



Estudo de Equipamentos de Controle de Poluentes Atmosféricos e Construção de um Sistema Lavador de Gases em Escala de Bancada.

Allan da Silva Santos

Projeto de Final de Curso

Orientador

Prof. Claudinei de Souza Guimarães, D. Sc., UFRJ.

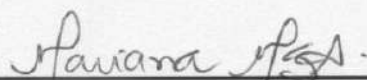
Março de 2014.

ESTUDO DE EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS E CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA LAVADOR DE GASES EM ESCALA DE BANCADA.

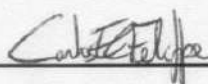
Allan da Silva Santos.

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Química.

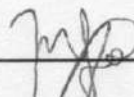
Aprovado por:



Mariana Moura Sampaio Arruda, B.Eng

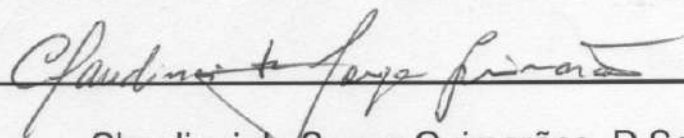


Carlos Eduardo Cunha Felipe, B.Eng



Melissa Limoeiro Estrada Gutarra, D.Sc

Orientado por:



Claudinei de Souza Guimarães, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil.

Março de 2014.

Ficha Catalográfica

Santos, Allan da Silva

Estudo de Equipamentos de Controle de Poluentes Atmosféricos e
Construção de um Sistema Lavador de Gases em Escala de Bancada / Allan
da Silva Santos. Rio de Janeiro/EQ, 2014.

xiv, 109 p.; il.

(Projeto Final de Curso) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de
Química, 2014.

Orientador: Claudinei de Souza Guimarães.

1. Poluentes Atmosféricos. 2. Equipamentos de Controle de Poluição do Ar. 3.
Construção de um Lavador de Gases em Escala de Bancada. 4. Projeto Final
de Curso. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Claudinei de Souza Guimarães. I.
Estudo de Equipamentos de Controle de Poluentes Atmosféricos e
Construção de um Sistema Lavador de Gases em Escala de Bancada.

Dedicatória:

Dedico esse trabalho aos meus pais e meu irmão, aos quais tenho profundo respeito, admiração e amor.

Citação:

“Não, não pares. É graça divina começar bem. Graça maior é persistir na caminhada certa, manter o ritmo. Mas a graça das graças é não desistir. Podendo ou não, caindo, embora aos pedaços, chegar ao fim.”

Dom Hélder Câmara

Agradecimentos:

Agradeço aos meus pais, Antônio e Sueli, e ao meu irmão Alex pela paciência, apoio, compreensão e amor durante toda a minha vida e principalmente graduação.

Aos amigos e amigas da graduação, que repartiram as mesmas dificuldades, tristezas e alegrias durante o trajeto acadêmico.

Ao meu professor orientador, Claudinei, pelo apoio, orientação, norteamento, dicas e entusiasmo. Ao colega David, que me auxiliou com ajuda em diversos experimentos sobre a construção do lavador enquanto estive no laboratório.

Aos demais professores da Escola de Química da UFRJ, que contribuíram efetivamente na minha formação.

Resumo do Projeto Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Química.

ESTUDO DE EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS E CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA LAVADOR DE GASES EM ESCALA DE BANCADA.

Allan da Silva Santos.

Março, 2014.

Orientador: Prof. Claudinei de Souza Guimarães, Doutor.

O trabalho apresenta os principais poluentes atmosféricos, tanto os legislados quanto os não legislados e os meios de remoção dos mesmos da atmosfera. Apresenta ainda os mecanismos de remoção de poluentes atmosféricos que possibilitam o tratamento dos mesmos, e os principais equipamentos baseados nesses mecanismos. Por fim, propõe a construção de um lavador de gases versátil, capaz de tratar poluentes atmosféricos e reaproveitar os reagentes utilizados no processo.

ÍNDICE

Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 – A poluição atmosférica	1
1.2 – Organização do trabalho	2
Capítulo 2 – Objetivos do trabalho	4
2.1 – Objetivo geral	4
2.2 – Objetivos específicos.....	4
Capítulos 3 – Poluentes Legislados	5
3.1 – A Lei Brasileira	5
3.2– Poluentes Legislados	7
3.2.1- O Material Particulado.....	7
3.2.1.1 - As Partículas Totais em Suspensão (PTS)	9
3.2.1.2 – Fumaça	10
3.2.1.3 – Partículas Inaláveis	10
3.2.2 – Dióxido de Enxofre	12
3.2.3 – Monóxido de Carbono (CO)	13
3.2.4 – Ozônio (O ₃)	16
3.2.5 – Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	18
3.3– Órgãos ambientais	20
Capítulos 4 – Poluentes Não Legislados.....	22
4.1 – Definição	22
4.2 – Os Compostos Orgânicos Voláteis.....	22
4.2.1 – Os Alcanos	25
4.2.2 – Os Alcenos	28
4.2.3 – Os Hidrocarbonetos Aromáticos.....	29
4.2.3.1 – O Benzeno	29
4.2.3.2 – O Tolueno.....	31
4.2.3.3 – O Etilbenzeno	32
4.2.3.4 – O Xileno.....	32
4.2.4 – Os Compostos Orgânicos Voláteis Oxigenados.....	36
4.2.4.1 – Os Aldeídos.....	36
4.2.4.2 – As Cetonas.....	38

4.2.4.3 – Os Ácidos Carboxílicos	39
4.2.4.4 – Os Éteres	41
4.2.4.5 – Os Álcoois	42
4.2.5 – Os Compostos Nitrogenados	43
Capítulos 5 – Equipamentos utilizados no Controle de Poluição do Ar	48
5.1 – Conceito de Controle de Poluição do Ar.....	48
5.2 – Mecanismos de Controle de Material Particulado utilizando Coletores Úmidos	48
5.2.1 - Impactação.....	49
5.2.2 - Interceptação	50
5.2.3 – Difusão	51
5.3 – Mecanismos de Controle de Material Particulado utilizando Coletores Secos	52
5.3.1 – Atração Eletrostática	52
5.3.2 – Gravidade.....	52
5.3.3 – Força Centrífuga	52
5.4 – Equipamentos de Controle de Material Particulado	53
5.4.1 – Câmara de Poeira	53
5.4.2 - Ciclones	55
5.4.3 – Precipitador Eletrostático.....	58
5.4.4 – Filtros de Tecido.....	62
5.5 – Mecanismos de Controle de Poluentes Gasosos.....	66
5.5.1 – Absorção	67
5.5.2 – Adsorção	67
5.5.3 – Processos de Combustão	68
5.5.4 – Condensação	70
5.6 – Equipamentos de Controle de Poluentes Gasosos	71
5.6.1 – As Torres de Spray	71
5.6.1.1 – Dimensionamento de uma torre de spray.....	72
5.6.2 – O Lavador Venturi.....	75
5.6.2.1 – Dimensionamento de um Lavador Venturi para Absorção de Gases.....	80
5.6.2.2 – Operação do Lavador Venturi	82
5.6.3 – Torre de Recheio.....	83
5.6.4 – Torre de Pratos	85

5.6.5 – Leitos de Adsorção.....	85
Capítulos 6 – Proposta de Construção de um Sistema Lavador de Gases em Escala de Bancada	87
6.1 – Motivação	87
6.2 – Construção de um Sistema Completo do Lavador	88
6.3 – Componentes do Sistema	93
6.4 – Controle de pH nos reservatórios de reaproveitamento	94
6.4.1 – Construção da placa de pH	94
6.4.2 – Materiais e Métodos envolvidos na construção da placa de pH.....	95
6.4.3 – Dados experimentais.....	97
Capítulo 7 – Conclusão	102
7.1 – Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros	102
Capítulo 8 – Referências Bibliográficas.....	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de reação de abstração de Hidrogênio. Fonte: Seinfeld e Pandis, 1988.	33
Figura 2: Exemplo de reação de adição do radical hidroxila ao anel aromático Fonte: Seinfeld e Pandis, 1988.	34
Figura 3: Exemplo de formação do m-nitrotolueno Fonte: Seinfeld e Pandis, 1988.	34
Figura 4: Exemplos de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos.....	36
Figura 5: Formação do Formaldeído. Fonte: Seinfeld e Pandis, 1988.	37
Figura 6: Exemplo de Fotólise da acetona. Fonte: Manahan, 2000	39
Figura 7: Esquema simplificado de formação do Nitrato de Peroxiacila. Fonte: Seinfeld e Pandis, 1988.	39
Figura 8: Esquema simplificado da origem dos Ácidos Carboxílicos. Fonte: Souza e Carvalho, 2001.....	40
Figura 9: Exemplo de remoção dos Éteres da atmosfera. Fonte: Seinfeld e Pandis, 1988.	42
Figura 10: Exemplos de Aminas e Arilaminas. Fonte: Manahan, 2000	44
Figura 11: Acetonitrila e Acrilonitrila Fonte: Manahan, 2000	45
Figura 12: Formação do radical cianeto. Fonte: Manahan, 2000.	46
Figura 13: Exemplo de formação do PAN. Fonte: Seinfeld e Pandis, 1988.	47
Figura 14: Mecanismo de Impactação	49
Figura 15: Mecanismo de Intercepção	50
Figura 16: Mecanismo de Difusão.....	51
Figura 17: Câmara de Poeira. Fonte: THEODORE, 2008.....	54
Figura 18: Ciclone de Entrada Tangencial com Medidas Relevantes. Fonte: THEODORE, 2008.	56
Figura 19: Modos de Operação de Filtros de Tecido. Fonte: THEODORE, 2008.	63
Figura 20: Métodos de Limpeza de Filtros de Tecido. Fonte: THEODORE, 2008.	64
Figura 21: Exemplo de Torre de Spray	73
Figura 22: Estrutura de um tipo de Lavador Venturi.....	76
Figura 23: Lavador Venturi Convencional. Fonte: Schnelle, 2002.....	77
Figura 24: Lavador Venturi do Tipo pulverizador. Fonte: Schnelle, 2002.	77
Figura 25: Atomização de Líquido. Fonte: Linne et al, 2005.	78
Figura 26: Torre de Recheio. Fonte: Theodore (2008).....	84
Figura 27: Diagrama do Sistema de Lavador de Bancada.....	88
Figura 28: Pulverização na primeira torre	89
Figura 29: Segunda torre de pulverização	90
Figura 30: Lavador Venturi e seu funcionamento.....	91
Figura 31: Reservatório de Reaproveitamento nº 1	92
Figura 32: Sistema de Lavador de Gases em 3D.....	92
Figura 33: Bicos pulverizadores	93

Figura 34: Modelo de Circuito de pH Aquarix Software. Fonte: http://www.aquarix.de/de/diy/img/phmeter.gif	94
Figura 35: Placa de pH montada no protoboard.....	96
Figura 36: Multímetro de alta precisão	96
Figura 37: Fonte de 12V.....	97

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Limites estabelecidos para materiais particulados	12
Tabela 2 – Limites Padrão Primário e Padrão Secundário para poluentes legislados não particulados.	20
Tabela 3 – Percentual de suspeitos de intoxicação por benzeno (Costa, 2009 apud Sindiquim, 1992)	31
Tabela 4 – Eficiências de ciclones no controle de material particulado. Fonte: USEPA, 2003d	58
Tabela 5 – Propriedades e custos de elementos filtrantes para filtros de tecido. Fonte: SCHNELLE, 2002.	65
Tabela 6 – Capacidade de Adsorção de Carvão Ativado.	86
Tabela 7- Dados coletados do experimento de pH	98
Tabela 8 - Equações da reta pH x Voltagem.....	99
Tabela 9 - Resultados Comparativos de pH.....	99
Tabela 10 - Comparativo dos valores de pH em temperaturas intermediárias.	100

NOMENCLATURA

- ACCENT - Atmospheric Composition Change The European Network of Excellence
- BTEX – Grupo Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
- cmWC – Centímetros de Coluna D'água
- CO – Monóxido de Carbono
- CO₂ – Dióxido de Carbono
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
- COVs – Compostos Orgânicos Voláteis
- FEPAM – Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler
- H₂O – Água
- H₂SO₄ – Ácido Sulfúrico
- HCFC – Hidroclorofluorcarbono
- HNO₃ – Ácido Nítrico
- HO₂⁻ – Hidroperoxila
- HPAs – Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
- HSO₃⁻ – Íon Bissulfito
- hV – Luz
- IAP – Instituto Ambiental do Paraná
- INEA – Instituto Estadual do Ambiente (RJ)
- K – Kelvin
- KΩ - Kilo Ohm, unidade de resistência
- M – Composto que participa da reação apenas para retirar energia dela e estabilizá-la.
- MAA – Média Aritmética Anual
- MGA – Média Geométrica Anual
- Mm – Micrômetros (10⁻⁶ m)
- MP₁₀ – Material Particulado menor que 10 micrômetros e maior que 2,5 micrômetros
- MP_{2,5} – Material Particulado menor que 2,5 micrômetros
- NG – Número de Unidades de Transferência de massa do Gás
- N₂O – Óxido Nitroso
- N₂O₃ – Trióxido de Dinitrogênio
- N₂O₄ – Tetróxido de Dinitrogênio
- N₂O₅ – Pentóxido de Dinitrogênio
- NO – Monóxido de Nitrogênio
- NO₂ – Dióxido de Nitrogênio
- NO_x – Óxidos de Nitrogênio
- O₂ – Gás Oxigênio

- O₃ – Ozônio
- OH⁻ – Íon Hidroxila
- PANs – Nitratos de Peroxiacila
- PI – Partículas Inaláveis
- ppm – Partes por milhão
- PRONAR – Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar
- PTS – Partículas Totais em Suspensão
- R⁻ – Radical Alquila
- R-C(O) – Radical Acila
- RH – Alcano
- RO⁻ – Radical Alcóxido
- RO₂⁻ – Radical Peroxila
- RONO₂ – Nitrato de Alquila
- ROOH – Hidroperóxido
- SO₂ – Dióxido De Enxofre
- SO₃ – Trióxido de Enxofre
- SO_x – Óxidos de Enxofre
- USEPA - United States Environmental Protection Agency
- UV – Ultra Violeta
- UV-B – Ultra Violeta B
- W – Watts, unidade de potência
- Ω.cm – Ohm Centímetro, unidade de resistividade

Capítulo 1 – Introdução

1.1 – A poluição atmosférica

O ar é constituído por uma mistura de gases presentes na atmosfera, sendo imprescindível para a manutenção da vida no planeta. A qualidade do ar de uma região reflete significativamente na saúde dos seres vivos que nela habitam. Nesse contexto, a poluição caracteriza-se como a degradação de determinada localidade, provocada pela mudança ambiental decorrente da ação de um ou mais agentes denominados poluentes.

De uma forma geral, a poluição atmosférica tem como origem duas fontes principais de emissão de poluentes: as fontes naturais e as fontes antropogênicas.

As fontes naturais de poluição sempre existiram e, de uma maneira geral, são controladas com certa estabilidade pela própria natureza, que consegue degradar os poluentes sem acarretar danos significativos ao meio ambiente. Já as fontes antropogênicas tem como origem (direta e indireta) o homem. Com a revolução industrial e o início do consumo de combustíveis fósseis, a poluição causada pelo homem se intensificou de forma mais contundente, representando graves riscos a fauna, flora e saúde humana, desde locais próximos a fonte de emissão como também a lugares mais afastados, dependendo da estabilidade do poluente na atmosfera, bem como as características meteorológicas da região.

A queima de combustíveis fósseis libera uma infinidade de poluentes à atmosfera. Em particular, a indústria petroquímica é responsável pela emissão de toneladas de óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x), compostos orgânicos voláteis (COVs) e materiais particulados (MP) todos os anos. Os danos à saúde humana são variados, como irritação das vias respiratórias, tosse, falta de ar,

agravamento de asma e bronquite crônica, danos a órgãos sensoriais, edemas pulmonares, bem como outros problemas respiratórios (INEA, 2009).

