



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



POLUIÇÃO DO AR

THAYNARA PEDROSA SILVA

Uberlândia – MG

2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



POLUIÇÃO DO AR

Thaynara Pedrosa Silva

Monografia de graduação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia Química

Uberlândia – MG

2017

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA MONOGRAFIA DA DISCIPLINA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE THAYNARA PEDROSA SILVA
APRESENTADA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, EM (DATA).

BANCA EXAMINADORA

Prof. Vicelma Luiz Cardoso
Orientador (FEQ/UFU)

Luis Henrique dos Reis Menêzes
FEQ/UFU

Flávia de Santana Magalhães
FEQ/UFU

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1. INTRODUÇÃO.....	9
2. CARACTERÍSTICAS DA POLUIÇÃO DO AR	12
3. QUALIDADE DO AR	17
3.1. Legislações.....	20
3.2. Ciclos	22
3.3. Poluentes primários e secundários	25
4. EFEITOS DA POLUIÇÃO DO AR.....	27
4.1. Efeitos na saúde e bem estar humano	27
4.2. Efeitos na vegetação e animais	29
4.3. Efeitos nos materiais e estruturas.....	30
4.4. Efeitos na visibilidade.....	31
4.5. Efeitos a longo prazo no planeta.....	32
5. MEDIDA E MONITORAMENTO DA POLUIÇÃO DO AR.....	34
5.1. Amostragem do ar ambiente	34
5.2. Poluentes do ar ambiente: análise e medição.....	35
5.2.1. Análise e medição de poluentes gasosos	35
5.2.2. Análise e medição de poluentes particulados	37
6. CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR	39
6.1. Poluentes gasosos	39
6.1.1. Absorção.....	39
6.1.2. Adsorção.....	40
6.1.3. Combustão.....	41
6.1.4. Condensação.....	41
6.1.5. Biofiltração	42
6.2. Materiais particulados.....	43
6.2.1. Ciclones	43
6.2.2. Filtros.....	44
6.2.3. Lavadores úmidos.....	45
6.2.4. Precipitadores eletrostáticos	46
7. CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

Lista de Figuras

Figura 1 – Ciclo do Enxofre	10
Figura 2 – Ciclo do Nitrogênio.....	11
Figura 3 – Participação relativa (%) das emissões de dioxinas e furanos no ar em 2008	14
Figura 4 – As regiões da atmosfera	15
Figura 5 – Relação produtos-precusores das reações químicas atmosféricas	17
Figura 6 – Parcelas de dispersão de concentrações de carbonilas medidas no interior e exterior de residências.....	19
Figura 7 – Padrões diários por hora das concentrações de alguns poluentes em Los Angeles, nos Estados Unidos, em 19 de julho de 1965	23
Figura 8 – Variações sazonais das concentrações de partículas em Hyderabad, Índia	24
Figura 9 – Evolução das emissões de poluentes veiculares no Estado de São Paulo.....	24
Figura 10 – Poluentes primários e secundários	26
Figura 11 – Sistema respiratório.....	28
Figura 12 – Espectro de resposta biológica para plantas e poluição do ar	29
Figura 13 – Interações possíveis da luz com partículas: (a) luz de um refletor ou lâmpada elétrica, (b) luz solar refletindo em um objeto.....	32
Figura 14 – Diagrama esquemático de vários tipos de amostragem	34
Figura 15 – Analisador infravermelho não dispersivo	36
Figura 16 – Diagrama esquemático para um impactador em cascara com sete estágios	38
Figura 17 – PFD para o método mais comum de remoção de um componente de uma corrente gasosa	40
Figura 18 – Sistema típico de adsorção de carvão ativado com dois leitos	40
Figura 19 – Incinerador catalítico.....	41
Figura 20 – Sistema de diagrama esquemático de condensação de vapor	42
Figura 21 - Biofiltração	43
Figura 22 – Esquema de um ciclone simples	44
Figura 23 – Esquema de um filtro de saco	45
Figura 24 – Lavador venturi	45
Figura 25 – Precipitador eletrostático.....	46

Lista de tabelas

Tabela 1 – Distribuição de uma fonte hipotética de medidas de concentrações de SO ₂	13
Tabela 2 – Composição gasosa do ar sem poluição (base seca).....	16
Tabela 3 – Compostos orgânicos voláteis comuns e suas fontes	20
Tabela 4 – National Ambient Air Quality Standards (NAAQS).....	21
Tabela 5 – Padrões nacionais de qualidade do ar, segundo Resolução Conama nº 3 de 28/06/1990.....	22
Tabela 6 – Tempos de resposta característicos de categorias de receptores	27
Tabela 7 – <i>Forcing</i> relativo do aumento da temperatura global.....	32

RESUMO

A poluição do ar não é um problema recente e está presente em todas as escalas: local, urbana, regional, continental e global. É dependente da quantidade de poluentes dispersos, que podem ser material particulado ou gases, de origem química, física ou biológica. São primários, quando lançados ao ambiente diretamente de uma fonte poluidora, ou secundários, quando algum composto não poluente reage com um poluente primário, formando um outro poluente. Os impactos da poluição do ar atingem principalmente a saúde humana, causando doenças respiratórias, a vegetação, através de sintomas visíveis e não visíveis, os materiais e estruturas, com a reação da chuva ácida, e a visibilidade, com a formação de neblinas. Além disso, a poluição do ar é responsável pelo aquecimento global e pelo buraco na camada de ozônio. Para prevenir danos à saúde humana ou aos animais, vegetação e materiais, deve-se observar atentamente a poluição do ar, através de ciclos, e fazer o devido controle, seguindo as normas estabelecidas pelos órgãos responsáveis em cada país. Para se fazer o controle da poluição do ar é preciso antes fazer uma amostragem do ar, analisando-o e fazendo medições. Essas análises, assim como os métodos de controle, variam para poluentes particulados e gasosos, dependendo da necessidade, quantidade e características do poluente que se deseja controlar.

Palavras-chave: Poluição do ar. Poluentes. Controle dos poluentes do ar.

ABSTRACT

Air pollution is not a recent problem and exists in all scales: local, urban, regional, continental and global. It is dependent of the quantity of dispersed pollutants, which they can be particulate matter or gaseous, of chemical, physical or biological origin, they are primary, when lunched to the environment directly from a pollution source, or secondary, when some non-polluting component of the atmosphere reacts with a primary pollutant, forming another pollutant. The impacts of air pollution reach mainly the human health, causing respiratory diseases, the vegetation, through visible and non-visible symptoms, the materials and structures, with the reaction of acid rain, and the visibility, with the formation of haze. Besides, the air pollution is responsible for global warming and for the hole in the ozone layer. Preventing human health, animal, vegetation and material damages, must be observed carefully the air pollution, through cycles, and make proper control, following the standards established by the responsible bodies in every country. In order to make air pollution control it's needed to do an air sampling before, analysing it and making measurements. These analysis, as the methods of control, vary to particulate pollutants and gaseous pollutants, depending on the need, quantity and characteristics of the pollutant being controlled.

Key words: Air Pollution. Pollutants. Control of air pollutants.

1. INTRODUÇÃO

A poluição do ar é a presença de substâncias contaminantes ou poluentes no ar, que interfere na saúde ou bem-estar humano, ou que produz outros efeitos prejudiciais ao meio ambiente (*United States Environmental Protection Agency*, 2009). As impurezas ou poluentes podem ser perigosos ou inofensivos para a saúde humana e o meio ambiente. O que define em qual dos dois um determinado componente melhor se encaixa depende da quantidade que se encontra no ar e o local (VALLERO, 2008).

Uma das razões para as tribos na história antiga serem nômades era para mover periodicamente para longe do cheiro podre dos restos que os animais, vegetais e humanos geravam. Quando eles aprenderam a usar o fogo, usavam de uma maneira que enchia o ar com produtos da combustão incompleta. Poluição do ar associada com queima da madeira em Nottingham, Inglaterra, foi considerada insuportável por Eleanor de Aquitaine, esposa do Rei Henry II da Inglaterra em 1157. Cento e dezesseis anos depois, queima de carvão foi proibido em Londres. Em 1306, Edward I emitiu uma proclamação real aprovando o uso de carvão marinho em fornos. Elizabeth I barrou-o em Londres quando o Parlamento estava em sessão. As principais indústrias relacionadas com a produção de poluição do ar nos séculos que precederam a Revolução Industrial eram metalúrgicas, cerâmicas e preservação de produtos animais (VALLERO, 2008).

Com a chegada da Revolução Industrial aproveitavam-se o vapor para prover energia para bombear água e mover máquinas. Motores, turbinas e caldeiras a vapor utilizavam combustíveis vegetais e fósseis queimados para funcionar. No século XIX, carvão era o principal combustível para geração de vapor, que lançavam no ar fumaça e cinzas. Em 1848 foi criado na Grã-Bretanha o primeiro Ato Público de Saúde. A engenharia criou então, no século XIX, o fogão para queima mecânica de carvão, o purificador para remover gases ácidos do efluente gasoso, ciclones e coletores de poeira e a introduziu os princípios físicos e químicos no design de processos (VALLERO, 2008).

A partir de então, durante o período de 1900 a 1925 a engenharia avançou mais na tecnologia de produção e no controle da poluição do ar. Mas as cidades e fábricas cresciam em tamanho e o problema da poluição foi ficando mais sério. Os motores a vapor foram substituídos pelos motores elétricos (VALLERO, 2008).

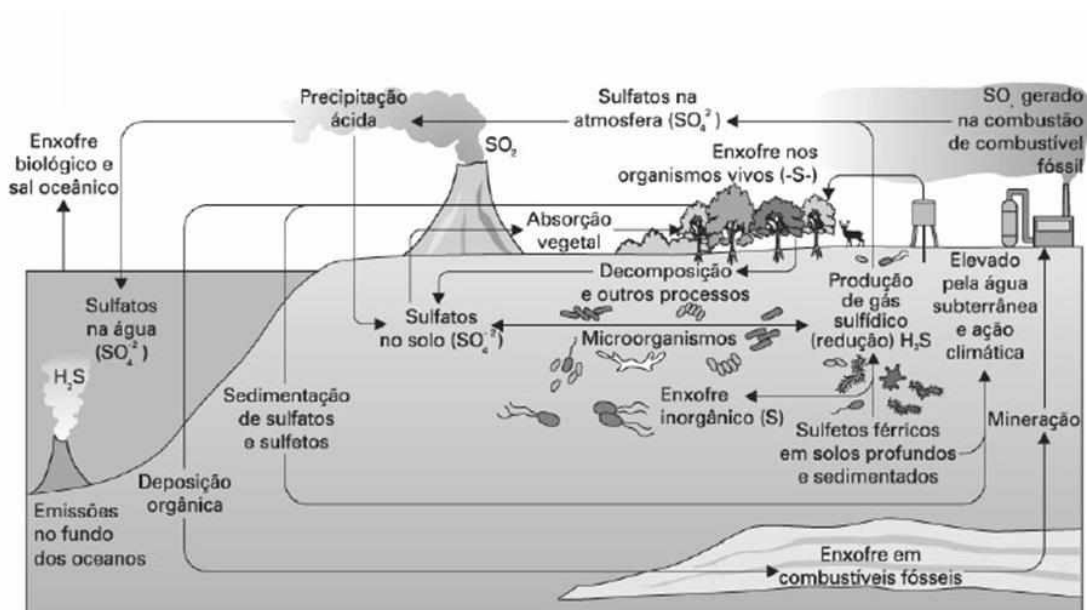
A pesquisa sobre a poluição do ar começou na Califórnia, após um episódio de nevoeiro com fumaça em Los Angeles na década de 1940. Na Grã Bretanha também

aconteceu um episódio em Londres em 1952, que resultou na passagem do Ato do Ar Limpo em 1956. Sérios problemas também aconteceram nas grandes cidades do Japão, Austrália, Nova Zelândia e Estados Unidos. Alguns países começaram a criar legislações de controle da poluição do ar. No futuro, o aumento da poluição do ar é previsto pelo uso cada vez maior de combustíveis fósseis e nucleares com o aumento da população mundial (VALLERO, 2008).

Nas últimas décadas, a característica principal da poluição do ar tem sido sua associação com seus danos, que podem ser divididos em três tipos: aqueles que prejudicam a saúde, destroem e afetam negativamente os recursos ambientais e danificam propriedades. Os seis principais poluentes são materiais particulados com $10\ \mu\text{m}$ ou menos (PM_{10}), compostos orgânicos voláteis, monóxido de carbono, dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio e chumbo (NEVERS, 2010).

