmente aceita é que o ozônio da estratosfera está sendo eliminado em grande parte pelo cloro presente nas substâncias denominadas clorofluorcarbonos (CFCs) ou mais popularmente, gás freon, que são substâncias muito estáveis quimicamente, permanecendo na atmosfera por dezenas de anos. Outros agentes dessa destruição são os óxidos de nitrogênio e as erupções vulcânicas e o gás halon utilizados em sistemas de proteção contra incêndio.

Os CFCs são utilizados como gás refrigerante em sistemas de refrigeração (geladeiras, freezers, balcões, câmaras frigoríficas, etc.) e em sistemas de ar condicionado. Outros usos incluem a produção de espumas, onde agem como agente expensor, como agente de limpeza de dispositivos eletrônicos e como propelente de aerossóis (embalagens tipo *spray*).

No Brasil, o Ministério da Saúde proibiu, em 1989, o uso de CFCs como propelentes de aerossóis, exceto em casos essenciais, como por exemplo o uso medicinal.

Acordos internacionais, celebrados com a intermediação da ONU, prevêem a eliminação da produção de clorofluorcarbonos em 1995, nos países desenvolvidos, e em 2005 nos países em desenvolvimento.

A camada de ozônio da estratosfera é um filtro natural para as radiações ultravioletas do sol, protegendo portanto a terra de níveis indesejáveis dessa radiação. Raios ultravioletas em excesso, principalmente na faixa do UV-B (280 a 320 nanômetros de comprimento de onda), tem como efeitos prováveis a maior incidência de cataratas, doenças da pele, como queimaduras e câncer de pele, prejuízo ao sistema imunológico, redução da camada de gordura com aumento de infecções fúngicas e bacterianas, envelhecimento mais rápido da pele pela sua degeneração elástica, efeitos negativos à vegetação, com prejuízos à agricultura, redução da fotossíntese do fitoplâncton, com conseqüente redução do seu crescimento e aumento da concentração de gás carbônico na atmosfera, contribuindo portanto para o efeito estufa indiretamente. Muitos outros efeitos negativos poderão advir desse desequilíbrio ambiental.

Enquanto o consumo médio anual, per capita nos países desenvolvidos está próximo a 1 quilograma, a média brasileira não chega a 100 gramas por habitante por ano. Mesmo assim, várias providências estão sendo tomadas para reduzir ainda mais a utilização dessas substâncias entre elas:

- Em 1979 os CFCs foram retirados da lista de propelentes que poderiam ser utilizados em inseticidas domissanitários, conforme resolução normativa 2/78 do Ministério da Saúde;
- Proibição do uso dos CFCs como propelentes em embalagens tipo *spray* (aerossóis), a não ser em usos essenciais como o medicinal, a partir de dezembro de 1989, conforme portaria nº 534 de 19/9/88, do Ministério da Saúde. Essa medida fez com que a utilização em *sprays* se reduzisse em mais de 90%;
- Conscientização de usuários de CFCs quanto à necessidade de reduzir o consumo através de medidas que impeçam o uso desnecessário e que reduzam a ocorrência de vazamentos;
- Desenvolvimento de estudos quanto à possibilidade de coleta e reciclagem desses gases;
- Desenvolvimento de estudos quanto às modificações que serão necessárias quando da introdução dos substitutos já desenvolvidos e em desenvolvimento, bem como dos seus impactos negativos.

O Brasil, a partir de 1990, é signatário do Protocolo de Montreal e deve atender às medidas a nível internacional, cabíveis aos países em desenvolvimento.

8.4.3. EFEITO ESTUFA

O Efeito Estufa significa o aumento da temperatura da Terra provocado pela maior retenção na atmosfera da radiação infravermelha por ela refletida, em função do aumento da concentração de determinados gases que têm essa propriedade, como o gás carbônico (CO₂), o metano (CH₄), os clorofluorcarbonos e os óxidos de nitrogênio.

O gás carbônico é considerado responsável por cerca de 50% do efeito estufa. Sua concentração no início do século era de cerca de 290 ppm, e está agora, no início da década de 90, ao nível de 345 ppm. A sua principal fonte de emissão é a queima de combustíveis fósseis, as queimadas e o desmatamento que reduz a absorção do CO₂ por fotossíntese.

O crescimento da temperatura da Terra seria muito lento, cerca de 0,6°C nos últimos 100 anos, mas existem previsões de acréscimos significativos se a emissão desses gases continuar a crescer na taxa atual, podendo resultar em aumentos de 1,5 a 4,5°C em meados do próximo século, o que ocasionaria maior degelo das calotas polares, com conseqüente aumento de nível dos mares, entre 20 cm e 140 cm, inundando áreas costeiras, além de alterações climáticas, com efeitos deletérios à agricultura, à vegetação em geral, além do aumento de tormentas, secas e inundações.

Muitas incertezas ainda existem sobre a origem do aquecimento recente da Terra, sendo que muitos cientistas postulam a maior influência de processos naturais cíclicos de aquecimento e resfriamento. A hipótese mais aceita atualmente é a da influência das emissões antropogênicas.

O Brasil tem sido considerado um dos grandes emissores de dióxido de carbono para a atmosfera, proveniente das queimadas, principalmente na Amazônia legal. Enquanto em relação à emissão pela queima de combustíveis fósseis o Brasil estava colocado 18º lugar em 1986, em relação à emissão de carbono por desmatamento era colocado em 1º lugar, seguido da Indonésia e Colômbia.

A emissão de carbono pelo Brasil em 1987 era de 0,38 toneladas por habitante, enquanto que os EUA emitiam 5,03 toneladas por habitante, ficando o Brasil atrás do Egito e do México. Na emissão global o Brasil é colocado em 4º lugar, atrás dos EUA, da ex-União Soviética e da China, segundo o World-watch Institute (1990).

Cálculos mais atualizados do World Resources Institute coloca o Brasil em 3º lugar, suplantando a China. Nesses cálculos foram levadas em consideração a emissão de outros dois gases causadores do efeito estufa: metano e clorofluorcarbonos. Há que se levar em consideração que a estimativa de emissão por queimadas é muito menos exata do que aquela de combustíveis fósseis. De qualquer forma, as queimadas representam um problema ambiental de graves conseqüências, não só para a qualidade do ar da região e para a segurança de aeroportos, mas também pela devastação rápida que a mesma provoca nas nossas florestas tropicais.

8.5. REPERCUSSÕES ECONÔMICAS DA POLUIÇÃO DO AR

Evidentemente os efeitos de poluição do ar tem repercussões econômicas e de grande monta. É impossível estimar com precisão essa repercussão.

Lave e Seskin (1970) estimaram os custos anuais fatais da poluição do ar sobre a saúde em 12,302 bilhões de dólares nos EUA, subdivididos em 4,887 bilhões de dólares para doenças cardiovasculares e 2,6 bilhões de dólares para câncer.

A American Lung Association, dos EUA publicou, em outubro em 1987, dados de pesquisa sobre custos da poluição do ar à saúde, realizada por cientistas da Universidade da Califórnia que concluiu que o excesso de mortes por poluição do ar nos EUA, em 1985, ficou na faixa de 50.000 a 120.000 mortes e que nas condições dos EUA, representaria, considerando o valor monetário vida, um custo entre 27 bilhões de dólares a 137 bilhões de dólares (dólar de 1988). A poluição por veículos significou uma participação entre 15% e 25% do custo total dos efeitos da poluição do ar sobre a saúde.

“O ar é um bem público que, pela sua abundância, era considerado, até recentemente um bem livre, sem que fossem estabelecidos direitos de propriedade sobre o mesmo e dessa forma, a sua utilização se deu de forma generalizada, tanto pela população, principalmente pelo uso de veículos, como pelos agentes econômicos. À medida que o controle da poluição do ar avança, esse livre direito de utilização deste recurso natural fica tolhido, fazendo com que as empresas e mesmo a população (no caso de veículos) pague indiretamente pela sua utilização”.

Os benefícios deste gasto em termos de preservação do recurso ar, somente agora começa a ser mensurado. Estudos realizados em São Paulo verificaram que o custo anual dos efeitos do dióxido de enxofre na Região Metropolitana de São Paulo, em 1980, era de 282 milhões de dólares, enquanto o custo de controle das fontes deste poluente era de 58,9 milhões de dólares. Para a mensuração do benefício foram utilizados “coeficientes de dano”, em relação à mortalidade, morbidade e danos aos materiais causados pelas concentrações de dióxido de enxofre na região.

O balanço custo/benefício do Programa de Controle de Dióxido de Enxofre na Grande São Paulo seria então de cerca de 223 milhões de dólares em favor dos benefícios, justificando plenamente os investimentos neste programa.

9. CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR

O controle da poluição do ar envolve 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:

- A) **Medidas indiretas:** ações que visam a eliminação, redução, diluição, segregação ou afastamento dos poluentes.
- B) **Medidas diretas:** ações que visam reduzir a quantidade de poluentes descarregada na atmosfera, através da instalação de equipamentos de controle (filtros de ar).

9.1. MEDIDAS INDIRETAS

- A) **Planejamento urbano e medidas correlatas:** método que consiste basicamente numa melhor distribuição espacial das fontes da poluição, aumentando a distância fonte-receptor; diminuindo a concentração de atividades poluidoras próximas a núcleos residenciais; melhorando o sistema viário; proibindo a implantação de fontes altamente poluidoras em regiões críticas; localizando as fontes preferencialmente à jusante dos ventos predominantes na região, em relação a assentamentos residenciais, e controlando a circulação desnecessária de veículos em áreas congestionadas.

Este método é tanto uma forma de diluição pela diminuição da densidade de fontes por área como de redução da emissão.

A utilização de ações de planejamento urbano para controle da poluição do ar pode reduzir, a curto prazo, as exigências de controle na fonte, pela possibilidade de utilização da capacidade diluidora da atmosfera, bem como, pode ser um método mais econômico e eficaz por se tratar de medida preventiva.

Infelizmente temos no Brasil e também no exterior, exemplos de falta de planejamento, do ponto de vista ambiental, da localização de complexos industriais, provocando graves problemas de poluição do ar.

- B) **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 na atmosfera, após o devido controle da emissão na fonte.

- C) **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 processos, ou seja, combustíveis, materiais e processos de baixo impacto ambiental, conduzindo a tecnologias limpas.

Um exemplo típico é a eliminação da emissão de compostos de chumbo por veículos a gasolina quando o chumbo tetraetila, um aditivo anti-detonante, deixa de ser adicionado à gasolina, sendo substituído por álcool (etanol) anidro.

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 contém teores altos de enxofre.

- D) **Medidas para reduzir a geração de poluentes:** essas medidas também significam produção com menor impacto ambiental e que levam às chamadas “tecnologias mais limpas”.

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

- operar os equipamentos dentro da sua capacidade nominal;
- operar e manter adequadamente os equipamentos produtivos, caldeiras, fornos, veículos, etc.;
- armazenamento adequado de materiais pulverulentos e/ou fragmentados, evitando a ação dos ventos sobre o mesmo;
- adequada limpeza do ambiente em conjunto com prédios projetados e construídos adequadamente;
- utilização de processos, equipamentos e operações de menor potencial poluidor;
- utilização de matérias-primas e reagentes de menor potencial poluidor;
- utilização de combustíveis de menor potencial poluidor.

Alguns exemplos dessa medida são: utilização dos veículos de acordo com as especificações da fábrica, não violando o lacre da bomba injetora em caminhões e ônibus, reduzindo com isso a emissão de fumaça preta; regulagem adequada do carburador e do motor de veículos a gasolina e a álcool; utilização de combustíveis com menor teor de enxofre; utilização de combustível gasoso ao invés de combustível sólido (carvão, lenha, etc.) ou líquido que poluem mais; utilização de carro a álcool ao invés de carro a gasolina; utilização de fornos elétricos para produção de ferro e aço e na fundição de metais não ferrosos, ao invés de fornos a óleo ou a carvão; utilização de processo de dupla catálise na produção de ácido sulfúrico ao invés do processo de catálise simples que elimina a necessidade de instalação de equipamentos de controle de dióxido de enxofre, além de reduzir o consumo de enxofre (matéria-prima importada), etc.

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 agentes poluidores, 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.

9.2. MEDIDAS DIRETAS — RETENÇÃO DOS POLUENTES APÓS GERAÇÃO

Após esgotados todos os esforços com as medidas anteriormente mencionadas, sem que tenha sido conseguida a redução necessária na emissão ou concentração no ambiente, deve-se então utilizar os equipamentos de controle de poluentes (filtros).

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

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

A) **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:

- **Equipamentos de controle de material particulado**

- **Coletores secos**

- coletores mecânicos inerciais e gravitacionais
- coletores centrífugos (por exemplo, ciclones)
- precipitadores eletrostáticos secos
- precipitadores dinâmicos secos

- **Coletores úmidos**

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

• **Equipamentos de controle de gases e vapores:**

- absorvedores;
- adsorvedores;
- incineradores de gás com chama direta;
- incineradores catalíticos;
- condensadores;
- processos especiais.

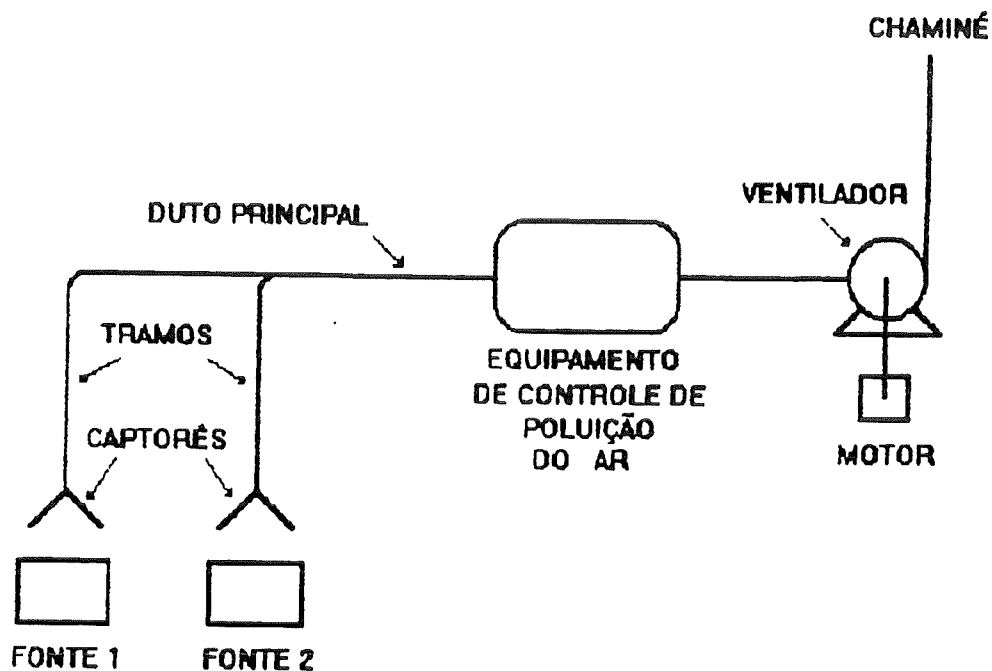


Figura 1 — Componentes de um sistema de controle de poluição do ar.

- B) **Seleção de equipamentos de controle de poluição de ar:** a seleção 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 em questão.

A escolha de um equipamento de controle depende de vários fatores, entre os quais o tipo e a natureza dos poluentes, eficiência de controle desejada, condições locais e custo.

A eficiência de controle de um equipamento de controle da poluição do ar indica a quantidade de poluentes que o mesmo remove (coleta) ou tem condições de remover (coletar).

9.3. EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE POLUIÇÃO DO AR

9.3.1. EFICIÊNCIA E MECANISMOS DE COLETA

O tratamento de emissão atmosférica é realizado através de equipamentos de controle de poluição do ar. Nesses equipamentos são aplicados fenômenos físicos e/ou químicos à mistura gasosa que contém os poluentes (“impurezas”), de forma a separá-los do gás que os transporta. Os mecanismos a serem aplicados dependerão do tipo de natureza dos poluentes e do tipo de equipamento de controle utilizado.

A escolha de um equipamento de controle depende de vários fatores, entre os quais o tipo e natureza dos poluentes, eficiência de controle desejada, condições locais e custo.

A) *Eficiência de controle:*

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

Matematicamente, a eficiência de controle pode ser expressa por:

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

Sendo:

η = eficiência de controle (%)

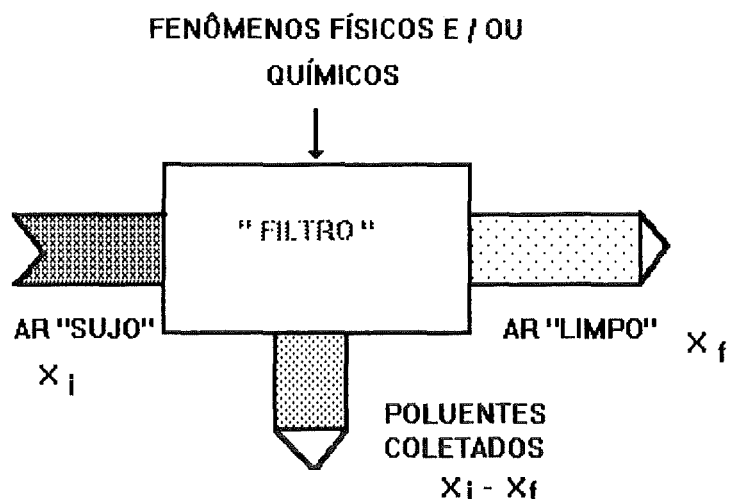
X_i = quantidade de poluentes existentes na entrada do ECP

X_f = quantidade de poluentes existentes no fluxo gasoso após o ECP

$X_i - X_f$ = quantidade de poluentes coletados pelo ECP

Em geral, X_i e X_f são expressos em massas e, dessa forma, temos a Eficiência em Massa. Quando X_i e X_f são expressos em números de partículas, temos a Eficiência em Número, a qual é utilizada somente para poluentes sob a forma de partículas e indica o número de partículas.

Deve-se ressaltar que a eficiência dos equipamentos ao controle de poluição do ar nunca atinge 100%, apesar de existirem equipamentos capazes de remover mais que 99,9% dos poluentes. Assim, o termo ar limpo deve ser entendido como contendo uma quantidade de poluentes dentro de níveis aceitáveis, e em relação ao poluente considerado.



Quando a eficiência é expressa por tamanho de partículas, a mesma recebe a denominação de Eficiência Fracionada. Exemplo de eficiência fracionada é mostrada na Tabela 1, para vários tipos de coletores. A eficiência fracionada também pode ser expressa por uma curva e, nesse caso temos a Curva de Eficiência.

TABELA 1 — EFICIÊNCIA FRACIONADA DE COLETORES DE MATERIAL PARTICULADO EM FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DAS PARTÍCULAS* (EM PORCENTAGEM)

<i>Tipo de equipamento</i>	<i>Faixas de diâmetros (μm)</i>				
	<i>0-5</i>	<i>5-10</i>	<i>10-20</i>	<i>20-44</i>	<i>> 44</i>
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
Lavadores Venturi (lavador de alta energia)	95,0	99,5	100,0	100,0	100,0
Precipitador eletrostático	97,0	99,0	99,5	100,0	100,0
* Valores para fins comparativos. Não deverão ser utilizados para fins de projetos.					

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.

Matematicamente, a eficiência global é expressa por:

$$\eta_G = 1 - [(1 - \eta_1) \cdot (1 - \eta_2) \cdot (1 - \eta_i)] \cdot 100$$

Onde:

η_G = eficiência global (%)

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

η_2 = eficiência de controle do equipamento 2 (base 1)

η_i = eficiência de controle do i-ésimo equipamento (base 1)

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

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

Ou

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

B) *Mecanismos de coleta:*

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

- sedimentação gravitacional;
- força centrífuga;
- impactação;
- intercepção;
- difusão;
- força eletrostática;
- força térmica.

Sedimentação gravitacional: a eficiência de coletas de partículas através de sedimentação gravitacional é função da velocidade terminal da partícula, a qual, para a região de Stokes, é expressa por:

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

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

C = fator de correção de Cunningham

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 de partículas, o qual só deve ser considerado para partículas pequenas (menores que aproximadamente $3\ \mu\text{m}$).

A sedimentação gravitacional é um mecanismo de deposição importante somente para partículas grandes (maiores que $20\ \mu\text{m}$).

Força centrífuga: age sobre partículas que estejam em movimento numa trajetória circular, fazendo com que a partícula se afaste do centro do círculo e no caso de ciclones, se dirija às paredes do mesmo.

A coleta por força centrífuga, na prática, é limitada a fontes de poluição do ar que emitem quantidades razoáveis de partículas maiores que 5 a $10\ \mu\text{m}$. Em geral, os coletores centrífugos (ciclones) são utilizados como pré-coletores.

Impactação inercial: é importante mecanismo de coleta de partículas. A impactação representa a “batida” da partícula contra um obstáculo que faz com que a partícula que estava em movimento diminua a sua energia e se separe do fluxo gasoso que a transportava.