Sistemas de controle e tratamentos eficientes devem ser empregados para reduzir a emissão desses poluentes na atmosfera. Dentre as mais variadas possibilidades, existem os coletores úmidos, equipamentos que são utilizados tanto para controle de material particulado, como controle de gases e vapores. Estes equipamentos são conhecidos como lavadores. Quando um lavador é empregado no tratamento de gases e vapores, ele também é chamado de absorvedor. Entre os tipos de lavadores mais conhecidos, pode-se citar as torres de spray e os lavadores Venturi. Dentre as vantagens das torres de spray, destacam-se a baixa perda de carga, baixo custo de capital na construção, habilidade de coletar material particulado e gases (US EPA, 2003a). As vantagens dos lavadores Venturi incluem o baixo custo na manutenção do equipamento, eficiência de coleta variada, de acordo com a necessidade, design simples e de fácil instalação (US EPA, 2003b).

1.2 – Organização do trabalho

O presente trabalho será estruturado em seis capítulos, sendo:

- Capítulo 1 - Responsável pela introdução (já apresentado).
- Capítulo 2 - Responsável por esclarecer os objetivos do trabalho.
- Capítulo 3 – Poluentes Legislados: apresentará a legislação brasileira para os compostos que são controlados na atmosfera terrestre, bem como as principais formas de remoção dos mesmos na atmosfera e os danos causados ao homem e a natureza.

- Capítulo 4 – Poluentes não legislados: apresentará os principais poluentes que não tem controle previsto em legislação, as principais formas de remoção da atmosfera e os malefícios dos mesmos à saúde humana e da natureza em geral.
- Capítulo 5 – Equipamentos de Controle de Poluição do ar: este capítulo apresentará os diversos mecanismos pelos quais os poluentes podem ser tratados, e os principais equipamentos utilizados com base nesses mecanismos.
- Capítulo 6 – Proposta de um Sistema Lavador de Gases: este capítulo apresentará uma proposta de construção de um sistema lavador de gases, construção de uma placa de pH e projeção em 3D do sistema.
- Capítulo 7 – Conclusão: apresentará a conclusão do trabalho e propostas para trabalhos futuros.
- Capítulo 8 – Referências Bibliográficas – apresentará as fontes que foram buscadas para embasamento do trabalho.

Capítulo 2 – Objetivos do trabalho

2.1 – Objetivo geral

Este projeto final de curso tem como objetivo apresentar os compostos legislados e suas reações na atmosfera, os compostos não legislados e suas reações na atmosfera, os mecanismos de controle e tratamento de poluentes e os principais equipamentos baseados nesses mecanismos. Propor a construção de um sistema de lavador de bancada que seja versátil, combinando torres de spray e um lavador Venturi, com a capacidade de tratar ou COV's (Compostos orgânicos voláteis), ou material particulado ou outro tipo de poluente, de acordo com a vontade e necessidade do usuário, adaptando os reagentes a cada caso, respeitando as limitações do aparelho. O sistema contará ainda com reservatórios de reaproveitamento de reagente, com o objetivo de reutilizá-lo até que suas características reativas sejam perdidas ou se mostrem pouco funcionais.

2.2 – Objetivos específicos

- Propor um projeto em 3D do Sistema Lavador
- Construção de uma placa eletrônica em um protoboard para a medição de pH, permitindo o monitoramento da acidez ou da basicidade do reagente acondicionado no reservatório de reaproveitamento de reagente, funcionando como fator de decisão para o reaproveitamento do reagente no tanque pulverizador ou não.

Capítulos 3 – Poluentes Legislad

3.1 – A Lei Brasileira

No Brasil, a legislação define meio ambiente, a degradação da qualidade ambiental e a poluição segundo o artigo número 3 da Lei nº 6938 da Constituição Federal, de 31 de agosto de 1981, que trata da política nacional do meio ambiente.

Segundo o artigo nº 3 da Constituição, a poluição é caracterizada pela degradação da qualidade ambiental por atividades que, diretamente ou indiretamente:

- a) prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- b) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas;
- c) afetem desfavoravelmente a biota;
- d) afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente;
- e) lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos.

Os padrões ambientais são estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). No que se relaciona ao controle de poluição do ar, a resolução CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990, caracteriza poluente atmosférico como qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou que possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde; inconveniente ao bem-estar público; danoso aos materiais, à fauna e a flora; prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

A resolução ainda cita e estabelece padrões primários e secundários para partículas totais em suspensão (PTS), fumaça, partículas inaláveis (PI), dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO), ozônio (O₃) e dióxido de nitrogênio (NO₂), constituindo os compostos legislados. Os padrões primários de qualidade do ar limitam as concentrações dos poluentes a um determinado limite, que se for ultrapassado, acarretaria problemas de saúde à população. Já o padrão secundário de qualidade do ar constitui o limite inferior onde as concentrações dos poluentes atmosféricos estão abaixo da mínima capaz de provocar algum efeito nocivo à população, à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral.

Ambos os padrões, primários e secundários, servem como referências para a adequação das emissões de poluentes, sendo responsáveis por orientarem a elaboração de planos regionais de controle de poluição do ar, já que o monitoramento da qualidade do ar é de responsabilidade dos estados, segundo o artigo nº 5 da mesma resolução. Este artigo, de 15 de junho de 1989, através de seu item 2.3 “Prevenção de deterioração significativa da qualidade do ar” ainda estabelece três classificações de área diferentes, orientando se a região necessita de um controle limitado pelo padrão primário ou secundário. Estas regiões são portanto classificadas em três classes diferentes, como:

- As regiões Classe I, que enquadram áreas de preservação, turismo e lazer (como parques nacionais e estaduais, reservas ecológicas). Essas áreas Classe I deverão ter a qualidade do ar em um nível tal que fique o mais próximo possível de como a região estaria sem que houvesse intervenção antropogênica.
- As regiões Classe II, que englobam áreas onde se fazem necessárias que o nível de poluição do ar não ultrapasse o estabelecido pelo padrão secundário.

- Por fim, as regiões Classe III, que enquadram áreas nas quais o nível de poluição do ar não deve ultrapassar o teto estabelecido pelo padrão primário.

3.2– Poluentes Legislados

São inúmeros os tipos de poluentes lançados diariamente na atmosfera terrestre. As variadas características de cada um inviabilizam tecnicamente e economicamente o controle de maior parte dos poluentes, pois seriam necessários equipamentos específicos para a detecção e o controle de um composto em questão, encarecendo os custos de produção ou de operação.

Em vista disso, a qualidade do ar é mensurada através da medição e controle de um grupo de poluentes. Esses poluentes foram adotados universalmente como indicadores da qualidade do ar, e o critério de escolha desse grupo de poluentes foi feito em vista da recorrente presença na atmosfera terrestre, bem como os efeitos potencialmente danosos à saúde humana, à fauna, à flora e ao meio ambiente em geral. São denominados poluentes legislados.

Segundo a resolução nº 3 do CONAMA, de 28 de junho de 1990, os poluentes legislados são: os materiais particulados, que englobam as Partículas totais em Suspensão (PTS), a Fumaça, e as Partículas Inaláveis (PI). O Dióxido de Enxofre (SO₂), o Monóxido de Carbono (CO), o Ozônio (O₃) e o Dióxido de Nitrogênio (NO₂) completam a lista dos poluentes legislados.

3.2.1- O Material Particulado

O termo material particulado é usado para se referir a uma classe de diversas substâncias que existem na forma de partículas discretas, seja na forma sólida, seja na forma líquida (gota). Os materiais particulados podem ser classificados em uma ampla gama de tamanhos

de partículas, bem como podem ser divididos em subgrupos de acordo com certas características específicas. A legislação brasileira divide o material particulado em três categorias, que devem ser monitoradas e controladas. São as Partículas Totais em Suspensão, Fumaça e Partículas Inaláveis.

As partículas podem ser emitidas na atmosfera tanto por fontes antropogênicas quanto por fontes naturais, assim como podem ser formados na atmosfera posteriormente por transformações sofridas por outros poluentes, como os compostos orgânicos voláteis (COVs), óxidos de enxofre (SO_x) e óxidos de nitrogênio (NO_x). As propriedades físicas e químicas do material particulado variam de acordo com a região, meteorologia e tipo de fonte emissora (US EPA, 2009a).

O potencial dos materiais particulados em causar problemas de saúde está diretamente ligado ao diâmetro da partícula. As partículas com diâmetro aerodinâmico igual ou menor a 10 µm podem causar problemas de saúde. Quanto menor o diâmetro, maior a capacidade da partícula em penetrar mais fundo nos pulmões, causando doenças pulmonares. Algumas partículas são tão pequenas que podem chegar inclusive a corrente sanguínea, terminando por se depositar no coração, causando doenças cardiovasculares. Partículas de diâmetro menor que 100 µm e maior que 10 µm são menos precursoras de doenças pulmonares e cardiovasculares, porém podem causar irritação nos olhos, garganta e nariz (US EPA, 2003c).

O material particulado presente na atmosfera pode ser de origem primária como de origem secundária. O material particulado de origem primária é lançado da fonte diretamente na atmosfera, enquanto o material particulado de origem secundária é formado na atmosfera através de reações ou interações físico-químicas, entre poluentes que já se encontram na atmosfera. Os efeitos nocivos da poluição por material particulado sobre o meio ambiente são diversos, podendo citar a redução de visibilidade nos centros urbanos poluídos, causada pelas partículas suspensas na atmosfera, que acabam servindo como

obstáculos para luz, dispersando e absorvendo os raios solares. (US EPA, 2009a)

Há também os efeitos nocivos sobre os processos metabólicos das plantas, já que o material particulado que se deposita sobre as folhas diminuem a área efetiva de captação de luz solar, causando um decréscimo na capacidade fotossintetizante, pois afeta diretamente a primeira fase da fotossíntese, que é a fase dependente da luz solar. A deposição de material particulado no solo favorece ainda a acumulação de metais e compostos orgânicos, alterando a microbiologia e bioquímica vigentes no ecossistema local em longo prazo, acabando por afetar o crescimento de plantas e animais no futuro, resultado da bioacumulação através de diversos níveis tróficos (US EPA, 2009a).

3.2.1.1 - As Partículas Totais em Suspensão (PTS)

Incluem todas as partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, com um diâmetro menor que 50 μm . As fontes antropogênicas que contribuem para o lançamento dessas partículas à atmosfera são processos industriais, queima incompleta de combustíveis em automóveis (principalmente os motores de combustão de diesel), poeira ressuspensa nas ruas, queima de biomassa (CETESB, 2005).

A resolução CONAMA nº 3 de 28 de junho de 1990, estabelece no seu artigo 3 que para as partículas totais em suspensão, o padrão primário deve ser atendido mediante dois objetivos: a concentração média geométrica anual deve ser menor que 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar, enquanto que a concentração média de um único dia não pode exceder 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar mais de uma vez por ano.

Já o padrão secundário deve ser atendido de duas formas: a concentração média geométrica anual tem que ser menor que 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar, enquanto que a concentração média diária não pode exceder 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar mais de uma vez por ano.

3.2.1.2 – Fumaça

A fumaça é constituída de uma mistura de gases e de material particulado que está relacionada restritivamente às partículas suspensas na atmosfera provenientes de processos de combustão. Porém, a maior ameaça está presente justamente no material particulado. Essas partículas finas agravam doenças crônicas do coração e do pulmão. A fumaça causa danos à vegetação, contamina o solo e causa danos a visibilidade, além de causar o aumento de atendimentos hospitalares e mortes prematuras (CETESB, 2005).

A resolução CONAMA nº 3 de 28 de junho de 1990, estabelece no seu artigo 3 que, para o padrão primário da fumaça ser atingido, é necessário que a concentração média aritmética anual da fumaça seja menor que $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar, enquanto que a concentração média diária não deve ultrapassar $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar mais de uma vez por ano.

Para o padrão secundário, a concentração média aritmética anual da fumaça deve ser menor que $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar, enquanto que a concentração média diária não pode exceder $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar mais de uma vez por ano.

3.2.1.3 – Partículas Inaláveis

São materiais particulados de diâmetro muito pequeno, que se dividem em duas categorias: MP_{10} (partículas menores que $10 \mu\text{m}$ e maiores que $2,5 \mu\text{m}$) e $\text{MP}_{2,5}$ (partículas menores que $2,5 \mu\text{m}$). Por terem diâmetro muito pequeno, são leves suficientemente para que se mantenham suspensas na atmosfera.

O MP_{10} tem origem majoritariamente primária, sendo emitida na atmosfera como partículas totalmente formadas, originadas de processos mecânicos (como abrasão ou ruptura de algum material), suspensão de poeira, fragmentos de plantas ou insetos, evaporação de *sprays* entre outros (Seinfeld e Pandis, 1988). Ele ainda pode ser gerado

a partir de partículas muito finas com características higroscópicas, aumentando de tamanho a medida que a umidade aumenta. O MP₁₀ serve ainda como núcleo de condensação de diversos gases, como o ácido nítrico (HNO₃) gasoso (US EPA, 2009a).

O MP_{2,5} é produzido principalmente a partir da queima de combustíveis fósseis, mas também pode ser formado a partir de queimadas e processamento de metais. As partículas são formadas a partir da condensação de vapores e gases durante um processo de combustão, combinando compostos como sulfatos, nitratos, compostos orgânicos, amônia, e variados metais, como chumbo, cádmio, cobre, zinco, níquel, entre outros (US EPA, 2009a).

Segundo a resolução CONAMA nº 3 de 28 de junho de 1990, não há distinção entre o padrão primário e secundário do MP₁₀ e MP_{2,5}. A resolução estabelece que a média aritmética da concentração anual não deve ser superior a 50 µg/m³ de ar e que a concentração média diária não deve exceder a 150 µg/m³ de ar mais de uma vez por ano.

Quanto menor a partícula, mais danos ela causa à saúde, pois ela vence mais facilmente os mecanismos de filtração do sistema respiratório humano, acabando por se depositar nos alvéolos, responsáveis pelas trocas gasosas de O₂ e CO₂ com o sangue, diminuindo a eficiência da respiração e podendo causar várias doenças respiratórias (US EPA, 2004a).

A tabela 1 a seguir resume os dados com relação ao tamanho das partículas, padrão primário, padrão secundário de todos os materiais particulados legislados, onde a Média Geométrica anual é representada pela sigla MGA e a Média Aritmética Anual é representada pela sigla MAA:

Tabela 1 – Limites estabelecidos para materiais particulados

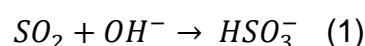
Poluentes	Tempo de amostragem	Concentração	
		Padrão Primário	Padrão Secundário
PTS	24 horas	240 µg/m ³	150 µg/m ³
	MGA	80 µg/m ³	60 µg/m ³
Fumaça	24 horas	150 µg/m ³	100 µg/m ³
	MAA	60 µg/m ³	40 µg/m ³
PI	24 horas	150 µg/m ³	150 µg/m ³
	MAA	50 µg/m ³	50 µg/m ³

3.2.2 – Dióxido de Enxofre

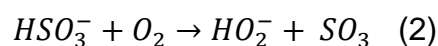
Os óxidos de enxofre de maior interesse na química da atmosfera são o SO₂ e o SO₃ (USEPA, 2008b). O SO₃ é emitido diretamente na atmosfera a partir de chaminés de fábricas e indústrias. Entretanto, ele não permanece muito tempo nessa forma, reagindo quase que instantaneamente com a água presente na atmosfera, formando ácido sulfúrico (US EPA, 2008c).

O Dióxido de Enxofre (SO₂) também é um poluente membro da família dos óxidos de enxofre (SO_x). A emissão antropogênica do dióxido de enxofre resulta majoritariamente da queima de combustíveis que contém enxofre, como gasolina, óleo diesel ou óleo combustível industrial. Refinarias de petróleo e extração também são fontes antropogênicas de emissão (CETESB, 2005). As principais fontes naturais de dióxido de enxofre incluem erupções vulcânicas e queima de biomassa (USEPA, 2009b).

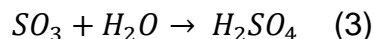
A principal reação do SO₂ na atmosfera é com o radical hidroxila (OH) (Seinfeld e Pandis apud Stockwell e Calvert 1983), resultando em:



Seguido por uma reação com o oxigênio atmosférico (O₂):



O trióxido de enxofre reage rapidamente na presença de vapor d'água, sendo convertido em ácido sulfúrico:



O ácido sulfúrico é solúvel em água, sendo capaz de precipitar junto com a água presente na atmosfera, causando a chuva ácida. O SO₂ ainda se mostra capaz de reagir com o ozônio e o peróxido de hidrogênio, formando sulfato e posteriormente o ácido sulfúrico (ANDRADE E SARNO, 1990). Pode-se afirmar, portanto, que o SO₂ é um dos principais precursores da chuva ácida.