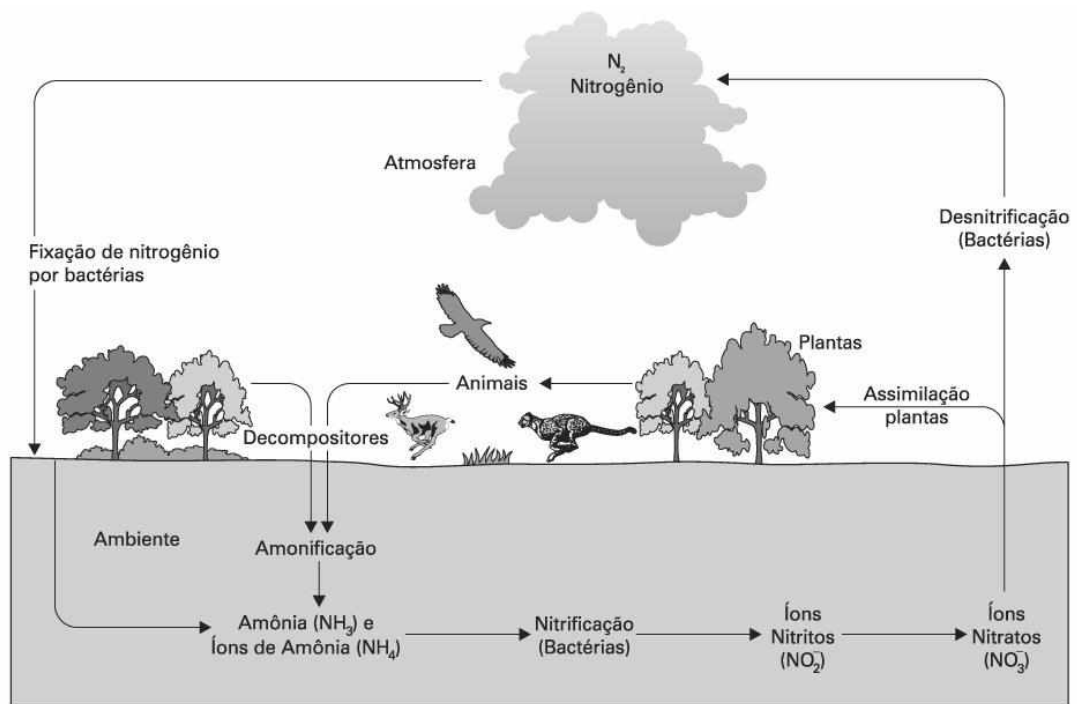
Os contaminantes podem ser químicos, como a chuva ácida, uma chuva com excesso de nitratos e sulfatos, ou físicos, como a energia dos raios ultravioletas. Eles podem, ainda ser divididos em partículas ou gases (VALLERO, 2008). As partículas podem ser materiais líquidos e/ou sólidos, enquanto os poluentes gasosos incluem formas de enxofre e nitrogênio, como dióxido de enxofre e óxidos de nitrogênio, demonstrados na Figura 1 e Figura 2 (WANG; PEREIRA; HUNG, 2004).

Figura 1 – Ciclo do Enxofre



Fonte: BRAGA et al, 2005.

Figura 2 – Ciclo do Nitrogênio



Fonte: BRAGA et al, 2005.

Estudos provaram que pequenas quantidades de certas partículas tóxicas podem causar doenças e efeitos adversos em humanos, animais, vegetações ou em materiais. A destruição da camada de ozônio estratosférica e a mudança climática são alguns efeitos da poluição do ar na atmosfera (DAVIS; CORNWELL, 2008).

A poluição do ar ambiental está presente em todas as escalas, desde local, passando por urbana, regional, continental, até global. Os problemas locais geralmente são caracterizados pela emissão de um ou vários poluentes grandes ou pelo lançamento de um grande número com diâmetros relativamente pequenos. Em áreas urbanas, podem ser causados pelo lançamento de poluentes primários ou a formação de secundários. Em escala regional, podem ser por combinação dos problemas urbanos na escala regional, por causa do lançamento de poluentes primários, que reagem lentamente durante os longos tempos de transporte, ou visibilidade diminuída, causada pela presença de partículas no ar que produzem névoas em várias intensidades. A maior preocupação em escala continental são as políticas da poluição do ar de um determinado país, que podem criar impactos em nações vizinhas. Os problemas globais são causados pelo transporte de longo alcance dos poluentes. Uma questão muito conhecida de natureza global é o lançamento de clorofluorcarbonos (CFCs) usados em

latas de spray e em ar condicionado, que causa uma alteração na camada de ozônio (VALLERO, 2008).

Os poluentes em processos industriais podem ser controlados através de diferentes equipamentos, que pode ser selecionados através de dados sólidos sobre os poluentes do ar obtidos através de um trabalho cuidadoso, conhecimento de como o processo se comporta e seguir testes apropriados (WANG; PEREIRA; HUNG, 2004).

Este trabalho tem como objetivo fazer uma revisão sobre a poluição do ar, mais especificamente sobre suas características, qualidade do ar, impactos causados pelos poluentes, como fazer uma amostragem, análise e medição do ar, e formas de controle desta poluição.

2. CARACTERÍSTICAS DA POLUIÇÃO DO AR

Em discussões sobre o meio ambiente e a poluição do ar, sempre deve ser levado em conta que os processos físicos estão associados com as reações químicas e outros processos. Os processos da poluição do ar são funções das características químicas e físicas do ar e de seus contaminantes. Alguns exemplos de processos químicos importantes são sedimentação, filtração, dissolução, absorção, adsorção, complexação, oxidação/redução e ionização. Já em termos de processos físicos, são utilizados, por exemplo, a volatilização e a fotólise.

Os processos químicos ambientais são abordados em termos de como os elementos químicos são formados, como eles são introduzidos no meio ambiente, como eles se transformam, onde eles terminam nos organismos e outros receptores e seus efeitos nestes.

Uma das principais preocupações quando se diz respeito às medidas da poluição do ar e suas interpretações é sua origem. Essa questão pode ser respondida através da utilização de várias ferramentas, um modelo conhecido é o de recepção, que usa algoritmos e funções de medidas feitas no meio ambiente para determinar de onde vem o poluente, podendo também quantificá-lo, se construído adequadamente. Um exemplo dessa utilização é a medida de vanádio e dióxido de enxofre (SO_2) em alguns óleos combustíveis. Se for encontrado concentrações de dióxido de enxofre (SO_2) de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em uma área urbana, juntamente com vanádio em níveis suficientes para indicar que sistemas de aquecimentos domésticos estão emitindo certa quantidade de SO_2 para a atmosfera, o modelo irá relacionar com a quantidade de SO_2 dos sistemas de aquecimentos (VALLERO, 2008). Outras fontes de combustão associadas com emissão de SO_2 são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Distribuição de uma fonte hipotética de medidas de concentrações de SO₂

Fonte	Distância da medida (km)	Concentração de SO₂ (µm/m³)	Porcentagem da medida de SO₂
Central elétrica a carvão	25	3,0	30
Central elétrica a carvão	5	2,0	20
Fontes móveis (carros, caminhões, trens e aviões)	0-10	1,5	15
Refinaria de óleo	30	1,5	15
Aquecedor doméstico (óleo combustível)	0-1	1,0	10
Desconhecida	Não aplicável	1,0	10
Total		10,0	100

Fonte: VALLERO, 2008.

Modelos receptores precisam de traçadores “conservadores” para que identifiquem as fontes mais especificamente. Um traçador conservador é um produto químico resistente a reações químicas, porém apresenta transporte de propriedades similar aos traçadores reativos. Um bom traçador é aquele que move juntamente com o fluido, no caso, o ar. Portanto, se ele for reativo, sua massa diminui e não permite uma interpretação correta do movimento da partícula analisada na massa do ar (VALLERO, 2008).

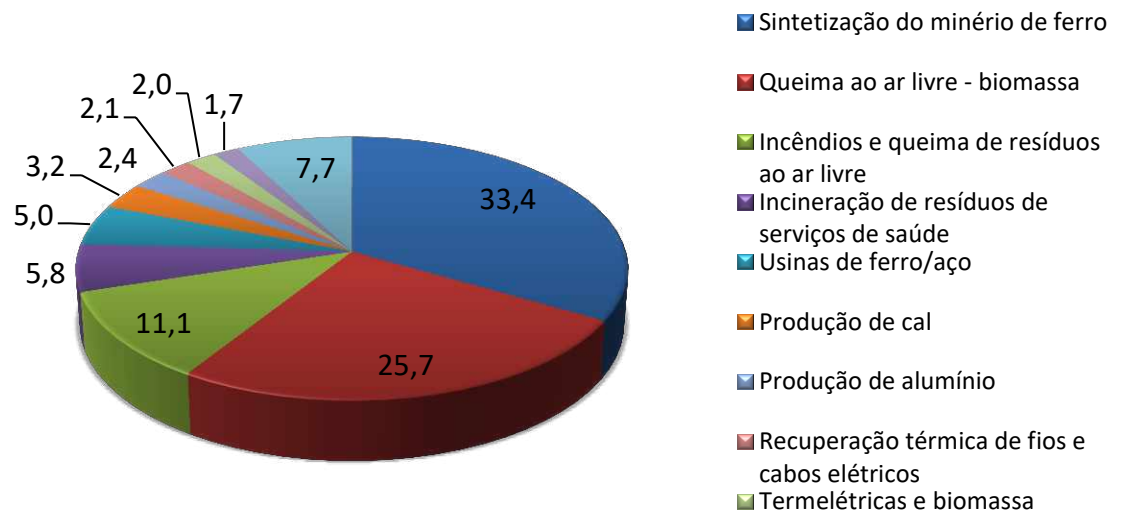
Os contaminantes podem vir na forma de agentes químicos, físicos ou biológicos. Contaminantes biológicos podem ser bactérias patogênicas ou vírus que afetam a saúde ou prejudicam ecossistemas, por estarem em uma concentração maior que a capacidade natural. Os agentes biológicos podem ser também pólenes, esporos, fungos e pelos, que se dispersam no ar, podendo causar doenças, por exemplo, no aparelho respiratório (MASCARENHAS, 2012).

Um agente físico, por exemplo, é a energia na forma e quantidade incorretas, o que pode ser prejudicial. Uma onda de radiação eletromagnética é formada por pequenos pacotes contendo energia, chamados fótons. A energia de um fóton é diretamente proporcional à frequência da onda. Portanto, quanto mais alta a frequência de uma onda, mais energia existirá em um fóton. As ondas de radiação eletromagnética de baixas frequências são chamadas de campos eletromagnéticos, e as de altas frequências de radiações

eletromagnéticas. A frequência e a energia também determinam se uma radiação eletromagnética será radiação ionizada ou não-ionizada. Radiação ionizada consiste em ondas eletromagnéticas de alta frequência (raios-X e raios gama), que têm energia nos fótons suficiente para produzir ionização, quebrando ligações de moléculas. O termo geral radiação não-ionizada é a porção do espectro eletromagnético onde a energia nos fótons não são fortes o suficiente para quebrar ligações moleculares. Este segmento do espectro inclui radiação ultravioleta (UV), luz visível, radiação infravermelho, ondas de rádio e micro-ondas, juntamente com campos elétricos e magnéticos. Até em altas intensidades, radiação não-ionizada não consegue ionizar átomos em sistemas biológicos, mas tal radiação é associada com outros efeitos, como aquecimento celular, mudanças nas reações químicas e suas taxas, e a indução de correntes elétricas dentro e entre as células (VALLERO, 2008).

Átomos e moléculas reagem formando compostos e produtos químicos. No entanto, alguns compostos formados são considerados tóxicos. Dioxinas e furanos são importantes exemplos de poluentes químicos tóxicos no ar. Dioxinas são compostos secundários em processos de combustão (MMA, 2013). A Figura 3 apresenta a participação relativa das emissões de dioxinas e furanos por algumas fontes.

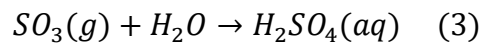
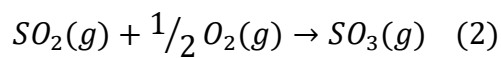
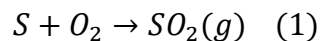
Figura 3 – Participação relativa (%) das emissões de dioxinas e furanos no ar em 2008



Fonte: MMA, 2013.

Outro processo químico importante é a ionização, como, quando um sal dissolvido em água dissocia-se, formando íons. Íons podem reagir entre si formar compostos sólidos e complexos. Essas reações frequentemente ocorrem entre íons de sais solúveis em água e formam sais quase insolúveis em água. Isso faz com que eles se separem e precipitem. Os contaminantes podem variar de completamente solúveis em água a insolúveis.

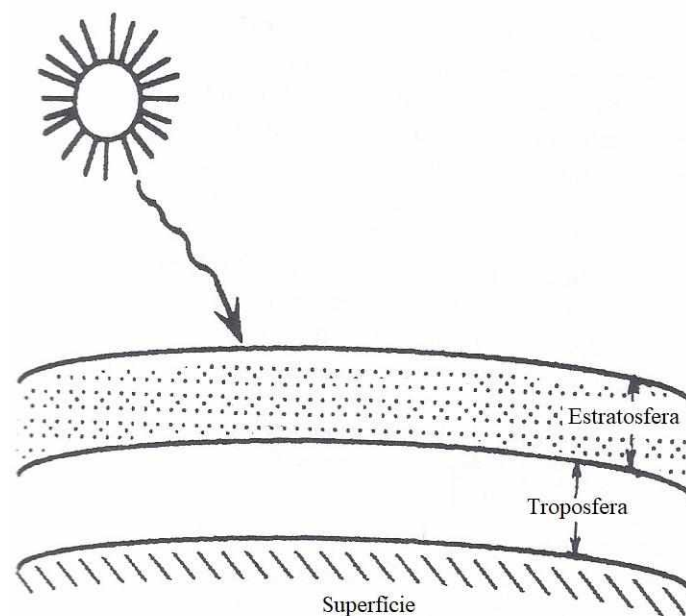
A precipitação ácida contém os ácidos fortes H_2SO_4 e HNO_3 , vindos principalmente da combustão de combustíveis fósseis que contêm enxofre. No processo ocorrem as seguintes reações demonstradas pelas reações 1, 2 e 3 mostradas a seguir:



Perto das fontes poluentes, o pH da chuva ácida pode chegar a ser menor que 3, um valor bem abaixo da chuva, que é neutra (VALLERO, 2008).