O controle de partículas por impactação é geralmente conseguido através de pequenos obstáculos secos ou úmidos. O obstáculo úmido em geral são as gotas do líquido de lavagem. Os obstáculos secos são de várias formas, como por exemplo cilíndricos, esféricos, chatos, elipsóidicos, etc.

A impactação inercial é um importante mecanismo de coleta, mas se restringe a partículas maiores que $1\ \mu\text{m}$ em diâmetro. A impactação aumenta com o aumento da massa da partícula e da velocidade relativa partícula-coletor. Quanto maior a impactação, maior a eficiência de coleta por este mecanismo. Os lavadores de partículas funcionam principalmente através do mecanismo de impactação, o qual é importante na filtragem através de tecidos (filtro-manga, por exemplo).

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 “raspam” o coletor.

Quanto maior a relação diâmetro da partícula-diâmetro do coletor, maior será o efeito da intercepção.

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 $1\ \mu\text{m}$. As partículas menores, em função da sua energia térmica, estão em constante movimento,

similarmente ao que ocorre com as moléculas dos gases, fenômeno este denominado “movimento Browniano”, o qual é diretamente proporcional à temperatura.

Força eletrostática: é um mecanismo de coleta predominante em precipitadores eletrostáticos, no entanto apresenta importância também em outros tipos de equipamento de controle de poluição do ar, como os filtros de tecido, 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: $F = q \cdot E$, sendo:

F = 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 tamanho maior que $0,5 \mu\text{m}$ em diâmetro, mas também por difusão, o qual age mais intensamente em partículas pequenas (menores que $0,2 \mu\text{m}$).

Para as partículas com diâmetro entre $0,2 \mu\text{m}$ e $0,5 \mu\text{m}$ o carregamento elétrico ocorre tanto por ação do campo elétrico, como por difusão.

Força térmica: a termoforese é um mecanismo pelo qual partículas sujeitas a um gradiente de temperatura migram da zona mais quente para a zona mais fria.

A utilização de precipitadores térmicos tem se restringido ao campo de amostragem de material particulado, onde eficiência altíssima é obtida para partículas pequenas.

É importante ressaltar que as partículas emitidas por fontes de poluição do ar situam numa faixa de tamanho bastante ampla. No entanto, as partículas “grandes” (maiores que $10 \mu\text{m}$) são mais fáceis de serem coletadas.

Quanto menor a partícula, maior a dificuldade de coleta. Infelizmente as partículas pequenas são aquelas passíveis de serem respiradas, podendo, portanto, ter contato com as partes mais profundas do sistema respiratório, aumentando a probabilidade de ocorrência de efeitos nocivos. Entende-se como partículas respiratórias aquelas de diâmetro aerodinâmico menor que $10 \mu\text{m}$.

9.3.2. CÂMARA DE SEDIMENTAÇÃO GRAVITACIONAL

A câmara de sedimentação gravitacional é um equipamento de controle, cujo mecanismo de coleta é a força gravitacional. A figura, a seguir, mostra o esquema deste tipo de equipamento. Apresenta pouca importância em termos de poluição do ar face à baixa eficiência para partículas menores que $40 \mu\text{m}$. 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.

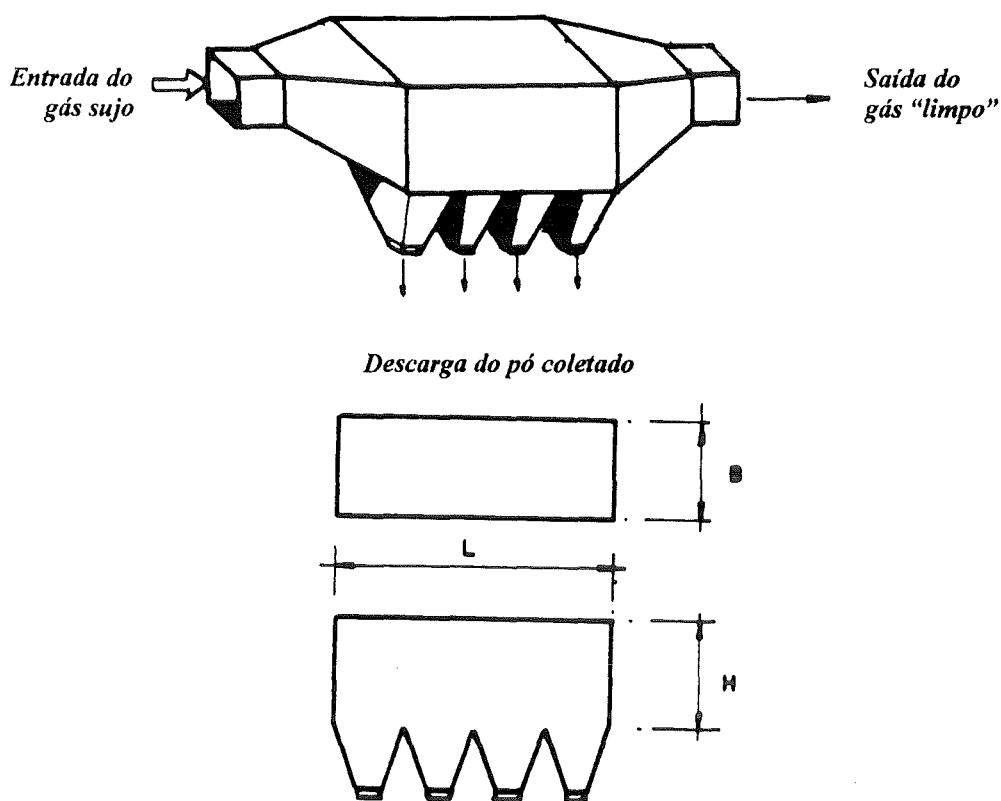


Figura 2 — Câmara de sedimentação gravitacional.

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 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.

9.3.3. CICLONES

Ciclones são coletores que utilizam primariamente a força centrífuga para a coleta de partículas. A Figura 3 mostra ciclones com entrada tangencial, bem como o fluxo de gás e das partículas do mesmo. Os ciclones podem ter entrada tangencial ou radial. São de grande uso em controle de poluição do ar, principalmente como pré-coletores. Devido à sua baixa eficiência 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 .

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

- **ciclones de baixa eficiência:** ciclones com perda de carga entre 5 e 10 cm H_2O
- **ciclones de média eficiência:** ciclones com perda de carga entre 10 e 20 cm H_2O
- **ciclones de alta eficiência:** ciclones com perda de carga maior que 20 cm H_2O

Um tipo de ciclone muito utilizado na prática são os multiciclones ou multiciclones. 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 ao ciclones:

- são mais eficientes;
- custam menos;
- ocupam menor espaço;
- apresentam menor perda de carga para eficiências equivalentes;
- resistem melhor à erosão.

No entanto, apresentam um problema sério que é o entupimento freqüente.

Os ciclones podem ser projetados utilizando relações padronizadas entre suas dimensões conforme mostra a Tabela 2. Considerar a velocidade de entrada no ciclone como dado inicial no projeto.

9.3.4. FILTRO DE TECIDO

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

O princípio de funcionamento de um filtro de tecido é bastante simples. Trata-se da passagem da mistura gasosa que contém as partículas através de um tecido, sendo que um gás atravessa os poros e as partículas, na sua maioria, ficam retidas na sua superfície, que de tempos em tempos tem que ser retirada para evitar uma camada muito espessa 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. À medida que o processo continua, a camada de partículas coletadas vai aumentando, tornando-se então o meio de coleta.

Em alguns tipos de filtro é importante a permanência de uma camada de partículas, após cada ciclo de limpeza, para aumentar a eficiência de coleta.

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 interceptação e possivelmente as forças térmicas e sônicas.

O filtro de tecido é um equipamento enquadrado na categoria dos de 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.

Apesar de existirem modelos para determinações da eficiência, os mesmos são de difícil aplicação prática.

Os filtros de tecido são classificados, primeiramente, conforme o formato do meio filtrante, ou seja: tipo manga ou envelope. A classificação seguinte leva em consideração o mecanismo de limpeza. Os mecanismos de limpeza mais usuais são:

- movimento mecânico;

- ar reverso;
- jato pulsante de ar comprimido.

Na Figura 5 são mostrados três coletores tipo filtro de tecido. A Figura 6 mostra as formas de entrada do fluxo gasoso no filtro tipo manga.

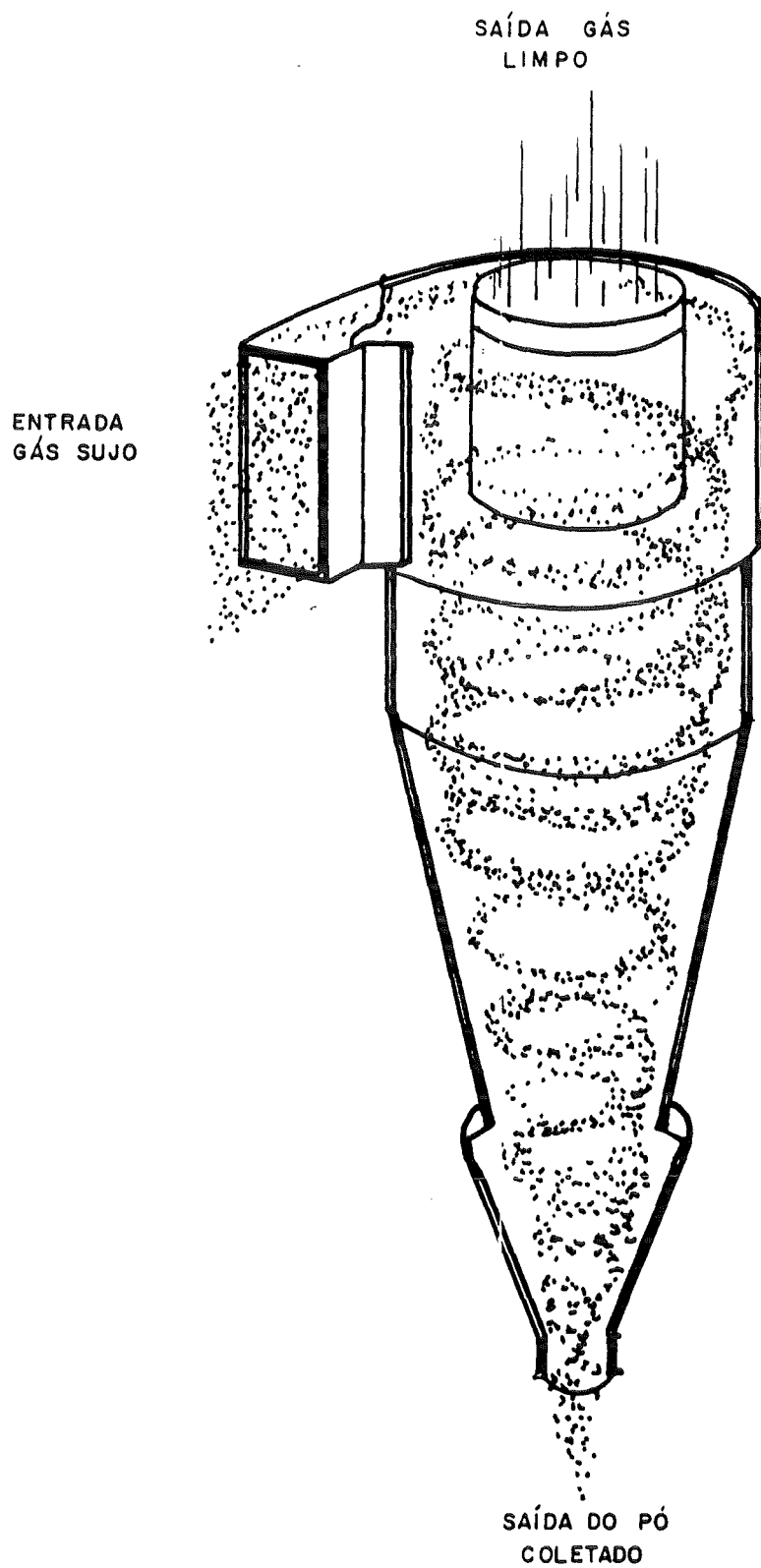
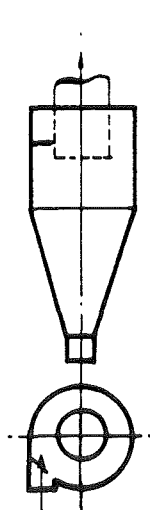
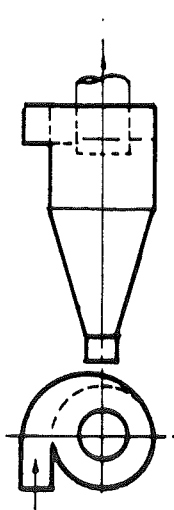


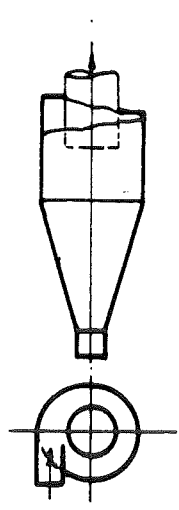
Figura 3 — Desenho esquemático de um ciclone de entrada tangencial.



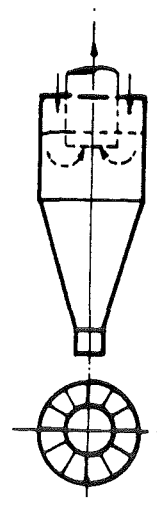
Entrada tangencial



Entrada envolvente



Entrada curva



Entrada axial

Tipos de ciclones de acordo com a entrada do fluxo gasoso.

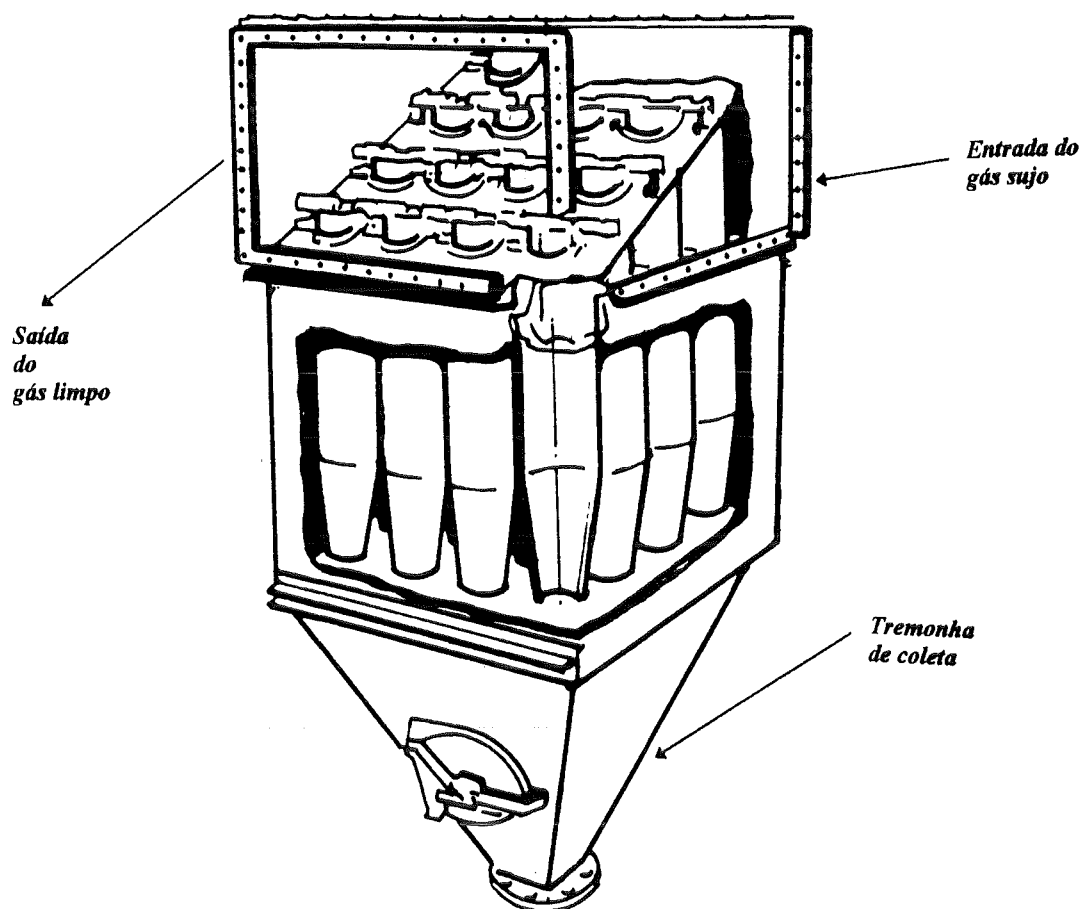
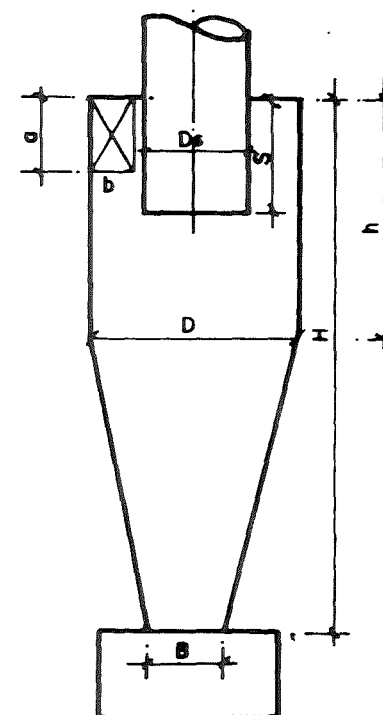
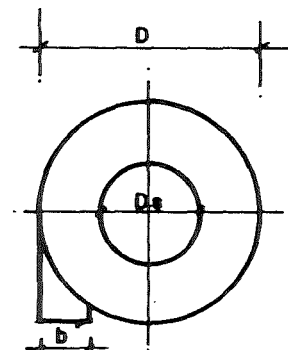


Figura 4. - Continuação

Multiciclone

**TABELA 2 - RELAÇÕES GEOMÉTRICAS PADRONIZADAS
DE CICLONES DE ENTRADA TANGENCIAL**

<i>Elemento característico</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Autor</i>		
		<i>Lapple</i>	<i>Stairmand</i>	<i>Swift</i>
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	0,625 D	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



A Figura 7 mostra um desenho esquemático de um filtro manga com limpeza por jato pulsante. Esse tipo de limpeza é o que tem sido mais utilizado atualmente, pois apresenta a vantagem de exigir uma área de filtração menor que os que utilizam limpeza por sacudimento mecânico ou ar reverso, possibilitando limpeza contínua e automática das mangas.

Os projetos de equipamentos de controle tipo filtro de tecido envolvem 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 filtração necessária. O fluxo gasoso deve ser adequadamente condicionado antes de entrar no filtro de tecido no que diz respeito à temperatura e umidade.

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), e da disponibilidade do mercado.

A Tabela 3 apresenta as características dos meios filtrantes mais usuais. Em certos casos o meio filtrante recebe tratamento especial, como, por exemplo, a aplicação de silicone e grafite. Atualmente os meios filtrantes feltrados estão sendo bastante utilizados, principalmente o de poliéster.

O dimensionamento da área filtrante depende da velocidade de filtração (razão vazão de gás/área filtrante) recomendada para o caso específico. A velocidade de filtração 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 a 1,0 m/min. Para limpeza por jato reverso, com meio filtrante tipo feltro, os valores variam de 2 a 5 m/min. 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 filtração necessária deve levar em consideração, também, a condição do meio filtrante no momento da limpeza, sendo feita com o filtro fora de operação (*offstream*), a área de filtração deve ser calculada em relação às unidades que permanecem em operação de forma a não exceder a velocidade de filtração recomendada.

Principais vantagens dos filtros de tecido:

- apresentam 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;
- não pode ser utilizado em condições onde haja condições de condensação de umidade;
- exige espaço razoável.

TABELA 3 — CARACTERÍSTICAS DOS MEIOS FILTRANTES USUAIS PARA FILTROS-MANGA								
Fibra	Temp. de operação		Permeabilidade (m ³ /m ²) ^a	Composição	Resistência ^b			
	Exposição longa	Exposição curta			Abrasão	Ácidos minerais	Ácidos orgânicos	Alcalis
Algodão	82	107	3,0-6,0	Celulose	B	P	B	B
Lã	93	121	6,0-18,0	Proteína	B	R	R	P
Nylon ^d	93	121	4,6-9,1	Poliamida	E	P	R	B
Orlon ^d	116	135	6,0-13,7	Poliacrilonitrila	B	B	B	R
Dacron	135	163	3,0-18,0	Poliéster	E	B	B	B
Polipropileno	93	121	2,1-9,1	Olefina	E	E	E	E
Nomex ^d	218	260	7,6-21,3	Poliamida	E	R	E	B
Fibra de vidro	288	316	3,0-21,3	Vidro	P-R	E	E	O
Teflon ^d	232	260	4,6-20,0	Polifluoretileno	R	E	E	E

^a Permeabilidade a 12,7 mm H₂O.