Segundo a resolução CONAMA nº 3 de 28 de junho de 1990, para o padrão primário, a concentração média aritmética anual do SO₂ deve ser menor que 80 µg/m³ de ar, enquanto que a concentração média diária não pode exceder 365 µg/m³ de ar mais de uma vez por ano. O padrão secundário estatiza que a concentração média aritmética anual do SO₂ não deve ultrapassar anualmente a 40 µg/m³ de ar e que, a concentração média diária não pode ultrapassar 100 µg/m³ de ar mais de uma vez por ano.

Os danos à saúde causados pelo dióxido de enxofre são numerosos. Provoca doenças respiratórias, agravamento de doenças cardiovasculares e respiratórias já existentes. Pessoas com histórico de doenças cardiovasculares e respiratórias tendem a ser mais sensíveis ao dióxido de enxofre (CETESB, 2005).

3.2.3 – Monóxido de Carbono (CO)

O monóxido de carbono é um gás incolor e inodoro formado primordialmente pela combustão incompleta de combustíveis contendo carbono, como os que são utilizados em fontes móveis como carros, locomotivas e aviões, que estão entre as principais fontes antropogênicas de emissão de monóxido de carbono no planeta (USEPA, 2010a). Outros processos tecnológicos a base de combustão e de queima de biomassa também podem ser incluídas neste grupo principal. Um equipamento que realize combustão, com manutenção

preventiva e otimizado dificilmente emitirá quantidades relevantes de monóxido de carbono na atmosfera, uma vez que o aumento do oxigênio na câmara de combustão, ou da temperatura de queima, ou ainda do tempo de mistura dos gases na zona de combustão contribui consideravelmente para o decréscimo de geração de CO. Como a eficiência de queima de um combustível está diretamente ligada à economia de capital empregado na compra do mesmo, quanto maior for a eficiência de combustão, menor será o gasto e menor será a emissão de CO. Esse perfil de funcionamento é buscado pela maioria das caldeiras industriais, principalmente as mais novas (US EPA, 2010a).

A foto-oxidação de compostos orgânicos voláteis, como metano e hidrocarbonetos não-metânicos constituem uma importante fonte secundária de emissão de monóxido de carbono na atmosfera (US EPA, 2010a).

Estima-se que dois terços de todo o monóxido de carbono emitido na atmosfera seja derivado de ações antropogênicas. Medições ainda indicam que existe mais monóxido de carbono no hemisfério norte que no hemisfério sul (Seinfeld e Pandis, 1988).

A principal forma de remoção do monóxido de carbono na atmosfera é através da reação com o radical hidroxila, formando o dióxido de carbono:



O mesmo poderia ser dito para a hidroxila: a principal forma de remoção do radical hidroxila da atmosfera é a partir da reação com o monóxido de carbono. Entretanto, o radical hidroxila participa de outras reações importantes com outros gases, e um aumento do monóxido de carbono na atmosfera afeta indiretamente esses outros processos que demandam o radical OH. Por exemplo, o ozônio e o metano são gases do efeito estufa que reagem com a hidroxila. Se a hidroxila reage preferencialmente com o monóxido de carbono, o ozônio e o metano ficam livres para absorver radiação infravermelha e contribuir com o

efeito estufa. Outros compostos como o hidroclorofluorcarbono (HCFC), o bromometano e o clorometano também reagem com a hidroxila, e na ausência dela, ficam livres para atacar a camada de ozônio, provocando um aumento da incidência de radiação ultravioleta diretamente na superfície terrestre. (US EPA, 2010a). O CO₂ também absorve radiação infravermelha proveniente da superfície terrestre do planeta, contribuindo para o efeito estufa e acarretando em mudanças climáticas (US EPA, 2010a).

O monóxido de carbono é extremamente prejudicial a saúde, pois afeta diretamente no transporte do oxigênio para as células do corpo. O monóxido de carbono entra na corrente sanguínea a partir da respiração, passando pelos pulmões, e reagindo com a hemoglobina, formando a carbóxi-hemoglobina. Com isso, a eficiência da respiração é diminuída consideravelmente, pois a hemoglobina não consegue carrear o oxigênio para os diversos órgãos e tecidos do corpo humano (US EPA, 2010a).

Os efeitos do monóxido de carbono são ainda piores em pessoas que já têm doenças cardiovasculares. Nessas pessoas, a simples exposição ao monóxido de carbono reduz a capacidade de exercício físico, além de provocar dores no peito (US EPA, 2008a). Entre outros efeitos adversos, pessoas que respiram altos níveis de monóxido de carbono podem desenvolver problemas de visão, além de apresentar tremores corporais. Em altas concentrações, o monóxido de carbono pode causar a morte (US EPA, 2008a).

A concentração de monóxido de carbono é mais alta em locais próximos a rodovias e avenidas, devido as emissões provenientes das fontes móveis. Dentro de um carro, por exemplo, a concentração de monóxido de carbono é de duas a cinco vezes mais alta que em locais abertos (USEPA, 2010a).

A resolução CONAMA nº 3 de 28 de junho de 1990 não faz distinção entre o padrão primário e secundário do monóxido de carbono, definindo os mesmos valores para os dois padrões. A concentração

média do monóxido de carbono em oito horas não deve ultrapassar $10.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por metro cúbico de ar (9 ppm) mais de uma vez por ano, assim como a concentração média em uma hora não deve ultrapassar $40.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar (35 ppm) mais de uma vez por ano.

3.2.4 – Ozônio (O_3)

O ozônio é um gás reativo e oxidante produzido naturalmente em baixas concentrações na atmosfera terrestre. Ele é abundantemente encontrado na estratosfera, onde desempenha um importante papel absorvendo a radiação ultravioleta, que é danosa aos seres vivos. Aproximadamente, 90% de todo o ozônio existente na terra é encontrado na estratosfera (Seinfeld e Pandis, 1988).

Entretanto, na troposfera (camada mais interna da atmosfera), o ozônio atua como um forte agente oxidante, mostrando-se perigoso à saúde dos seres vivos e danoso aos materiais. O ozônio troposférico não se encontra apenas em atmosferas poluídas, mas encontra-se espalhado por todo globo.

O ozônio da troposfera pode ser originado tanto da ação humana quanto de fontes naturais. O ozônio atribuído a fontes antropogênicas são gerados de maneira geral a partir de reações fotoquímicas envolvendo luz do sol e poluentes já existentes na atmosfera, como compostos orgânicos voláteis (COVs), os óxidos de nitrogênio (NO_x) e o monóxido de carbono (CO). Importantes compostos orgânicos voláteis na formação do ozônio incluem os alcanos, os alcenos, os aldeídos, os hidrocarbonetos aromáticos, álcoois, peróxidos orgânico e compostos organo-halogenados (US EPA, 2013).

Já o ozônio atribuído a fontes naturais também é formado a partir de reações fotoquímicas, e de poluentes presentes na troposfera proveniente de fontes biogênicas. Ele pode ser retirado da atmosfera através da deposição em superfícies e através de reações químicas que ocorrem na atmosfera (Seinfeld e Pandis, 1988). As concentrações de

ozônio também são influenciadas por fatores meteorológicos, quantidade de emissões de poluentes primários na atmosfera local e até por barreiras topográficas (USEPA, 2013).

O ozônio troposférico também funciona como um escudo adicional frente à radiação ultravioleta. O comprimento de onda dos raios UV na troposfera são normalmente entre 290 e 320 nanômetros, sendo chamado nessa faixa de raios UV-B (Seinfeld e Pandis, 1988). Porém, a acumulação excessiva de ozônio nas camadas mais baixas da atmosfera traz mais malefícios que benefícios.

A saúde de um indivíduo é mais ou menos afetada de acordo com velocidade e profundidade da respiração (US EPA, 2013). Por isso, os danos à saúde são mais severos em pessoas com vida física ativa em ambientes poluídos abertos (US EPA, 2009c).

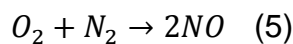
Entre os problemas de saúde causados pelo ozônio, ele pode irritar as vias respiratórias, causando tosses, coceiras na garganta e dores no peito quando se respira profundamente. O ozônio pode diminuir a capacidade de respiração dos pulmões, fazendo a pessoa se sentir ofegante, pode inflamar e danificar as células do tecido pulmonar, tornar os pulmões mais suscetíveis a infecções, agravar doenças como asma e causar danos permanentes aos pulmões (US EPA, 2009c).

A resolução CONAMA nº 3 de 28 de junho de 1990 também não faz distinção entre o padrão primário e secundário, adotando um padrão único. Ela estabelece que a concentração média de ozônio durante uma hora não pode exceder $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar mais de uma vez por ano.

3.2.5 – Dióxido de Nitrogênio (NO₂)

O dióxido de nitrogênio é um membro da família dos óxidos de nitrogênio (NO_x), que contém ainda o monóxido de nitrogênio (NO), o óxido nitroso (N₂O), o trióxido de dinitrogênio (N₂O₃), o tetróxido de dinitrogênio (N₂O₄) e o pentóxido de dinitrogênio (N₂O₅). O NO₂ é majoritariamente formado no ar através da oxidação do NO emitido por combustíveis queimados em altas temperaturas. Ele também pode ser emitido como poluente primário pela mesma fonte, porém suas emissões primárias são muito menores que as de NO (US EPA, 2008a). Como o NO e NO₂ têm a capacidade de se interconverterem entre um e outro em intervalos muito pequenos de tempo, e por serem os óxidos de nitrogênio mais abundantemente encontrados na atmosfera, frequentemente o termo é NO_x é usado como a soma do NO com o NO₂, negligenciando os outros óxidos de nitrogênio menos frequentes. A oxidação do NO emitido na atmosfera a NO₂ constitui o principal caminho de formação de NO₂ na atmosfera (poluente secundário) (USEPA, 2008d).

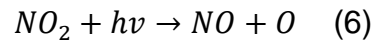
As fontes de dióxido de nitrogênio que é lançado na atmosfera podem ser tanto de origem biogênica como de origem antropogênica. Porém, as fontes antropogênicas contribuem muito mais para as emissões. Os óxidos de nitrogênio (NO_x) lançados pelo o homem na troposfera são majoritariamente originados da queima de combustíveis fósseis. A zona de combustão deve estar numa temperatura igual ou maior a 1.300 K para que o N₂ presente no ar ou no combustível consiga ser fixado, de acordo com a reação (US EPA, 2008c):



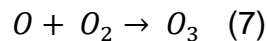
As principais fontes biogênicas de NO_x são os processos de nitrificação e desnitrificação que ocorrem no solo e a queima de biomassa (US EPA, 2008c).

As emissões de óxidos de nitrogênio, somadas a presença de COVs presentes em uma atmosfera poluída são os principais

precursores da formação do smog fotoquímico (USEPA, 2008d). O smog fotoquímico é caracterizado como o conjunto de poluentes formados na atmosfera a partir de reações foto-oxidativas. O ozônio é o principal poluente formado nesse processo. Na primeira reação, o NO_2 é convertido em NO na presença de luz solar:



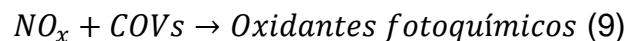
Em seguida, o radical oxigênio reage com o oxigênio atmosférico, formando o ozônio (EPA, 2004):



Em condições normais, o ozônio seria consumido pelo monóxido de nitrogênio, formando dióxido de nitrogênio e oxigênio atmosférico:



Porém, em atmosferas poluídas, o NO_x reage com os compostos orgânicos voláteis, formando produtos como nitrato de peróxi-acetil e outros compostos oxidantes fotoquímicos:



O NO também pode reagir com compostos orgânicos oxigenados, assim como compostos inorgânicos oxigenados, formando mais NO_2 e contribuindo para o aumento da poluição (EPA, 2004). O NO_2 também pode ser oxidado para formar o ácido nítrico (HNO_3), um dos principais precursores da chuva ácida (US EPA, 2008d).

A exposição ao NO_2 aumenta o risco de crianças desenvolverem doenças respiratórias. Exposições rápidas a baixos níveis de NO_2 podem causar um decréscimo nas funções pulmonares de indivíduos que já apresentam algum tipo de doença respiratória. Além disso, um longo tempo de exposição a ambientes com altos níveis de dióxido de nitrogênio pode causar danos irreversíveis na estrutura pulmonar (US EPA, 2008a).

A resolução CONAMA nº 3 de 28 de junho de 1990 estabelece que, para o padrão primário, a concentração média aritmética anual não pode exceder 100 µg/m³ de ar, enquanto que a concentração média de uma hora não pode exceder 320 µg/m³ de ar.

Já para o padrão secundário, é estabelecido que a concentração média anual não pode ultrapassar 100 µg/m³ de ar, enquanto que a concentração média durante uma hora não pode exceder 190 µg/m³ de ar.

Resumindo os limites para os poluentes abordados que não se enquadram na classificação de material particulados, segue na tabela 2 os limites de padrão primário e secundário para os poluentes CO, SO₂, NO₂ e O₃:

Tabela 2 – Limites Padrão Primário e Padrão Secundário para poluentes legislados não particulados.

Poluentes	Tempo de amostragem	Concentração Padrão Primário	Concentração Padrão Secundário
CO	8 horas	10000 µg/m ³	10000 µg/m ³
	1 hora	40000 µg/m ³	40000 µg/m ³
SO ₂	24 horas	365 µg/m ³	100 µg/m ³
	MAA	80 µg/m ³	40 µg/m ³
NO ₂	1 hora	320 µg/m ³	190 µg/m ³
	MAA	100 µg/m ³	100 µg/m ³
O ₃	1 hora	160 µg/m ³	160/m ³

3.3– Órgãos ambientais

Segundo a resolução CONAMA nº 5, de 15 de junho de 1989, compete aos estados do Brasil a criação e a implementação dos programas estaduais de controle de poluição do ar, em conformidade com o estabelecido no Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR). O PRONAR tem como objetivo básico limitar nacionalmente as emissões de poluentes, estabelecendo padrões de acordo com o tipo de fonte poluidora e de acordo com os poluentes

emitidos, usando os padrões de qualidade do ar como uma forma complementar de controle.

Em conformidade com a resolução CONAMA nº 5, os estados brasileiros têm os seus órgãos ambientais que fiscalizam as emissões, possuindo ainda total liberdade para adotar limites mais rígidos que os estabelecidos pela resolução CONAMA nº 3, se assim for necessário para determinada região. Por exemplo, em São Paulo, o órgão ambiental é a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), enquanto que no Rio de Janeiro o órgão encarregado das tarefas relacionadas ao meio ambiente é o Instituto Estadual do Ambiente (INEA). Ainda a nível de exemplificação, tem-se no estado do Paraná o Instituto Ambiental do Paraná (IAP), enquanto que no Rio Grande do Sul tem-se a Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler (FEPAM).

Capítulos 4 – Poluentes Não Legislados

4.1 – Definição

Os poluentes não legislados compreendem todos os compostos químicos emitidos na atmosfera para os quais a legislação de um determinado país não prevê monitoramento e controle dos mesmos.

Os poluentes não legislados fazem tão mal quanto os poluentes legislados. As razões para o não monitoramento e controle pode ser justificado por não haver base científica suficiente para analisar os impactos dos poluentes sobre a saúde humana, aos materiais e ao meio ambiente em geral, ou por não haver tecnologia suficiente para que analisadores automáticos sejam construídos e possibilitem o controle e monitoramento. Por fim, também existe a possibilidade do texto legislativo estar ultrapassado, necessitando ser revisto e atualizado.

Entre os principais poluentes não legislados, pode-se destacar os COVs e os metais encontrados na atmosfera sob a forma de material particulado.

4.2 – Os Compostos Orgânicos Voláteis

Adotando uma rígida definição, os COVs são todos os compostos orgânicos presentes na atmosfera sob a forma de gás, que em condições normais de temperatura e pressão seriam líquidos ou sólidos. Porém, muitos compostos orgânicos não seriam incluídos nesta

definição (Hester e Harrison,1995), que acabou sendo expandida na maior parte do mundo, para fins práticos de estudos sobre impactos ambientais, como todo composto orgânico que tenha carbono presente na atmosfera, excluindo-se o carbono elementar, o monóxido de carbono e o dióxido de carbono (Seinfeld e Pandis, 1988).