Transformações químicas podem ocorrer desde a troposfera até além da estratosfera, mostradas na Figura 4. A troposfera é a região em que se vive e é na estratosfera que está localizada a camada de ozônio (WANG; PEREIRA; HUNG, 2004). A composição gasosa do ar sem poluição da troposfera encontra-se na Tabela 2.

Figura 4 – As regiões da atmosfera



Fonte: WANG; PEREIRA; HUNG, 2004.

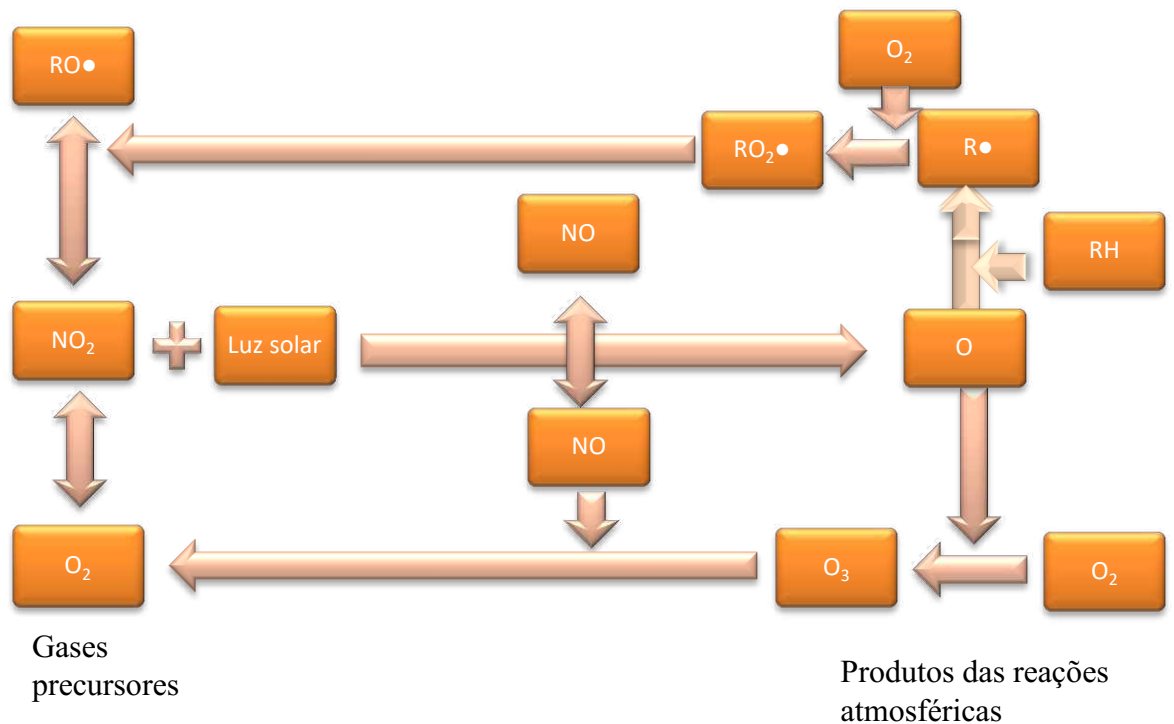
Tabela 2 – Composição gasosa do ar sem poluição (base seca)

	ppm (vol.)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Nitrogênio	780.000	$8,95 \times 10^8$
Oxigênio	209.400	$2,74 \times 10^8$
Água	-	-
Argônio	9.300	$1,52 \times 10^7$
Gás carbônico	315	$5,67 \times 10^5$
Neônio	18	$1,49 \times 10^4$
Hélio	5,2	$8,50 \times 10^2$
Metano	1,0-1,2	$6,56-7,87 \times 10^2$
Criptônio	1,0	$3,43 \times 10^3$
Óxido nitroso	0,5	$9,00 \times 10^2$
Hidrogênio	0,5	$4,13 \times 10^1$
Xenônio	0,08	$4,29 \times 10^2$

Fonte: VALLERO, 2008.

A química da poluição do ar tem impacto direto nos seres humanos, vegetação e águas superficiais. As transformações químicas que ocorrem na atmosfera são geralmente processos de oxidação. Reações envolvendo compostos de carbono (C), nitrogênio (N) e enxofre (S) são os de maior interesse quando se diz respeito à poluição do ar. Os processos químicos ocorrentes na troposfera envolvem hidrocarbonetos, NO (óxido nitroso) e SO₂ (dióxido de enxofre), que formam produtos oxigenados como aldeídos, dióxido de nitrogênio (NO₂) e ácido sulfúrico (H₂SO₄). A Figura 5 apresenta a relação produtos-precursores das reações químicas atmosféricas, em que R é um radical de hidrocarboneto (VALLERO, 2008).

Figura 5 – Relação produtos-precursores das reações químicas atmosféricas



Fonte: DAVIS; CORNWELL, 2008.

A radiação solar pode influenciar os processos químicos na atmosfera, quando interage com moléculas que atuam como fotorreceptores. Radicais livres são fragmentos neutros de moléculas estáveis muito reativos, formados pela fotodissociação de certos tipos de moléculas. O processo de fotodissociação depende de fótons com energia suficiente.

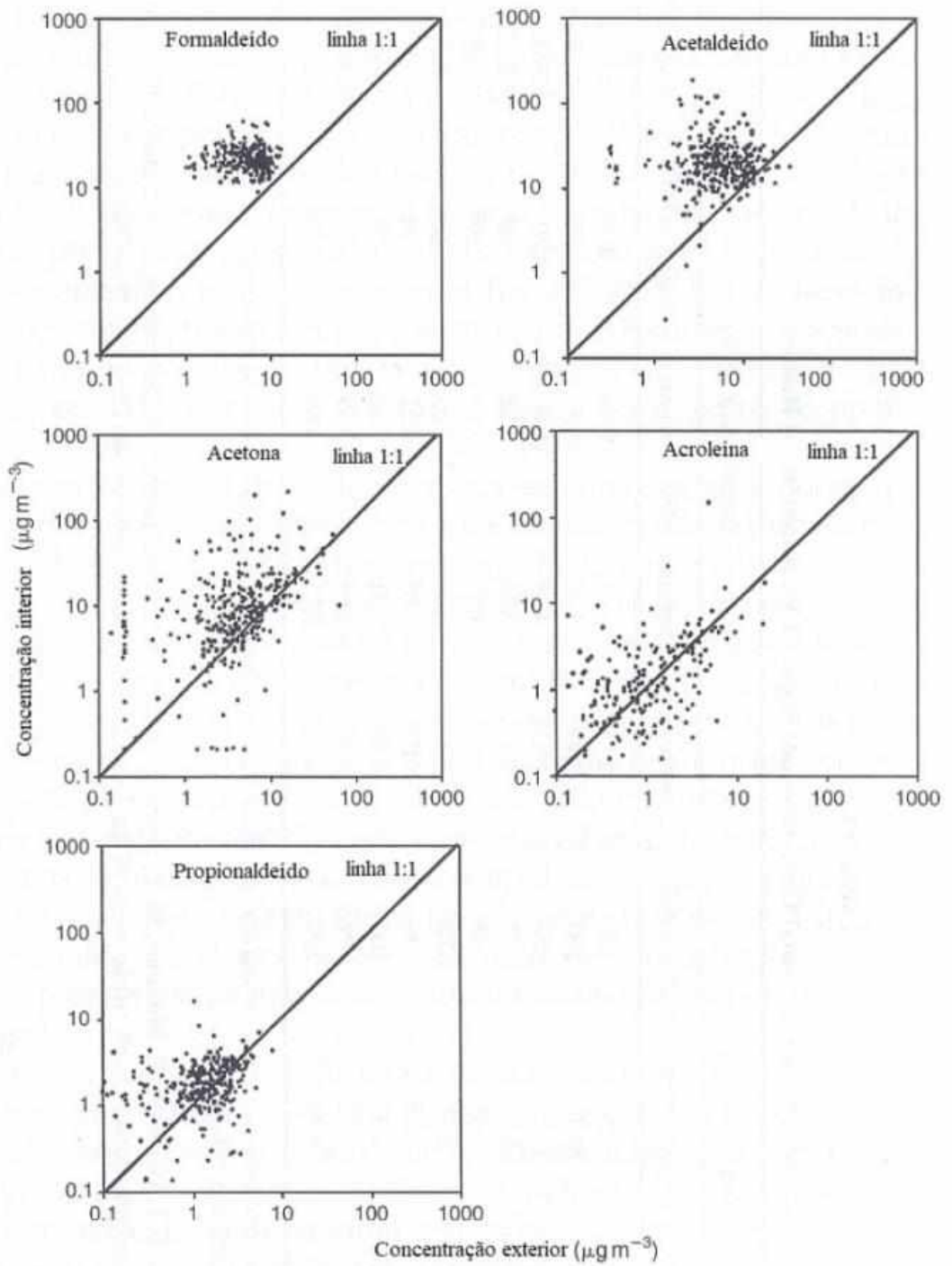
Reações químicas atmosféricas são classificadas como fotoquímicas ou térmicas. Reações fotoquímicas são as interações de fótons com determinadas espécies, resultando na formação de produtos, que podem sofrer outras reações químicas, estas últimas chamadas de reações térmicas. As transformações químicas atmosféricas também podem ocorrer no estado gasoso (homogêneas), em uma superfície, ou em partículas líquidas (heterogêneas) (VALLERO, 2008).

3. QUALIDADE DO AR

A qualidade do ar deve sempre ser observada e controlada para estar dentro de uma faixa bem limitada, já que o ar é uma fonte indispensável para a vida. Essa qualidade consiste no nível mínimo de poluentes que o ar pode ter para garantir a saúde pública e a preservação de diferentes ecossistemas, além de garantir o bem estar e prevenir a corrosão de materiais.

O ar no interior de uma residência, de um cômodo ou de um prédio é um assunto de muito interesse. Esses espaços interiores podem ser contaminados por fontes de aquecimentos, fornos ou fogões que lançam produtos de combustão gasosa, ou por vários compostos orgânicos voláteis, encontrados em pinturas, adesivos, produtos de limpeza, formaldeído e produtos emanando dos materiais de construção. Existindo alguma dessas fontes dentro de um ambiente, o nível de poluição do ar no interior pode ser maior que do ar no exterior. Entretanto, se nenhuma dessas fontes se encontra no interior do ambiente, o nível de poluição no interior seria menor que a concentração no ambiente exterior, devido à habilidade das superfícies internas da construção – paredes, chão, teto, móveis e luminárias – de adsorver ou reagir com poluentes gasosos e de atrair e reter partículas de poluentes, assim removendo-os parcialmente do ar respirado pelos ocupantes do ambiente. Essa adsorção ocorreria mesmo se as portas e janelas estivessem abertas, mas a diferença entre as concentrações interiores e exteriores seriam maiores se essas estiverem fechadas, neste caso o ar poderia entrar na construção apenas por infiltração através de rachaduras e paredes (VALLERO, 2008). A Figura 6 apresenta a dispersão de concentração de carbonila medidas no interior e exterior de residências. A Tabela 3 mostra as principais fontes de exposição a compostos orgânicos voláteis no interior.

Figura 6 – Parcelas de dispersão de concentrações de carbonilas medidas no interior e exterior de residências



Fonte: VALLERO, 2008.

Tabela 3 – Compostos orgânicos voláteis comuns e suas fontes

Compostos orgânicos voláteis	Principais fontes de exposição no interior
Acetaldeído	Tinta (a base de água), fumaça
Álcoois (etanol, isopropanol)	Produtos de limpeza
Hidrocarbonetos aromáticos (tolueno etilbenzeno, xilenos, trimetilbenzenos)	Tintas, adesivos, gasolina, fontes de combustão
Hidrocarbonetos alifáticos (octano, decano, undecano)	Tintas, adesivos, gasolina, fontes de combustão
Benzeno	Fumaça
Hidrotolueno butilado	Almofadas a base de uretano
p-Diclorobenzeno	Desinfetantes
Etileno glicol	Tintas
1, 1, 1-Tricloroetano	Aerossóis

Fonte: DAVIS; CORNWELL, 2008.