^b P = pouco, R = razoável, B = boa, E = excelente.

^c Custo relativo: 1 = menor custo, 9 = custo mais alto.

^d Marca registrada da Du Pont.

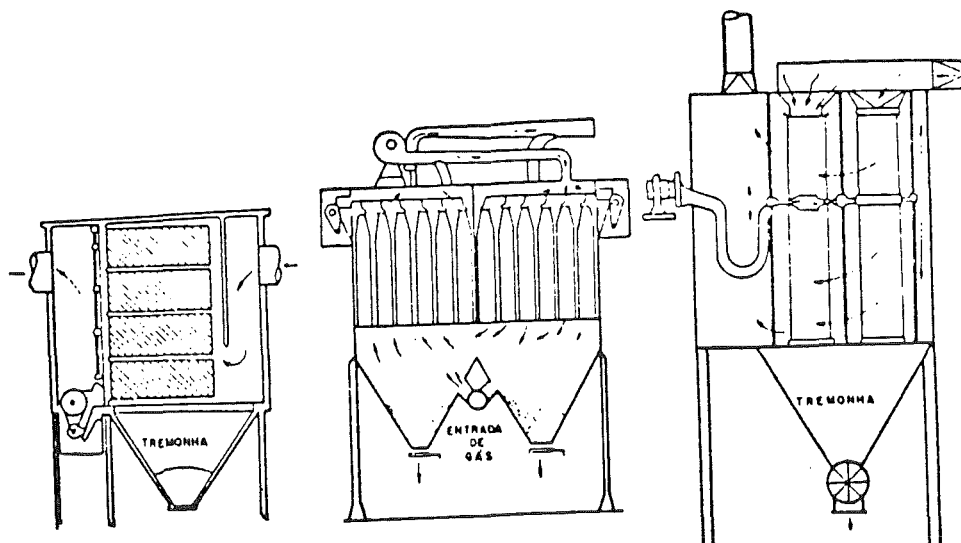
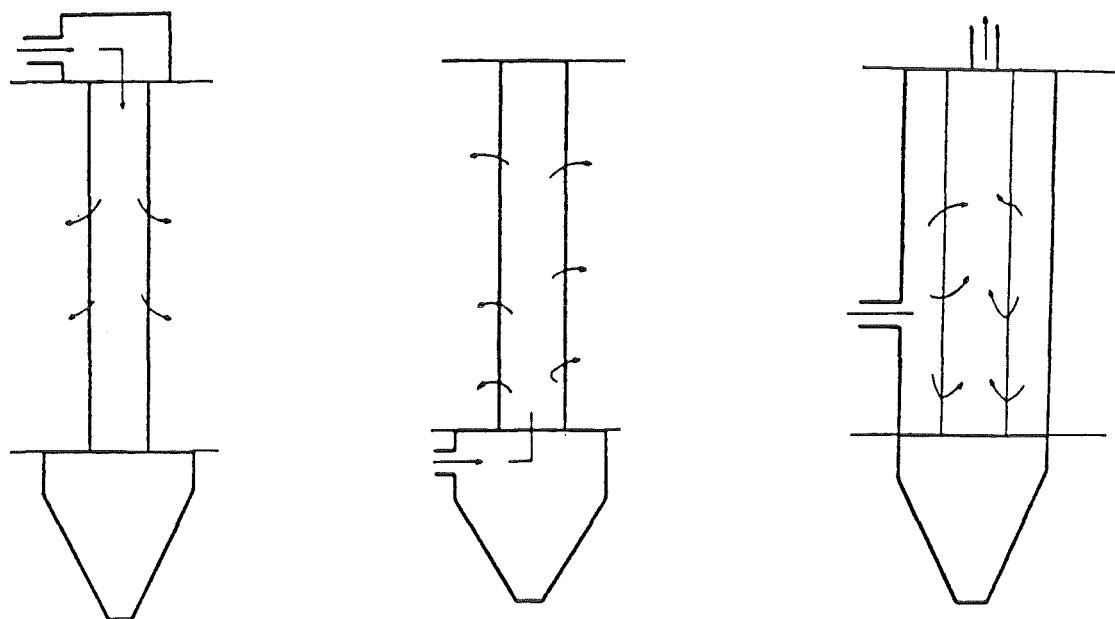


Figura 5 — Coletor tipo filtro de tecido.



Entrada superior

Entrada inferior

Entrada externa

Figura 6 — Formas de entrada do fluxo no filtro manga.

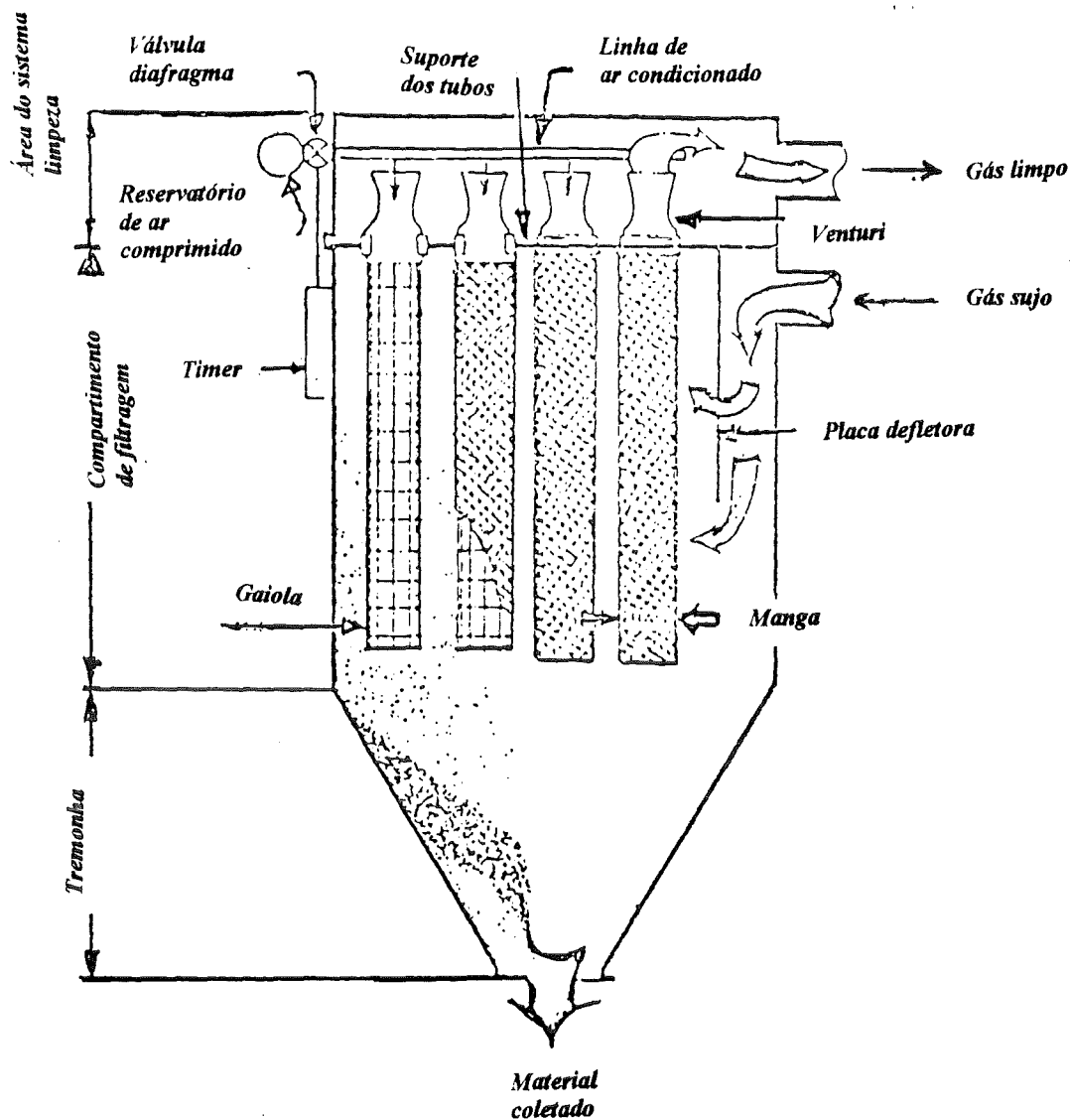


Figura 7 — Desenho esquemático de um filtro manga com limpeza por jato pulsante.

A perda de carga em filtros de tecido é o somatório 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 é fixado um valor de perda máximo e, após atingido esse limite, o sistema de limpeza é acionado. Em geral a perda de carga varia de 10 a 20 cm H_2O .

9.3.5. LAVADORES (SCRUBBERS)

Os lavadores são equipamentos do controle de poluição do ar que podem ser utilizados para o controle de gases e vapores. Nesta seção vamos tratar de lavadores utilizados para o controle do material particulado. Os lavadores utilizados para o controle de gases e vapores recebem a denominação de absorvedores.

Uma primeira classificação de lavadores é baseada na energia requerida (perda de carga) para fazer o fluxo gasoso passar através do mesmo. Nessa classificação temos:

- lavadores de baixa energia: perda de carga de até 7,5 cm H_2O ;
- lavadores de média energia: perda de carga de 7,5 a 25 cm H_2O ;

- lavadores de alta energia: perda de carga maior que 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;
- lavadores de impactação;
- lavadores auto-induzidos (de orifício);
- lavador Venturi.

Na Figura 8 são mostrados alguns tipos de lavadores disponíveis no mercado.

Os lavadores auto-induzidos e o lavador Venturi são também denominados “lavadores gás-atomizador”, face ao processo de atomização do líquido que ocorre pela passagem do gás a ser tratado.

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 Tabela 4 apresenta os principais parâmetros operacionais de alguns lavadores.

TABELA 4 — PRINCIPAIS PARÂMETROS OPERACIONAIS DE ALGUNS LAVADORES				
<i>Tipo de lavador</i>	<i>Velocidade do gás (cm/s)</i>	<i>Perda de carga (mm H₂O)</i>	<i>Razão líquido/gás (l/m³)*</i>	<i>Eficiência para partículas < 2 µm</i>
Câmara de <i>spray</i> gravitacional	90 a 150	25	0,3 a 2	Baixa
Ciclônico	100 a 250 (na câmara)	60 a 150	0,4 a 0,7	Média
Auto induzido	1.500 a 10.000 (no orifício)	100 a 250	1,3 a 5,3	Média
Venturi	6.000 a 18.000	250 a 2.500	0,3 a 1,3	Alta
* A água em geral é recirculada após sofrer tratamento.				

O mecanismo de coleta predominante no caso de lavadores 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.

Existem vários modelos e teorias para determinação da eficiência de lavadores. A mais abrangente é a “Teoria do Poder de Contato”, desenvolvida por Lapple (1955) e Semrau.

A assumida fundamental dessa teoria é a seguinte: 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 independente do meio fornecedor de energia, seja líquido ou o gás.

O lavador Venturi necessita ter em série um equipamento que coletará as partículas que tiverem o seu tamanho aumentado ao passar pela sua garganta. Nota-se, portanto, que o Venturi age como um aglomerador de partículas. O equipamento de coleta final é em geral 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 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 o seu funcionamento.

A perda de carga no lavador Venturi, segundo Calvert, pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$\Delta P = 0,85 \times 10^{-3} \times Vg^2 \times \frac{QI}{Qg}$$

Onde:

ΔP = perda de carga no Venturi (cm H₂O)

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

QI = vazão do líquido (m³)

Qg = vazão do gás (m³)

Vantagens e desvantagens dos lavadores em geral:

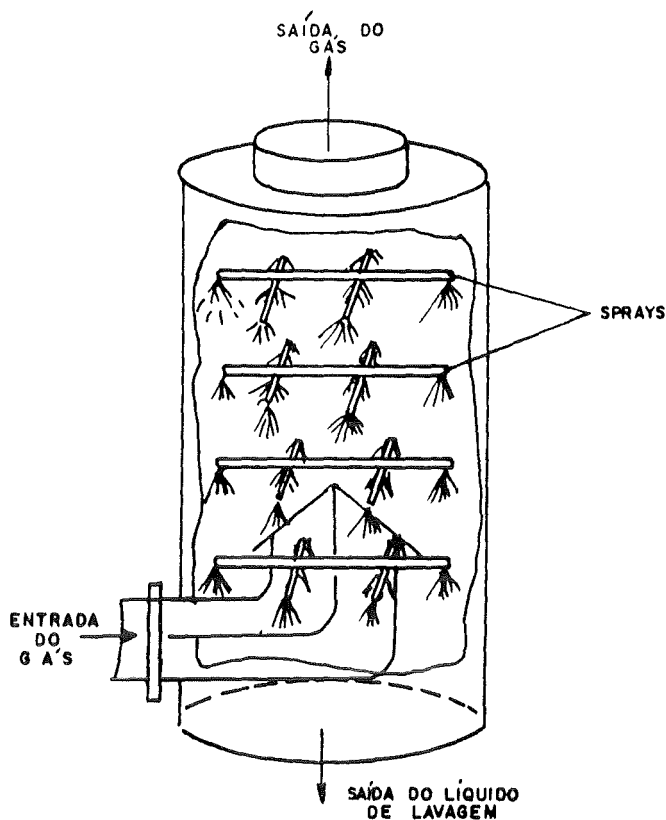
Vantagens:

- podem ser utilizados em gases a altas temperaturas;
- podem ser utilizados para a coleta de partículas adesivas;
- não há restrições de utilização quanto à umidade do efluente a ser tratado;
- podem ser conseguidas altas eficiências de coleta.

Desvantagens:

- apresentam alta perda de carga quando se necessita de alta eficiência de coleta, o que implica em custo;
- descarregam gases tratados úmidos, o que implica em uso de materiais resistentes à corrosão;
- necessitam de materiais resistentes à corrosão;

- possível formação de pluma visível proveniente da condensação da umidade contida nos gases;
- o material coletado está na forma úmida e em geral necessita tratamento para sua reutilização;
- necessita tratamento de efluentes líquidos.

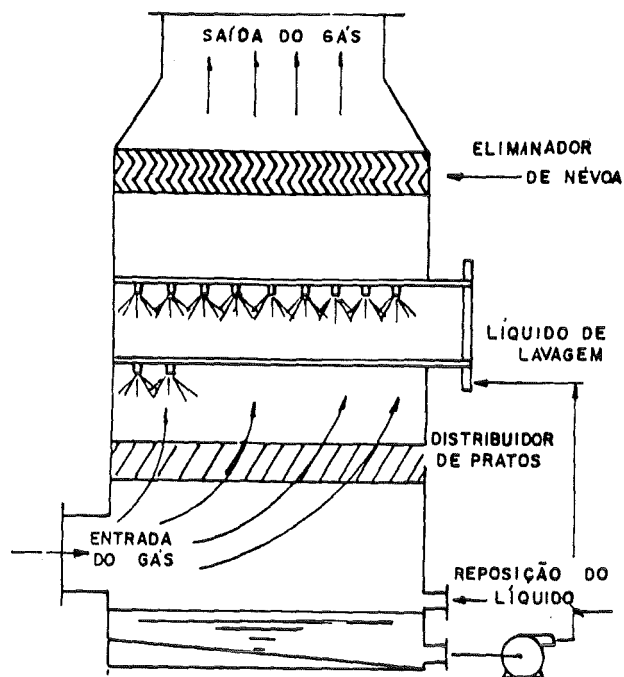


$$\Delta P = 0,5 - 1'' \text{ CA}$$

$$\frac{L}{G} = 0,65 - 1,3 \frac{\ell}{\text{m}^3 *}$$

$$\eta = 70\% + \text{ para partículas } \geq 10 \mu\text{m}$$

Aplicações: Como preconditionador na indústria de fertilizantes; indústria de papel Kraft.



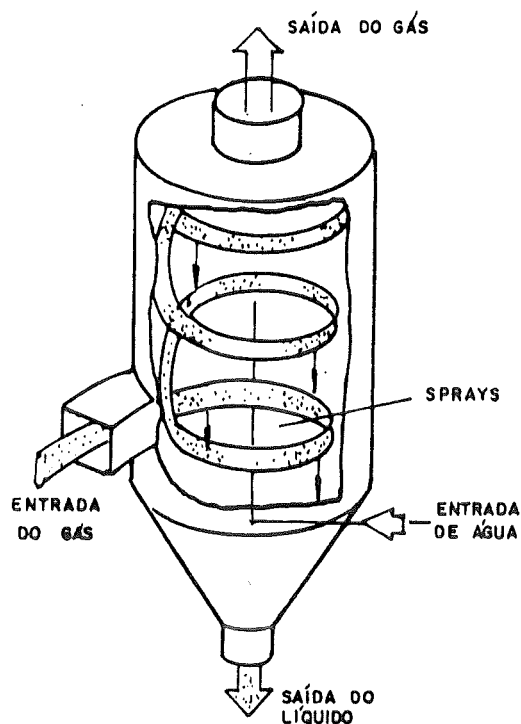
$$\Delta P = 1 - 2 \text{ CA}$$

$$\frac{L}{G} = 0,39 - 2,6 \frac{\ell}{\text{m}^3 *}$$

$$\eta = 80\% + \text{ para partículas } \geq 10 \mu\text{m}$$

Aplicações: Alto forno; como pré-resfriador e umidificador.

Figura 8 — Câmara e torre de spray.

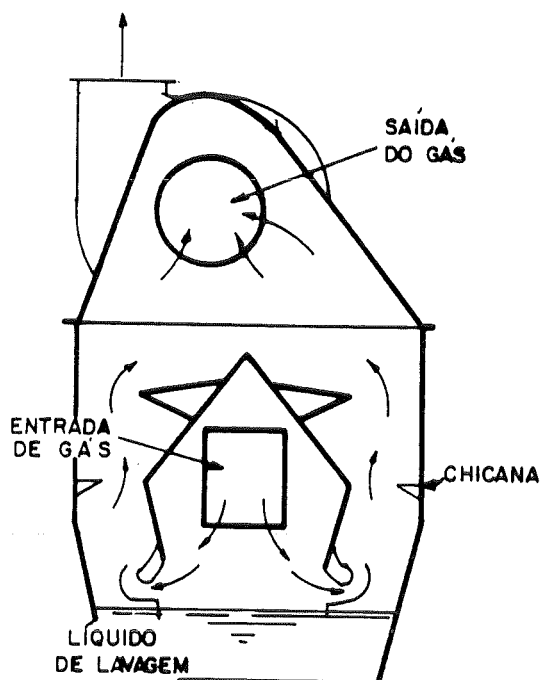


$$\Delta P = 1,5 \text{ a } 3'' \text{ CA}$$

$$\frac{L}{G} = 0,25 \frac{\ell}{\text{m}^3 *}$$

$$\eta = 95\% \text{ para partículas } \geq 2 \mu\text{m}$$

Aplicações: Secadores; calcinadores; manuseio do carvão pulverizado.



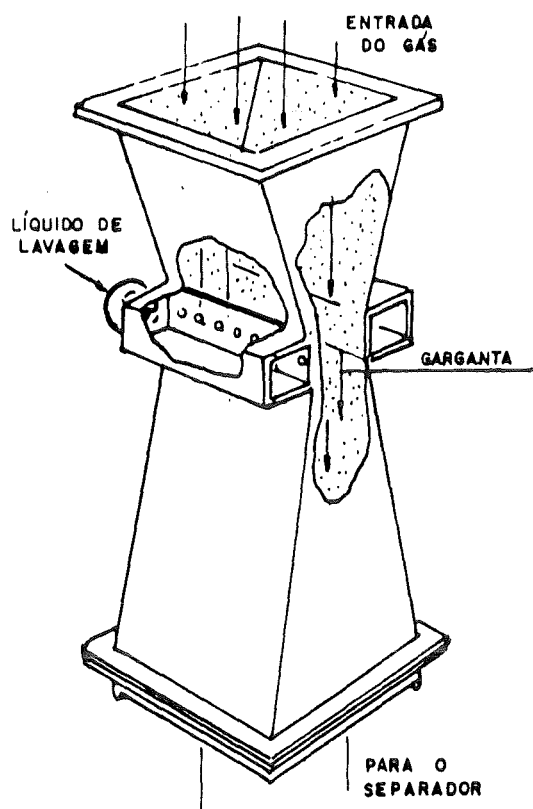
$$\Delta P = 2 \text{ a } 8'' \text{ CA}$$

$$\frac{L}{G} = 1,30 \text{ a } 5,20 \frac{\ell}{\text{m}^3 *}$$

$$\eta = 93\% + \text{ para partículas } \geq 5 \mu\text{m}$$

Aplicações: Manuseio de materiais; britagem; moagem; fornos; secadores; resfriadores.

Figura 8 (continuação) — Lavador centrífugo e lavador de orifício.