Os compostos orgânicos voláteis são poluentes importantes da atmosfera. Eles reagem na presença de luz solar para gerar ozônio e outros oxidantes fotoquímicos. Por exemplo, em ambientes urbanos, COVs como alcanos, alcenos, hidrocarbonetos aromáticos, compostos carbonilados entre outros são importantes para formação do ozônio (USEPA, 2013). Os produtos de maior peso molecular provenientes das reações dos COVs são compostos semi-voláteis, e têm a capacidade de se condensar e formar material particulado, denominado aerossol orgânico secundário (ACCENT, 2005).

Os compostos orgânicos voláteis são lançados na atmosfera tanto por ação antropogênica quanto por processos naturais. A principal fonte antropogênica provém das indústrias petroquímicas, desde o processo de extração, passando pelo transporte, refino e distribuição (ACCENT, 2005). Outras fontes antropogênicas incluem o escapamento de motores automotivos e fontes móveis em geral e a fabricação e uso de solventes e resinas (Hester e Harrison, 1995).

Já as fontes naturais têm como principais emissores as árvores, animais selvagens, queimadas e processos anaeróbios (Hester e Harrison, 1995).

Na troposfera, o principal processo químico de remoção dos COVs é a oxidação promovida pela reação com o radical hidroxila (OH) (tipicamente durante o dia) (Atkinson e Arey, 2003), conhecido como o “detergente da atmosfera”, tamanho sua importância como agente de remoção de diversos compostos presentes nela. A maioria dos produtos formados pela reação de oxidação com o radical hidroxila se tornam solúveis em água e podem ser lavados da atmosfera pela chuva ou pela neve (Riedel e Lassey, 2008).

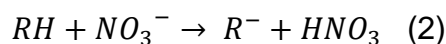
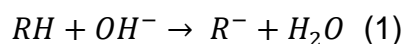
É também possível que a oxidação seja promovida pelo ozônio, pelo nitrato e por radicais halogenados (Koppmann, 2007 apud Atinkson 1994, Jenkin et al. 2003, Saunders et al. 2003). Alguns COVs, como aldeídos e cetonas, podem ainda sofrer reações de fotólise, absorvendo radiação solar e se fragmentando em pequenos outros compostos (Hester e Harrison, 1995).

Por fim, ainda existem os processos físicos de remoção de compostos orgânicos voláteis, como a deposição úmida (como chuva, neve) e processos de deposição seca (através dos movimentos das massas de ar) (Atkinson e Arey, 2003).

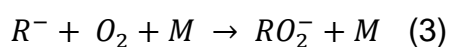
Os principais compostos orgânicos voláteis presentes na atmosfera podem ser divididos em grandes grupos. São eles os alcanos, os alcenos, os compostos aromáticos, os aldeídos, as cetonas, os álcoois, os éteres, os compostos orgânicos nitrogenados e os compostos orgânicos halogenados.

4.2.1 – Os Alcanos

Os alcanos reagem na troposfera predominantemente com os radicais hidroxila, embora reações com os radicais nitrato possam acontecer pela noite. Ainda reagem em menor escala com os átomos de cloro, e não apresentam reatividade significativa com o ozônio, além de não sofrerem reação de fotólise (Hester e Harrison, 1995). A reação do radical hidroxila (1) e do radical nitrato (2) procedem da mesma forma: a partir da abstração de um átomo de hidrogênio da ligação C – H presente no alcano, produzindo um radical alquila (Seinfeld e Pandis, 1988), com o alcano representado pelas letras RH, e o radical alquila representado por R[•].



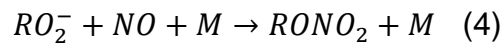
O radical alquila formado reage sob condições da troposfera com o oxigênio, formando o radical peroxila, representado por RO₂[•] (Hester e Harrison, 1995):



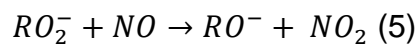
onde M é um composto que participa da reação apenas para retirar energia da mesma e estabilizá-la, sem sofrer alteração em sua estrutura.

O radical peroxila pode reagir com o NO, NO₂ e HO₂[•], dependendo da concentração desses radicais na atmosfera. As reações

do radical peroxila que tem até 3 carbonos com o NO levam a formação do nitrato de alquila:



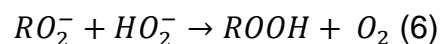
Enquanto que a reação do radical peroxila com mais de 3 carbonos com o NO leva à formação de um radical alcóxido e de NO₂:



Esta reação (5) é mais frequente em áreas continentais e na parte mais alta da troposfera, onde o NO é mais abundante (Hester e Harrison, 1995).

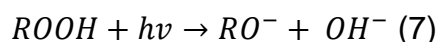
O radical peroxila pode ainda reagir com o NO₂, formando peróxinitratos de alquila. Porém, esses compostos não duram mais que 1 segundo na troposfera, se decompondo termicamente de volta a NO₂ e o radical peroxila (Hester e Harrison, 1995).

Seguindo a linha das possíveis reações do radical peroxila, ele pode reagir com o radical hidroperoxila, formando hidroperóxido e gás oxigênio:

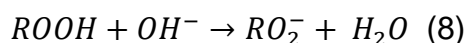


Essa reação (6) é mais frequente em áreas oceânicas da baixa troposfera, onde a concentração de NO é menor (Hester e Harrison, 1995).

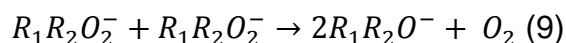
Os hidroperóxidos podem ser removidos da atmosfera por deposição úmida ou seca, ou sofrer reação de fotólise, ou ainda reagir com o radical hidroxila. Na reação de fotólise, o hidroperóxido é reconvertido a um alcóxido:



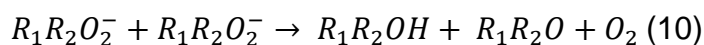
Na reação com o radical hidroxila, o hidroperóxido é reconvertido a um radical peroxila:



Por fim, ainda é possível a reação entre dois radicais peroxila, que pode seguir por dois caminhos significantes diferentes (Seinfeld e Pandis, 1988). O primeiro caminho forma um radical alcóxido e gás oxigênio:



O segundo caminho forma um composto carbonilado, um álcool, e gás oxigênio:



O caminho a ser seguido na reação de dois radicais peroxila depende das condições de reação e das condições estéricas dos radicais R_1 e R_2 (Seinfeld e Pandis, 1988).

Os alcóxidos formados durante as reações que se desenvolveram acima a partir dos alcanos podem reagir com o oxigênio atmosférico. Por exemplo, os radicais metóxido e etóxido reagem com oxigênio do ar para

formar respectivamente metanal (mais conhecido como formaldeído) e etanal (comumente conhecido como acetaldeído) (Hester e Harrison, 1995).

4.2.2 – Os Alcenos

Os alcenos são emitidos na troposfera a partir de fontes antropogênicas (majoritariamente a partir da queima incompleta de combustíveis fósseis), biocombustíveis, e de fontes biogênicas, como queima de biomassa (Koppmann, 2007). Eles se mantêm pouco tempo na atmosfera, devido a sua alta reatividade, reagindo preferencialmente com o OH^- , o O_3 e o radical nitrato (NO_3^-) (Hester e Harrison, 1995). A reatividade com um desses três radicais varia de alceno para alceno, e de acordo com a temperatura do ambiente também. Segundo Atkinson e Arey (2003), para uma altitude elevada, a temperatura é menor, e a reação com o ozônio é desfavorecida, pois a taxa de reação do ozônio diminui com a diminuição da temperatura. Já a reação com o OH^- é favorecida com baixas temperaturas, logo são observadas taxas de reação maiores em altitudes mais elevadas.

Com respeito ao mecanismo de iniciação das reações, os alcenos são atacados pelo radical NO_3 e pelo radical OH^- majoritariamente na sua ligação dupla, podendo também abstrair um hidrogênio de um carbono, o que é menos frequente. Já o O_3 ataca exclusivamente a dupla ligação, não sendo observados casos de abstração de hidrogênio com esse reagente (Seinfeld e Pandis, 1988). De uma forma geral, a reação dos alcenos com esses três radicais levam à formação de vários compostos orgânicos intermediários diferentes, abrindo um leque de

possibilidades para novas reações e formação de novos compostos, que incluem aldeídos, ácidos carboxílicos, H_2O_2 , hidroperóxidos orgânicos e radicais hidroxila (Koppmann, 2007).

4.2.3 – Os Hidrocarbonetos Aromáticos

Os hidrocarbonetos aromáticos são compostos caracterizados por apresentar apenas átomos de carbono e hidrogênio, que contenham pelo menos um anel aromático. Exemplos desses compostos são o Benzeno, o Tolueno, o Etilbenzeno, o Xileno (esses quatro primeiros compostos formam o grupo chamado BTEX), o 1,2,4 trimetilbenzeno, o 1,3,5 trimetilbenzeno e o etil tolueno. Esses compostos são de grande interesse na química da atmosfera urbana, pois estão presente em abundância em pelo menos dois combustíveis amplamente utilizados (gasolina e diesel) por veículos automotivos. Indústrias podem ainda emitir significativamente o xileno e tolueno, pois devido as suas propriedades químicas, podem ser usados como solventes (Seinfeld e Pandis, 1988). Com respeito a saúde humana, os Hidrocarbonetos Aromáticos são extremamente danosos ao homem.

4.2.3.1 – O Benzeno

O Benzeno é um solvente extremamente utilizado em indústrias químicas, siderúrgicas e laboratórios, além de ser um constituinte do petróleo, sendo portanto lançado na atmosfera por motores automotivos, postos de gasolina, indústrias e até pela fumaça do cigarro, tendo impacto maior em ambientes fechados. É pouco solúvel em água e extremamente volátil e tóxico ao ser humano. Consegue se manter na

atmosfera por alguns poucos dias antes de ser removido da mesma por alguma reação. Quando o benzeno entra em contato com o homem, mesmo em pequenas concentrações, pode causar irritação nos olhos e na pele, sonolência, tonturas, acelerar o batimento cardíaco, dores de cabeça, náuseas e inconsciência (Arcuri et al, 2012). Se a exposição humana acontecer numa região com alta concentração de benzeno, pode ser que a pessoa sofra ânsias de vômito, batimentos cardíacos irregulares, coma e morte. Pessoas que respiram benzeno por longos períodos de tempo podem ainda apresentar problemas nos tecidos formadores de células sanguíneas, em especial na medula. Problemas na medula acarretam em quadros de anemia (baixa concentração de glóbulos vermelhos no sangue), leucocitopenia (baixa concentração de glóbulos brancos no sangue) e trombocitopenia (baixa concentração de plaquetas no sangue) (Arcuri et al, 2012). Essa exposição de maneira crônica pode danificar permanentemente o sistema imunológico do homem, fazendo com que ele fique mais suscetível a infecções e a um determinado tipo de câncer conhecido como leucemia mielogênica. A forma mais significativa de contato entre o homem e o benzeno é pelo ar, não sendo tão crítica ou relevante a ingestão ou contato com água contaminada por benzeno, a não ser que esse contato se dê em grandes quantidades.

No Brasil, os casos mais significativos de intoxicações por benzeno ocorreram em empresas do polo de Camaçari, na Bahia, em 1990. Dois trabalhadores morreram em decorrência da exposição ao benzeno. Um deles era médico do trabalho, e faleceu em decorrência de

aplasia da medula, e o outro era um operador da empresa Nitrocarbono, e faleceu com leucemia mielogênica. Foram feitos exames hematológicos nos trabalhadores das empresas do pólo de Camaçari na época do ocorrido, e do total de 4579 exames, 472 trabalhadores foram diagnosticados com suspeita de intoxicação por benzeno, conforme mostrado na tabela 3:

Tabela 3 – Percentual de suspeitos de intoxicação por benzeno (Costa, 2009 apud Sindiquim,1992)

Empresa	Trabalhadores Examinados	Trabalhadores	
		suspeitos de intoxicação por Benzeno	Percentual de intoxicados
CEMAN	600	122	20,33%
CIQUINE	816	85	10,42%
COPENE	1660	133	8,01%
ESTIRENO	617	29	4,70%
NITROCARBONO	442	23	5,20%
NITROCOLOR	444	80	18,02%
TOTAL	4579	472	10,31%

O uso do Benzeno no Brasil é limitado e restrito. Por ser uma substância carcinogênica, não existe um limite de exposição mínimo, devendo ser evitado a todo custo qualquer exposição a esse composto (Costa, 2009).

4.2.3.2 – O Tolueno

O tolueno, outro hidrocarboneto aromático pertencente ao grupo BTEX, é emitido no ar através da exaustão dos motores veiculares, bem como pela evaporação em solventes, colas, resinas entre outros. O homem pode entrar em exposição com o tolueno tanto pelo ar quanto

por água, comida, cigarro, entre outros. A exposição a altos níveis desse composto em pequenos espaços de tempo pode acarretar em tonturas, sonolência, inconsciência, problemas nos rins e morte. A exposição em altos níveis durante longos períodos de tempo provoca problemas crônicos no sistema nervoso central, além de depressão, dificuldade de concentração, fraqueza muscular, perda de memória e mudanças de personalidade (CDC, 2013).

4.2.3.3 – O Etilbenzeno

O Etilbenzeno é um Hidrocarboneto Aromático frequentemente encontrado como vapor na atmosfera, sendo emitido diretamente no ar por indústrias, ou através de queima de gasolina, óleo, gás e carvão. Ele também se encontra presente em pesticidas, vernizes, colas, no tabaco, podendo entrar em contato com o ser humano tanto pelas vias respiratórias, como por absorção cutânea. A exposição a este hidrocarboneto aromático em altas concentrações causa tonturas, irritação dos olhos e da garganta, problemas no sistema nervoso central e no fígado (CDC, 2013).

4.2.3.4 – O Xileno

Terminando o grupo dos BTEX, o Xileno é um hidrocarboneto aromático que pode se apresentar sob a forma de três isômeros: o *para*-xileno, o *orto*-xileno e o *meta*-xileno. As indústrias químicas produzem xileno a partir do petróleo, pois ele pode ser usado como solvente na fabricação de tintas, borracha entre outras funcionalidades. A exposição a baixos ou altos níveis de xileno podem causar problemas ao cérebro,

dores de cabeça, falta de coordenação motora, problemas no pulmão, nos rins, no fígado, irritação dos olhos e da pele entre outros problemas (CDC, 2013).

Com relação às reações que os hidrocarbonetos aromáticos sofrem na atmosfera, o principal radical responsável pela remoção destes compostos é a hidroxila. A reação com o radical hidroxila pode ocorrer de duas maneiras. A primeira maneira acontece através da abstração de um átomo de hidrogênio da ligação C-H, seja do anel aromático, seja do radical alquila substituído no anel. Se abstração ocorreu no radical alquila, a reação prossegue reagindo com o O_2 presente no ar e com o monóxido de nitrogênio. Usando como exemplo a reação do tolueno com a hidroxila, tem-se como produto final o benzaldeído, como exemplificado na Figura 1:

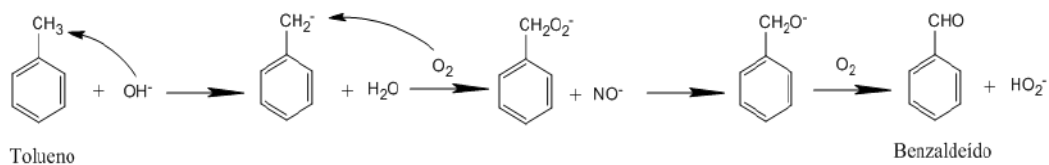


Figura 1: Exemplo de reação de abstração de Hidrogênio. Fonte: Seinfeld e Pandis, 1988.