3.1. Legislações

A legislação brasileira de qualidade do ar é bem parecida com as leis norte-americanas. Nos Estados Unidos, a Environmental Protection Agency (EPA) estudou os efeitos ambientais de qualquer poluente do ar que pode afetar a saúde humana ou o meio ambiente e estabeleceu o National Ambient Air Quality Standards (NAAQS), que são padrões para o ar ambiente, podendo eles serem primários e secundários. Os padrões primários foram estabelecidos para proteger a saúde humana, enquanto os padrões secundários previnem danos aos animais, ao meio ambiente e aos materiais. Alguns poluentes estão listados na Tabela 4.

Tabela 4 – National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)

Poluente	Nível do padrão	Tempo médio	Concentração
Monóxido de carbono (CO)	Primário	8 horas	9 ppm
	Primário	1 hora	35 ppm
Chumbo (Pb)	Primário e secundário	Média de 3 meses	0,15 µg/m ³
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	Primário	1 hora	100 ppb
	Primário e secundário	1 ano	53 ppb
Ozônio (O ₃)	Primário e secundário	8 horas	0,070 ppm
Material particulado (PM _{2,5}) (d≤2,5µm)	Primário	1 ano	12,0 µg/m ³
	Secundário	1 ano	15,0 µg/m ³
	Primário e secundário	24 horas	35 µg/m ³
Material particulado (PM ₁₀) (d≤10µm)	Primário e secundário	24 horas	150 µg/m ³
Dióxido de enxofre (SO ₂)	Primário	1 hora	75 ppb
	Secundário	3 horas	0,5 ppm

Fonte: UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2017.

No Brasil, o órgão responsável pelos padrões de qualidade do ar é o Conama (Conselho Nacional do Meio Ambiente), que estabeleceu os padrões em 28 de junho 1990 através de uma resolução. A Tabela 5 apresenta esses padrões.

Tabela 5 – Padrões nacionais de qualidade do ar, segundo Resolução Conama nº 3 de 28/06/1990

Poluente	Tempo de amostragem	Padrão primário ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Padrão secundário ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Partículas totais em suspensão (PTS)	24 horas ^a	240	150
	MGA ^b	80	60
Dióxido de enxofre (SO ₂)	24 horas	365	100
	MAA ^c	80	40
Monóxido de carbono (CO)	1 hora ^a	40.000 (35 ppm)	40.000 (35 ppm)
	8 horas	10.000 (9 ppm)	10.000 (9 ppm)
Ozônio (O ₃)	1 hora ^a	160	160
Fumaça	24 horas ^a	150	100
	MAA ^c	60	40
Partículas inaláveis (PI)	24 horas ^a	150	150
	MAA ^c	50	50
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	1 hora ^a	320	190
	MAA ^c	100	100

^aNão deve ser ultrapassado mais que uma vez ao ano.

^bMGA: média geométrica anual.

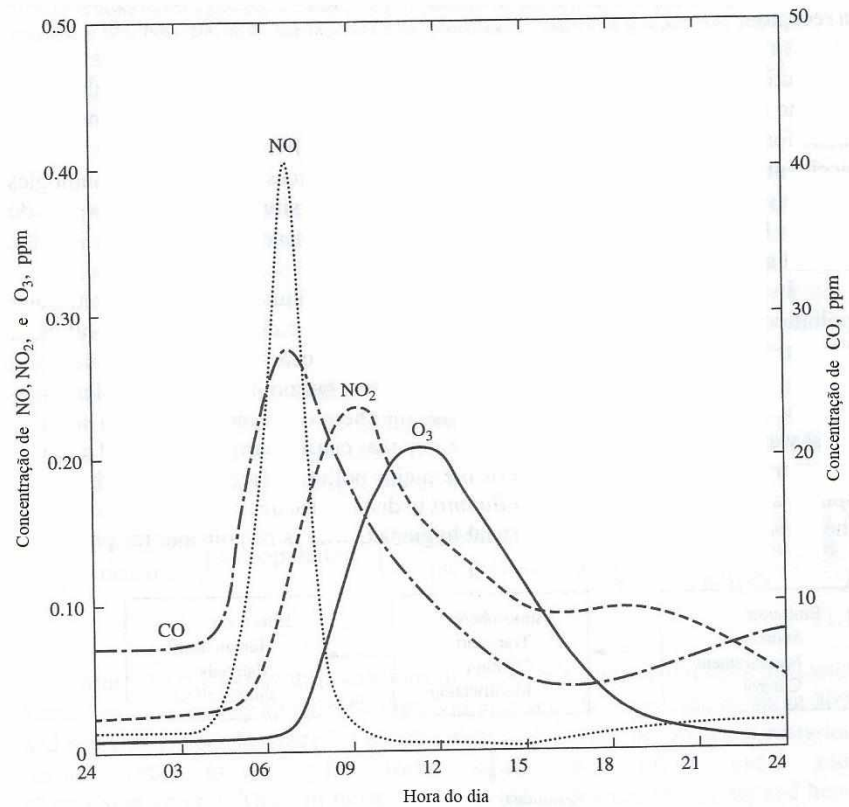
^cMAA: média aritmética anual.

Fonte: BRAGA et al, 2001.

3.2. Ciclos

Os ciclos mostram a variação da concentração dos poluentes do ar em diferentes períodos de tempo e o mais importante é o ciclo diário. Um exemplo é representado na Figura 7. No geral, emissões de quase todas as fontes são menores durante a noite e maiores durante o dia. Isso acontece porque fábricas e comércios fecham ou reduzem suas atividades à noite, há menos trânsito de automóveis, menos uso de eletricidade e aquecimento doméstico (VALLERO, 2008).

Figura 7 – Padrões diários por hora das concentrações de alguns poluentes em Los Angeles, nos Estados Unidos, em 19 de julho de 1965

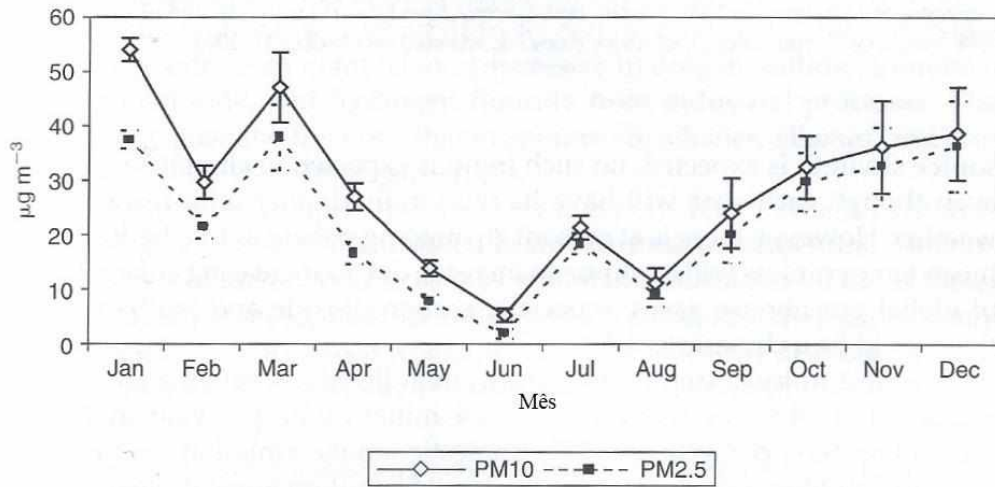


Fonte: NEVERS, 2010.

O segundo ciclo mais importante é o ciclo fim de semana-dias de semana. Este ciclo é associado com a mudança nos padrões de vida nos finais de semana quando comparados com o dia-a-dia dos demais dias de semana.

Há também o ciclo sazonal, em que a concentração dos poluentes varia de acordo com os diferentes climas e tempos nas quatro estações: inverno, primavera, verão e outono, demonstrado na Figura 8 (VALLERO, 2008).

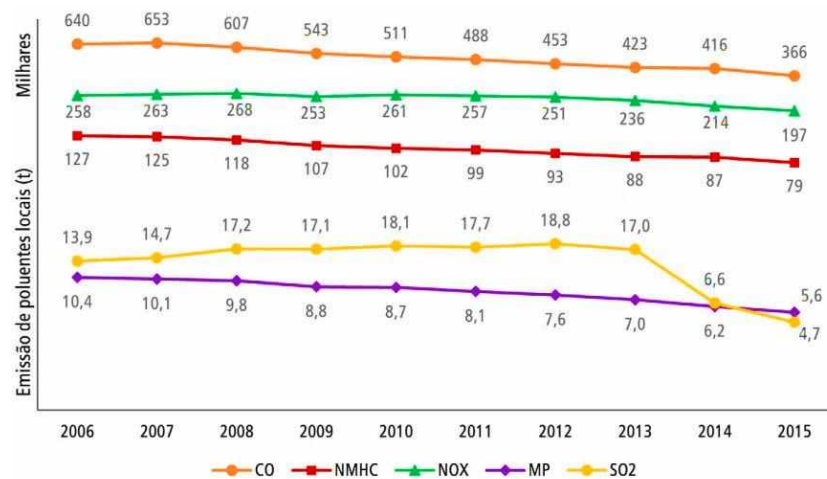
Figura 8 – Variações sazonais das concentrações de partículas em Hyderabad, Índia



Fonte: VALLERO, 2008.

No ciclo anual, algumas mudanças de ano para ano são esperadas com um aumento da população de uma determinada região, por exemplo, e com as mudanças de hábitos. A Figura 9 apresenta a evolução das emissões de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não-metano (NMHC), óxidos de nitrogênio (NO_x), material particulado (MP) e dióxido de enxofre (SO₂) no estado de São Paulo.

Figura 9 – Evolução das emissões de poluentes veiculares no Estado de São Paulo



Fonte: CETESB, 2017.

3.3. Poluentes primários e secundários

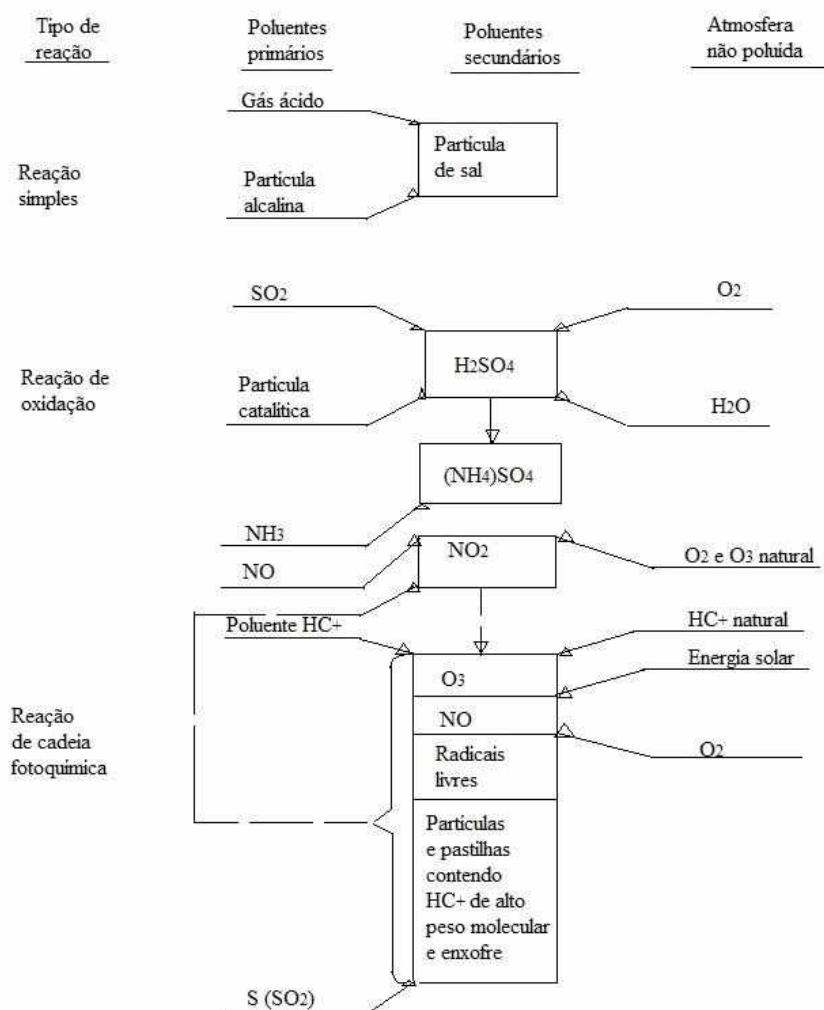
A maioria dos gases e vapores emitidos para a atmosfera em uma grande quantidade por fontes humanas tende a ser relativamente simples na sua estrutura química, como dióxido de carbono, monóxido de carbono, dióxido de enxofre e óxido nítrico vindos de processos de combustão, ou sulfato de hidrogênio, amônia, cloreto de hidrogênio e fluoreto de hidrogênio vindo de processos industriais. A evaporação de solventes e frações da gasolina também contém moléculas com estruturas simples, como os alcanos, alcenos e aromáticos.

As moléculas mais complexas, como hidrocarbonetos aromáticos policíclicos e dioxinas, também são lançadas para a atmosfera através de processos industriais e fontes de combustão, e são conhecidas como poluentes tóxicos. Essas substâncias emitidas diretamente das fontes são conhecidas como poluentes primários.