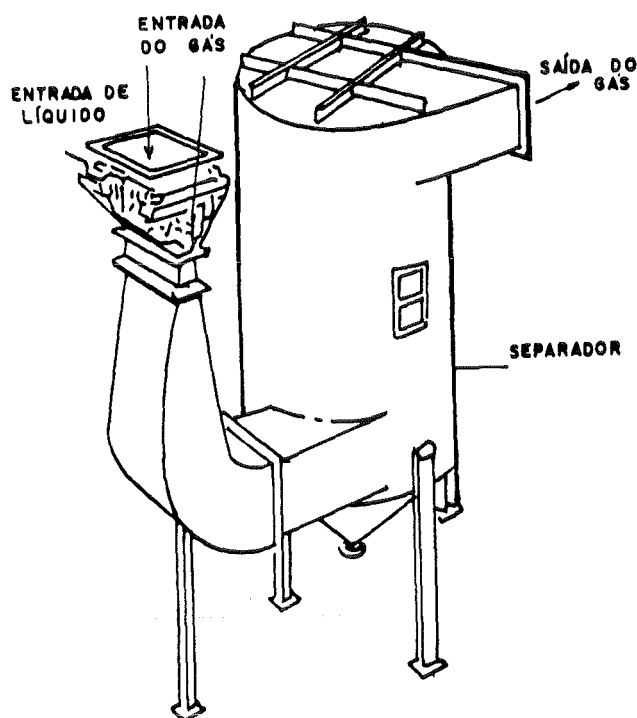
$$\Delta P = 20 \text{ a } 80'' \text{ CA}$$

$$\frac{L}{G} = 0,40 \text{ a } 1,56 \frac{\ell}{\text{m}^3 *} \text{ de gás saturado}$$

$$V_g = 45,50 \text{ a } 122 \text{ m/s}$$

$$\eta = 90 \text{ a } 99\% + \text{ para partículas variando de } 0,05 \text{ a } 100 \mu\text{m}$$

Aplicações: Fornos para fusão de ferro, fusão de produção de aço, fábrica de celulose.



$$\Delta P = 5 \text{ a } 30'' \text{ CA}$$

$$\frac{L}{G} = 0,65 \frac{\ell}{\text{m}^3 *} \text{ de gás saturado}$$

$$V_g = 61 \text{ a } 122 \text{ m/s}$$

$$\eta = 99\% + \text{ para partículas } > 1 \mu\text{m}$$

$$\eta = 95\% - \text{ para partículas } < 1 \mu\text{m}$$

Aplicações: Plantas de asfalto, forno revérbero para fusão de zinco, secador da mistura de fertilizantes e forno cubilo para fusão de chumbo.

Figura 8 (continuação) — Venturi P. A. e lavador Venturi com garganta ajustável.

9.3.6. *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.

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 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 — EUA. As instalações industriais pioneiras se deram no período de 1907 a 1920.

O mecanismo de coleta principal, obviamente, é a força elétrica.

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 eletricamente 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 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/ou disposição final.

Os precipitadores eletrostáticos podem ser classificados da seguinte forma:

A. *Quanto à voltagem:*

- baixa voltagem: voltagem menor ou igual a 30 kV;
- alta voltagem: voltagem maior que 30 kV.

B. *Quanto à polaridade do eletrodo de descarga:*

- corona positivo;
- corona negativo.

C. *Quanto à geometria do eletrodo de coleta:*

- tubulares;
- em forma de placas.

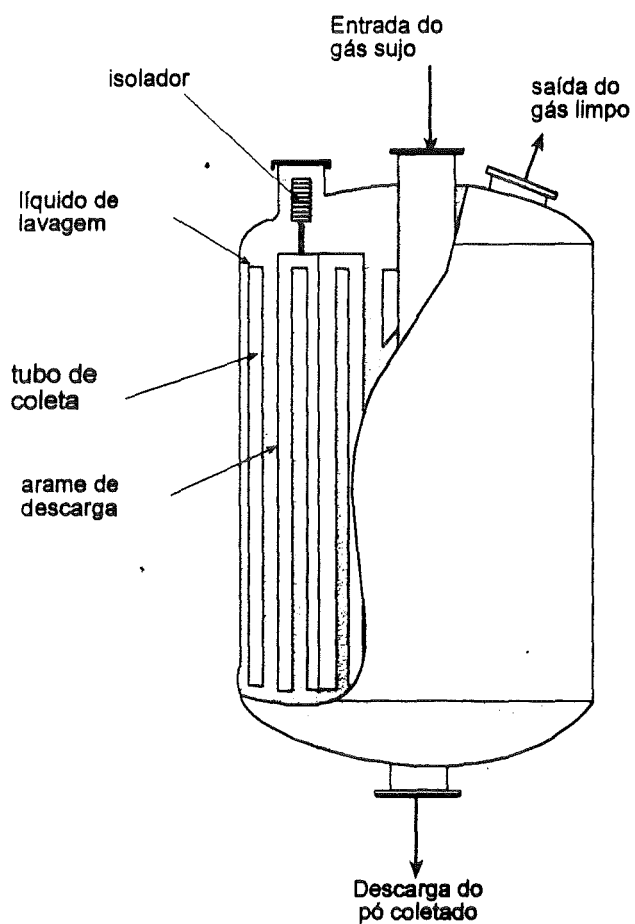
D. *Quanto ao número de estágios:*

- simples estágios com carga e disposição simultâneas;
- duplo estágio, com carga em um primeiro estágio e a deposição num estágio posterior.

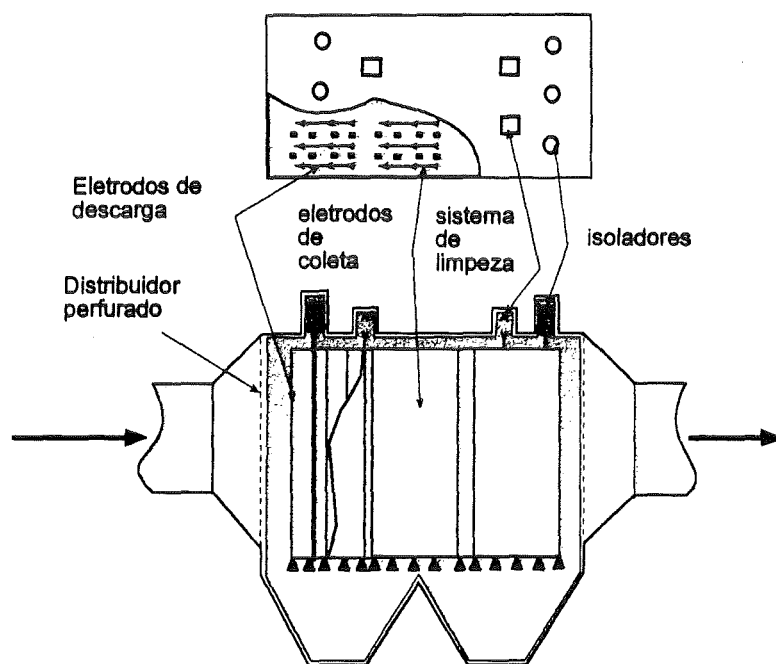
Os precipitadores podem ser ainda classificados em secos e úmidos, dependendo da utilização ou não de líquido de lavagem no mesmo.

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

A Figura 9 mostra um precipitador eletrostático de aplicação industrial que apresenta eletrodo de descarga tipo arame e eletrodo de coleta tipo placas.

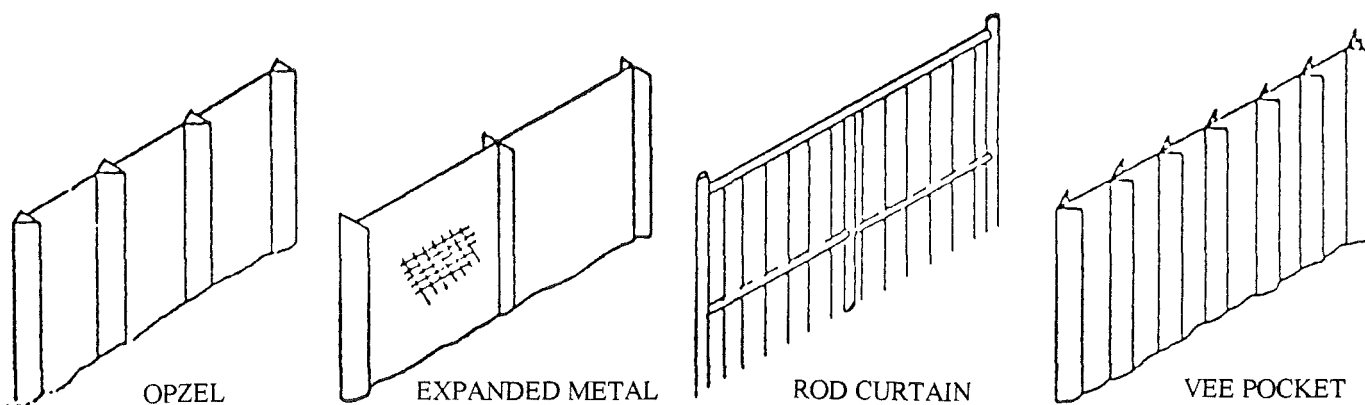


Precipitador tubular

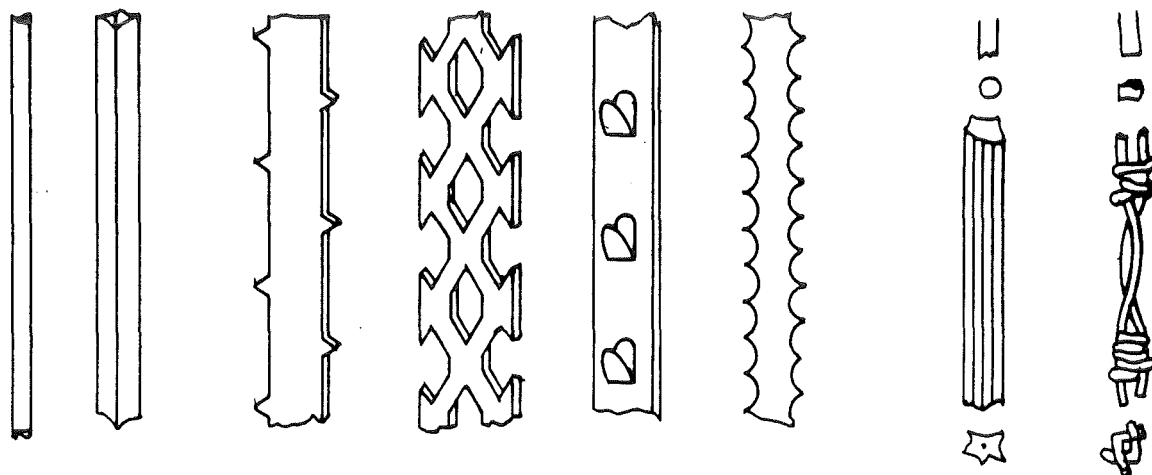


Precipitador em placas

Figura 9 — Precipitador eletrostático tubular e de placas.



Eletrodos de coleta



Eletrodos de descarga

Figura 10 — Formas usuais de eletrodos de coleta e descarga.

O carregamento das partículas se dá por dois processos.

Para partículas maiores que $0,5 \mu\text{m}$ em 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.

A eficiência de coleta de precipitadores eletrostáticos é usualmente expressa pela fórmula de Deutsch-Anderson, qual seja:

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

Sendo:

η = eficiência de coleta (base 1)

A = área de coleta

Q = vazão de gás

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 a 15 cm/s.

Uma característica importante da partícula que influencia 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 consequência, retornar ao fluxo gasoso. Já em relação às partículas de resistividade muito alta ocorre o inverso, podendo gerar o processo denominado *black corona* que é uma descarga localizada no eletrodo de coleta, devido à formação de uma camada de material não-condutor.

A faixa ideal de resistividade em precipitadores está entre 10^7 e 10^{10} Ohm . cm.

Existem formas de condicionamento da resistividade, sendo principal o uso de controle de temperatura e umidade. A Figura 11 mostra a variação da resistividade com a temperatura e umidade do gás.

Um sumário das vantagens e desvantagens do precipitador eletrostático é mostrado abaixo.

Vantagens:

- Alta eficiência de coleta. Pode exceder 99,9%.
- Coleta partículas muito pequenas. Teoricamente não há limite inferior do tamanho de partícula possível de ser coletada.
- Baixo custo operacional.
- Baixa perda de carga. Em geral não excede 1,25 cm H₂O.
- 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 até 650°C.
- A eficiência de coleta pode ser aumentada pela inclusão de novos módulos.
- Coleta de material a seco.

- Podem ser operadas 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 pressão de até 10 kg/cm^2 e também em condições de vácuo.
- Vida útil longa. Chega a mais de 20 anos.

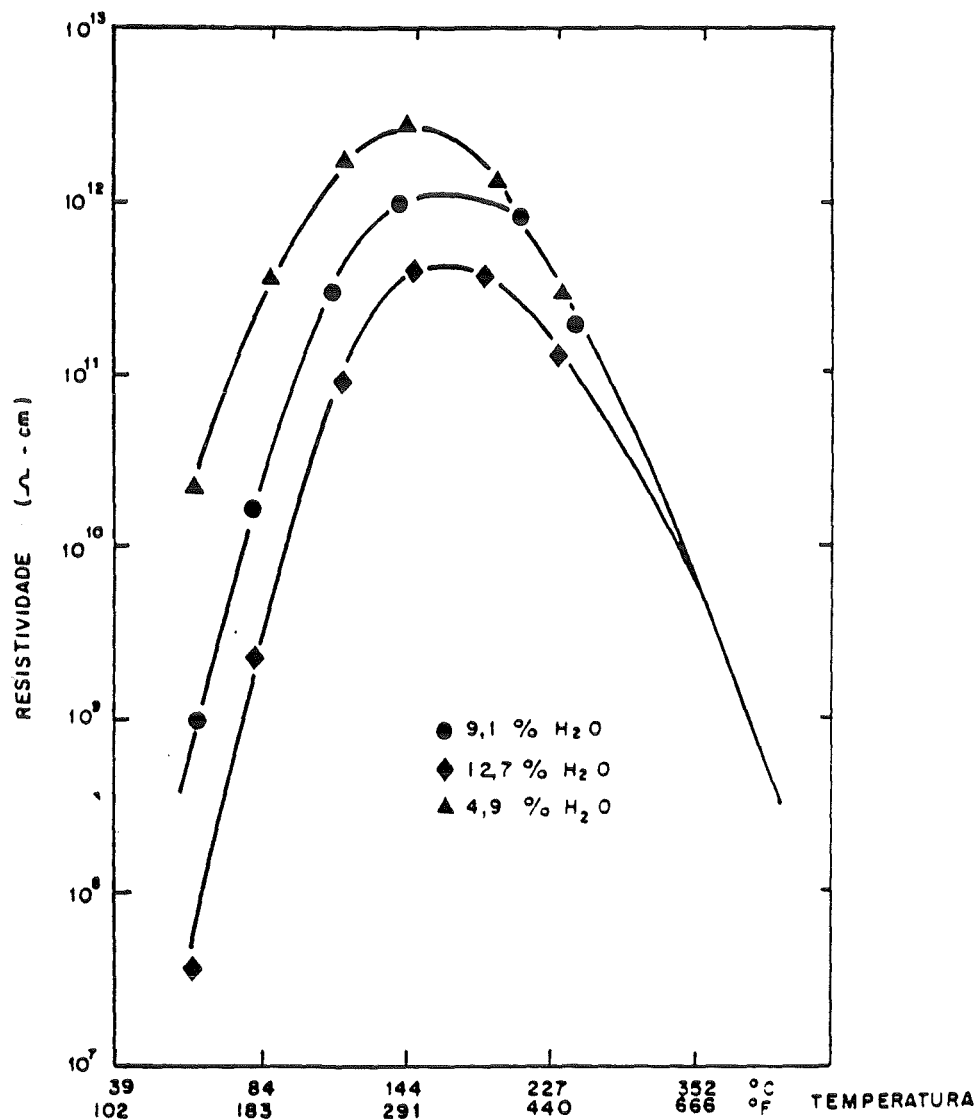


Figura 11 — Variação e resistividade em função da umidade e temperatura para cinzas de carvão.

Desvantagens:

- Investimento inicial alto.
- Exige grande espaço 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 exigidas de controle automático fino.

9.4. EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE GASES E VAPORES

9.4.1. MECANISMOS DE COLETA

O controle de gases e vapores envolve operações unitárias e reações químicas.

As operações unitárias principais são a absorção física, a adsorção e a concentração. Reações químicas ocorrem em casos de absorção e adsorção com reação química (quimissorção), na incineração (combustão) e em processos especiais.

9.4.2. ADSORVEDORES

A adsorção é um processo seletivo e bastante apropriado para a remoção de gases e vapores, quer a baixas concentrações, quer a altas concentrações. A eliminação de compostos odoríferos, 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 também ser feito 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 lavagem de roupas a seco, o qual leva significativa vantagem econômica em relação à incineração pela não necessidade de uso de combustível auxiliar.

A presença de material particulado no fluxo gasoso prejudica a performance do adsorvedor, encurtando a sua vida útil. O mesmo ocorre se houver presença de vapor de água.

A adsorção é fenômeno de transferência de massa de uma fase gasosa (ou líquida) para um sólido poroso. Os materiais com grande capacidade de adsorção, como o carvão ativado e a sílica gel, apresentam grandes áreas superficiais e possuem propriedades de superfície adequadas para tanto.

Em poluição do ar, a adsorção física é a que apresenta maior importância. A adsorção física consiste na ação de forças coercitivas como as forças de Van der Waals, no interior dos poros do material adsorvente. Existem, entre os átomos e as moléculas de uma substância, forças atuantes de natureza elétrica e eletromagnética que estão presentes tanto no material adsorvente como na substância a ser adsorvida. Quando ocorre compatibilidade de forças, ocorre uma atração entre o adsorvente e as substâncias a serem adsorvidas, resultando na fixação das ou da substância na superfície do sólido.

Fatores importantes na adsorção são:

- temperatura, pressão, concentração, tamanho molecular, ponto de ebulição, peso molecular e polaridade do gás (adsorbato);
- polaridade superficial, tamanho e espaçamento dos poros do material adsorvente.

Os principais adsorventes utilizados são:

- carvão ativado;
- alumina ativada;
- sílica gel;
- peneiras moleculares.

Os três primeiros são substâncias amorfas, enquanto as peneiras moleculares são substâncias cristalinas constituídas basicamente de aluminos-silicatos de metais (cálcio, magnésio, potássio e sódio). 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 é o adsorvente mais importante no grupo dos sólidos não polares. Ele é produzido pelo aquecimento de sólidos orgânicos (carvão, madeira, coco, madeira dura, 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 do carvão ativado está na faixa de 0,08 a 0,5 g/cm³.

Os adsorventes, em geral, tem tamanhos na faixa de 4 a 20 mesh (4,76 mm a 0,841 mm) e são disponíveis, em geral, na forma esférica (pelletes).

Outra característica importante de um adsorvente é a sua alta temperatura de oxidação para preveni-la e adequada resistência, de forma a manter-se estruturalmente estável.

A Tabela 5 apresenta algumas características do carvão ativado, sílica-gel e alumina ativada, assim como das terras diatomáceas e *fuller* para fins de comparação.

TABELA 5 — CARACTERÍSTICAS DE ADSORVENTES			
<i>Adsorventes</i>	<i>Área ativa (m²/g)</i>	<i>Volume dos poros (cm³/g)</i>	<i>Diâmetro médio dos poros (Angstrom)</i>
Carvão ativado	500 a 1.500	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 <i>fuller</i>	4,2	1,14	2.200

A Tabela 6 apresenta características específicas das peneiras moleculares, assim como suas principais aplicações.

TABELA 6 — CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES DAS PENEIRAS MOLECULARES (TIPO LINDE)

<i>Tipo</i>	<i>Diâmetro do poro (em Angstrons)</i>	<i>Cátion</i>	<i>Moléculas adsorvidas^a</i>	<i>Usos</i>
3A	3	Potássio	< 3 Angstrons de diâmetro. Exemplo: água e amônia	Secagem e desidratação
4A	4	Sódio	< 3 Angstrons de diâmetro. Exemplos: etanol, H ₂ S, CO ₂ , C ₂ H ₂ e C ₂ H ₆	Adsorção de hidrocarbonetos saturados
5A	5	Cálcio	< 5 Angstrons de diâmetro. Exemplos: (n-C ₄ H ₉) H . n-C ₄ H ₁₀ , C ₃ H ₈ e C ₂₂ H ₁₆	
13X	10	Sódio	< 10 Angstrons de diâmetro	Secagem, remoção de mercaptanas
^a Cada tipo adsorve as moléculas listadas e as precedentes.				

A impregnação do carvão ativado com substâncias químicas adequadamente escolhidas pode aumentar a afinidade adsorptiva 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 pode ser recuperado sem a destruição do adsorvente que deve então ser descartado.

Capacidade de adsorção: existem dois tipos de capacidade de adsorção. Um refere-se à capacidade em relação à 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*.

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.