Essa reação de abstração corresponde a cerca de 10% da totalidade das reações do radical hidroxila com os hidrocarbonetos aromáticos. A segunda forma de reação é através da adição do radical hidroxila ao anel aromático. Tendo como base o tolueno para exemplificação, a reação pode prosseguir reagindo com o oxigênio atmosférico, formando o orto-cresol, meta-cresol ou para-cresol, ou

formar um peróxido cíclico, que posteriormente tem a cadeia aberta, formando compostos epóxis e compostos dicarbonilados, como mostrado na Figura 2:

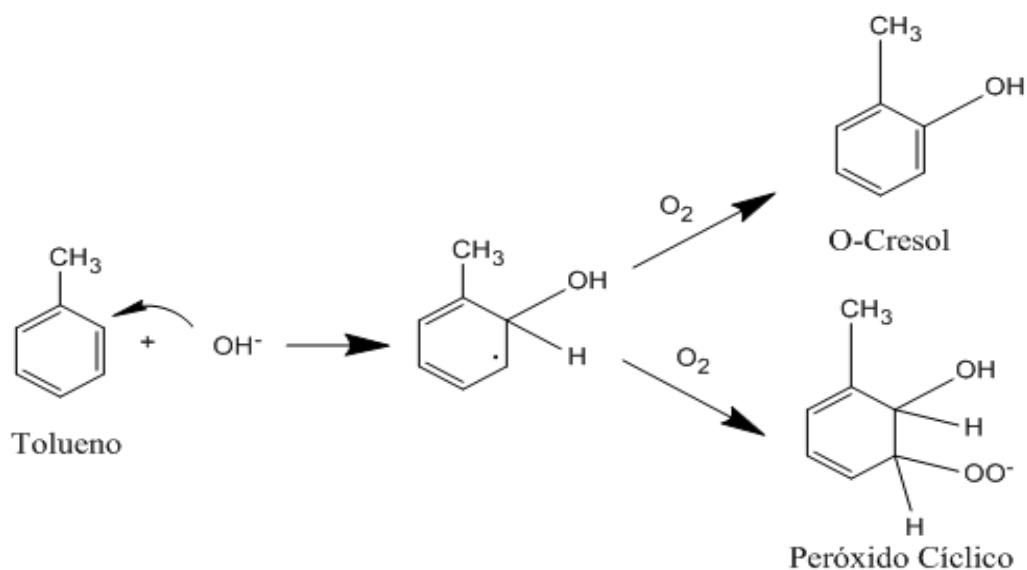


Figura 2: Exemplo de reação de adição do radical hidroxila ao anel aromático Fonte: Seinfeld e Pandis, 1988.

A reação com o oxigênio atmosférico pode também prosseguir reagindo com o dióxido de nitrogênio, formando o *meta*-nitrotolueno, como na Figura 3. Todos os compostos formados são tóxicos.

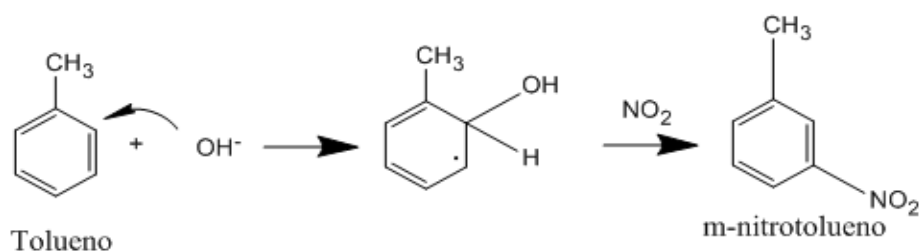


Figura 3: Exemplo de formação do m-nitrotolueno Fonte: Seinfeld e Pandis, 1988.

Os hidrocarbonetos aromáticos ainda contribuem para a formação dos aerossóis orgânicos secundários (material particulado), assim como todo composto aromático, pois a degradação desses compostos na

atmosfera leva a adição de diversos grupos polares no anel aromático, formando aldeídos, cetonas, ácidos carboxílicos e nitratos. Esses compostos oxigenados tem baixa pressão de vapor e são solúveis em água, favorecendo a formação de material particulado (Koppmann, 2007).

Os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HPAs) também constituem uma classe de compostos aromáticos importante para a atmosfera. Esses compostos, que basicamente são constituídos apenas por átomos de hidrogênio e carbono, onde dois ou mais anéis benzênicos apresentam-se fundidos em conformação linear, angular ou em blocos, são formados a partir da queima incompleta de matéria orgânica combustível, como madeira, carvão, óleo, gasolina entre outros. Foram um dos primeiros compostos atmosféricos a serem classificados como carcinogênicos, sendo potencialmente mutagênicos e teratogênicos (Seinfeld e Pandis, 1988). Mais de cem compostos HPAs são encontrados frequentemente na atmosfera, os de menor peso molecular mais comumente na fase gasosa, enquanto que os de maior peso molecular sob a forma de material particulado (Seinfeld e Pandis, 1988). Na figura 4 podemos ver exemplos de hidrocarbonetos aromáticos:

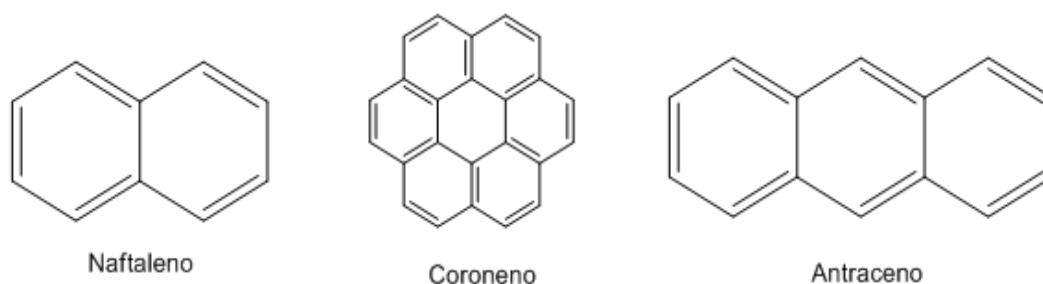


Figura 4: Exemplos de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos

4.2.4 – Os Compostos Orgânicos Voláteis Oxigenados

Os compostos orgânicos voláteis oxigenados agrupam várias funções químicas diferentes, como os aldeídos, as cetonas, os ácidos carboxílicos, os álcoois, os éteres, os ésteres, os peróxidos orgânicos e os hidroperóxidos orgânicos, que participam de diversas reações químicas na atmosfera. São emitidos na atmosfera tanto antropogenicamente como biogenicamente, sendo importantes na concentração e balanço de diversas espécies químicas na atmosfera. Podem ser removidos da atmosfera principalmente pela reação com o radical OH^\cdot , podendo também ser retirados da atmosfera através de reações de fotólise, ou via deposição, seca ou úmida (Koppmann, 2007).

4.2.4.1 – Os Aldeídos

Os aldeídos são compostos orgânicos oxigenados que se caracterizam pela presença do grupamento formila, no qual um átomo de carbono faz uma ligação dupla com o oxigênio, uma ligação simples com o átomo de hidrogênio, e uma ligação simples com um carbono alfa e formados na atmosfera através de degradação fotoquímica de outros compostos orgânicos, e emitidos diretamente na atmosfera pela queima

incompleta de combustíveis como o etanol, ou que contenham álcool em sua composição, pintura por spray, fabricação de polímeros, emissões de incineradores e fabricação de petroquímicos (Manahan, 2000). As principais vias de remoção dos aldeídos na atmosfera são as reações com o radical hidroxila e as reações de fotólise, embora reações de aldeídos com o radical nitrato também ocorram, mas em menor frequência quando comparada com as duas primeiras (Seinfeld e Pandis, 1988).

Os compostos mais conhecidos desta função química são o formaldeído e o acetaldeído. O formaldeído é produzido na atmosfera através da reação dos radicais metóxidos com o oxigênio, como mostrado na Figura 5:

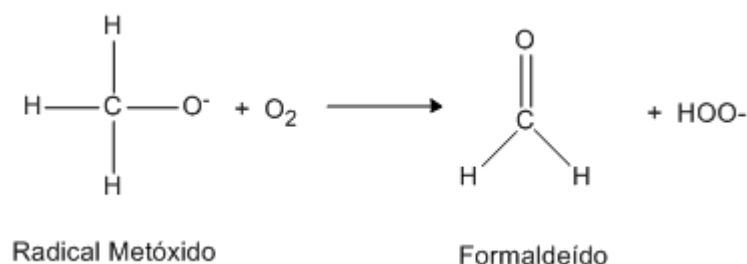


Figura 5: Formação do Formaldeído. Fonte: Seinfeld e Pandis, 1988.

Além de ser formado na atmosfera, ele também é produzido por microorganismos presentes na natureza. O formaldeído pode sofrer fotólise ou reagir com o radical hidroxila na atmosfera. Em ambas as reações, o monóxido de carbono é formado.

O acetaldeído também é emitido na atmosfera por alguns microorganismos, bem como alguns tipos de vegetação.

Antropogenicamente, além das emissões comuns à maioria dos aldeídos citadas anteriormente, o acetaldeído é emitido por empresas produtoras de ácido acético. Os aldeídos também contribuem para a formação de compostos como os nitratos de peroxiacila, quando, após a reação com a hidroxila, reagem com o oxigênio atmosférico, seguido de reação com o NO₂.

Os aldeídos são tóxicos ao ser humano, provocando irritação e hipersensibilidade das vias respiratórias e dos olhos. Em especial, o formaldeído demonstrou-se carcinogênico em experiências feitas em animais, muito pelo fato da absorção metabólica de seu produto de oxidação, o ácido fórmico (Manahan, 2000).

4.2.4.2 – As Cetonas

São compostos químicos caracterizados pela presença do grupamento carbonila ligado a dois carbonos adjacentes. Na atmosfera, a cetona mais presente e estudada é a propanona (acetona), e 50% dela é formada na atmosfera, a partir da oxidação de hidrocarbonetos. A outra metade presente na atmosfera é praticamente toda emitida a partir de fontes naturais, e apenas 3% de toda a acetona presente na atmosfera é emitida a partir de atividades humanas (Manahan, 2000).

As cetonas sofrem reação de fotólise (principalmente a acetona) e reações com o radical hidroxila, sendo essas duas reações as principais formas de remoção das cetonas da atmosfera. Por exemplo, na fotólise, a acetona se decompõe em duas moléculas menores, um radical acila e um radical alquila, como mostrado na Figura 6:

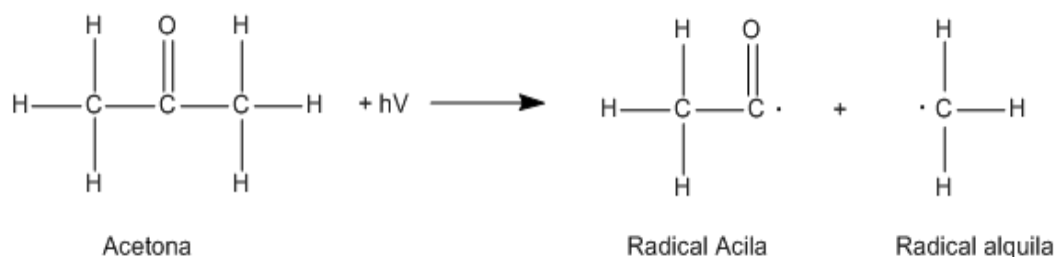


Figura 6: Exemplo de Fotólise da acetona. Fonte: Manahan, 2000

O radical acila posteriormente reage com o O₂, formando o radical peroxiacila, que reage com o dióxido de nitrogênio presente no ar, formando os nitratos de peroxiacila. Um esquema simplificado pode ser mostrado na Figura 7:

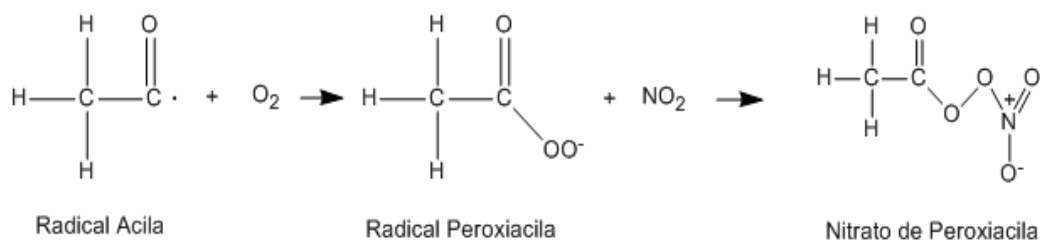


Figura 7: Esquema simplificado de formação do Nitrato de Peroxiacila. Fonte: Seinfeld e Pandis, 1988.

4.2.4.3 – Os Ácidos Carboxílicos

Os ácidos carboxílicos são compostos químicos que apresentam o grupo funcional carboxila, caracterizado por um carbono ligado por uma ligação dupla a um primeiro átomo de oxigênio, ligado por uma ligação simples a um carbono alfa e ligado a um segundo oxigênio por uma ligação simples, oxigênio esse que se liga a um átomo de hidrogênio.

Podem ser encontrados na atmosfera sob três formas distintas: gasosa, aquosa ou como material particulado. É frequente que os ácidos carboxílicos de baixo peso molecular se encontrem tanto na forma gasosa como na forma aquosa, enquanto que ácidos mais pesados se encontrem sob a forma de material particulado. Podem ser emitidos tanto diretamente na atmosfera, como podem ser formados na atmosfera através de reações. De uma forma geral, as fontes antropogênicas emitem ácidos carboxílicos através da queima de combustíveis fósseis e de matéria orgânica. Já as fontes biogênicas principais são os microorganismos presentes no solo, como bactérias e fungos, além de plantas e insetos (Souza e Carvalho, 2001). Um esquema simplificado origem das principais classes de ácidos carboxílicos presentes na atmosfera é apresentada na Figura 8:

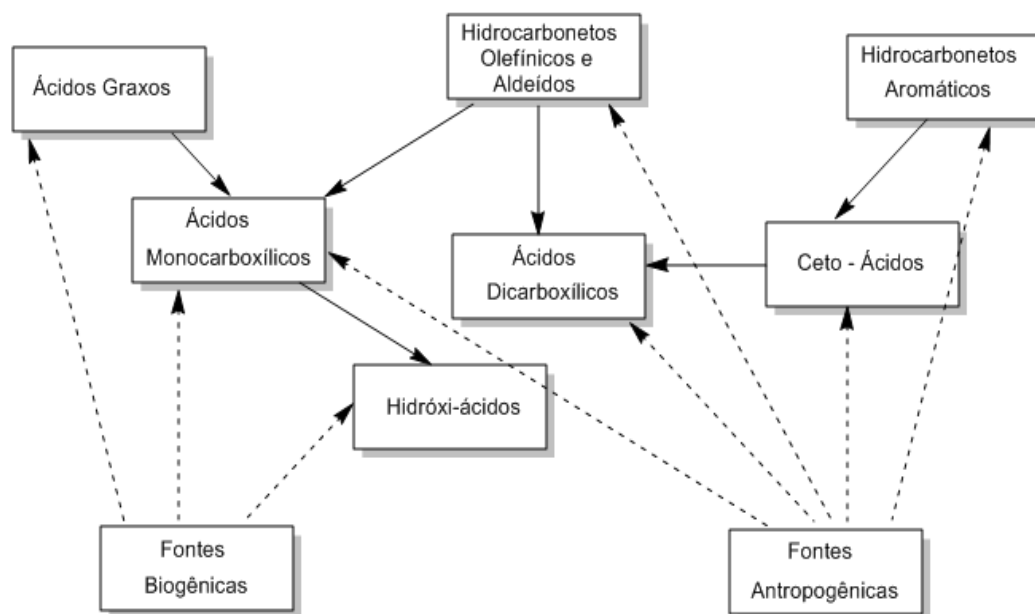


Figura 8: Esquema simplificado da origem dos Ácidos Carboxílicos. Fonte: Souza e Carvalho, 2001.

De todos os tipos de ácidos carboxílicos, os ceto-ácidos são os únicos que são retirados da atmosfera por meio de reação na fase gasosa, sofrendo fotólise e decompondo-se em poucas horas. Os outros ácidos carboxílicos podem ser removidos da atmosfera através da reação com o radical hidroxila, porém o processo é demasiadamente demorado, levando em média 50 dias. Portanto, o principal mecanismo de remoção dos ácidos carboxílicos da atmosfera é via deposição, seja úmida ou seca, diminuindo o tempo de vida médio para algumas horas ou até poucos dias (Souza e Carvalho, 2001).

Os ácidos carboxílicos participam das reações químicas do *smog* fotoquímico, além de fazerem mal ao ser humano em concentrações elevadas, podendo provocar problemas respiratórios e irritação nos olhos.