Poluentes tóxicos são aqueles que causam ou podem causar câncer ou outras doenças sérias, como problemas reprodutivos e de desenvolvimento ou defeitos no nascimento. Eles são frequentemente associados com efeitos ambientais e ecológicos adversos, podendo vir de fontes humanas, sejam elas estacionárias ou móveis.

Além dos poluentes primários, existem também os poluentes secundários, que surgem de reações químicas entre os poluentes primários e componentes da atmosfera não poluída. Algumas dessas reações são mostradas na Figura 10. Os poluentes secundários são responsáveis por efeitos na visibilidade, como o smog, a neblina e irritação dos olhos, e por danos às plantas e aos materiais causados por poluentes do ar. Os poluentes primários que reagem são conhecidos como precursores dos poluentes secundários. Conhecendo as reações químicas específicas que formam cada poluente secundário, é mais fácil controlar os poluentes secundários a partir do controle da emissão dos poluentes primários (VALLERO, 2008).

Figura 10 – Poluentes primários e secundários



Fonte: VALLERO, 2008.

Os níveis de qualidade do ar variam de concentrações menores que os valores mínimos detectáveis em instrumentos utilizados para medi-los a níveis maiores aos das concentrações já medidas. O objetivo do controle da poluição do ar é prevenir respostas adversas a todos os riscos expostos à poluição: humanos, animais, vegetais e materiais. Essas respostas adversas têm tempo de resposta a curto prazo (segundos ou minutos), médio prazo (horas ou dias) e longo prazo (meses ou anos), como é mostrado na Tabela 6 (VALLERO, 2008).

Tabela 6 – Tempos de resposta característicos de categorias de receptores

Categoria de receptores	Tempos de respostas característicos		
	Curto prazo (segundos-minutos)	Médio prazo (horas-dias)	Longo prazo (meses-anos)
Humanos	Odor, visibilidade e irritação dos olhos	Doença aguda respiratória	Doença crônica respiratória e câncer no pulmão
Animais, vegetações	Perda de colheita de campo e dano à planta ornamental	Perda de colheita de campo e dano à planta ornamental	Fluorose do gado, diminuição de produção de frutas e florestas
Materiais	Pingo de gotas de ácido e destruição da mangueira de nylon	Rachamento da borracha, mancha prata e escurecimento da tinta	Corrosão, sujeira e deterioração de materiais

Fonte: VALLERO, 2008.

4. EFEITOS DA POLUIÇÃO DO AR

A poluição não difere de qualquer outra substância em contato com seres vivos: pequenas doses e concentrações podem ser benéficas, enquanto que quantidades excessivas são geralmente prejudiciais. A poluição do ar é prejudicial para todos os seres vivos e seus ambientes (WANG; PEREIRA; HUNG, 2004).

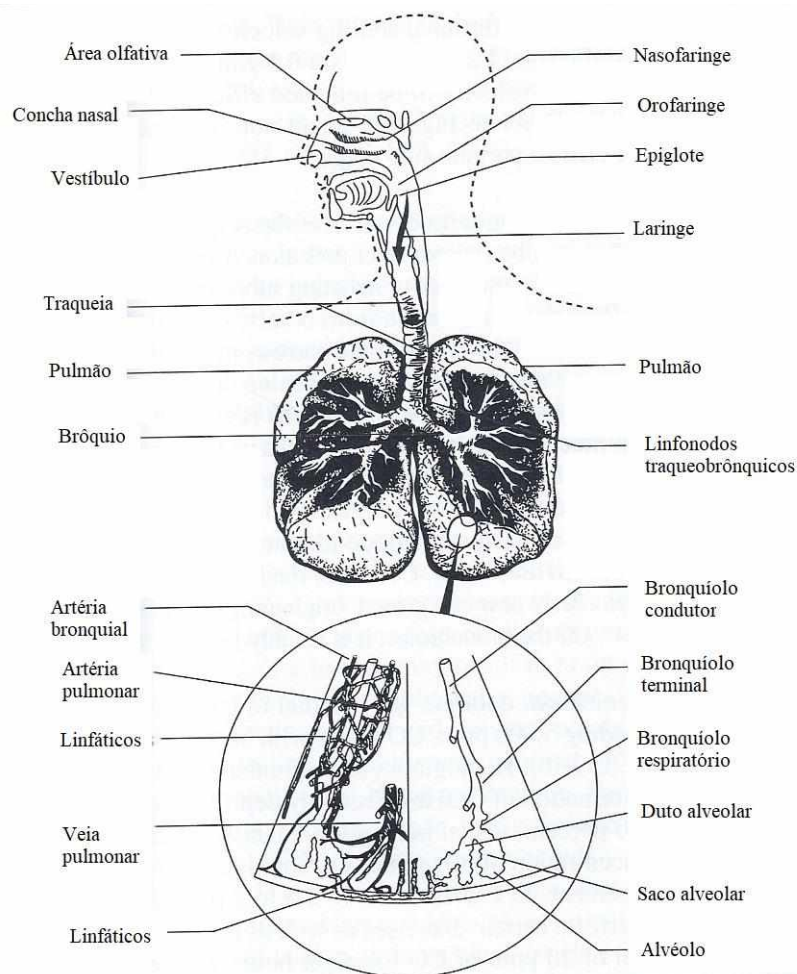
4.1. Efeitos na saúde e bem estar humano

Analisar como um poluente do ar afeta o corpo humano fornece uma informação sobre seus efeitos em um órgão ou sistema corporal. O corpo humano tem uma grande capacidade de absorver todos os tipos de compostos e utilizá-los ou eliminá-los, de acordo com suas necessidades. A maioria dos poluentes entra no corpo por inalação. Os componentes do corpo humano que conseguem estocar esses compostos são o sangue, a urina, tecido fino, cabelo, dentes e ossos. O sangue e a urina permitem remoção mais rápida de materiais de rastreamento que tecido fino, cabelo e osso. Quando eles são estocados mais rapidamente do que são eliminados, houve um armazenamento. Para que isso não ocorra, as fontes dos poluentes devem ser reduzidas.

Os impactos da acumulação nos vários sistemas corporais dependem da quantidade de poluentes envolvidos. Se os poluentes encontrados no interior do corpo humano estiverem em concentrações pequenas, eles podem não afetar a saúde. Para poluentes eliminados devagar, pode-se observar seus efeitos por longos períodos de tempo e analisar como eles afetam o corpo (VALLERO, 2008). Alguns exemplos desses poluentes do ar são o chumbo, monóxido de carbono, manganês, selênio e cromo.

Os primeiros impactos de poluentes do ar no corpo humano é no sistema respiratório. A principal função do sistema respiratório humano é transferir O_2 do ar para a corrente sanguínea, e CO_2 da corrente sanguínea para o ar. A transferência ocorre nos sacos alveolares, que estão em contato com os vasos sanguíneos. O ar vai da atmosfera para as áreas de trocas gasosas nos sacos alveolares (LOWE; ANDERSON, 2015). O sistema respiratório é mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Sistema respiratório



Fonte: DAVIS; CORNWELL, 2008.

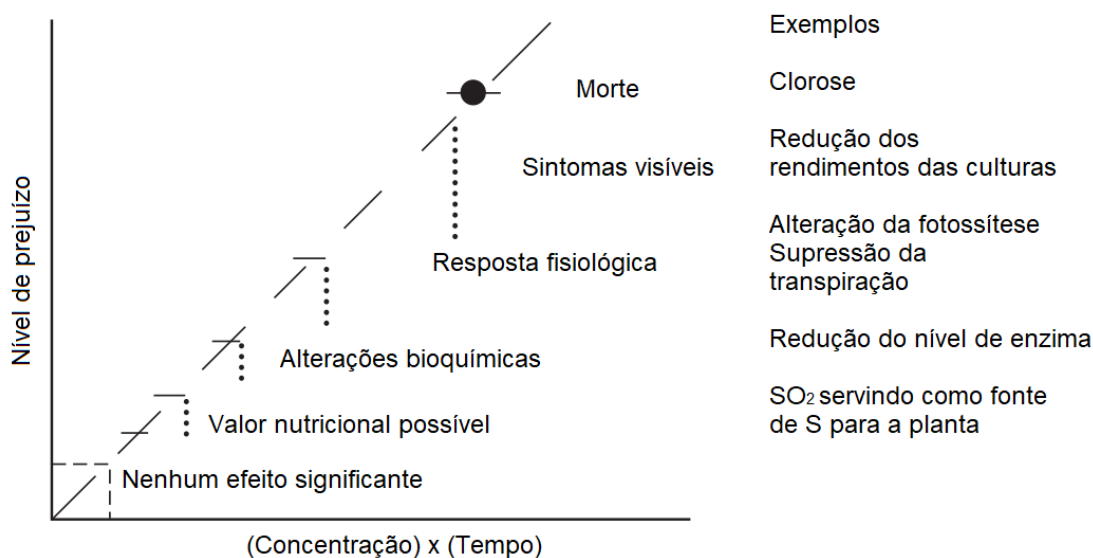
A poluição do ar pode causar doenças cancerígenas e não cancerígenas. O termo “não cancerígeno” é utilizado para distinguir câncer, como câncer de bexiga, e leucemia, de outras doenças, como neurotoxicidade, desordens do sistema imunológico e interrupção endócrina.

O impacto da poluição do ar em seres humanos tem sido o principal motivo para controlá-la. Ela pode afetar tanto o sistema respiratório como o circulatório e olfativo, portanto, qualquer sistema pode ser afetado (VALLERO, 2008).

4.2. Efeitos na vegetação e animais

Quando algum tipo de vegetação reage com um poluente do ar, muitos fatores influenciam os efeitos que podem ser causados, entre eles a espécie da planta, idade, balanço nutricional, condições do solo, temperatura, umidade e luz solar. Além disso, a concentração do poluente também é um fator importante. Poluentes em baixas concentrações podem não causar nenhum dano significativo, da mesma forma que altas concentrações podem danificar a planta por meio de alterações bioquímicas, mudança na resposta fisiológica, sintomas visíveis e causar até a morte da planta. Os principais poluentes do ar que danificam os vegetais são ozônio, dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, fluoretos e nitrato de peroxiacetila (PAN) (VALLERO, 2008). A Figura 12 apresenta o espectro de resposta biológica para plantas e poluição do ar.

Figura 12 – Espectro de resposta biológica para plantas e poluição do ar



Fonte: VALLERO, 2008.

Sintomas visíveis podem ser observados quando a aparência normal e saudável das folhas está diferente, com uma cor mais clara, colapso dos tecidos, alterações fisiológicas e caules e folhas alongados. Além disso, a poluição do ar pode causar envelhecimento precoce ou queda de folhas. Já os efeitos não visíveis podem causar redução do crescimento da planta, alteração dos processos fisiológicos e bioquímicos, mudanças no ciclo reprodutivo e redução no campo de colheita. A alteração dos processos fisiológicos e bioquímicos inclui alterações na fotossíntese e atividade metabólica.

Nas florestas, o impacto da poluição do ar é classificado em três categorias: baixa dose, média dose e alta dose. Em baixa dose, as florestas podem agir como fossas ou como fontes para os poluentes, ou seja, utilizam compostos químicos presentes na atmosfera e lançam outros. Com a industrialização, houve um aumento das concentrações de NO₂, SO₂ e CO₂ na atmosfera, o que faz com que as florestas utilizem esses compostos e os lancem de volta. Em média dose, pode resultar na redução do crescimento das florestas e mudança em suas espécies. Em alta dose, os efeitos são perceptíveis para qualquer pessoa, já que causa a destruição ou dano grave nas florestas (VALLERO, 2008).

Deposição de ácido ocorre quando os formantes de ácidos se movem da atmosfera para a superfície da Terra, como por exemplo, quando SO₂, NO₂, HNO₃ e material particulado de enxofre chegam à superfície pela chuva ácida. Isso faz com que haja uma alteração na distribuição de plantas e espécies aquáticas, composição do solo e pH da água, formando, assim, lagos e lagoas acidificadas.

Nos animais, a poluição do ar pode impactar através da acumulação de contaminantes transportados pelo ar na vegetação que serve como alimento para eles ou, no caso dos carnívoros, o consumo de pequenos animais que podem ter ingerido, de alguma forma, poluentes do ar (VALLERO, 2008).

4.3. Efeitos nos materiais e estruturas

Nas construções, a poluição do ar deteriora o calcário, produto químico usado como material de construção. Cidades antigas, por exemplo, foram expostas à fumaça urbana, SO₂ e CO₂ por décadas, fazendo com que as superfícies fiquem sujeitas a ataque químico por gases ácidos. Um exemplo de reação entre um poluente e o calcário, formando sulfato de cálcio e gesso, está demonstrado na equação 4:



Estes dois sulfatos são bastante solúveis em água, causando deterioração em tijolos e na argamassa utilizada para manter os tijolos juntos. Os sulfatos de cálcio solúveis podem penetrar nos poros do calcário, recristalizar e expandir, causando uma deterioração mais profunda na pedra. Já o CO_2 na presença de umidade forma ácido carbônico. Este ácido converte o calcário em bicarbonato, que é também solúvel em água e pode ser lixiviado pela chuva (VALLERO, 2008).