Na Tabela 7 é mostrada a capacidade de adsorção relativa ao carvão ativado para várias substâncias. Esse quadro é importante para verificar a viabilidade de utilização do carvão ativado para a adsorção de uma substância específica.

A capacidade de adsorção e a retentividade do carvão ativado para algumas substâncias orgânicas são mostradas na Tabela 8.

A retentividade refere-se à quantidade da substância adsorvida que permanece no adsorvente após a desadsorção. A adsorção, sempre que possível, deve ser feita a temperaturas relativamente baixas.

**TABELA 7 — CAPACIDADE DE ADSORÇÃO RELATIVA DO
CARVÃO ATIVADO PARA VÁRIAS SUBSTÂNCIAS ORGÂNICAS**

Grau 4 — Alta capacidade de adsorção.

Um grama adsorve de 20 a 50% do seu próprio peso (média de 33%).

Ácido acético	Ácido caprílico	Acetato de etila
Álcool	Álcool butílico	Álcool butílico
Álcool isopropílico	Benzeno	Cloropicrina
Cresol	Fenol	Fumaça de cigarro
Gasolina	Mercaptanas	Odores corporais
Odores hospitalares	Odores de perfumaria	Óleos essenciais
Ozona	Piridina	Terebentina
Tetracloro de carbono	Tolueno	

Grau 3 — Capacidade de adsorção satisfatória.

Adsorve entre 10 a 25% do seu peso (média de 16,7%).

Acetona	Acroleína	Cloro
Cheiro de fumaça de óleo diesel	Gás sulfídrico	

Grau 2 — Capacidade de adsorção razoável.

Requer estudos específicos para sua utilização.

Acetaldeído	Aminas	Amônia
Butano	Formaldeído	Propano

Grau 1 — Baixa capacidade de adsorção.

Uso não recomendado.

Etileno	Gás carbônico	Monóxido de carbono
---------	---------------	---------------------

TABELA 8 — CAPACIDADE DE ADSORÇÃO E RETENTIVIDADE DO CARVÃO ATIVADO PARA ALGUMAS SUBSTÂNCIAS ORGÂNICAS

<i>Substâncias</i>	<i>Capacidade de adsorção, percentual de peso</i>	<i>Retenção após remoção, percentual de peso</i>
Tetracloreto 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

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. A Figura 12 mostra a capacidade de adsorção de alguns odores por carvão ativado da Pittsburgh Activated Carbon, tipo BPL, tamanho 12 x 30 mesh americana, em condição padrão. A densidade desse material é de 0,5 g/cm³.

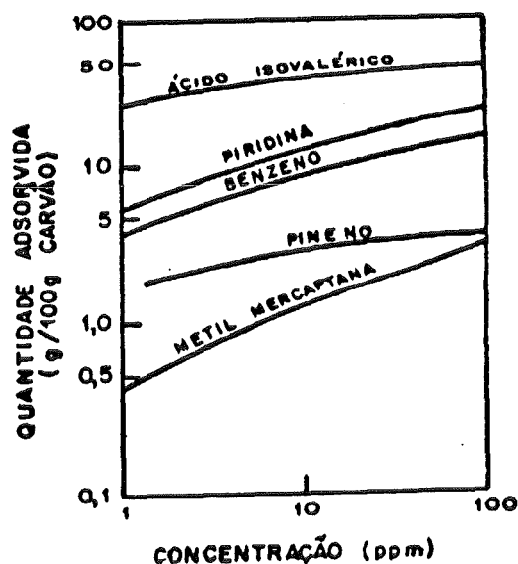


Figura 12 — Capacidade de adsorção de alguns odores por carvão ativado.

A Figura 13 mostra que a capacidade de adsorção é inversamente proporcional à temperatura e diretamente proporcional à concentração.

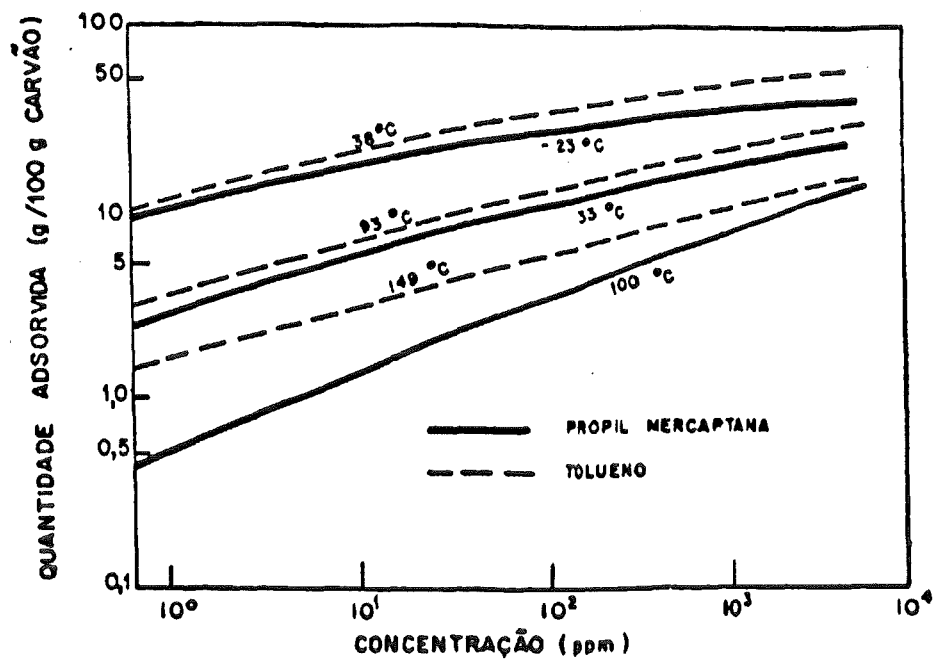


Figura 13 — Variação da capacidade de adsorção em função do tipo de substância, concentração e temperatura.

Tipos de adsorvedores: podem ser de leito único ou múltiplos, fixos ou móveis. A Figura 14 mostra um adsorvedor de leitos múltiplos, fixos. Na Figura 15 é mostrado um adsorvedor de leito fixo de carvão ativado.

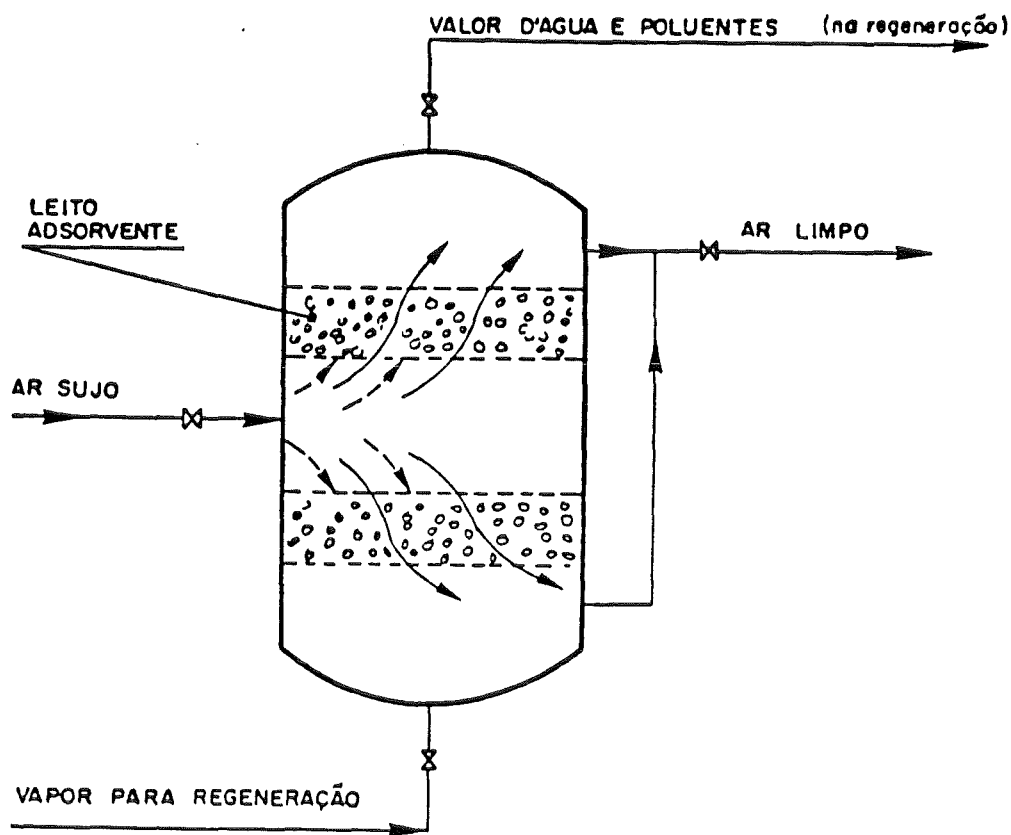


Figura 14 — Adsorvedor de leitos múltiplos.

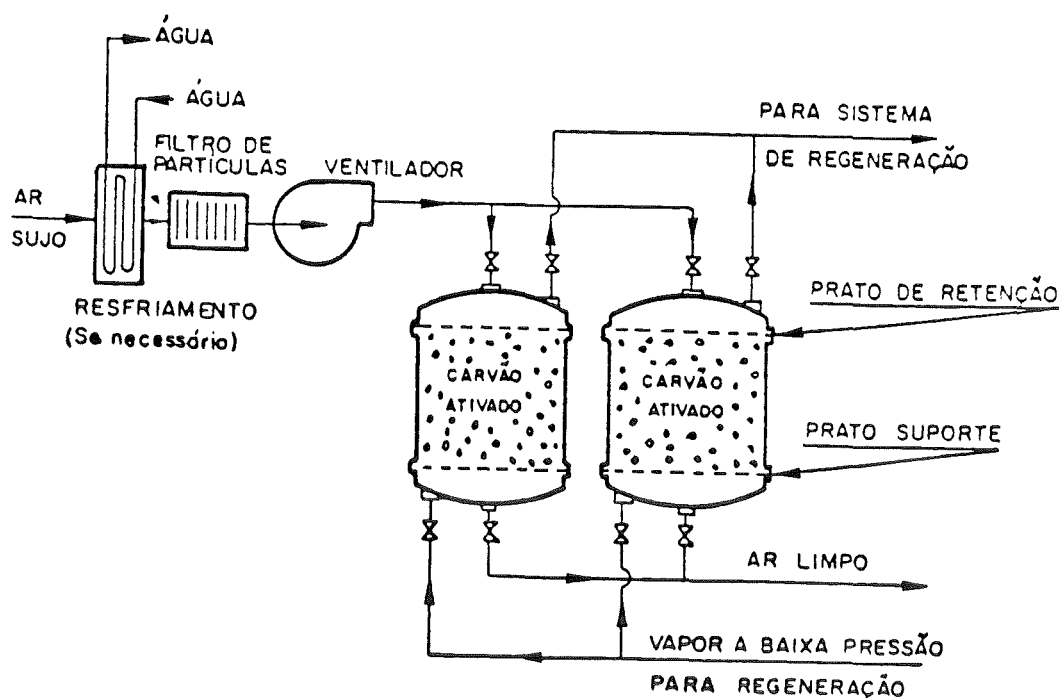


Figura 15 — Adsorvedor de leito simples.

Os adsorvedores podem operar com sistema de regeneração ou o material adsorvente pode ser descartado após a sua 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.

Perda de carga: a perda de carga do adsorvedor é função do tipo e granulometria do material adsorvente e da velocidade superficial através do leito adsorvente.

A Figura 16 apresenta valores de perda de carga para leitos de carvão ativado.

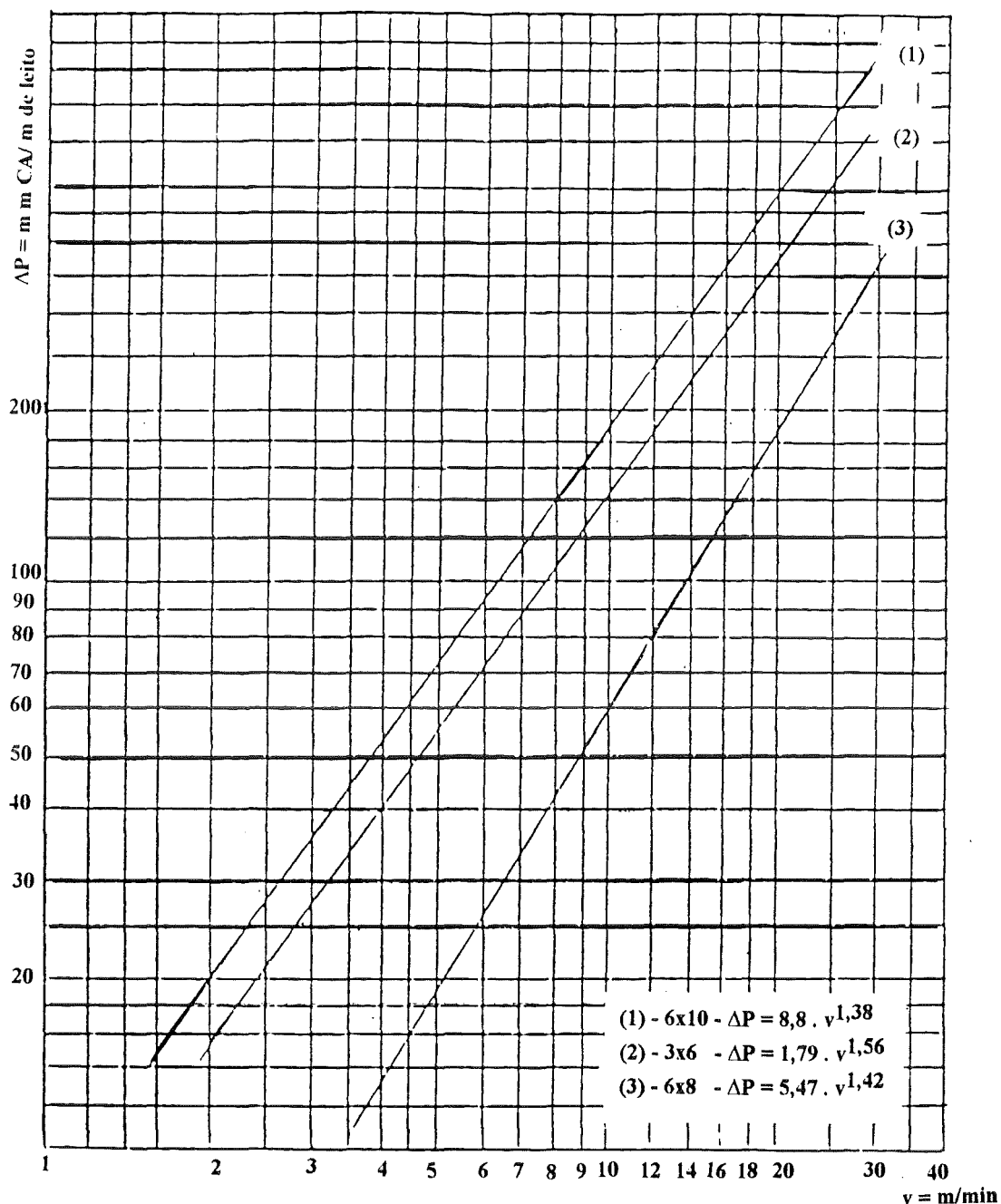


Figura 16 — Perda de carga em leitos de carvão ativado.

Eficiência de remoção: os adsorvedores são extremamente efetivos na remoção 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 empíricos necessitam ser utilizados para estabelecer as condições de operação para atingir a eficiência desejada ou atingível para uma dada aplicação, bem como para estabelecer o *breaking point*.

9.4.3. INCINERADORES

A incineração é um método bastante eficaz à eliminação de gases e vapores de origem orgânica. A combustão, que é o processo utilizado na incineração, transforma os contaminantes combustíveis em dióxido de carbono e vapor d'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 bastante desagradável, transformando-o em dióxido de enxofre e vapor d'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 obter-se 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 por fontes móveis (veículos), através do uso de combustores catalíticos ou térmicos.

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 deve ser suprida pela queima de combustível auxiliar. O sistema de combustão catalítica utiliza oxidação a temperaturas mais baixas que o de combustão por chama direta.

O principal fator de projeto para se obter combustão auto-sustentável é o conhecimento da temperatura mínima requerida para queimar gases ou vapores orgânicos na presença de oxigênio em quantidade adequada. Esta temperatura é conhecida como a de combustão autógena, ou temperatura de combustão catalítica quando é referida a incineradores direto ou pós-queimados e sistemas catalíticos, respectivamente. Ela é influenciada pelo tipo de combustível, conteúdo de oxigênio, conteúdo de energia, velocidade de passagem e outras condições. O tipo de catalisador usado nos sistemas catalíticos é um fator adicional na temperatura de combustão catalítica.

Equipamentos de incineração: três tipos básicos de equipamentos de incineração são utilizados para o controle das emissões de gases e vapores combustíveis. São eles:

- Incinerador de chama direta;
- Incinerador catalítico;
- *Flare*.

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

Incinerador 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 e algumas vezes contém equipamentos para recuperação de calor, (trocadores de calor). A secção transversal deste tipo de equipamento pode ser cilíndrica ou retangular. A Figura 1 mostra um incinerador de chama direta de secção cilíndrica.

O funcionamento do incinerador de chama direta depende do contato da chama e da existência 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 o gasoso, sendo que o combustível líquido também tem sido usado com eficiência.

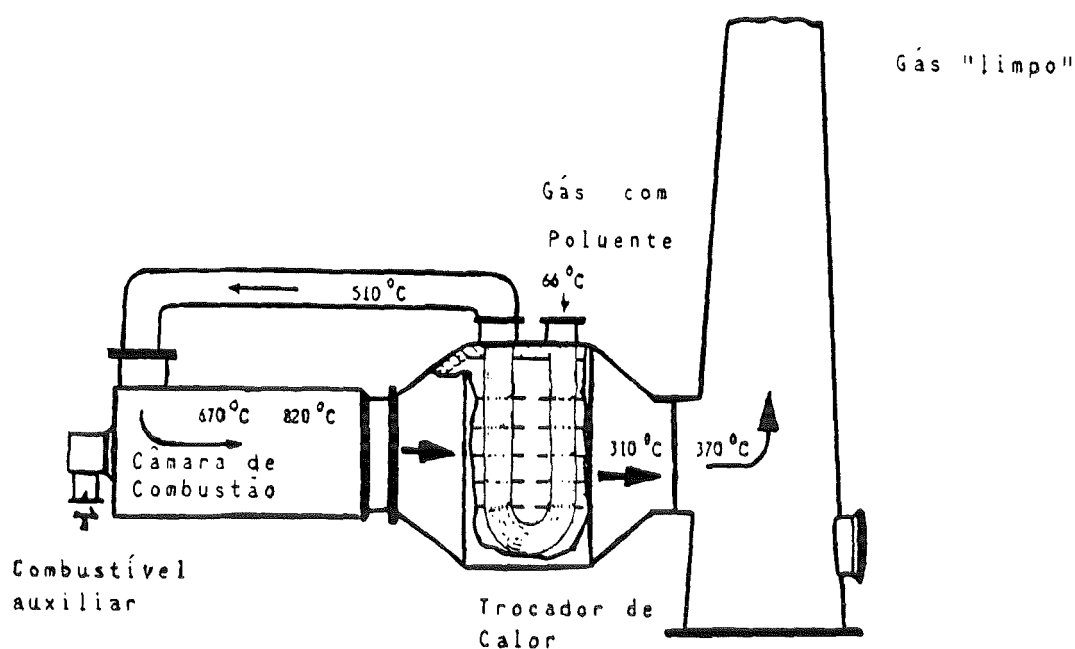


Figura 17 — Incinerador de chama direta.

PARÂMETROS BÁSICOS

- A) **Temperatura:** a Figura 18 mostra a eficiência de um incinerador em função da temperatura na câmara de combustão. Essa figura mostra que para se conseguir eficiência próxima de 100% a temperatura do incinerador deve ser de 815°C ou mais.