4.2.4.4 – Os Éteres

Os éteres são funções químicas que apresentam um oxigênio no meio de uma cadeia de carbonos (heteroátomo). Devido a estabilidade da ligação entre oxigênio e os carbonos adjacentes, e por não ser tão solúvel em água como outros compostos oxigenados, são pouco reativos e portanto não contribuem efetivamente para a poluição da atmosfera (Manahan, 2000). A principal forma de remoção de éteres da atmosfera é através da reação com o radical hidroxila na presença de oxigênio, que ataca a ligação entre o carbono e o hidrogênio, abstraindo um hidrogênio (Seinfeld e Pandis, 1988). A Figura 9 mostra a sequência

da reação, partindo do éter dimetílico:

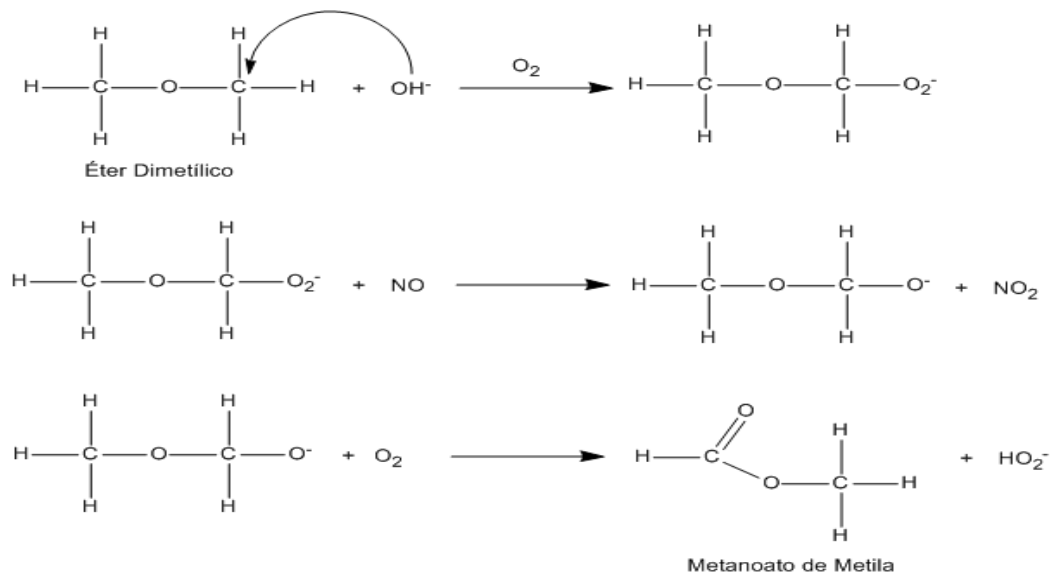


Figura 9: Exemplo de remoção dos Éteres da atmosfera. Fonte: Seinfeld e Pandis, 1988.

Apesar dos éteres não serem muito reativos na atmosfera, eles causam danos a saúde humana caso sejam emitidos em ambientes fechados. Por exemplo: o Éter Dietílico é inflamável e, apesar de apenas 20% da ingestão deste éter ser metabolizado pelo organismo humano, ele pode causar sonolência, intoxicação, e em altas doses, coma e morte (Manahan, 2000).

4.2.4.5 – Os Álcoois

É um grupo de compostos químicos que apresentam na sua estrutura uma ou mais hidroxilas ligadas a uma sequência de carbonos. Os principais álcoois presentes na atmosfera são os de menor peso molecular, devido a sua alta volatilidade, como o metanol (que é o segundo COV mais presente na atmosfera) e o etanol. Ambos são utilizados como solventes, combustíveis, na produção de ácido fórmico,

ácido acético, entre outras finalidades e podem ser emitidos tanto biogenicamente como antropogenicamente. A produção mundial da ordem de um bilhão de quilos anualmente (Manahan, 2000).

Na atmosfera, os álcoois sofrem reações fotoquímicas, como a abstração de um hidrogênio de seu carbono alfa (preferencialmente) por meio de um ataque de um radical hidroxila, formando aldeído posteriormente (Seinfeld e Pandis, 1988).

Com relação à toxicidade, o metanol pode causar problemas sérios ao ser humano, pois a sua metabolização aumenta a acidez do sangue, além de causar problemas no sistema nervoso central e problemas ao nervo óptico. Exposição aguda pode levar a morte, enquanto que exposição em baixas doses por muito tempo acarreta em problemas crônicos. O etanol pode ser absorvido pelos alvéolos pulmonares e causar também problemas no sistema nervoso central (Manahan, 2000).

4.2.5 – Os Compostos Nitrogenados

O grupo dos compostos nitrogenados abrange várias funções químicas presentes na atmosfera, como as aminas, as amidas, as nitrilas, e os nitratos orgânicos.

As aminas são compostos orgânicos onde o nitrogênio encontra-se ligado a uma ou mais cadeias de hidrocarbonetos, onde as de menor peso molecular são voláteis. Se a cadeia de carbonos que se liga ao nitrogênio apresenta pelo menos um anel aromático, essa amina é chamada de arilamina, onde a forma mais famosa e simples é a anilina.

Várias aminas são utilizadas amplamente nas indústrias como solventes, além de serem usadas na produção de tintas, amidas e remédios. A maior parte das arilaminas são conhecidas por causar câncer na uretra e na bexiga, razão pela qual as emissões devem ser controladas, já que são também amplamente utilizadas em indústrias de tintas, pesticidas, pigmentos, como agente de cura em indústrias de polímeros e até como antioxidantes (Manahan, 2000). A Figura 10 exemplifica alguns tipos de aminas e arilaminas:

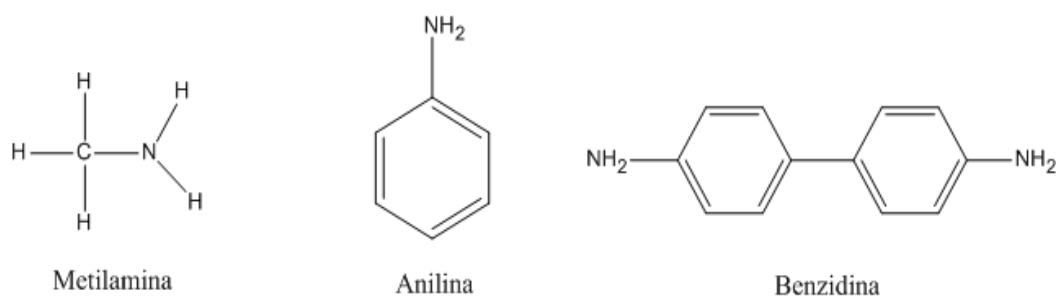


Figura 10: Exemplos de Aminas e Arilaminas. Fonte: Manahan, 2000

As aminas sofrem reações na atmosfera principalmente com o radical hidroxila (Seinfeld e Pandis, 1988).

As amidas, funções químicas que apresentam um nitrogênio ligado ao carbono de uma carbonila, não são poluentes comuns atmosféricos, visto que grande parte das amidas tem uma baixa pressão de vapor, mostrando-se pouco voláteis por esse motivo (Manahan, 2000).

As nitrilas são funções químicas caracterizadas pela presença de um grupamento CN, onde o carbono faz uma ligação tripla com o

nitrogênio. As principais nitrilas emitidas na atmosfera são a acrilonitrila e a acetoneitrila, que são mostradas na Figura 11:

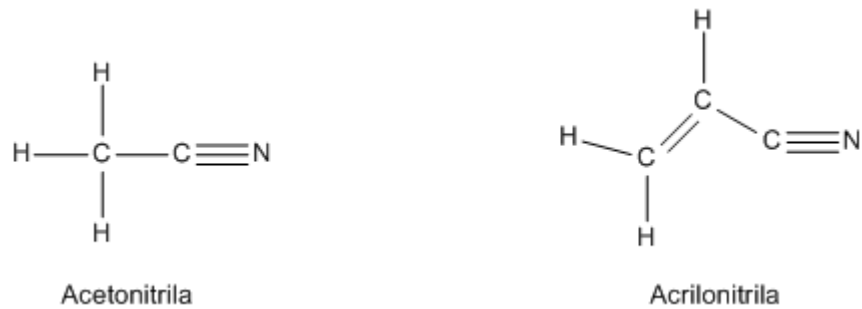


Figura 11: Acetonitrila e Acrilonitrila Fonte: Manahan, 2000

Ambas são emitidas na atmosfera principalmente por fábricas de borracha sintética. A acrilonitrila, em particular, é o único composto nitrogenado entre os 50 primeiros compostos químicos com uma produção anual que excede um bilhão de quilos, pois é utilizada como monômero para a fabricação da poliacrilonitrila. Em geral, as nitrilas encontradas na atmosfera são as de baixo peso molecular, saturadas ou insaturadas, e as nitrilas aromáticas apresentam no máximo um anel benzênico (Manahan, 2000). As nitrilas reagem na atmosfera basicamente com o radical hidroxila, através da abstração de um hidrogênio do grupamento alquila, formando um radical cianeto, mostrado na figura 12:

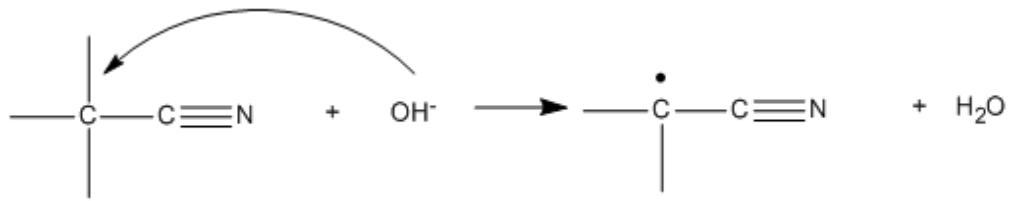


Figura 12: Formação do radical cianeto. Fonte: Manahan, 2000.

Os nitratos de peroxiacila (PANs) são compostos nitrogenados de fórmula geral $RC(O)OONO_2$, que foram descobertos nos anos 50 como componentes do *smog* fotoquímico. Os PANs são classificados como um dos mais abundantes compostos nitrogenados presentes na atmosfera (Seinfeld e Pandis, 1988) e são formados na atmosfera através de uma sequência de reações, não sendo emitidos diretamente. Inicialmente, um radical acila $R-C(O)$ deve ser formado, seja por uma reação de um aldeído com uma hidroxila, ou de uma fotólise de compostos cetônicos ou dicarbonilados. Após a formação do radical acila, ele reage com o oxigênio do ar formando os radicais peroxiacila. Esses radicais são muito reativos com o NO_2 , o NO , com o HO_2 e outros radicais peróxidos. Quando o radical peroxiacila reage com o NO_2 , ele finalmente forma o PAN. A reação do radical peroxiacila com um dos outros compostos leva a remoção irreversível do mesmo da atmosfera (Koppman, 2007). A Figura 13 exemplifica a formação do PAN na atmosfera:

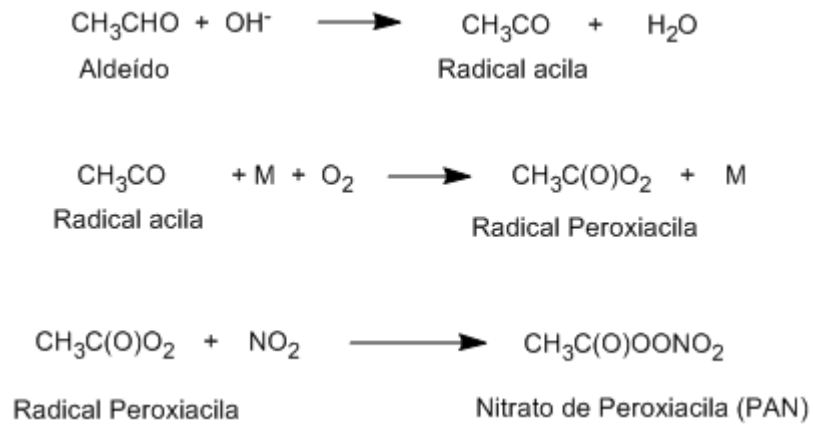


Figura 13: Exemplo de formação do PAN. Fonte: Seinfeld e Pandis, 1988.

As principais formas de remoção dos PANs da atmosfera envolvem decomposição térmica, fotólise, deposição na vegetação ou em outras superfícies, e reação com radicais como a hidroxila e o NO_3 . Entretanto, na troposfera, o processo de remoção mais importante é através da reação de decomposição térmica (Koppman, 2007).

Estão presentes em abundância no *smog* fotoquímico, e são tóxicos e irritantes aos seres humanos. Funcionam como reservatório de NO_2 , pois sua lenta decomposição na atmosfera permite que esses compostos carreguem compostos instáveis como o NO_x para lugares distantes de onde o PAN foi originalmente formado.

Capítulos 5 – Equipamentos utilizados no Controle de Poluição do Ar

5.1 – Conceito de Controle de Poluição do Ar

Como visto nos capítulos anteriores, a poluição do ar afeta não somente a saúde humana, mas também ao meio ambiente, seja indiretamente ou diretamente, causando problemas que provocam a diminuição da qualidade de vida no planeta.

Esforços devem ser feitos para que os impactos provocados por ações antropogênicas não desestabilize o equilíbrio mantido pela natureza. Nesse contexto, surge o conceito de controle de poluição do ar, onde poluentes carregados por um gás carreador são tratados ou removidos. Os equipamentos que efetuam esse controle ou tratamento são baseados em diversos mecanismos que dão origem as mais variadas tecnologias de remoção, e são projetados de acordo com a capacidade demandada, natureza do componente poluente e a eficiência de remoção necessária. É normal que se encontre equipamentos diferentes trabalhando em conjunto, sempre em prol do melhor resultado e da menor despesa possível.

5.2 – Mecanismos de Controle de Material Particulado utilizando Coletores Úmidos

Para materiais particulados, os equipamentos de controle são projetados a partir de mecanismos de impactação, interceptação, difusão, atração eletrostática, gravitação e força centrífuga. Uma breve descrição desses mecanismos será dada nas seções subsequentes.

5.2.1 - Impactação

No mecanismo de impactação, são exploradas as propriedades das partículas com diâmetro maior de $1\ \mu\text{m}$. A partícula é carregada por um gás até encontrar um alvo, que pode ser uma gota de um líquido ou obstáculos sólidos. Quanto maior a massa da partícula carregada e menor for o raio do alvo, maior a probabilidade da partícula ser coletada, visto que o centro da partícula segue uma linha de fluxo e que, na presença do alvo, essa linha de fluxo se deforma de modo a contorná-lo. O momento de inércia da partícula carregada é muito maior que o das moléculas do gás carreador, pois sua massa é muito maior, fazendo com que ela não seja capaz de acompanhar o movimento da linha de fluxo e acabe por se chocar ao alvo, sendo coletada e se o diâmetro do alvo for pequeno, a coleta torna-se ainda mais possível, pois a mudança de direção das linhas de fluxo torna-se mais brusca à medida que se aproxima do alvo (Schnelle, 2002). O mecanismo de impactação é exemplificado na Figura 14:

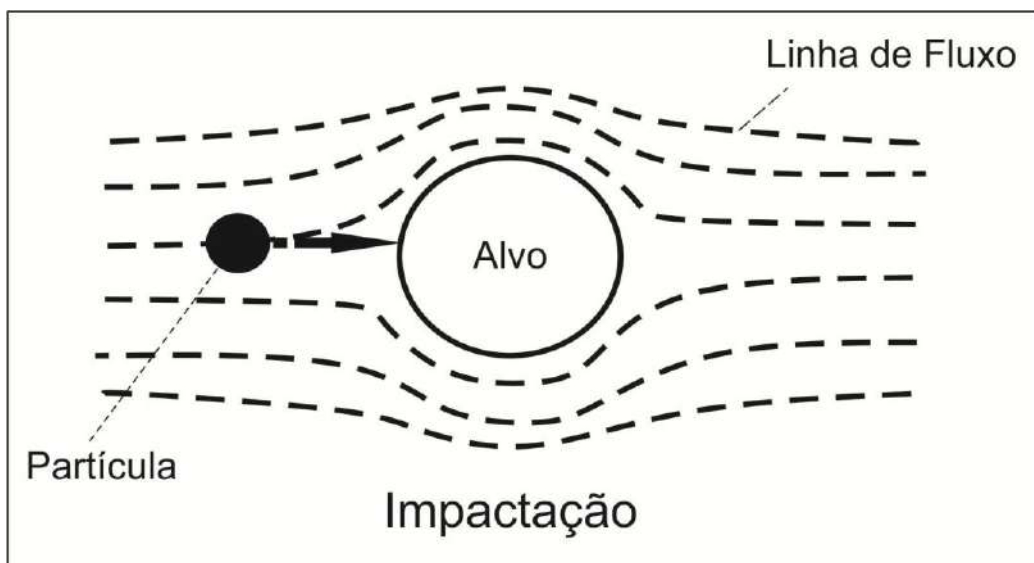


Figura 14: Mecanismo de Impactação

5.2.2 - Intercepção

No mecanismo de Intercepção, a coleta ocorre mais comumente em partículas com diâmetro na faixa de $0,1 \mu\text{m}$ a $1 \mu\text{m}$ (Schnelle, 2002), podendo ser considerado uma extensão do mecanismo de impactação (Theodore, 2008). Na intercepção, o centro da partícula consegue seguir a trajetória da linha de fluxo do gás carreador quando ela se deforma próxima ao alvo. Entretanto, se essa linha de fluxo do gás passar a uma distância do alvo menor ou igual ao raio da partícula carregada, ainda assim a partícula é coletada, pois o contato entre a partícula e o alvo acontece. Na Figura 15, podemos observar o mecanismo de intercepção:

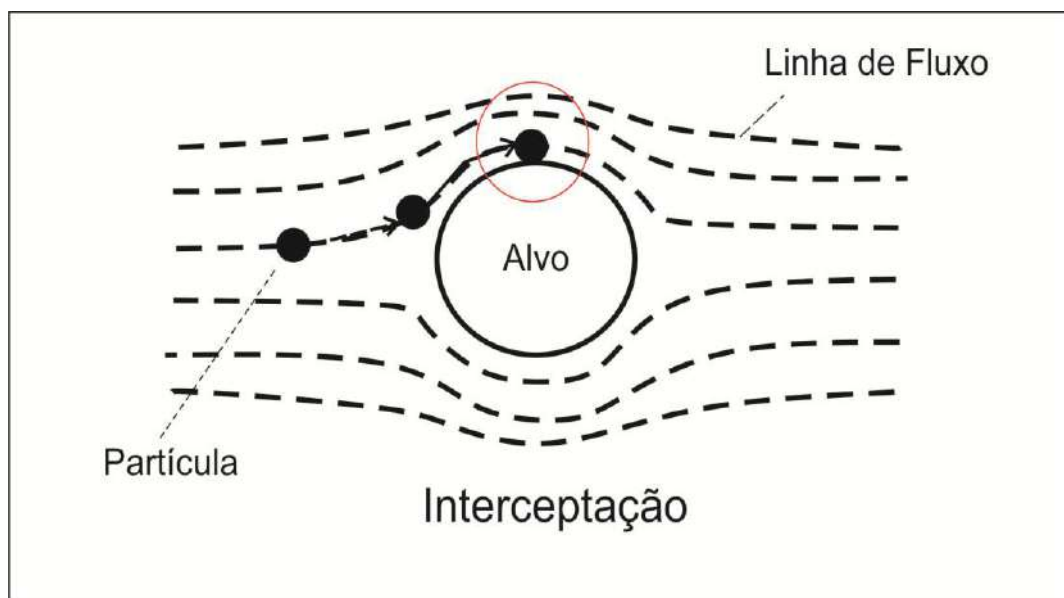


Figura 15: Mecanismo de Intercepção

5.2.3 – Difusão

Na Difusão as partículas muito pequenas, de frações de micrômetros, podem ser coletadas com ajuda do movimento Browniano (Schnelle, 2002). O movimento Browniano é decorrente dos impactos entre moléculas do gás carreador com as partículas presentes no próprio gás, fazendo com que elas se desviem ligeiramente de sua trajetória. Quanto maior a turbulência na linha de gás e quanto menor for o tamanho da partícula, maiores são as chances desse fenômeno acontecer em sucessão durante o trajeto, gerando um comportamento aleatório da partícula, acabando por aumentar as probabilidades dela se chocar com um alvo e ser coletada (Theodore, 2008). A Figura 16 ilustra o comportamento aleatório da partícula no mecanismo de difusão:

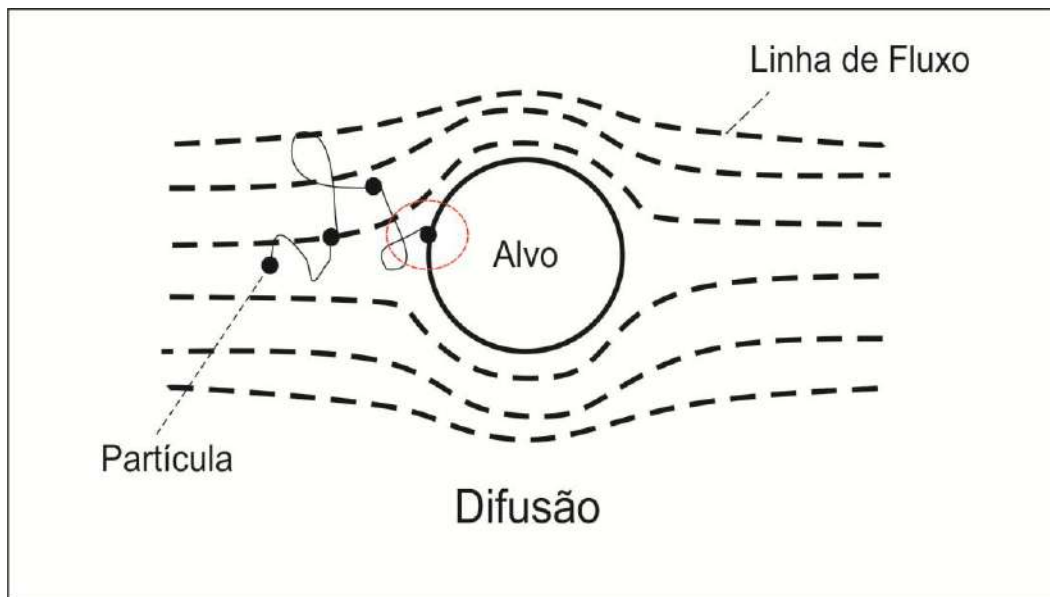


Figura 16: Mecanismo de Difusão

5.3 – Mecanismos de Controle de Material Particulado utilizando Coletores Secos

5.3.1 – Atração Eletrostática

Este mecanismo explora o fato de que pequenas partículas carregadas e submetidas a um campo elétrico podem ser movidas através das linhas de fluxo de gás até uma superfície de carga oposta, onde a partícula é coletada (Schnelle, 2002). Essas partículas podem se apresentar naturalmente carregadas ou serem carregadas submetendo-as a um forte campo elétrico (Theodore, 2008).

5.3.2 – Gravidade

O mecanismo de separação por gravidade só é relevante quando utilizado em partículas pesadas. A força da gravidade atua sobre a partícula, fazendo com que ela saia das linhas de fluxo de gás e acabe por se separar através da deposição em alguma superfície coletora (Schnelle, 2002).

5.3.3 – Força Centrífuga

A força centrífuga pode ser ilustrada da seguinte forma: um gás carreador, que tem alta velocidade e que entra tangencialmente à parede de um tubo circular adquire uma trajetória circular. As partículas sólidas presentes nesse gás tendem a permanecer na trajetória tangente a essa curva, devido a inércia, colidindo com a parede circular do tubo. O gás carreador tem velocidade suficiente para manter a partícula na parede, acabando finalmente por se desprender do gás carreador sendo coletada, enquanto que o gás carreador segue por um outro caminho.

Esse mecanismo é basicamente o princípio de funcionamento dos equipamentos chamados ciclones (Theodore, 2008).

5.4 – Equipamentos de Controle de Material Particulado

Os equipamentos de controle de material particulado podem ser separados em dois grandes grupos: os coletores secos e os coletores úmidos. Cada coletor, seja seco ou úmido, tem as suas características, vantagens e desvantagens, e um estudo deve ser feito para que a partícula poluente alvo seja removida com sucesso, levando em consideração a eficiência de remoção necessária do processo, os custos de investimento, custos operacionais e de manutenção. Nesta seção 5.4, o trabalho irá discriminar os principais equipamentos de controle de material particulado utilizados nas indústrias.

5.4.1 – Câmara de Poeira

A câmara de poeira é um dos mais simples e antigos equipamentos de controle de poluição do ar projetados pelo homem. Basicamente, são câmaras grandes e longas, com um formato parecido ao de uma caixa, onde o gás com o material particulado a ser tratado é introduzido por meio de um duto expansor com uma área transversal que vai aumentando até ficar do tamanho da área transversal da câmara de poeira. (Theodore, 2008). Isso causa uma diminuição significativa da velocidade do gás, aumentando o seu tempo de residência dentro da câmara e possibilitando a deposição das partículas pesadas no fundo da câmara por meio apenas da ação da gravidade. A figura 17 exemplifica o funcionamento de uma câmara de poeira:

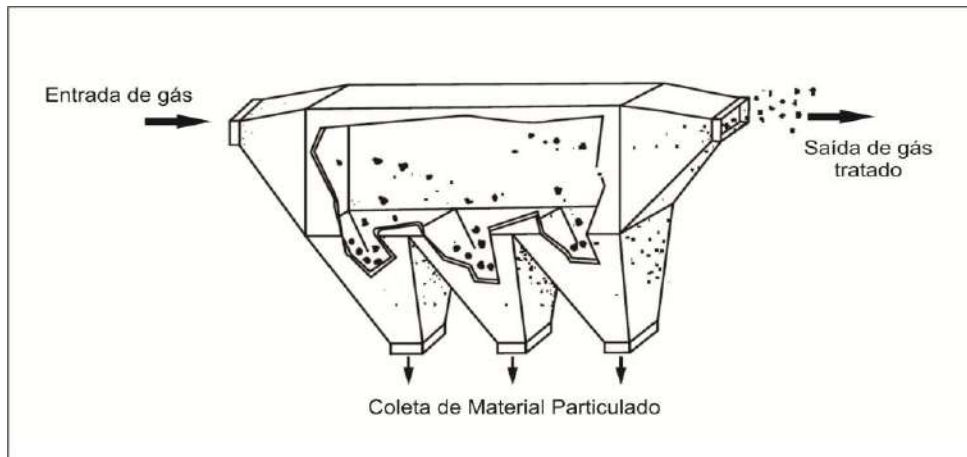


Figura 17: Câmara de Poeira. Fonte: THEODORE, 2008.

O seu projeto é baseado principalmente no tamanho e na densidade das partículas a serem coletadas, assim como na viscosidade e na velocidade do gás carreador (Schiffner, 2002). Quanto menor a partícula a ser removida, maior deverá ser a câmara, sendo um fator limitante de projeto, muito em conta pelo tamanho ocupado pelo equipamento e são pouco eficientes para partículas com diâmetro menor que $40\mu\text{m}$, sendo mais frequente sua construção apenas para remover as maiores partículas presentes no gás carreador, de modo a proteger os equipamentos subsequentes dos desgastes promovidos pelo atrito entre partículas grandes e a superfície interna dos equipamentos de linha (Theodore, 2008). Chicanas também podem ser adaptadas à câmara de poeira para otimizar a sua eficiência de coleta. Da mesma forma deve-se tomar cuidado para que o gás carreador não ressuspenda as partículas coletadas no fundo da câmara, pois isso diminuiria a eficiência de coleta.

São muitas as vantagens das câmaras de poeira, entre elas a simplicidade de construção e operação, o custo de implantação, a fácil

manutenção, resistência a altas temperaturas de entrada e a coleta a seco permite uma recuperação mais fácil do material. As desvantagens compreendem no tamanho do equipamento, que ocupa um espaço muito grande e a baixa eficiência para partículas menores que 40 μ m.

5.4.2 - Ciclones

Os ciclones são equipamentos de baixo custo que separam material particulado de uma corrente de gás específica, assim como as câmaras de poeira, porém com uma eficiência muito maior e são equipamentos menores que as câmaras de poeira, e o seu formato é constituído de uma parte cilíndrica e uma parte cônica.

Seu funcionamento é baseado principalmente na exploração da força centrífuga, a grande responsável pela separação. As partículas entram no equipamento carregadas pelo gás por meio de um duto que tangencia uma parede cilíndrica. As partículas carregadas pelo gás têm um maior momento de inércia que as moléculas do gás, não conseguindo girar, acabando por atingir a parede do ciclone, mantendo-se presa em decorrência da velocidade do gás e pela ação da força centrífuga. Eventualmente acaba por se desprender da corrente de fluxo de gás, sendo posteriormente coletada na calha presente no fundo do ciclone. Quanto maior for a quantidade de giros que a corrente de gás se submeter dentro do equipamento, maior a probabilidade das partículas do gás se chocarem com a parede do ciclone e serem coletadas (Theodore, 2008). Um problema que diz respeito a natureza da partícula que entra no ciclone é a consistência da partícula. Quanto mais quebradiça ela for, maior a possibilidade dela se dividir em pequenos

fragmentos de massas menores que o conjunto inicial, diminuindo o momento de inércia (que é diretamente proporcional a massa da partícula), tornando a partícula mais difícil de ser coletada no ciclone (Schiffner, 2002).

O ciclone pode ser dividido em quatro partes principais: A entrada do gás a ser tratado, o corpo do ciclone, a saída do gás tratado e a saída do material particulado coletado. As dimensões dessas partes, com exceção da saída de material particulado, influenciam diretamente na eficiência do ciclone para coleta de partículas de uma determinada faixa de diâmetro. A Figura 18 exemplifica um ciclone com entrada de gás tangencial com as respectivas medidas relevantes de projeto:

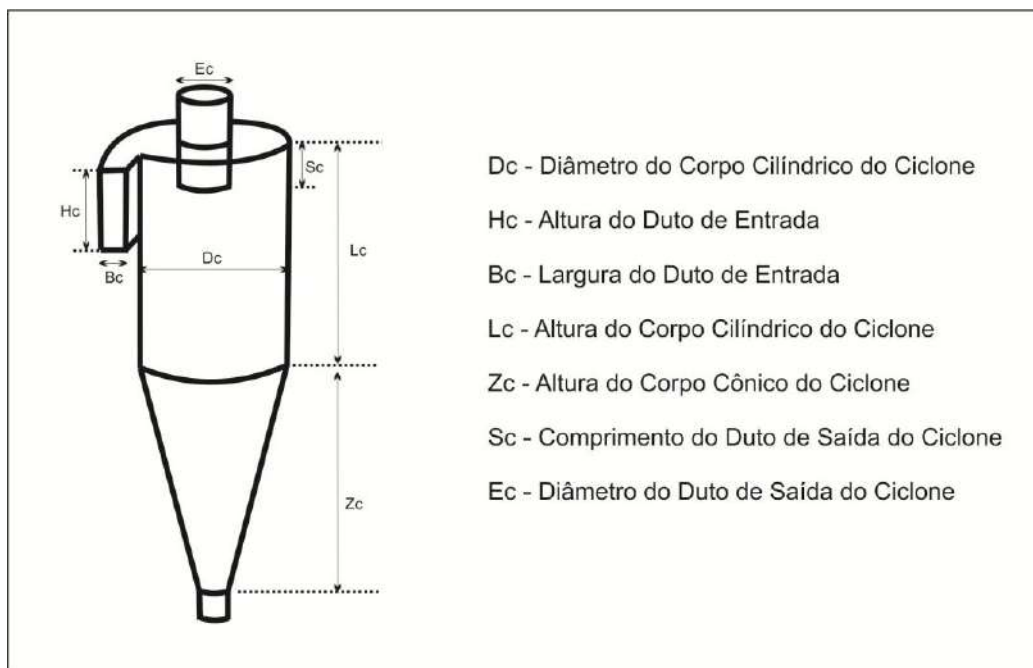


Figura 18: Ciclone de Entrada Tangencial com Medidas Relevantes. Fonte: THEODORE, 2008.

Também são relevantes no projeto de um ciclone a queda de pressão prevista no equipamento, diâmetro da partícula a ser coletada, viscosidade da partícula a ser coletada, velocidade de entrada do gás

carreador, densidade da partícula a ser coletada, densidade do gás, distribuição do tamanho das partículas, forma geométrica da partícula, temperatura do gás carreador e pressão do gás carreador (Theodore, 2008). A eficiência de um ciclone geralmente aumenta com o aumento: do diâmetro da partícula, da densidade da partícula, da velocidade de entrada do gás carreador, do comprimento do ciclone, do número de revoluções da corrente de gás dentro do ciclone, da concentração de partículas na entrada e da lisura da parede do ciclone. Em compensação, a eficiência do ciclone diminui com o aumento: da viscosidade do gás, do diâmetro D_c , do diâmetro E_c , da área do duto de entrada e da densidade do gás (USEPA, 2003d).