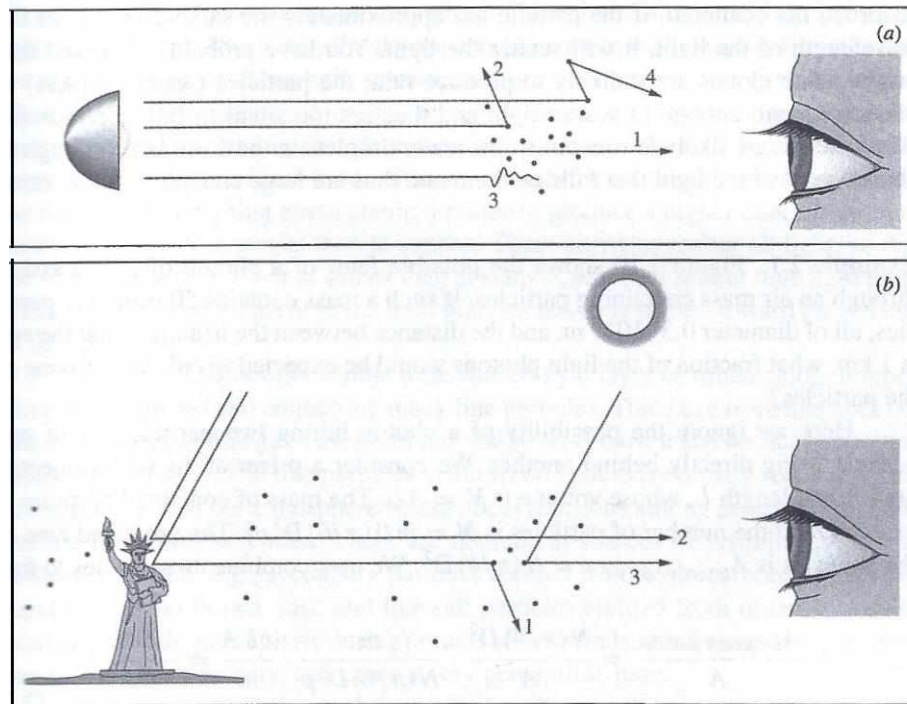
A deterioração pela poluição do ar acontece por meio de cinco mecanismos: abrasão, deposição, ataque químico direto, ataque químico indireto e corrosão eletroquímica. A abrasão é causada por partículas sólidas grandes que se transportam a uma velocidade alta. Enquanto a deposição ocorre principalmente através de processos de limpeza, como, ao lavar uma roupa, o tecido vai enfraquecendo e a tinta vai desbotando. Exemplos de ataque químico direto são reações de solubilização e oxirredução. Já o ataque químico indireto ocorre quando há reação entre um poluente e um componente do material em que o mesmo obteve contato. A corrosão eletroquímica é o resultado de uma reação de oxirredução em metais, onde há a formação de cátodos e ânodos e uma diferença de potencial. Os fatores que influenciam na deterioração de materiais são umidade, temperatura, luz solar e posição do material exposto à poluição do ar (DAVIS; CORNWELL, 2008).

4.4. Efeitos na visibilidade

A visibilidade é reduzida por causa de partículas finas na atmosfera ou pela presença de NO_2 , causando uma neblina. Para que haja dispersão de luz, as partículas devem ter diâmetro entre 0,1-1,0 μm . O NO_2 é o único poluente gasoso que não é transparente presente em quantidade suficiente para causar essa neblina, ele apresenta uma coloração amarronzada. O material particulado presente na atmosfera pode vir de fontes primárias ou secundárias (NEVERS, 2010).

A Figura 13 mostra as possíveis interações dos fótons de luz com as partículas. Na Figura 13(a), a luz vem de uma lâmpada elétrica, refletor ou farol. A luz pode: (1) ter contato direto com o olho, (2) ser espalhada no caminho por partículas, (3) ser absorvida, ou (4) ser espalhadas por partículas várias vezes e conseguir chegar até o olho. Na Figura 13(b), a luz é solar. Já a luz solar pode: (1) refletir em um objeto, mas ser espalhada ao entrar em contato com uma partícula, (2) refletir em um objeto e chegar ao olho, permitindo a visão do objeto, ou (3) as partículas podem enviar luz solar diretamente ao olho.

Figura 13 – Interações possíveis da luz com partículas: (a) luz de um refletor ou lâmpada elétrica, (b) luz solar refletindo em um objeto



Fonte: NEVERS, 2010.

4.5. Efeitos a longo prazo no planeta

Aquecimento global ocorre graças ao aumento de dióxido de carbono (CO_2) e outros gases estufas (aqueles que absorvem e radiam porções de radiação infravermelha da Terra). A capacidade de um gás causar aquecimento global (ou resfriamento, como é o caso de aerossóis) é conhecida como *forcing* (VALLERO, 2008). Os gases de maiores *forcings* estão listados na Tabela 7.

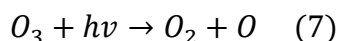
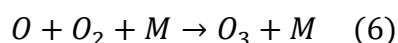
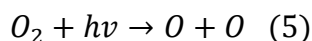
Tabela 7 – *Forcing* relativo do aumento da temperatura global

Gás	Porcentagem de <i>forcing</i> relativo
Dióxido de carbono (CO_2)	64
Metano (CH_4)	19
Halocarbonetos (principalmente CFCs)	11
Óxido de nitrogênio (N_2O)	6

Fonte: VALLERO, 2008.

A principal preocupação dos impactos do aquecimento global é que, com as mudanças climáticas, a agricultura é afetada e há perigo de inundação em áreas próximas ao mar, já que seu nível está aumentando. Para estimar os efeitos a longo prazo, foram criados modelos que analisam mudanças de temperatura (DAVIS; CORNWELL, 2008).

O “buraco na camada de ozônio” é uma diminuição da quantidade de ozônio na estratosfera, observada desde a década de 1980 na Antártica durante a primavera. O ozônio na camada estratosférica está em equilíbrio dinâmico entre processos fotoquímicos de formação e destruição. Os componentes primários nesses processos são radiação solar ultravioleta (UV), moléculas de oxigênio (O_2) e átomos de oxigênio (O) e pode ser representado pelas seguintes reações das equações 5, 6 e 7:



em que hv representa um fóton com energia dependente da frequência da luz, ν , e M é um terceiro componente, geralmente o nitrogênio (N_2). Esse ciclo se inicia na fotodissociação de O_2 para formar oxigênio atômico O. Então, os átomos de O reagem com O_2 na presença de uma terceira molécula para formar O_3 . Fechando o ciclo, o ozônio absorve radiação UV e sofre fotodissociação. Esse ciclo da radiação ultravioleta reagindo com oxigênio e ozônio impede a penetração da onda ultravioleta na superfície da Terra, formando um escudo de proteção (VALLERO, 2008).

Esse ciclo pode ser interrompido pela presença de clorofluorcarbonos (CFCs), que modificam as concentrações do ozônio. CFCs são compostos quimicamente muito estáveis, utilizados por muito tempo como fluidos refrigerantes, propulsores de aerossóis, agentes de expansão de espumas, agentes de limpeza e supressores. Após a descoberta de que ele era o causador do buraco na camada de ozônio, seu uso foi bastante reduzido. Entretanto, CFCs não são os únicos compostos químicos que causam efeitos a longo prazo na atmosfera (DAVIS; CORNWELL, 2008).

5. MEDIDA E MONITORAMENTO DA POLUIÇÃO DO AR

5.1. Amostragem do ar ambiente

Um sistema de amostragem requer uma amostra da atmosfera em um local e tempo específico para ser avaliada em termos de concentração mássica ou volumétrica e não deve alterar suas características químicas e físicas. Os principais componentes de um sistema de amostragem são: coletor de admissão, motor de ar, meio de coleta e dispositivo de medição de fluxo.

O coletor de admissão transporta a amostra inalterada recolhida da atmosfera para o meio de coleta ou dispositivo analítico. A abertura de admissão pode ser projetada para um propósito específico, desde que as entradas para a amostra sejam a prova de água. Coletores de admissão podem ser feitos de vidro, teflon, aço inoxidável ou outros materiais inertes. O motor de ar, uma bomba, por exemplo, fornece a força suficiente para criar um vácuo ou pressão baixa no fim do sistema de amostragem. O meio de coleta pode ser um líquido ou sorvente sólido para dissolver gases, uma superfície do filtro para coletar partículas, ou uma câmara para conter uma alíquota do ar. O dispositivo de medição de fluxo mede o volume de ar associado com o sistema de amostragem e podem ser medidores de fluxo mássico, rotâmetros e orifícios críticos. Sistemas de amostragem podem ter vários formatos e não precisa ter necessariamente todos os quatro componentes, como é mostrado na Figura 14 (VALLERO, 2008).

Figura 14 – Diagrama esquemático de vários tipos de amostragem



Fonte: VALLERO, 2008 – adaptado.

Todos os sistemas de amostragem deveria ter eficiência de coleta, estabilidade da amostra e recuperação de 100%, interferência mínima, ou preferencialmente 0, e um entendimento do mecanismo de coleta.

Poluentes gasosos costumam ser coletados pelos sistemas de amostragem mostrados na Figura 14. O volume do coletor e a taxa de vazão de amostragem são fatores determinantes para saber o tempo requerido para o gás ir da admissão até o meio de coleta. Quanto menor o tempo de residência, menor a perda de espécies reativas no coletor. Sistemas de coleta líquidos são em forma de borbulhadores, projetados para maximizar a interface gás-líquido. Quanto maior a taxa de vazão, menor o tempo de amostragem. Entretanto, taxa de vazão excessiva pode fazer a eficiência de coleta ser menor. Nos sistemas de borbulhadores, as espécies gasosas geralmente sofrem hidratação ou reação com água para formar ânions e cátions.

Devido ao maior tamanho das partículas quando comparados com moléculas gasosas, sua amostragem envolve um diferente conjunto de parâmetros de interesse, sendo eles: a concentração mássica, tamanho e composição química das partículas. Na amostragem de partículas, esses parâmetros são obtidos como uma função do diâmetro da partícula, podendo assim serem avaliados os efeitos na saúde humana, as fontes de material particulado são identificadas e são estudados processos de remoção dessas partículas. O método principal de amostragem de partículas é separá-las de um volume de ar conhecido, para serem pesadas e feitas análises químicas (VALLERO, 2008).

5.2. Poluentes do ar ambiente: análise e medição

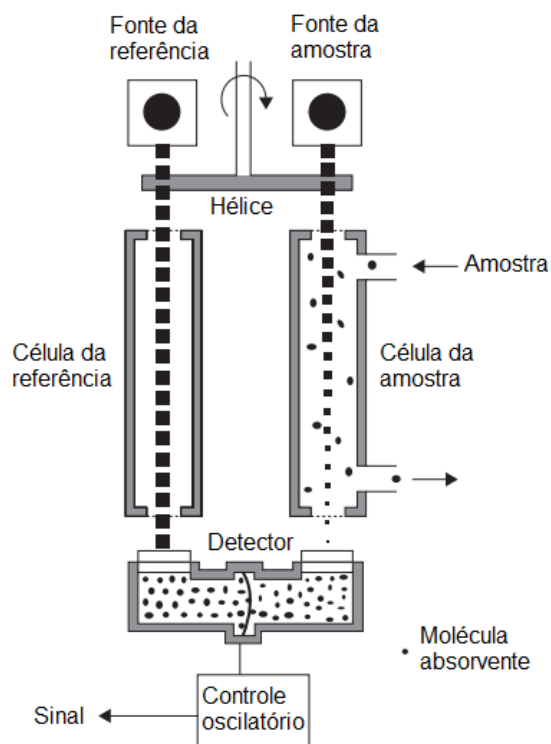
5.2.1. Análise e medição de poluentes gasosos

Depois das propriedades físicas e químicas das amostras coletadas serem analisadas, os poluentes do ar são identificados e quantificados. Técnicas de medição da poluição do ar passam por vários estágios, sendo o primeiro o estágio de identificação qualitativa, depois de coleta separada, e por último por uma coleta concorrente e quantificação de um determinado poluente. Os poluentes gasosos do ar mais comumente monitorados são CO, O₃, NO₂, SO₂ e compostos orgânicos voláteis não-metano.

Um método que pode ser utilizado para medir o monóxido de carbono é baseado na fotometria infravermelha não dispersiva. Um analisador infravermelho não dispersivo é mostrado na Figura 15. O princípio desse equipamento é que o monóxido de carbono absorve

preferencialmente a radiação infravermelha. Ele é composto por uma fonte de filamento quente de radiação infravermelha, uma hélice, uma célula da amostra, célula de referência e um detector (VALLERO, 2008).

Figura 15 – Analisador infravermelho não dispersivo



Fonte: VALLERO, 2008.

Enquanto que para medir o ozônio, o método mais utilizado é baseado em quimiluminescência. Quando o ozônio e etileno reagem quimicamente, os produtos formados se encontram em estado eletrônico excitado, e fluorescem, liberando luz. Os principais componentes de um equipamento de quimiluminescência são uma fonte constante de etileno, uma linha de entrada da amostra para o ar ambiente, uma câmara de reação, um tubo fotomultiplicador, cuja taxa de luz recebida depende das concentrações de O_3 e etileno, e circuitos processadores de sinais.