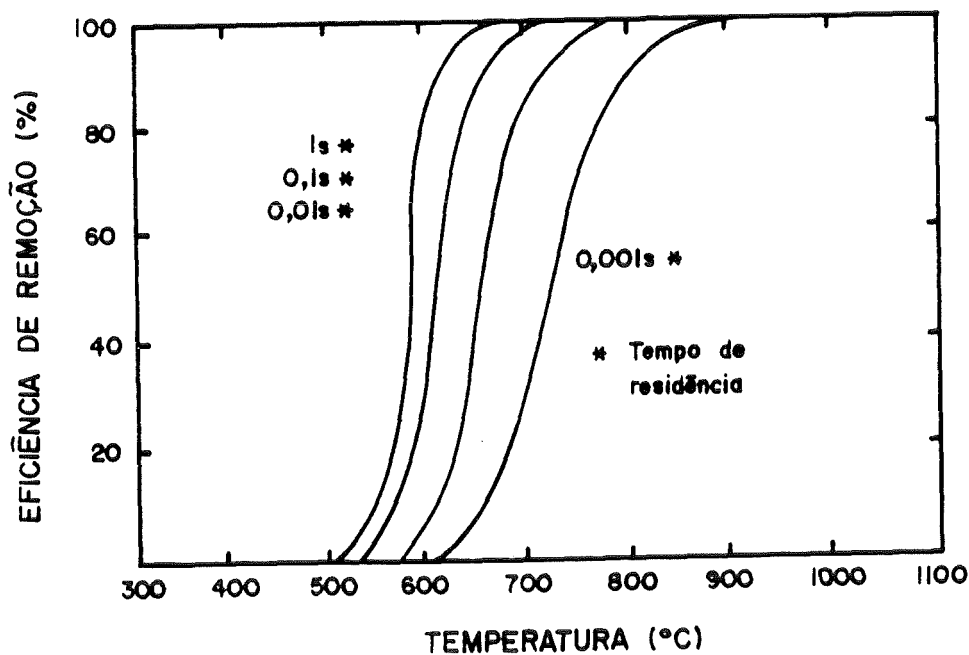


Figura 18 — Variação da eficiência de controle com a temperatura e tempo de residência do gás na câmara de combustão.

A Tabela 9 fornece algumas recomendações de temperaturas 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 a mínima necessária, porque o custo de operação está baseado no consumo de combustível auxiliar.

TABELA 9 — TEMPERATURAS DE OPERAÇÃO RECOMENDADAS PARA INCINERADORES DE CHAMA DIRETA	
<i>Fonte ou operação</i>	<i>Temperatura recomendada (°C)</i>
Controle do solvente	700-715
Controle de odor	700-815
Defumação	650
Cozimento de verniz	650
Cura de Plastisol	650-760
Digestão de material animal	650
Fumaça de óleo e graxa	650-760
Secagem de tinta	650-815
Torrefação de café	650-815
Fritura de gordura	650

- B) **Tempos de Residência (TR):** o tempo de residência é definido como o tempo em que o gás permanece na câmara de combustão e é matematicamente igual a:

$$tr = \frac{\text{Volume da câmara de combustão}}{\text{Vazão do gás}}$$

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 do modo de entrada do combustível auxiliar, do ar, do poluente e também da posição relativa destas entradas.

A câmara de mistura deve prover boa mistura entre os poluentes, o comburente e a chama. As velocidades usuais para a câmara de mistura variam de 7,5 a 15 m/seg. Essa faixa de velocidade, em geral, também é suficiente para evitar a volta de chama, pois é maior que a velocidade de propagação da chama, para a maioria dos casos práticos.

Consumo de combustível auxiliar: a quantidade de calor a ser provida 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.

Essa quantidade de calor será suprida pelo calor produzido na queima do combustível auxiliar. O consumo do combustível auxiliar dependerá do poder calorífico do mesmo e da eficiência de queima. Previsão deve ser feita para possíveis perdas de calor.

Incinerador catalítico: o incinerador catalítico consiste basicamente de uma câmara que contém uma camada do catalisador que promoverá a oxidação do poluente. A incineração catalítica necessita temperaturas mais baixas quando comparada com as da incineração com chama direta, mas, na maioria dos casos, há necessidade de câmara de pré-aquecimento. O incinerador catalítico também deve possuir dispositivos indicadores-controladores de temperatura, dispositivos de segurança e sistema de recuperação de calor.

A Figura 19 mostra esquema de incinerador catalítico. 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.

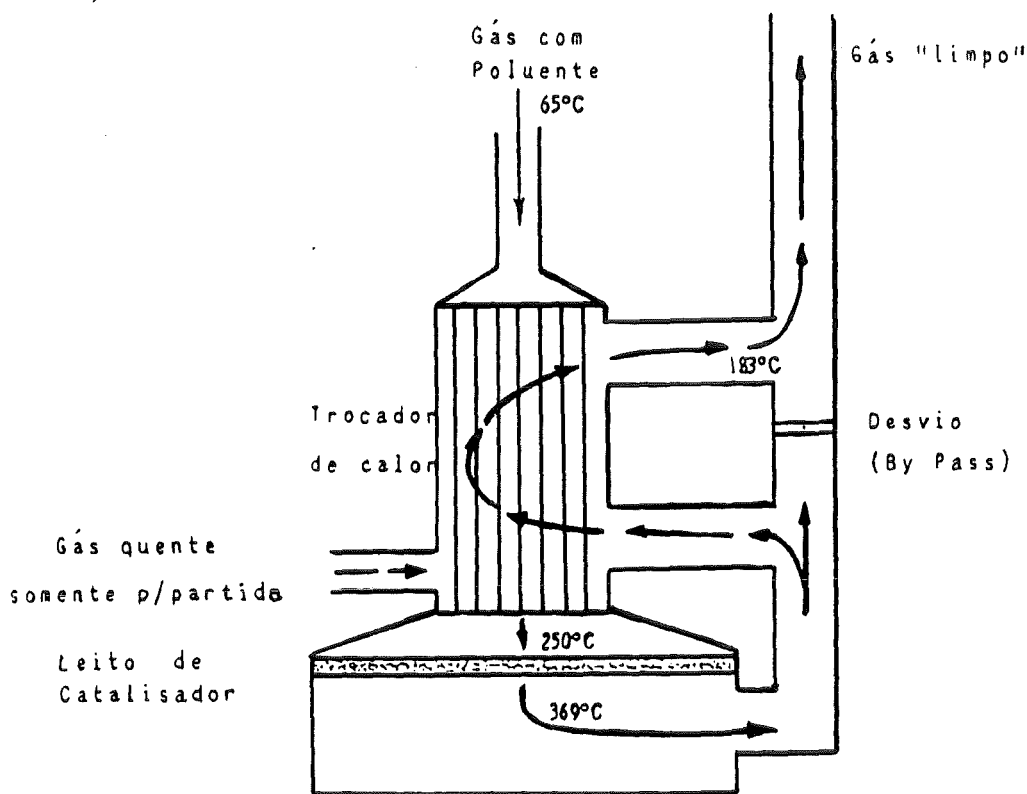


Figura 19 — Incinerador catalítico com recuperador de calor (Rhone-Poulenc), para anidrido ftálico.

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

- difusão dos reagentes para a superfície do catalisador;
- adsorção dos reagentes na superfície do catalisador;
- reação, envolvendo os reagentes adsorvidos;

- difusão dos produtos da reação para fora do catalisador.

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

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

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

Os elementos que tem sido utilizados como catalisadores são metais e óxidos metálicos da família da platina e outros metais nobres. Como a catálise é 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.

A temperatura na entrada do leito catalisador está usualmente na faixa de 340°C e 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. A Figura 20 mostra a influência de um hidrocarboneto estável e de baixo peso molecular (metano) o qual é difícil de ser oxidado, na eficiência do incinerador catalítico.

A eficiência do incinerador catalítico deteriora com o tempo de uso. Portanto, deve ser feita a reposição periódica dos elementos. O tempo varia largamente, desde alguns meses até vários anos. Em adição, a performance do catalisador é seriamente afetada por materiais que o envenenam, como mercúrio, arsênio, zinco e chumbo. Substâncias que cobrem o catalisador, tais como resinas, devem ser evitadas.

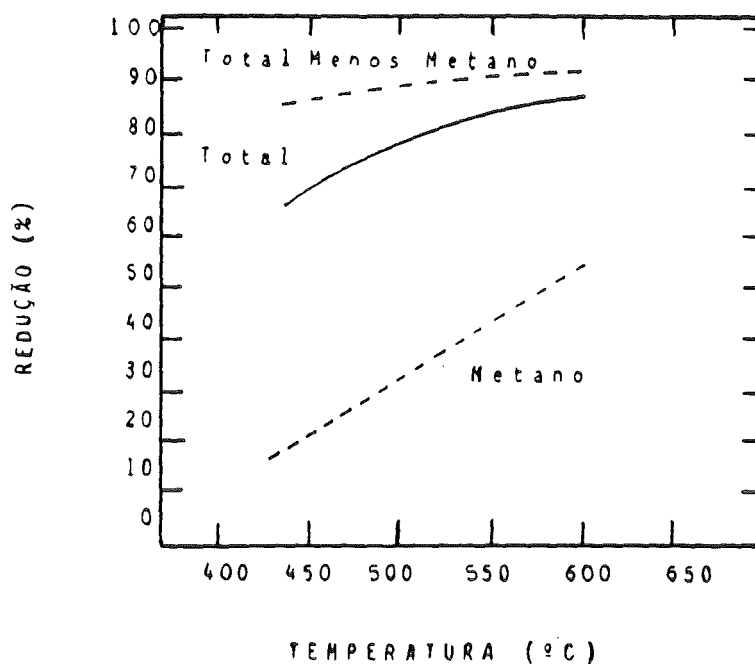


Figura 20 — Influência do metano na eficiência do incinerador catalítico.

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.

9.4.4. ABSORVEDORES

Os absorventes são equipamentos utilizados na absorção de gases. A absorção é uma transferência de massa (poluentes) na fase gasosa para a fase líquida (absorvente).

Os absorvedores usualmente utilizados são:

- torre de enchimento;
- torre de pratos;
- lavador Venturi;
- lavador de *spray*.

A Figura 21 mostra os absorvedores tipo torre de enchimento e de pratos. O material de enchimento é mostrado na Figura 21.

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) e hidrocarbonetos leves.

Passos para o projeto:

- seleção do solvente;

- obtenção de dados de equilíbrio de reação;
- seleção do tipo de absorvedor;
- determinação da vazão do líquido;
- escolha do enchimento;
- dimensionamento de material de construção;
- escolha de material de construção.

Seleção do líquido absorvente:

- 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;
- o absorvente deve ser não volátil para evitar emissões secundárias e aumento de consumo;
- deve ser não corrosivo para reduzir custo com materiais de construção especiais;
- deve ser barato e facilmente disponível;
- deve ter baixa viscosidade para aumentar a absorção e reduzir o *flooding* (inundação);
- deve ter baixa toxicidade, ser não inflamável e quimicamente estável.

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

Seleção do absorvedor: vários fatores ditam a escolha do absorvedor. Inicialmente deve ser escolhido aquele que proporcione a maior área de transferência de massa, de funcionamento simples e de menor custo.

Os enchimentos são utilizados para aumentar a área disponível para transferência de massa, no entanto podem ser também um foco de incrustações e entupimentos.

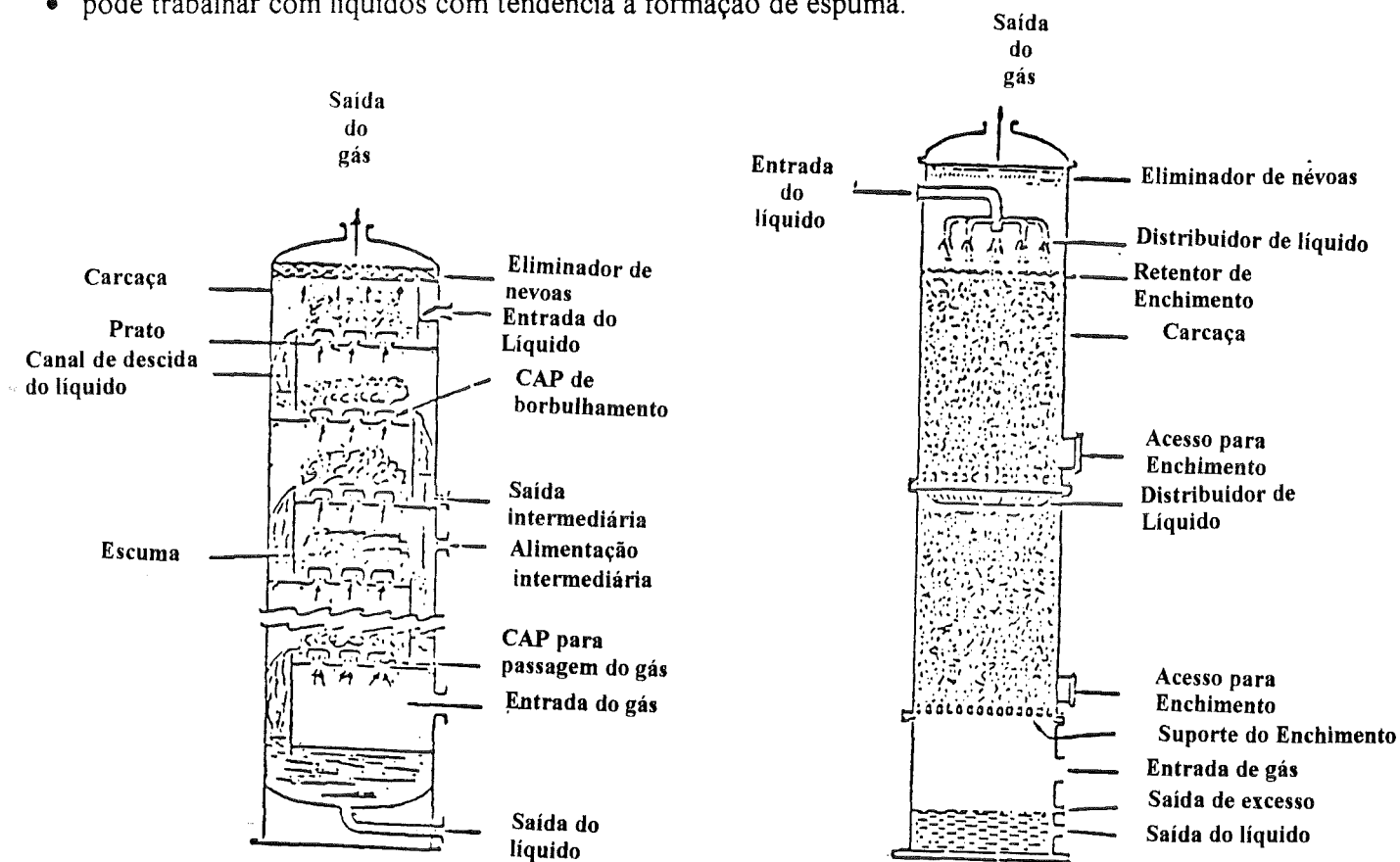
No caso de torres de pratos, o contato é feito através dos borbulhadores.

No caso do lavador Venturi ou lavador tipo *spray*, o contato entre gás e líquido é feito através da superfície das gotas formadas, sendo recomendados somente para gases altamente solúveis ou altamente reativos no líquido absorvente escolhido.

Em relação às torres de pratos, as torres de enchimento apresentam as seguintes vantagens:

- apresentam estruturas mínimas, ou seja, somente um suporte do enchimento e um distribuidor de líquidos a cada 3 metros;
- são mais versáteis, pois o enchimento pode ser trocado para aumentar a eficiência, diminuir a perda de carga ou aumentar a capacidade;

- no caso de fluidos corrosivos, podem ser utilizados enchimentos de cerâmica ou de plásticos;
- custo relativamente baixo quando se utiliza enchimento plástico;
- pode trabalhar com líquidos com tendência à formação de espuma.



Absorvedores de enchimento e de pratos



Figura 21 — Absorvedores e material de enchimento.

A torre de pratos, por sua vez, apresenta as seguintes vantagens:

- é mais fácil de ser limpada;

- em geral tem menor peso;
- é melhor quando há grandes variações de temperatura, pois resiste à contração e expansão térmica;
- não apresenta o problema de canalização *channeling* do líquido — tendência do líquido se dirigir para as paredes do absorvedor de enchimento.

Perda de carga: a perda de carga em torres de enchimento em geral varia de 10 a 100 mmCA por metro de altura da torre.

Eficiência de controle: A eficiência de controle é função da qualidade do projeto, das condições de operação e de manutenção. Em geral, apresentam eficiências na faixa de 70 a 95%.

10. OS VEÍCULOS AUTOMOTORES E A POLUIÇÃO DO AR

Os veículos são atualmente a principal fonte de emissão de poluentes para a atmosfera, nos grandes centros urbanos. Na América Latina merecem destaque a poluição do ar na cidade do México, cidade de São Paulo, cidade do Rio de Janeiro e Santiago do Chile. Na Região Metropolitana de São Paulo os veículos contribuem com mais de 90% da emissão de monóxido de carbono, hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio e são importantes contribuidores da emissão de dióxido de enxofre e material particulado.

A crise energética, principalmente o segundo embargo do petróleo de 1979, fez com que o Brasil adotasse o álcool (etanol) hidratado carburante. A frota brasileira a álcool em 1990 era de 5,4 milhões de veículos contra 8 milhões de carros a gasolina.

Teste realizados em 1981 mostraram que os carros a álcool emitiam 65% menos monóxido de carbono que os carros a gasolina e 69% menos hidrocarbonetos. A emissão de óxidos de nitrogênio era 13% maior, enquanto eram emitidos 441% mais, mas a emissão deste composto é pequena em termos absolutos.

A Tabela 10.1 mostra a evolução das emissões dos carros a álcool e a gasolina, onde se percebe que houve uma redução substancial nas emissões de monóxido de carbono em ambos. A menor emissão de monóxido de carbono nos carros a álcool foi decisiva para que os níveis deste poluente na cidade de São Paulo não chegassem a valores críticos, sendo que todas as cidades do Brasil se beneficiaram, em termos de qualidade do ar, com o uso do álcool.

Um estudo realizado na Faculdade de Medicina da USP mostrou que as emissões do álcool eram menos tóxicas do que aquelas de carros a gasolina.

O uso do álcool anidro nos veículos a gasolina, em substituição ao chumbo tetraetila, foi muito benéfica pois ocasionou a queda acentuada dos níveis de chumbo no ar das cidades brasileiras, em especial nas capitais, notadamente Rio de Janeiro e São Paulo.

O álcool também tem influência positiva em relação ao Efeito Estufa, pois trata-se de combustível que não contribui para o aumento dos níveis de gás carbônico (CO₂) na atmosfera. O gás carbônico que é emitido para a atmosfera na queima do álcool, foi anteriormente retirado da mesma atmosfera pelo processo de fotossíntese, na lavoura de cana de açúcar.

O Proalcool, analisado dentro de uma visão sistêmica, foi de grande importância para o país, na redução da importação de petróleo, no desenvolvimento da tecnologia do carro a álcool etílico, única no mundo, e da tecnologia de produção de um combustível limpo e de fonte renovável. Os impactos negativos do

Proalcool estão sendo resolvidos, sendo que o maior deles, a disposição da vinhaça, já foi resolvido. A poluição pela queima de canaviais ainda precisa ser equacionada. O bagaço de cana é hoje um energético importante.

Cálculos da Copersucar mostram que as “emissões evitadas” de CO₂ somaram 10,64 milhões de toneladas por ano, considerada a safra 90-91, sendo 7,4 milhões de toneladas pela substituição da gasolina e 3,24 milhões de toneladas na substituição de óleo combustível na indústria de açúcar principalmente.

11. LEGISLAÇÃO REFERENTE À POLUIÇÃO DO AR

A partir de setembro de 1981 a questão ambiental no Brasil passou a ser regida pela Lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981, que estabeleceu a Política Nacional de Meio Ambiente e o Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA).

A Resolução CONAMA nº 18, de 6 de maio de 1986, instituiu o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), com limites máximos de emissão para motores e veículos novos, bem como regras e exigências para o licenciamento para fabricação de uma configuração de veículo ou motor, e para a verificação da conformidade da produção.

A Resolução nº 5, de 15 de julho de 1989, instituiu o PRONAR — Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para proteção da saúde e bem-estar das populações e melhoria da qualidade de vida, com o objetivo de permitir o desenvolvimento econômico e social do país, de forma ambientalmente segura, pela limitação dos níveis de emissão de poluentes por fontes de poluição atmosférica, com vista à melhoria da qualidade do ar, ao atendimento aos padrões estabelecidos e o não comprometimento da qualidade do ar em áreas consideradas não degradadas.

A Resolução CONAMA nº 3, de 28 de julho de 1990, estabeleceu os Padrões Primários e Secundários de Qualidade do Ar e os métodos de referência para aferição da qualidade do ar, bem como os critérios para episódios agudos de poluição do ar.

A Resolução CONAMA nº 8, de 6 de dezembro de 1990, estabeleceu os limites máximos de emissão (Padrões de Emissão) de poluentes no ar, para processos combustão externa em fontes novas fixas.

A Resolução CONAMA nº 1, de 23 de janeiro de 1986, instituiu a Avaliação de Impactos Ambientais como um dos instrumentos da Política Nacional de Meio Ambiente, estabelecendo a obrigatoriedade da elaboração de Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e respectivo Relatório de Impacto no Meio Ambiente (RIMA), a serem submetidos à aprovação do órgão estadual competente, e do IBAMA em caráter supletivo, previamente ao licenciamento de atividades modificadoras do meio ambiente, com significativo impacto ambiental, conforme listado na Resolução.