A medição de NO_2 também é baseada na quimiluminescência. As concentrações de NO_2 são determinadas através da diferença entre as concentrações de NO e NO_x pela medição da luz emitida da reação de quimiluminescência de NO com O_3 , como na reação de O_3 com etileno para medição de O_3 .

Para medir SO_2 , existem várias técnicas manuais e analíticas contínuas. As amostras são colhidas pelo borbulhamento de um volume conhecido de gás pelo meio coletor de

líquido e medidas. A eficiência da coleta depende do tempo de contato gás-líquido, tamanho da bolha, concentração de SO_2 e solubilidade de SO_2 no meio coletor. Depois disso, as amostras são analisadas em um laboratório central por um método apropriado. Os métodos de medição utilizados em técnicas analíticas contínuas incluem condutimetria, colorimetria, coulometria e amperometria.

A medição de compostos orgânicos é muito difícil, já que existe um grande número de hidrocarbonetos individuais na atmosfera. Para que as medições sejam feitas, os hidrocarbonetos são classificados em metano (CH_4) e todos os outros compostos orgânicos voláteis não-metano. Para analisar hidrocarbonetos é preciso fazer uma coleta, uma separação e uma quantificação. Para fazer a coleta, basta obter uma alíquota de ar com uma vasilha evacuada. A separação é feita por cromatografia gasosa. Para quantificar a amostra é utilizado um detector ionizado de chama calibrado (VALLERO, 2008).

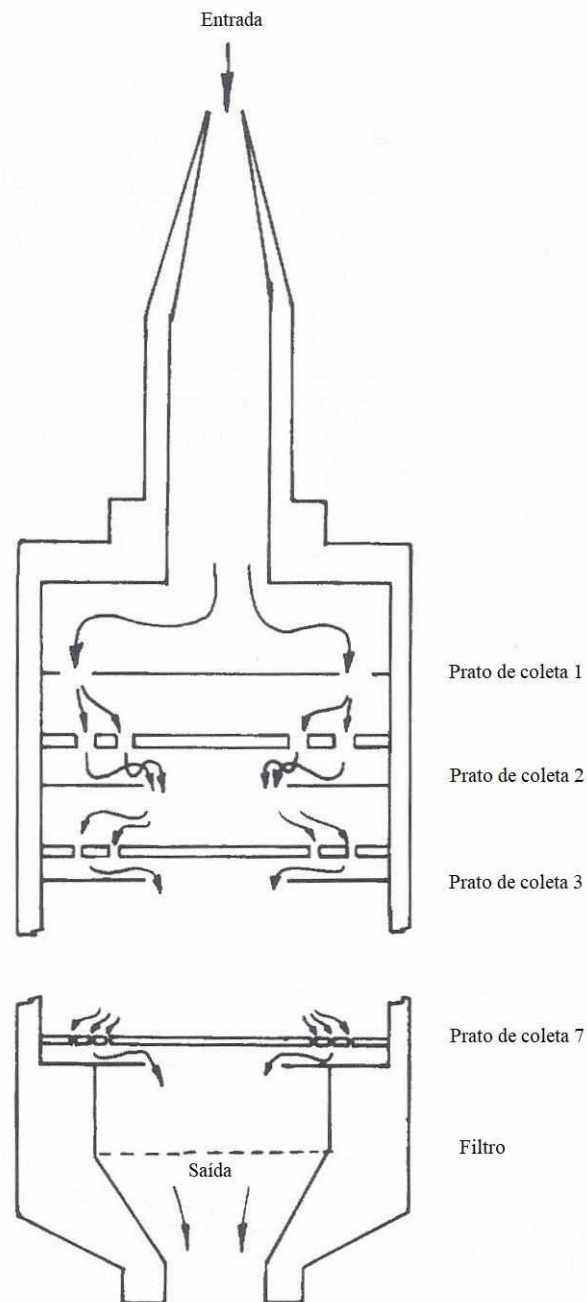
5.2.2. Análise e medição de poluentes particulados

Como já foi dito anteriormente no último parágrafo do item 5.1, as três principais características dos poluentes particulados são concentração mássica total, distribuição de tamanho e composição química.

Para determinar a concentração mássica, todas as partículas precisam ser removidas de um volume de ar conhecido, através da filtração ou impactação, e sua massa total são medidas.

Para fazer distribuição de tamanho, as partículas são classificadas por diâmetro dinâmico, mobilidade elétrica ou propriedades de dispersão da luz. A técnica mais comum é através de impactadores com multiestágios, em que cada estágio remove partículas com diâmetro menores e o material é pesado para fazer a distribuição (VALLERO, 2008). A Figura 16 mostra um impactador de sete estágios.

Figura 16 – Diagrama esquemático para um impactador em cascara com sete estágios



Fonte: WANG; PEREIRA; HUNG, 2004.

A composição química de poluentes particulados pode ser determinada especificando elementos ou especificando compostos ou íons. Conhecer essas composições químicas é útil para saber as fontes das partículas e para entender o destino delas na atmosfera. As técnicas utilizadas para analisar amostras de material particulado são espectroscopia de fluorescência em raio-X e análise de ativação de nêutron (VALLERO, 2008).

6. CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR

Para que se faça um controle exato da poluição do ar, é preciso conhecer as propriedades dos poluentes que se deseja verificar. Muitos equipamentos são utilizados para o controle de poluentes gasosos e materiais particulados. Para definir o melhor método, é preciso considerar fatores como, uma análise econômica para considerar custos operacionais, o impacto ao meio ambiente, pois pode haver a geração de subprodutos prejudiciais, ou até mesmo outros tipos de poluentes e resíduos sólidos. Além disso, o mau uso do equipamento pode liberar odores indesejáveis (WANG; PEREIRA; HUNG, 2004).

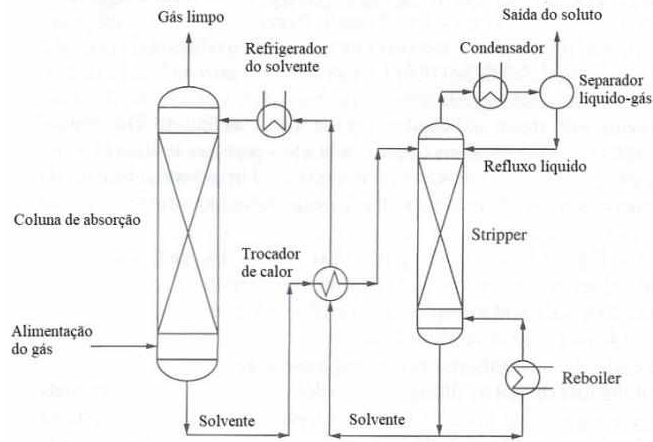
6.1. Poluentes gasosos

No controle de gases, é utilizada a propriedade de reatividade dos gases com outros compostos químicos. Para isso, pode ser utilizado cinco métodos: absorção, adsorção, combustão, condensação e biofiltração (DAVIS; CORNWELL, 2008).

6.1.1. Absorção

No sistema utilizando absorção, é utilizado um líquido em que o poluente gasoso é solúvel e eles são separados por uma coluna de absorção, sendo que essa coluna pode ser de pratos, de recheio ou de borbulhamento. O líquido deve ser escolhido de acordo com o gás que se deseja separar. Este método é utilizado geralmente para SO_2 , H_2S , HCl , Cl_2 , amônia, NO_x e hidrocarbonetos com baixo ponto de ebulição (WANG; PEREIRA; HUNG, 2004). A Figura 17 mostra um diagrama com coluna de absorção.

Figura 17 – PFD para o método mais comum de remoção de um componente de uma corrente gasosa



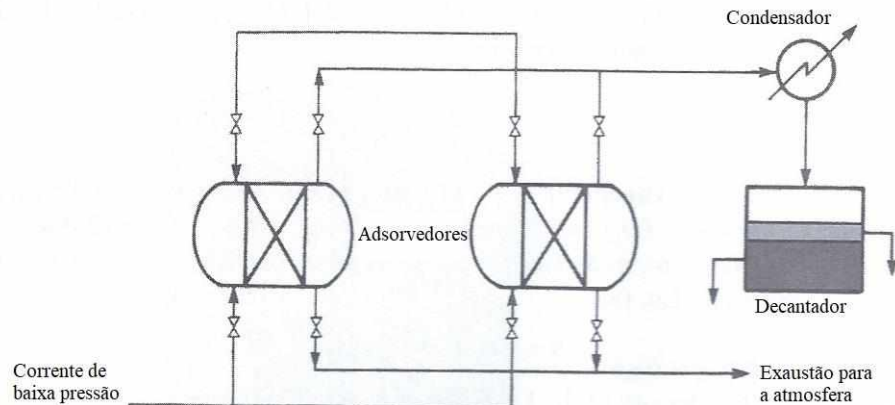
Fonte: NEVERS, 2010.

6.1.2. Adsorção

Na adsorção, o gás se adere na superfície de um sólido, geralmente poroso. A ligação entre eles pode ser física ou química. Os compostos adsorventes mais comuns são carvão ativado, sílica gel e alumina ativada, sendo o primeiro o mais utilizado.

Os poluentes são adsorvidos na superfície de seus leitos granulares, como mostra a Figura 18. A adsorção é mais utilizada para compostos orgânicos voláteis, mas também é efetiva para H_2S e SO_2 (NEVERS, 2010).

Figura 18 – Sistema típico de adsorção de carvão ativado com dois leitos

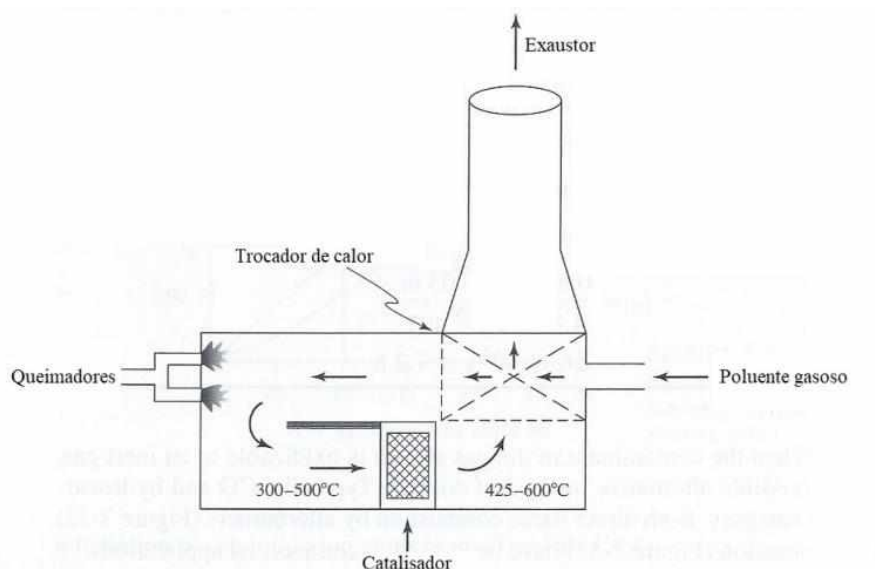


Fonte: WANG; PEREIRA; HUNG, 2004.

6.1.3. Combustão

A combustão é um modo de controle por oxidação. Quando um poluente é queimado, ele produz outros compostos menos prejudiciais. Este método é utilizado principalmente para compostos de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre. O equipamento mais utilizado é o incinerador. A vantagem deste equipamento é que praticamente qualquer corrente orgânica gasosa pode ser incinerada com segurança e com alta eficiência. A desvantagem é que pode ocorrer combustão incompleta, liberando produtos intermediários que prejudicam o meio ambiente, como dioxinas e furanos. A Figura 19 apresenta um incinerador catalítico (WANG; PEREIRA; HUNG, 2004).

Figura 19 – Incinerador catalítico

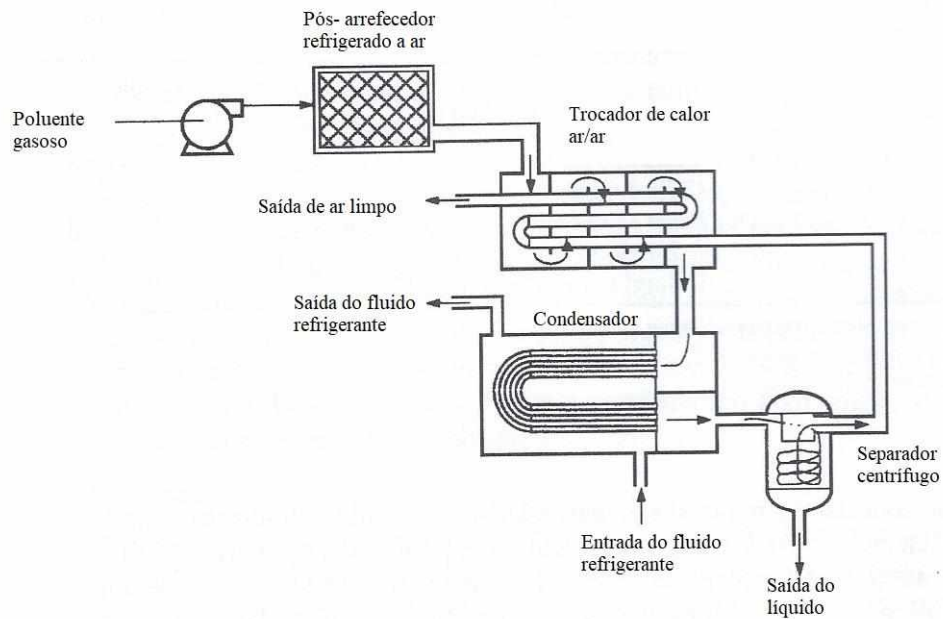


Fonte: DAVIS; CORNWELL, 2008.

6.1.4. Condensação

A condensação consiste em separar o poluente gasoso de uma corrente de ar abaixando a temperatura ou aumentando a pressão até o poluente virar líquido. É utilizado principalmente para compostos orgânicos voláteis (VALLERO, 2008). A Figura 20 mostra um sistema de condensação de vapor.

Figura 20 – Diagrama esquemático de condensação de vapor

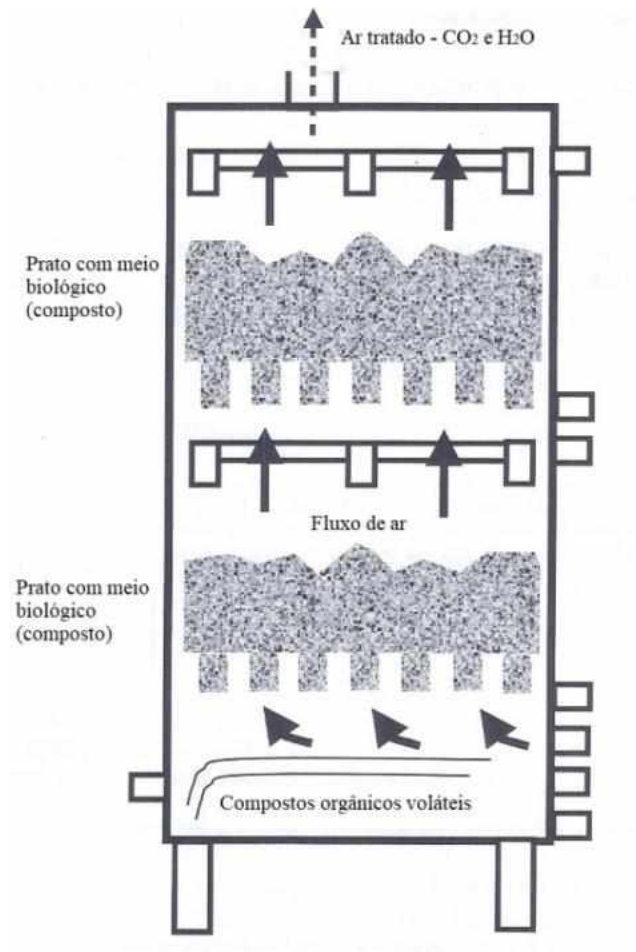


Fonte: WANG; PEREIRA; HUNG, 2004.

6.1.5. Biofiltração

Os biofiltros são utilizados para correntes com baixas concentrações de compostos orgânicos voláteis. Eles oxidam os poluentes através de micro-organismos. A Figura 21 mostra um biofiltro. Os poluentes gasosos entram nos canos distribuidores e sobem, entrando em contato com composto de micro-organismos, que oxidam esses poluentes (DAVIS; CORNWELL, 2008).

Figura 21 - Biofiltração



Fonte: VALLERO, 2008.

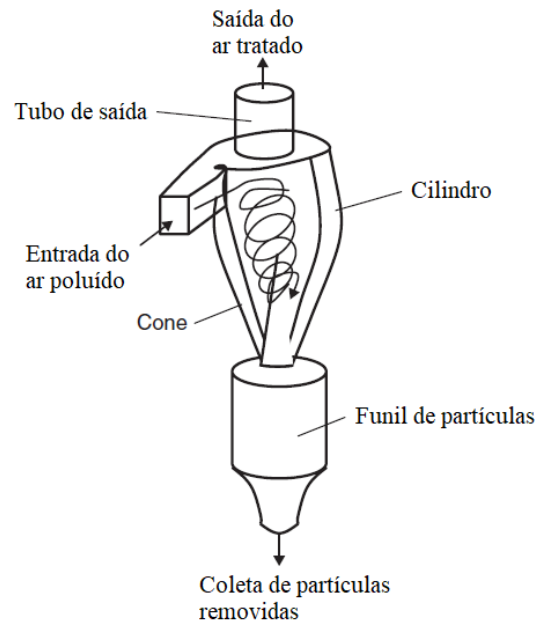
6.2. Materiais particulados

Materiais particulados podem ser removidos por ciclones, filtros, lavadores úmidos e precipitadores eletrostáticos (NEVERS, 2010).

6.2.1. Ciclones

O ciclone é utilizado para partículas com diâmetros maiores que $10 \mu\text{m}$. Ele aplica uma força centrífuga nas partículas, que, por inércia, seguem na direção da força gravitacional, enquanto o ar sai limpo na parte superior do ciclone. A Figura 22 mostra um ciclone simples (VALLERO, 2008).

Figura 22 – Esquema de um ciclone simples

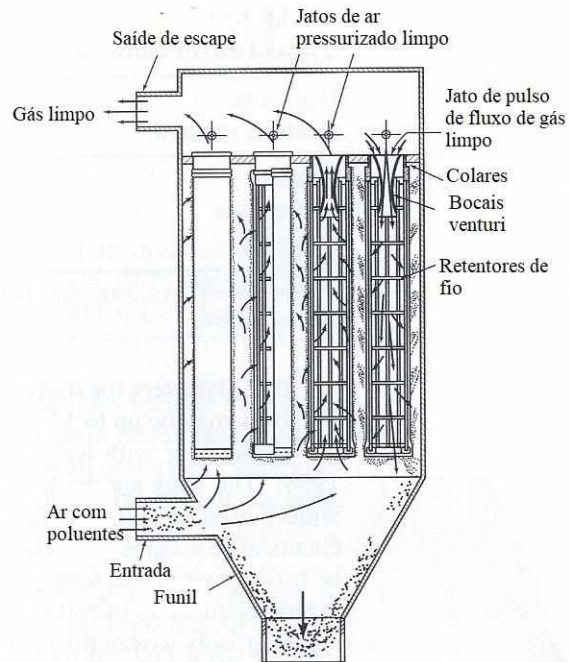


Fonte: VALLERO, 2008.

6.2.2. Filtros

Os filtros coletam partículas com diâmetros menores que $5 \mu\text{m}$. Eles podem ser feitos de tecido, material granular, como areia, ou de um sólido rígido, e podem ser de dois tipos: filtro de leito profundo ou filtro de saco. Os filtros de leito profundo utilizam principalmente de tecido como meio filtrante. Os filtros de saco são utilizados para gases industriais com grandes volumes (NEVERS, 2010). A Figura 23 mostra um filtro de saco.

Figura 23 – Esquema de um filtro de saco

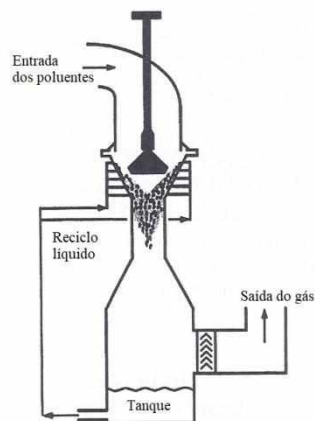


Fonte: DAVIS; CORNWELL, 2008.

6.2.3. Lavadores úmidos

Um lavador úmido é uma coluna de absorção, que pode ser utilizada também para materiais particulados. Porém, para partículas, são mais utilizados o lavador venturi, como mostrado na Figura 24, e pode ser empregado para partículas com diâmetro maior que $2\ \mu\text{m}$ e opera com um pH baixo e tem uma eficiência de 80 a 95% (WANG; PEREIRA; HUNG, 2004).

Figura 24 – Lavador venturi

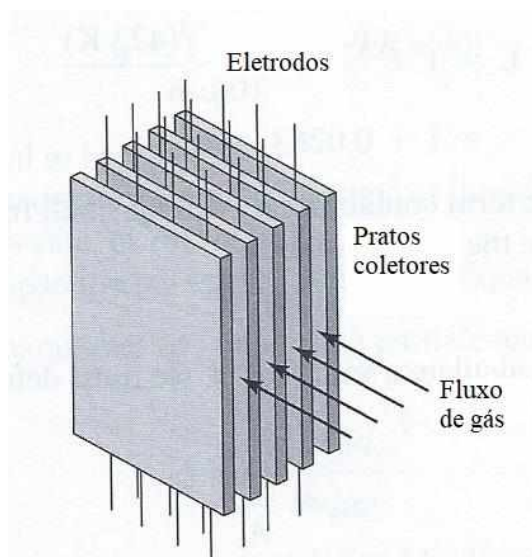


Fonte: WANG; PEREIRA; HUNG, 2004.

6.2.4. Precipitadores eletrostáticos

A precipitação eletrostática remove partículas sólidas de correntes gasosas quentes com uma queda de pressão mínima e alta eficiência. As partículas podem ser de vários tamanhos e concentrações. Um precipitador eletrostático, como mostrado na Figura 25, é feito de pratos e fios e uma corrente é aplicada nele. Quando as partículas passam pelos fios, é aplicada nelas uma carga negativa, fazendo com que sejam atraídas pelo prato carregado positivamente. As desvantagens deste método é que possui alto custo e precisa de um espaço grande (DAVIS; CORNWELL, 2008).

Figura 25 – Precipitador eletrostático



Fonte: DAVIS; CORNWELL, 2008.

7. CONCLUSÃO

A poluição do ar é um problema de cunho mundial, que afeta todo o ambiente e os seres humanos de várias maneiras, por isso, é necessário uma conscientização constante de toda a população sobre seus impactos e formas de prevenção.

Todas as pessoas podem contribuir para o controle da poluição atmosférica, evitando utilizar produtos com poluentes gasosos, como aerossóis com clorofluorcarbonos, substituindo o transporte urbano ou meios de transporte que não liberam poluentes no ar, como bicicletas, sempre que possível, e até mesmo combinar caronas para que os carros andem com sua capacidade máxima de pessoas.

As grandes cidades fazem o controle através de leis e inspeção. A cidade de São Paulo, por exemplo, criou o rodízio de carros como uma forma de diminuir a quantidade de carros rodando nas ruas durante horários de grande movimento. O rodízio estabelece quais placas de carro podem circular entre 7 horas e 10 horas e entre 17 horas e 20 horas de segunda a sexta-feira, exceto feriados. Cada dia da semana, placas com o final de dois números diferentes pode circular livremente nesses horários.

As indústrias também precisam seguir algumas leis e controlar suas emissões que podem prejudicar a qualidade do ar, utilizando os métodos citados neste trabalho ou algum outro. Existem pessoas que são responsáveis pela certificação de que as indústrias estão cumprindo as normas exigidas e controlando a poluição corretamente.

Portanto, a preocupação em evitar a poluição do ar é cada vez mais crescente desde que seus impactos foram sendo visualizados mais claramente. Esta consciência deve sempre se manter presente em todos para que a atmosfera se mantenha limpa e um lugar melhor para se habitar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRAGA, A. et al. Poluição Atmosférica e Saúde Humana. **Revista USP**, São Paulo, n. 51, p. 58-71, set./nov.2001.

BRAGA, B. et al. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. 332 p.

CETESB. **Qualidade do ar no Estado de São Paulo 2016**. São Paulo: CETESB, 2017. 198 p.

DAVIS, M.L.; CORNWELL, D.A. **Introduction to Environmental Engineering**. 4.ed. New York: McGraw-Hill, 2008. 1008 p.

LOWE, J.S.; ANDERSON, P.G. **Stevens & Lowe's Human Histology**. 4.ed. Philadelphia: Elsevier, Mosby, 2015. 166 p.

MMA. **Inventário Nacional de fontes e estimativa de emissões de dioxinas e furanos: Brasil POPs: Plano Nacional de Implementação Convenção de Estocolmo**. Brasília: MMA, 2013. 188 p.

NEVERS, N. **Air Pollution Control Engineering**. 2.ed. Long Grove: Waveland Press, Inc, 2010. 586 p.

VALLERO, D. **Fundamentals of Air Pollution**. 4.ed. United States of America: Academic Press, 2008. 942 p.

WANG, L.K.; PEREIRA, N.C.; HUNG, Y.T. **Air Pollution Control Engineering**. Totowa: Humana Press Inc, 2004. v.1.

www.epa.gov acessado em 14 de novembro de 2017.

<http://www.cetsp.com.br/consultas/rodizio-municipal/como-funciona.aspx> acessado em 20 de novembro de 2017.

<http://mario-mascarenhas.blogspot.com.br/2012/04/poluicao.html> acessado em 7 de novembro de 2017.