Além desses documentos legais merecem destaque:

- A Lei 6.803, de 2 de julho de 1980, que estabeleceu as diretrizes básicas para o zoneamento industrial nas áreas críticas de poluição, listadas no Decreto nº 76.389 de 3 de outubro de 1975;
- A Portaria do Ministério do Interior nº 100 de 1980, que estabeleceu os limites de emissão para fumaça preta em veículos diesel. O limite de emissão é o Ringelmann 2 (40%) a altitudes abaixo de 500 metros e para frotas com circulação restrita à área urbana, em qualquer altitude. Para altitudes maiores que 500 metros, o limite fixado é o Ringelmann 3 (60%).

12. PROGRAMAS DE CONTROLE E SUAS CARACTERÍSTICAS

12.1. NÍVEL FEDERAL

12.1.1. PROGRAMA PROCONVE

O “PROCONVE — Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores” foi estabelecido pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente — CONAMA. Sua regulamentação se deu pela Resolução CONAMA nº 18 de 06 de maio de 1986. A operacionalização deste programa fica a cargo do IBAMA, sendo a CETESB o órgão de técnico de apoio, inclusive em termos de laboratório.

O PROCONVE prevê a homologação de protótipos e a certificação da produção de veículos, tendo como complemento normativo o “Programa Nacional de Certificação de Conformidade de Veículos Automotores: Emissão — PROVEM”, estabelecido pelo CONMETRO e regulamentado pela Resolução CONMETRO nº1, de 22 de outubro de 1987.

A estratégia destes programas prevê a exigência dos limites estabelecidos para motores e veículos novos, a certificação de protótipos, linhas de produção e de peças de reposição, para garantir a qualidade do produto e sua conformidade, bem como a implantação de programas de inspeção e manutenção de veículos em circulação (resolução CONAMA 07/93). Os limites de emissão e as exigências tornam-se progressivamente mais restritivos, sendo que os valores de emissão mais restritivos serão exigidos em 01/01/2002 para veículos pesados e 01/01/97 para veículos leves.

12.1.2. PROGRAMA PRONAR

Instituído em 15 de junho de 1989, pela Resolução CONAMA nº 5, o “Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar — PRONAR” tem como estratégia básica limitar, a nível nacional, as emissões por tipologia de fontes e poluentes prioritários, reservando o uso de Padrões de Qualidade do Ar como ação complementar de controle.

Os instrumentos básicos do PRONAR são:

- Limites de Emissão diferenciados, em função da classificação de usos pretendidos para as diversas áreas, sendo mais rígidos para as fontes novas de poluição. Os limites máximos de emissão serão fixados por resoluções específicas do CONAMA.
- Adoção de Padrões Nacionais de Qualidade do Ar. Foram estabelecidos dois tipos de padrões de qualidade do ar: os padrões primários e os padrões secundários. Os padrões primários destinam-se à proteção de saúde pública, constituindo-se em metas de curto e médio prazo. Os padrões secundários são valores de concentração abaixo dos quais se prevê o mínimo efeito adverso ao bem-estar das populações e o mínimo dano sobre a flora, fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral, constituindo-se em meta a longo prazo.

TABELA 12.1.
LIMITES DE EMISSÃO PARA VEÍCULOS LEVES EQUIPADOS COM MOTOR DO
CICLO OTTO — RESOLUÇÕES CONAMA Nº 18 DE 06/05/86 E Nº 03 DE 15/06/89

<i>Tipo de emissão</i>	<i>Vigência</i>	<i>CO (g/km)</i>	<i>HC (g/km)</i>	<i>NO_x (g/km)</i>	<i>Aldeídos (g/km)</i>	<i>CO em marcha lenta (%)</i>
Escapamento	1989-1991	24	2,1	2,0	—	3,0
	1992-1996	12,0	1,2	1,4	0,15	2,5
	Janeiro/97	2,0	0,3	0,6	0,03	0,5
Evaporativa	1989	—	6,0 g/teste	—	—	—
Cárter	Janeiro/89	—	0	—	—	—

12.2. NÍVEL ESTADUAL

As ações de controle de poluição do ar a nível estadual estão sendo tomadas tanto com o caráter preventivo como corretivo. Basicamente essas ações são:

- ação preventiva através do licenciamento das fontes, inclusive com EIA-RIMA quando for o caso, e com exigências de medidas de controle;
- ação preventiva através da legislação de uso do solo, em várias regiões do Brasil, como por exemplo a lei 1.817/78 de Zoneamento Industrial Metropolitano, na Grande São Paulo, que incorpora parâmetros de poluição do ar, e a lei de Zoneamento Industrial da Região Metropolitana do Rio de Janeiro;
- ação corretiva através do atendimento de denúncias da população;
- ação corretiva através de programas de atendimento aos Padrões de Qualidade do Ar, nas regiões consideradas saturadas.

A ação preventiva através do licenciamento ambiental é exercida em quase todos os Estados, e quando não é feita pelo Estado, é feita supletivamente pelo IBAMA.

A ação corretiva através de denúncias da população é uma constante em todos os Estados que possuem órgão de meio ambiente e mais intensiva nas regiões mais industrializadas.

A ação corretiva, para atendimento aos Padrões de Qualidade do Ar, é exercida naquelas regiões onde estes os padrões foram ultrapassados e necessitam de ação de recuperação.

No caso de poluentes típicos de veículos automotores, as ações corretivas são atreladas aos padrões de emissão estabelecidos a nível federal pelo PROCONVE. A nível de Estados são realizadas atividades de esclarecimento da população e de seu envolvimento no processo (regulagem periódica dos veículos, evitar locais congestionados, etc.) e mesmo de fiscalização, como é o caso da fiscalização da fumaça preta de ônibus e caminhões.

A participação dos profissionais da área médica tem melhorado nos últimos anos, mas ainda é pequena. Faltam estudos epidemiológicos nacionais que possam mostrar as ações de controle de forma a otimizar os recursos financeiros aplicados.

12.3. PROGRAMAS DE INTERVENÇÃO EM SITUAÇÕES DE EMERGÊNCIA

Em 28 de junho de 1990 o CONAMA, através da Resolução nº 3, que fixou os Padrões de Qualidade do Ar nacionais, estabeleceu também os Níveis de Qualidade do Ar para o Plano de Emergência para Episódios Críticos de Poluição do Ar, visando providências dos Estados e Municípios, assim como de entidades privadas e comunidade em geral, com o objetivo de prevenir grave e iminente risco à saúde da população, com três níveis de atuação: ATENÇÃO, ALERTA e EMERGÊNCIA.

A declaração dos níveis de atenção, alerta e emergência depende, além do atingimento das concentrações, da manutenção das emissões e de condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão nas 24 horas subseqüentes.

13. PARTICIPAÇÃO DA SOCIEDADE

A participação da sociedade no processo de controle de poluição do ar iniciou-se com a apresentação de denúncias de focos poluidores. Atualmente o envolvimento da sociedade tem sido bastante amplo, privilegiando-se o seu envolvimento como agente modificador da qualidade do ar e como agente indutor de modificações estruturais.

A educação ambiental está sendo implantada a nível federal, estadual e municipal, seja como parte do currículo escolar nas escolas de 1º e 2º graus ou como educação informal. Informar adequadamente a população, conscientizá-la e motivá-la para participar do processo tem se mostrado a forma correta de envolvê-la no processo.

Exemplos de informação à população são os Relógios da Poluição, instalados em importante avenidas, em pontos estratégicos da cidade de São Paulo e que informam a nível de poluição para os motoristas que se dirigem ao centro da cidade, de forma que mesmos possam decidir quanto a ida ou não a locais mais poluídos; os Postos de Diagnóstico, em que se faz a verificação gratuita do estado de funcionamento dos veículos quanto à emissão de poluentes; a simulação de episódio crítico de poluição do ar, com o fechamento do centro da cidade de São Paulo, que contou com a adesão de mais de 90% da população; a divulgação diária, nos jornais, dos níveis de poluição do ar no Rio de Janeiro e em São Paulo.

A integração indústria-comunidade ganhou corpo na década de 80. Muitas indústrias poluidoras passaram a dialogar com sua comunidade. Os primeiros contatos entre a empresa e a comunidade geralmente acontecem em meio a um conflito social já desencadeado.

Atualmente muitas empresas abrem as suas portas à comunidade para que a mesma sinta a forma de condução do problema pela empresa. Esta mudança de atitude está muito relacionada com a questão da "imagem da empresa", que tem repercussões econômicas sérias, bem como, no caso de multinacionais, a repercussão negativa no país de origem e a nível internacional.

A participação da população nas audiências públicas previstas na Resolução CONAMA 1/86 (EIA-RIMA) tem sido muito importante para o respeito aos anseios, sentimentos e desejos da população.

Dentro desse processo deve-se destacar a participação da classe política, das entidades ambientalistas e de outros representantes da sociedade civil organizada, que, eliminados os excessos e interesses menores, são de fundamental importância para que o controle de poluição se faça de acordo com o que a maioria da população deseja.

Um instrumento de participação comunitária que vem sendo utilizado é o “Painel Ambiental”, destinado a coleta de informações relativas a frequência e intensidade dos poluentes percebidos pela comunidade diariamente. Os dados coletados através de diários são discutidos com os observadores, a cada período determinado pela metodologia, e as ocorrências anormais devem ser identificadas de imediato. Este tipo de instrumento tem sido útil para detectar alterações observadas na comunidade, antes, durante e após a instalação de sistemas de controle de poluição.

14. ÁREAS CRÍTICAS E AÇÕES DESENVOLVIDAS — EXEMPLOS

14.1. PLANO DE CONTROLE DE DIÓXIDO DE ENXOFRE — REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

Para o controle da poluição do ar por dióxido de enxofre a estratégia utilizada na Região Metropolitana de São Paulo estabeleceu em 66% a redução global necessária, utilizando o modelo proporcional (Rollback Simples).

Em 1982, tendo em vista que 79% das emissões de dióxido de enxofre eram provenientes da queima de combustíveis em fontes estacionárias e a dificuldade, a curto prazo, da redução do teor de enxofre no óleo diesel, a CETESB fixou em 80% a redução pretendida nas emissões deste poluente, por fontes estacionárias, a ser atingida até dezembro de 1985. Esta meta foi atingida em julho de 86.

O efeito da aplicação desta estratégia na qualidade do ar foi bastante efetivo. As concentrações de dióxido de enxofre passaram a atender aos Padrões de Qualidade do Ar em todas as estações, até 1989. Em 1990 a Estação Tatuapé violou o padrão anual com a média de $132 \mu\text{g}/\text{m}^3$, embora sem violação do padrão de 24 horas, voltando a ficar dentro do padrão no ano seguinte.

14.2. CUBATÃO

O problema da poluição do ar de Cubatão pode ser citado como exemplo maior da degradação da qualidade do ar no Brasil, já tendo sido chamada de “Vale da Morte” e também como exemplo da capacidade brasileira de reverter a situação, cujo programa de recuperação teve os elogios do representante do Programa de Meio Ambiente das Nações Unidas para a América Latina.

“A disposição topográfica, mais a concentração populacional e industrial induz à formação de um microclima local diferenciado das vizinhanças de Cubatão, principalmente no tocante à dispersão de poluentes. No inverno a precipitação pluviométrica, elemento depurador da atmosfera, reduz-se para cerca da metade, comparativamente às outras estações do ano. A calmaria (ausência de vento) é superior a 30% na região, atingindo valores próximos a 40% no inverno, sendo mais frequente acontecer ao anoitecer e se intensificar entre a madrugada e o amanhecer. Todas essas condições, mais a ocorrência de inversões térmicas, caracteriza como desfavoráveis as condições de dispersão desta região em grande parte do período de abril a setembro, quando ocorrem as maiores concentrações de poluentes na região.”

A qualidade do ar de Cubatão é determinada quase que exclusivamente por fontes industriais, sendo críticos os níveis de material particulado registrados na região, no começo da década de 80, atingindo um pico de $1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, média de 24 horas, em 1983.

Além dos possíveis danos à saúde da população, conforme verificado por pesquisadores da USP, a encosta da Serra do Mar, nas proximidades das indústrias, teve a sua vegetação gravemente afetada e vem sendo alvo de programa de re-vegetação por parte da CETESB.

O complexo industrial é representado por 23 indústrias incluindo-se uma siderúrgica, uma refinaria de petróleo, várias indústrias de produção de fertilizantes, indústrias químicas e outras. A Refinaria Presidente Bernardes foi inaugurada em 1955 e a siderúrgica COSIPA em 1962.

Para reverter a situação, o Governo do Estado de São Paulo, através da CETESB, estabeleceu em 1984 o Plano de Ação para Controle da Poluição Ambiental de Cubatão e o Plano de Prevenção de Episódios Agudos de Poluição do Ar, cujos resultados podem ser mostrados pela redução dos episódios críticos registrados na região (Tabela 14.1.).

A região foi considerada em Vigilância Permanente, sendo que, em relação à poluição do ar, foram exigidos limites de emissão dentro da melhor tecnologia prática disponível. Em função do plano de controle que vem sendo executado, as concentrações de pico declinaram e as médias anuais, embora continuem acima dos padrões, apresentam tendência decrescente. Até dezembro de 1990, 206 das 230 fontes de poluição do ar já estavam controladas. O esforço realizado livrou Cubatão do incômodo título de "Vale da Morte". As ações devem prosseguir até o controle total da situação.

TABELA 14.1. — NÚMERO DE ESTADOS DE ALERTA E EMERGÊNCIA REGISTRADOS EM VILA PARISI — CUBATÃO			
<i>Ano</i>	<i>Alerta</i>	<i>Emergência</i>	<i>Total</i>
1984	16	1	17
1985	8	1	9
1986	1	0	1
1987	3	0	3
1988	4	0	4
1989	0	0	0
1990	1	0	1
1991	2	1	3
Fonte: CETESB			

Parte 2

SELEÇÃO DE SISTEMAS DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR

1. INTRODUÇÃO

A característica básica que influencia a seleção de sistemas de controle da poluição do ar, em primeira instância, é a eficiência de coleta necessária para enquadrar emissão da fonte nos padrões exigidos. A eficiência de coleta, para todos os tipos de coletores de material particulado, é dependente da distribuição do tamanho das partículas presentes no gás a ser tratado.

A Tabela 1 mostra a eficiência de coleta de partículas para vários tipos de equipamentos, em função do tamanho das partículas. Os valores apresentados são eficiências usuais, e são apresentadas somente para fins comparativos, uma vez que a eficiência de cada equipamento depende das condições de projeto e de operação.

TABELA 1 — EFICIÊNCIA FRACIONADA DE COLETORES DE MATERIAL PARTICULADO EM FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHO DAS PARTÍCULAS (EM PORCENTAGEM)					
<i>Tipo de equipamento</i>	<i>Faixas de diâmetros (μm)</i>				
	<i>0-5</i>	<i>5-10</i>	<i>10-20</i>	<i>20-44</i>	<i>> 44</i>
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
Lavadores Venturi (lavador de alta energia)	95,0	99,5	100,0	100,0	100,0
Precipitador eletrostático	97,0	99,0	99,5	100,0	100,0
<i>Nota:</i> Valores para fins comparativos. Não deverão ser utilizados para fins de projetos.					

2. FATORES ENVOLVIDOS

Os fatores envolvidos na escolha de um equipamento de controle, técnica e economicamente viável, são:

2.1. CARACTERÍSTICAS DO PROBLEMA

A) Poluentes emitidos

B) *Quantidade emitida, obtida através de:*

- Balanço material
- Fatores de emissão
- Amostragem em chaminé

C) *Características do fluxo gasoso:*

- Composição do gás
- Vazão de gases a serem tratados
- Variabilidade do fluxo
- Temperatura dos gases
- Pressão dos gases
- Umidade e ponto de orvalho
- Viscosidade
- Corrosividade
- Explosividade

D) *Características dos poluentes:*

- Reatividade
- Concentração
- Granulometria (se partícula)
- Composição
- Densidade
- Forma da partícula
- Inflamabilidade
- Abrasividade
- Corrosividade
- Propriedades elétricas
- Higroscopicidade

- Solubilidade
- Capacidade de se aglomerar (no caso de partículas)
- Reatividade

E) *Condição de lançamento na atmosfera:*

- Altura da chaminé
- Localização da chaminé

F) *Características da indústria:*

- Condições meteorológicas da região
- Localização em relação à áreas residenciais, parques, áreas verdes em geral, e a outras indústrias mais sensíveis à poluição
- Disponibilidade de insumos (água, energia elétrica e combustíveis)
- Área disponível para implantação do sistema de controle
- Condições para disposição de resíduos
- Necessidade de recuperação do calor

G) *Possíveis efeitos dos poluentes:*

- Danos à saúde
- Danos à vegetação
- Danos a materiais
- Odor
- Natureza das reclamações

H) *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 quanto à disposição de resíduos

2.2. POSSÍVEIS SOLUÇÕES

A) *Métodos indiretos:*

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

B) *Métodos diretos:*

- Ciclones
- Multiciclones
- Lavadores
- Lavador Venturi
- Filtros de tecido
- Precipitadores eletrostáticos
- Absorvedores
- Adsorvedores
- Incineradores de gases
- Condensadores
- Outros

C) *Combinação de dois ou mais métodos*

D) *Características de cada alternativa:*

- Aplicabilidade ao caso
- Eficiência de controle
- Espaço requerido
- Consumo de água

- Consumo de energia
- Controles requeridos
- Simplicidade ou complexidade de construção e operação
- Requisitos de manutenção
- Flexibilidade do sistema
- Aspectos de segurança
- Vida média
- Temperatura máxima de operação
- Limitação quanto à umidade
- Materiais de construção requeridos
- Equipamento auxiliares
- Disponibilidade no mercado (equipamento e peças)
- Disponibilidade e qualidade da assistência técnica
- Sistemas de exaustão

2.3. ASPECTOS ECONÔMICOS DE CADA ALTERNATIVA

A) Custo de implantação:

- Projeto
- Materiais auxiliares
- Construção civil
- Movimentação de terra
- Estrutura necessária
- Custo de instalação e montagem
- Tratamento de resíduos
- Transporte
- Imposto
- Seguro

- B) *Custo de operação*
- C) *Custo de manutenção*
- D) *Custo anualizado*

3. VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS ALTERNATIVAS

É importante verificar, para cada alternativa de controle, os seus usos, vantagens e desvantagens. Esses fatores estão apresentados a seguir, para controle direto:

3.1. CÂMARA DE SEDIMENTAÇÃO GRAVITACIONAL

Usos:

- Pré-coletor de partículas grandes (> 40 micrômetros)
- Diminuir (reduzir) carga para coletor final

Vantagens:

- Baixa perda de carga ($< 12,5$ mmCA)
- Projeto, construção e instalação simples
- Baixo custo de instalação, operação e manutenção
- Pouco desgaste
- Não tem limitação de temperatura. Só depende dos materiais de construção
- Coleta a seco (permite recuperação fácil)

Desvantagens:

- Baixa eficiência para partículas pequenas (abaixo de 10 micrômetros)
- Requer grande espaço para instalação
- Requer cuidados especiais para substâncias inflamáveis ou explosivas

3.2. COLETORES CENTRÍFUGOS SECOS (CICLONES)

Usos:

- Em geral é utilizado como pré-coletor para partículas de tamanho médio e grande (> 10 micrômetros)
- Coletor final em alguns casos

Vantagens:

- Baixo custo de construção
- Perda de carga baixa a média (50 a 150 mmCA)
- Projeto relativamente simples
- Equipamento simples com poucos problemas de manutenção
- Simples de operar
- Não tem limitação de temperatura e pressão exceto pelo material de construção
- Espaço para instalação relativamente pequeno

Desvantagens:

- Baixa eficiência para partículas pequenas (< 10 micrômetros)
- Possibilidade de entupimento no caso de material adesivo ou higroscópico
- Pode apresentar problemas de abrasão para determinados tipos de partículas e determinadas velocidades
- Não pode ser utilizado para partículas com características adesivas

3.3. FILTRO-MANGA

Uso:

- Coletor final de partículas de todos os tamanhos inclusive bem pequenas, exceto oleosas e adesivas

Vantagens:

- Proporciona altas eficiências de coleta (acima de 99%)
- Pouco sensível a flutuação de vazão e concentração
- Coleta a seco possibilitando recuperação de material sem tratamento
- Não apresenta problemas de resíduos líquidos
- Corrosão pouco acentuada
- Manutenção simples
- Operação relativamente simples
- Princípio de funcionamento e projeto simples

- Perda de carga e custo de operação moderados
- Vida útil longa (10 a 15 anos)

Desvantagens:

- Temperaturas máximas limitadas em função do material das mangas
- Pode requerer tratamento especial das mangas para determinadas aplicações
- Custo de manutenção alto (troca de mangas)
- Materiais higroscópios, adesivos e condensação de umidade podem ocasionar entupimento das mangas
- Localização de mangas furadas relativamente difícil
- Requer espaço razoável, especialmente no caso de limpeza por fluxo reverso e por vibração

3.4. LAVADOR PARA COLETA DE PARTÍCULAS

Usos:

- Coletor final partículas de todos os tamanhos
- Podem ser utilizados também para a coleta de determinados gases e ou vapores

Vantagens:

- Não é fonte secundária de poeiras
- Em geral compactos, exigindo pouco espaço para instalação
- Coleta partículas adesivas sem ocasionar entupimento
- Pode tratar gases e altas temperaturas e altas umidades
- Pode proporcionar alta eficiência de coleta de partículas pequenas (a custa de altas perdas de carga)

Desvantagens:

- Pode criar problema de poluição das águas
- Pode necessitar sistema de tratamento de efluentes líquidos
- O material é coletado a úmido dificultando a sua reutilização
- Mais suscetível a problemas de corrosão
- Perda de carga alta para altas eficiências de coleta

- Necessita material de construção especial (inox ou fibra de vidro)
- Pode apresentar pluma visível, por condensação de vapor d'água
- Custo de manutenção relativamente alto
- Pode apresentar problemas de incrustação

3.5. PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO

Usos:

- Coleta final para partículas de todos os tamanhos
- Fontes medias a grandes
- Em geral para vazões médias e grandes

Vantagens:

- Alta eficiência de coleta. Pode exceder 99,9%
- Coleta partículas muito pequenas
- Baixa perda de carga. Em geral não excede a 12,5 mmCA
- Baixo custo operacional
- Coleta a seco possibilitando fácil reutilização
- Pode coletar partículas sólidas e líquidas que são difíceis de coletar com outros equipamentos
- Poucos problemas de manutenção e operação
- Podem ser operados continuamente por longos períodos
- Processam altas vazões e faixa ampla de concentração
- Podem operar em faixa ampla de pressões positivas ou negativas
- Vida útil longa, podendo atingir mais de 20 anos

Desvantagens:

- Investimento inicial alto
- Requer grande espaço para instalação
- Apresenta riscos de explosão quando processa partículas ou gases inflamáveis/explosivos
- Exige medidas especiais de segurança contra alta voltagem

- Muito sensível a variações de vazão, temperatura e umidade
- Alguns materiais são de difícil coleta por apresentarem resistividade alta ou baixa
- Exige pessoal qualificado para manutenção
- Produção de ozona nas descargas elétricas

3.6. ABSORVEDOR DE ENCHIMENTO E DE PRATOS

Usos:

- Controle de gases e vapores solúveis em água ou que trabalham
- Absorção de amônia, dióxido de enxofre, ácido fluorídrico, gás sulfídrico, hidrocarbonetos de baixo peso molecular

Vantagens:

- Perda de carga relativamente baixa
- Uso de fibra de vidro permite em atmosferas corrosivas
- Capaz de atingir altas eficiências de coleta
- Versáteis quanto ao aumento de eficiência (aumento da altura ou troca de enchimento)
- Pode coletar gases e partículas, no entanto a presença de partículas pode causar entupimento

Desvantagens:

- Pode criar problema de poluição das águas
- Necessita tratamento de efluentes
- Necessita controle de temperatura no caso de fibra de vidro
- Custo de manutenção relativamente alto

Comparação entre torres de enchimento e de pratos

Colunas de enchimento:

- Menor perda de carga
- Simples e de menor custo de construção
- Preferível para líquidos com tendência a formar espuma

- ***Colunas de pratos:***

- Menos susceptíveis ao entupimento
- Mais leves
- Menor formação de *channeling* (desvio do líquido para as paredes da torre)

3.7. ADSORVEDORES

Uso:

- Coleta (controle) de gases e vapores orgânicos e inorgânicos

Vantagens:

- É possível a recuperação do produto
- Pouco sensível a variações do processo
- Não há problema de disposição de resíduos quando se processa a recuperação do produto
- Capacidade de operação totalmente automática
- Podem ser atingidas altas eficiências de coleta

Desvantagens:

- Recuperação do poluente em geral cara
- O adsorvente deteriora-se progressivamente com o uso, necessitando substituição
- Regeneração requer fonte de vapor, calor ou vácuo
- Investimento inicial relativamente alto
- Requer pré-filtragem de partículas para evitar entupimento
- Necessita condicionamento dos gases em relação à temperatura (em geral trabalha a menos de 50°C)
- Necessita grande quantidade de vapor para a desorção de hidrocarbonetos de alto peso molecular

3.8. INCINERADORES DE GÁS

Usos:

- Controle de gases e vapores orgânicos
- Controle de H₂S (gás sulfídrico)

Vantagens:

- Operação simples
- Alta eficiência de coleta

Desvantagens:

- Custo de operação alto (usa combustível auxiliar)
- Perigo de explosão pelo retorno da chama
- Envenenamento do catalisador, no caso de incineração catalítico
- Combustão incompleta é fonte de poluição do ar

3.9. *CONDENSAÇÃO*

Uso:

- Controle de vapores em altas concentrações e com pressão de vapor alta

Vantagem:

- Permite recuperação de produto puro

Desvantagens:

- Eficiência de coleta baixa para concentrações típicas de fontes de poluição do ar
- Custo de resfriamento em geral é alto

4. *CUSTO DO EQUIPAMENTO DE CONTROLE DE POLUIÇÃO DO AR*

De posse das possíveis alternativas técnicas para controle da fonte de poluição do ar, deve ser então procedida a análise econômica das diversas alternativas, de forma a encontrar aquela de menor custo.

Na análise econômica deverão ser considerados:

A) *O investimento inicial que inclui os custos:*

- do sistema entre si;
- dos equipamentos auxiliares;
- de instrumentação e parte elétrica;
- fretes e seguros;
- montagem;

- obras civis necessárias para a instalação do sistema;
- pintura;
- preparação do local;
- teste inicial do sistema;
- da sistema de disposição do material coletado;
- projetos e administração da obra.

B) Custos de operação e manutenção, que incluem:

- custo da mão de obra para operar o sistema;
- custo das utilidades: eletricidade, combustíveis, água, vapor e ar comprimido;
- custo da disposição do material coletado;
- custo de mão-de-obra para manutenção;
- custo de peças de reposição;
- custo de outros materiais necessários para manutenção;
- seguros;
- custo administrativo e encargos sociais;
- taxa de amortização do equipamento.

C) O valor obtido com a reutilização ou venda do material coletado.

ANUALIZAÇÃO DE CUSTOS

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:

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

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

COA: custo de operação anual

CMA: custo de manutenção anual

SEQÜÊNCIA SUGERIDA PARA A SELEÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DE SISTEMA DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR

1. O PROBLEMA E A POSIÇÃO DA EMPRESA

- 1.1. Descreva detalhadamente a fonte a ser controlada.
- 1.2. Descreva a exigência legal para o controle da fonte.
- 1.3. Descreva a localização da fonte em relação à vizinhança, tipificando a zona em que está localizada (raio mínimo de 500 metros).
- 1.4. Solução que a empresa pretende dar ao problema:
 - A) Simplesmente cumprir a exigência legal;
 - B) Controlar o máximo possível;
 - C) Prevenir-se para o futuro, escolhendo uma solução flexível.
- 1.5. Liste outras informações que julgar importantes.

2. CARACTERÍSTICAS DA EMISSÃO

- 2.1. Tipos de poluente emitidos
- 2.2. Poluentes de interesse
- 2.3. Estimativa de emissão
- 2.4. Dados do efluente (vazão, temperatura, umidade etc.)
- 2.5. Características físicas e químicas dos poluentes

3. REDUÇÃO NECESSÁRIA

- 3.1. Estabeleça o máximo de emissão permitida, segundo exigência legal.
- 3.2. Verifique a redução necessária, considerando a emissão sem controle e o máximo permitido.

4. POSSÍVEIS SOLUÇÕES

- 4.1. Liste os métodos de controle indiretos aplicáveis e a respectiva redução de emissão.

- 4.2. Liste os sistemas de controle direto (instalação de equipamentos de controle) aplicáveis ao caso e a respectiva redução de emissão possível.
- 4.3. Verifique se existe, para a fonte/empresa em estudo, impedimentos para a adoção destas medidas.
- 4.4. Selecione as alternativas julgadas mais convenientes ao caso, inclusive as combinações. Caracterize cada solução como parcial ou total.
- 4.5. Consulte a literatura e outras fontes, listando as soluções usuais para o problema em questão.

5. SELEÇÃO PRELIMINAR

Das soluções selecionadas anteriormente, escolha aquelas mais convenientes para a empresa.

6. ANÁLISE ECONÔMICA

Estime os custos envolvidos para cada alternativa (custos de implantação, operação, manutenção e custo total anualizado).

7. COMPARAÇÃO FINAL

Compare as várias alternativas selecionadas no item 5, do ponto de vista técnico e econômico e selecione a alternativa mais conveniente para a fonte/empresa em questão.

Parte 4

FATORES DE EMISSÃO — FUNDIÇÃO DE FERRO CINZENTO

1. DESCRIÇÃO DO PROCESSO

Três tipos de fornos são utilizados para a produção de ferro cinzento: forno cubilô, forno revérbero e forno elétrico de indução.

No forno cubilô são intercaladas camadas de coque, material fluxante e metal. O ar de combustão forçado é injetado no cubilô, causando a queima do carvão e a fusão do metal. O ferro fundido flui através de um furo de vazamento na parte inferior do forno.

Os fornos elétricos são utilizados principalmente quando se quer produzir ligas especiais. Neste forno são carregados ferro gusa, sucata de ferro, elementos de liga e material fluxante.

Os fornos de indução são utilizados quando se tem disponível metal limpo e de alta qualidade.

2. EMISSÕES

As emissões dos fornos cubilô incluem gases, poeiras, fumos, fumaça e vapores de óleo. As poeiras provêm de sujeiras existentes na carga metálica e de finos no carvão e na carga de calcário. Fumaça e vapores de óleo provêm primariamente da combustão parcial e destilação de óleo da sucata oleosa carregada no forno. Os efluentes deste tipo de forno tem também um alto conteúdo de monóxido de carbono que pode ser controlado por um pós queimador.

As emissões dos fornos revérbero e elétrico de indução consistem primariamente de fumos metálicos e são relativamente baixos.

Na tabela a seguir são mostrados os fatores de emissão para os fornos mencionados:

**FATORES DE EMISSÃO PARA
FUNDIÇÃO DE FERRO CINZENTO
(GRAU DE CONFIABILIDADE "B")**

<i>Tipo de forno</i>	<i>Material particulado (kg/T)¹</i>	<i>Monóxido de carbono (kg/T)²</i>
Forno cubilô		
Sem controle	8,5	72,5 ¹
Com <i>wet cap</i>	4,0	-
Com lavador de impactação	2,5	-
Com lavador de alta energia	0,4	-
Com precipitador eletrostático	0,3	-
Com filtro manga	0,1	-
Forno revérbero	1,0	-
Forno elétrico de indução	0,75	-
Fonte: U. S. Environmental Protection Agency. Compilation of air pollutant emission factors. Washington DC, 1985 (Publicação AP-42) ¹ T = toneladas de metal carregado. Aproximadamente 85% da carga total é metal; ² Um pós-queimador bem projetado pode reduzir essa emissão a 4,5 kg/T.		

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARTAXO, P. In: Vieira, C. L. *Fumaça faz Amazônia parecer um vulcão*. Jornal Folha de São Paulo, 4/10/1991.
- ASSUNÇÃO, J. V. *Efeito da redução da camada de ozônio sobre o meio ambiente*. São Paulo, Gerência de Risco, 5 (20): 30-6, 1990.
- ASSUNÇÃO, J. V.; PEREIRA, S. P.; RANCEVAS, S.; SUHARA, R. K.; YAMAGATA, S. *Tecnologia de controle de emissão de gases e vapores inorgânicos e orgânicos*. São Paulo, CETESB, 1990 (apostila).
- ASSUNÇÃO, J. V.; RANCEVAS, S.; SUHARA, R. K.; YAMAGATA, S. *Tecnologia de controle de poluição por material particulado*. São Paulo, CETESB, 1990 (apostila).
- BOHM, G. M. *Impactos da poluição dos veículos automotores na saúde humana e meio ambiente*. Em avaliação do PROALCOOL, FIESP-CIESP, junho de 1986.
- BRAILE, V. V. *Controle da poluição do ar no Estado do Rio de Janeiro*. Trabalho apresentado no Encontro Internacional sobre Vigilância da Qualidade do Ar — OPAS/CETESB, 10/85.
- BRANCO, G. M.; SZWARC, A. *O PROCONVE e o controle da poluição do ar*. São Paulo, CETESB. Trabalho apresentado ao VI Simpósio Nipo-Brasileiro, 11/08/88.
- BROWN, L. R. (Org.) *Salve o Planeta! — Qualidade de vida*. 1990. Worldwatch Institute, Editora Globo, 1990.
- BUONICORE, A. J. e THEODORE, L. *Industrial control equipments for gaseous pollutants*. Cleveland, CRC Press, 1975.
- CALVERT, S. e ENGLUND, H. M. *Handbook of air pollution technology*. New York, John Wiley & Sons, 1984.
- COMISSÃO INTERMUNICIPAL DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DAS ÁGUAS E DO AR (CICPAA). *Poluição do ar*. Trabalho apresentado à III Conferência Latino-Americana Contra a Poluição do Ar, São Paulo, dezembro de 1970.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). *Ação da CETESB em Cubatão — situação em janeiro de 1991*. CETESB, São Paulo, 1991.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). *Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo*.
- COPERSUCAR. *Pró-Alcool: Fundamentos e perspectivas*. Copersúcar, São Paulo, 1989.
- DANIELLO, J. A. *Integração indústria/comunidade*. Trabalho apresentado ao Seminário "Eliminação de Odores em Fábricas de Papel e Celulose", ABCP, março de 1985.
- DANIELSON, J. A. (ed.). *Air pollution engineering manual*. Washington, U. S. Environmental Protection Agency, 1973.

- FISCHER, F. M. & HOFMEISTER, V. A. The effects of air pollution at different seasons on lung function of normal schoolchildren in Cubatão (SP — Brazil). In: MANNINEN, O. & OKADA, A. *Recent advances in researches on the combined effects of environmental factors*. Ed. Kyoei, Kanazawa, Japan, 1987.
- GALVÃO FILHO, J. B.; CAMPOS, M. A. V.; DIEZ, J. M. *Plano de ação para controle da poluição do ar em Cubatão*. Trabalho apresentado ao XII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1983.
- GODINHO, R.; ACQUAVIVA, W.; ROMANO, J. *Ocorrência de aldeídos na atmosfera da Grande São Paulo*. Trabalho apresentado ao XI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1981.
- GODISH, T. *Air quality*. Chelsea (EUA), Lewis Publishers, Inc., 1991.
- GOLDENBERG, J. *S.O.S. planeta Terra*. Editora Brasiliense, 1990.
- GUIMARÃES, F. A. Poluição do ar. In PHILIPPI Jr., A. *Saneamento do meio*. São Paulo, FUNDACENTRO, 1982.
- GUIMARÃES, F. A.; ESTEVES, S. S. *Rede automática de amostragem de poluentes atmosféricos — plano preliminar*. Trabalho apresentado ao VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, Rio de Janeiro, 1975.
- GUIMARÃES, F. A.; GALVÃO FILHO, J. B.; CAMPOS, M. A. V.; GODINHO, R.; OLIVEIRA, S. *Plano de ação de emergência para prevenção de episódios críticos de poluição do ar em Cubatão*. CETESB, São Paulo, 1984.
- HAAG, P. H. (coord.). *Chuvas ácidas*. Fundação Cargill, Campinas, 1985.
- HARRIS, C. M. *Handbook of noise control*. Ann Arbor, Ann Arbor Science, 1981.
- HESKETH, H. E. *Air pollution control*. Ann Arbor, Ann Arbor Science, 1981.
- KEMP, D. D. *Global environmental issues: a climatological approach*. Routledge, Londres/New York, 1990.
- KIRCHOFF, V. W. J. H. *A redução da camada de ozônio, efeitos sobre o Brasil*. Engenharia Ambiental, 2 (7), 1989.
- LIBANORI, A. *A aplicação de mecanismos econômicos na política de controle de poluição*. Tese de mestrado. PUC, São Paulo, 1990.
- LICCO, E. A. *Filosofias para controle da poluição ambiental*. CETESB, São Paulo, 1991.
- MAGALHÃES, J. P. de A.; KUPERMAN, N. & MACHADO, R. C. *PROÁLCOOL — uma avaliação global*. Astel, Rio de Janeiro, 1991.
- MELLO, W. Z. & MOTTA, J. S. T. *Chuva ácida*. Ciência Hoje, 6 (34), 1987.

MENDES, R. & WAKAMATSU, C. T. *Avaliação dos efeitos agudos da poluição do ar sobre a saúde, através do estudo da morbidade diária em São Caetano do Sul*. Estudo preliminar; relatório. São Paulo, CETESB, 1976.

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

MESQUITA, A. L. S.; SANTOS, J. C. D.; QUEIROZ, L. A. *Estratégias alternativas para o controle de dióxido de enxofre na Região da Grande São Paulo*. Trabalho apresentado ao XI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1981.

NEFUSSI, N.; ASSUNÇÃO, J. V.; TOLEDO, M. P.; CASTELLI, A. S. *Comparação entre emissões de poluentes de veículos a álcool e a gasolina*. Trabalho apresentado ao XI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1981.

NOGUEIRA, D. P. *Efeitos da poluição do ar sobre a saúde*. Apresentado ao Seminário sobre Poluição do Ar, São Paulo, 1966. Revisto e atualizado.

PETRÓLEO BRASILEIRO S/A. (PETROBRÁS). *Manual de produtos de petróleo*. Rio de Janeiro, PETROBRÁS, 1990.

PINHO FILHO, P. *A qualidade do ar no Estado do Rio de Janeiro*. Trabalho apresentado ao II Congresso de Pneumologia e Tisiologia do Rio de Janeiro — II Jornada de Pneumologia Infantil do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, setembro de 1989.

POMPÉIA, S. L.; PRADELLA, D. Z. A.; MARTINS, S. E.; SANTOS, R. C. & DINIZ, K. M. *A semeadura aérea na Serra do Mar em Cubatão*. Ambiente, 3 (1): 1989.

RANCEVAS, S. *Riscos ambientais decorrentes da utilização de energias alternativas: o controle da poluição do ar na Região Metropolitana de São Paulo e avaliações através de estudos de associações entre dados de concentrações ambientais de dióxido de enxofre com indicadores de saúde relativos a doenças respiratórias*. Tese de mestrado. USP — Faculdade de Saúde Pública, 1990.

RIBEIRO, H. P. et al. *Estudo da função ventilatória em escolares vivendo com diferentes níveis de poluição do ar*. (Relatório), 1976.

SETZER, A. In: Vieira, C. L. *Fumaça faz Amazônia parecer um vulcão*. Folha de São Paulo, 4/10/1991.

STERN, A. C. *Fundamentals of air pollution*. Academic Press, New York, 1982.

THEODORE, L. e BUONICORE, A. J. *Air pollution control equipment — selection, design, operations and maintenance*. Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, Inc., 1982.

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

WODTKE, M. *Brasil é o terceiro responsável pelo efeito estufa*. Jornal do Brasil, 3/7/1990.

BIBLIOGRAFIA BÁSICA

1. ASSUNÇÃO, J. V.; PEREIRA, S. P.; RANCEVAS, S.; SUHARA, R. K.; YAMAGATA, S. *Tecnologia de controle de emissão de gases e vapores inorgânicos e orgânicos*. São Paulo, CETESB, 1990 (apostila).
2. ASSUNÇÃO, J. V.; RANCEVAS, S.; SUHARA, R. K.; YAMAGATA, S. *Tecnologia de controle de poluição por material particulado*. São Paulo, CETESB, 1990 (apostila).
3. BUONICORE, A. J.; THEODORE, L. *Industrial control equipments for gaseous pollutants*. Cleveland, CRC Press, 1975.
4. BUONICORE, A. J.; DAVIS, W. T. *Air pollution engineering manual*. Pittsburgh, AWMA, 1992.
5. CALVERT, S.; ENGLUND, H. M. *Handbook of air pollution technology*. New York. John Wiley & Sons, 1984.
6. DANIELSON, J. A. (ed.). *Air pollution engineering manual*. Washington, U. S. Environmental Protection Agency, 1973.
7. HARRISON, J. A. (ed.). *Handbook of noise control*. Ann Arbor, Ann Arbor Science, 1981.
8. HESKETH, H. E. *Air pollution control*. Ann Arbor, Ann Arbor Science, 1981.
9. MESQUITA, A. L. S.; GUIMARÃES, F. A.; NEFUSSI, N. *Engenharia de ventilação industrial*. São Paulo, CETESB, 1988.
10. THEODORE, L.; BUONICORE, A. J. *Air pollution control equipment — selection, design, operations and maintenance*. Englewood Cliffs, N. J., Prentice Hall, Inc., 1982.
11. THEODORE, L. e BUONICORE, A. J. *Industrial air pollution control equipments for particulates*. Cleveland, CRC Press, 1976.

Data Aquis.:	7/10/97
Indic.	Memo 294/97 DDT
de	20/01/97
Assunto:	
Projeto:	CR3
Data Tomba:	7/10/97