Os ciclones convencionais são eficientes na retirada de material particulado com diâmetro acima de $10\mu\text{m}$, porém existem ciclones de alta eficiência capazes de coletar MP_{10} e até partículas $MP_{2,5}$. Ciclones individuais de alta eficiência apresentam queda de pressão acentuada, encarecendo os custos operacionais, pois as bombas e sopradores são mais exigidos para mover o gás dentro do ciclone. Por isso, se uma alta eficiência é requerida em um ciclone, é mais frequente o uso de multiciclones, que são pequenos ciclones arranjados de maneira tal que permitem uma menor queda de pressão para eficiências iguais às alcançadas pelos ciclones individuais, barateando os custos operacionais (USEPA, 2003d). A Tabela 4 mostra as eficiências de coleta estimadas para diferentes tamanhos de interesse de material particulado, de acordo com a natureza do ciclone:

Tabela 4 – Eficiências de ciclones no controle de material particulado.
Fonte: USEPA, 2003d

Material Particulado	Ciclone de Eficiência	
	Convencional	Ciclone de alta eficiência
MP > 10μm	70% a 90%	80% a 99%
MP₁₀	30% a 90%	60% a 95%
MP_{2,5}	0% a 40%	20% a 70%

Multiciclones ainda apresentam eficiência de 80 a 95% para partículas menores que 5 μ m.

De uma maneira geral, o ciclone é usado como um coletor inicial de partículas grandes e médias (assim como a câmara de poeira), com a vantagem de serem compactos, baratos com relação a construção e manutenção, perda de carga não tão grande, e resistentes a altas temperaturas e pressão, desde que estas não excedam a resistência mecânica e térmica do material com que o ciclone foi construído. As desvantagens envolvem as baixas eficiências na coleta de material particulado em unidades convencionais e a incapacidade de tratar partículas pegajosas ou adesivas. A construção de ciclones de alta eficiência obrigatoriamente aumenta os custos operacionais (USEPA, 2003d).

5.4.3 – Precipitador Eletrostático

O precipitador eletrostático é um equipamento para controle de material particulado cujo princípio de funcionamento envolve basicamente a exploração da força elétrica. O equipamento primeiro carrega eletricamente as partículas a serem separadas do gás carreador. Em seguida, é aplicado um campo elétrico que desvia as

partículas da trajetória do gás carreador, sendo por fim coletadas (Schnelle, 2002).

Existem dois eletrodos básicos em um precipitador: o eletrodo de descarga e eletrodo de coleta. A fonte de alimentação do equipamento converte a corrente alternada com potencial elétrico de 220 volts e 480 volts a uma corrente contínua e pulsátil com um potencial elétrico que varia de 20 mil volts a 100 mil volts, de acordo com a necessidade e o projeto do precipitador, sendo descarregada no eletrodo de descarga, caracterizando uma descarga de corona, pois o fluido ao redor do eletrodo acaba sendo ionizado devido à alta tensão. Os íons gerados perto do eletrodo de descarga migram para o eletrodo de coleta, que tem menor potencial elétrico. No meio do caminho, os íons se chocam com as partículas presentes no gás nas quais se acabam aglomerando, carregando-as e arrastando-as para o eletrodo de coleta (Theodore, 2008), onde sofrem um ação mecânica, fazendo com que elas se soltem das placas e sejam coletadas em compartimentos específicos embaixo da unidade (USEPA, 2003d).

Um precipitador eletrostático pode ser de placas ou de tubos. No precipitador de placas, as placas lisas fazem o papel de eletrodo de coleta, enquanto que longos arames postados ao longo do equipamento e intercalados com as placas fazem o papel de eletrodos de descarga. No precipitador de tubos, muitos tubos longos são arranjados em paralelo, fazendo o papel de eletrodos de coleta, e concentricamente a cada um desses tubos estão alocados longos arames, que fazem o papel de eletrodos de descarga (Schnelle, 2002).

Dois fatores são de extrema importância e refletem diretamente na eficiência do precipitador: a uniformidade do fluxo de gás e a resistividade da partícula a ser removida. A uniformidade do fluxo de gás é importante porque o aumento da velocidade do gás diminui a eficiência de coleta do equipamento, enquanto que a diminuição da velocidade do gás aumenta a eficiência (Theodore, 2008).

Já a resistividade afeta a eficiência de maneiras distintas: se a partícula tem baixa resistividade (10^4 a $10^7 \Omega.cm$), ela adquire carga e perde carga muito facilmente. Logo, o caminho dela em direção ao eletrodo de coleta não é certo, ela pode perder a carga e voltar a ser carregada pela corrente de gás (Theodore, 2008).

Partículas de resistividades consideradas normais (10^7 a $10^{10} \Omega.cm$) são as mais facilmente coletadas pelo precipitador, pois elas adquirem carga durante a descarga de corona e só a perdem quando estão em contato com eletrodo de coleta, onde se aglomeram por forças intermoleculares adesivas e coesivas, formando uma camada de poeira que posteriormente é removida do eletrodo (Theodore, 2008).

As partículas de alta resistividade adquirem com muita dificuldade as cargas durante o trajeto pelo precipitador. Porém, uma vez que as adquirem, não as libertam facilmente, formando uma camada altamente carregada na superfície do eletrodo de coleta. Essa camada carregada eventualmente começa a ionizar o gás perto dela, fazendo o mesmo papel que o eletrodo de descarga, constituindo o fenômeno chamado de “Back Corona”, formando partículas carregadas eletricamente que

repelem as que inicialmente se dirigiam ao eletrodo de coleta, diminuindo a eficiência do equipamento substancialmente. Sabe-se que tanto o aumento drástico da temperatura quanto a diminuição drástica da temperatura diminui a resistividade da partícula, assim como o aumento da umidade diminui a resistividade. Partículas de alta resistividade também podem ser tratadas previamente com agentes condicionantes, como vapor d'água, amônia, ácido sulfúrico ou ácido sulfâmico, sulfato de amônio e trietilamina (Schnelle, 2002). O comprimento do precipitador também influencia na eficiência, pois quanto maior for o tempo de residência da partícula dentro do equipamento, maior a possibilidade dela ser coletada.

De uma maneira geral, os precipitadores eletrostáticos apresentam uma eficiência de coleta de 99% para partículas menores que 10 μm , sendo um coletor eficiente de partículas finas (MP_{10} e $\text{MP}_{2,5}$).

As vantagens de seu uso são extensas, entre elas a possibilidade de coletar partículas de até 0,01 μm , a baixa perda de carga durante a passagem do gás pelo equipamento, a vida útil longa, o baixo custo operacional, opera sob altas pressões ou à vácuo, opera sob altas temperaturas. As desvantagens são o alto custo inicial de compra do equipamento, o espaço necessário para sua alocação é grande, é extremamente sensível a mudanças no fluxo do gás, partículas de baixa ou alta resistividade são difíceis de serem coletadas, apresenta risco de explosão se o gás ou a partícula a serem tratados forem combustíveis, as altas voltagens constituem um perigo de vida aos operadores do

equipamento e ozônio é produzido durante a ionização do gás (Theodore, 2008).

5.4.4 – Filtros de Tecido

Os filtros de tecido são um dos mais antigos e simples equipamentos para controle de material particulado. Surpreendentemente, são um dos equipamentos mais efetivos nesse quesito, sendo capazes de coletar com sucesso partículas de 0,1 μm e remover substancialmente partículas de 0,01 μm (Theodore, 2008).

Basicamente, o seu funcionamento consiste na passagem do gás poluído pelos poros do tecido, que funciona como filtro. Todos os principais mecanismos para coleta de material particulado podem ser observados nos filtros de tecido, entre eles a impactação, a interceptação e a difusão. Os poros de um tecido novo e limpo são da ordem de 50 μm a 75 μm , e ainda assim eles se mostram eficientes na remoção de impurezas do ar, pois conforme a filtração ocorre, uma camada de partículas vai se formando no tecido, que diminui ainda mais o espaço entre os poros do elemento filtrante, aumentando a eficiência de coleta e proporcionando a capacidade de coletar partículas ainda menores, desde que a perda de carga ainda esteja numa faixa de valores aceitáveis que tornem possível a continuação da operação. Se a perda de carga for muito grande, se faz necessário uma limpeza do tecido. Torna-se interessante constatar que tecidos novos vão se tornando mais eficientes a medida que são colocados em operação, pois a camada que se forma na sua superfície é de extrema importância na eficiência da operação (Schnelle, 2002).

Os principais parâmetros que devem ser levados em conta no projeto de um filtro de tecido são: o tamanho e a capacidade do equipamento, a queda de pressão limite de operação, o tipo de tecido do filtro, o mecanismo de limpeza do filtro e o tempo de vida útil do tecido (Schnelle, 2002).

O modo de operação do equipamento pode ser de três tipos: alimentação de gás pelo topo, alimentação de gás pelo fundo, ou por filtração exterior, conforme demonstrado pela Figura 19:

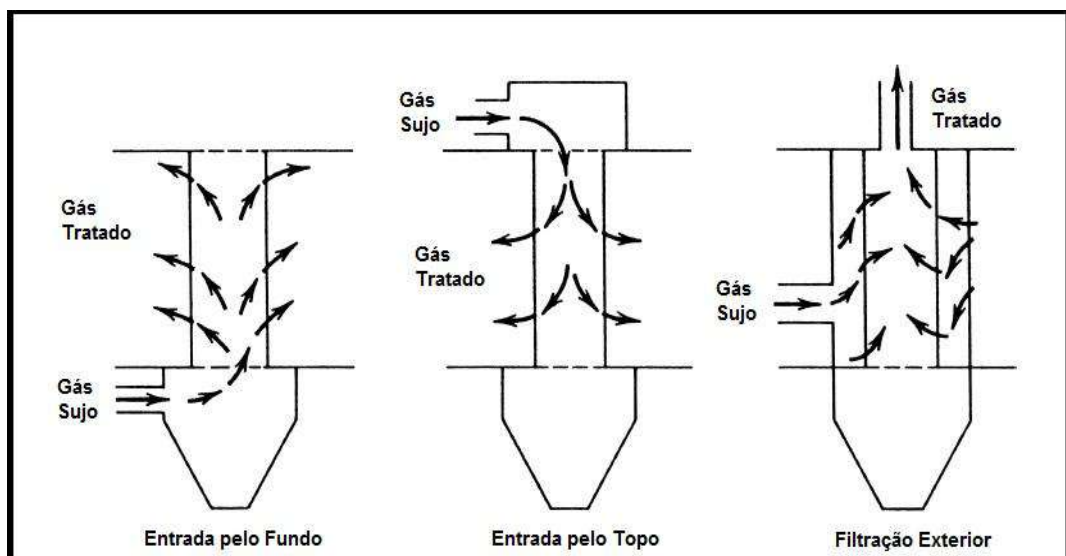


Figura 19: Modos de Operação de Filtros de Tecido. Fonte: THEODORE, 2008.

Os métodos são equivalentes em termos de eficiência, porém o método de filtração exterior demanda que o tecido esteja preso e suportado a um anteparo, evitando que se dobre e colapse com a velocidade de entrada do gás. Nos métodos de entrada pelo fundo e pelo topo, os tecidos se auto suportam, pois devido a diferença de pressão, o gás migra de dentro para fora, mantendo o filtro completamente esticado (Schnelle, 2002).

Os modos de limpeza dos filtros podem ser efetuados por métodos mecânicos, como chacoalhar ou oscilar os filtros, por emissão de ondas sônicas, que fazem com que as partículas vibrem e se soltem dos poros ou da torta de impurezas, ou por injeção de ar de alta pressão, que carrega as impurezas presas no filtro em direção ao depósito final de partículas do equipamento (Schenelle, 2002). A Figura 20 ilustra os métodos de limpeza:

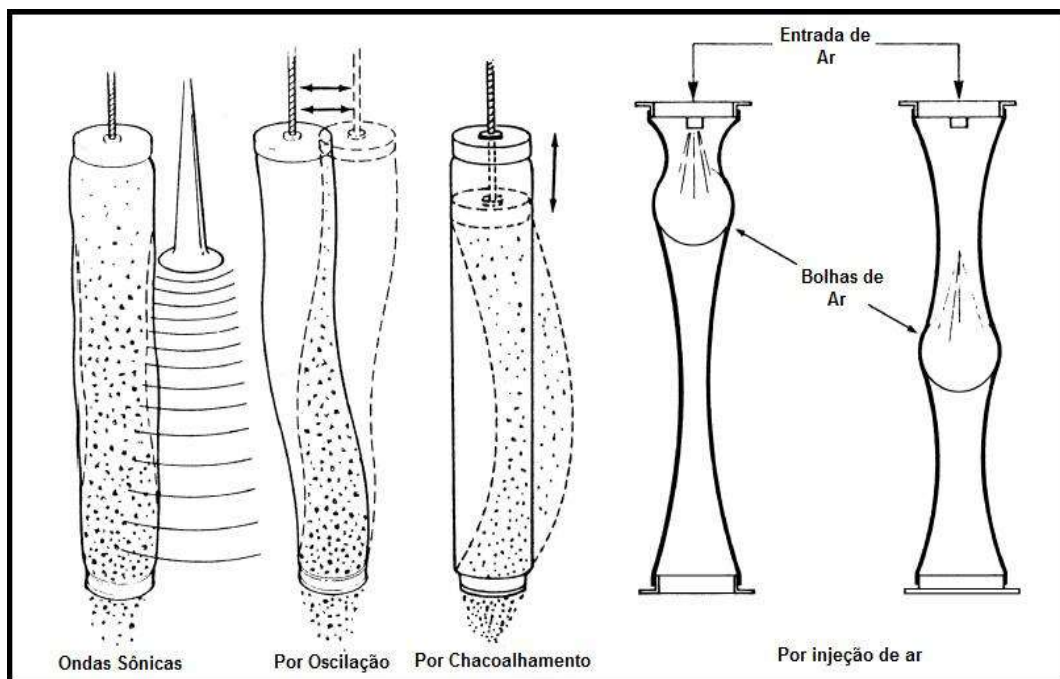


Figura 20: Métodos de Limpeza de Filtros de Tecido. Fonte: THEODORE, 2008.

Os tecidos filtrantes podem ser fabricados de diversos materiais diferentes, cada um com suas vantagens e desvantagens. A escolha do material do filtro deve se adequar principalmente à temperatura do gás a ser tratado e da composição química do gás (Schnelle, 2002). A Tabela 5 lista os principais materiais dos filtros de tecidos e suas respectivas resistências químicas e abrasivas, bem como uma estimativa do custo:

Tabela 5 – Propriedades e custos de elementos filtrantes para filtros de tecido. Fonte: SCHNELLE, 2002.

Material	Temperatura de Operação	Resistência ácida	Resistência Básica	Resistência à abrasão	Custo^a
Algodão	82°C	Fraca	Boa	Boa	\$8
Lã	93°C	Boa	Fraca	Média	-
Nylon	93°C	Fraca	Boa	Excelente	-
Polipropileno	93°C	Excelente	Excelente	Excelente	\$8
Poliéster	135°C	Boa	Média	Excelente	\$9
Acrílico	127°C	Boa	Média	Boa	\$13
Nomex®	191°C	Média	Boa	Excelente	\$22
Material	Temperatura de Operação	Resistência Ácida	Resistência Básica	Resistência à abrasão	Custo
Ryton®	191°C	Excelente	Excelente	Excelente	-
Teflon®	232°C	Excelente	Excelente	Média	\$26
Fibra de Vidro	260°C	Boa	Boa	Média	\$24
Sílica de alta pureza revestida	482°C	Boa	Boa	Média	\$150
Velas de cerâmica	900°C	-	-	-	\$1000 ^b

a – Custo por saco de 2,44 metros

b – 1,5 metros de comprimento, 0,060 metros de diâmetro

Apesar de ser um equipamento que alcance alta eficiência de coleta, as indústrias pecam pela falta de manutenção nos filtros de tecido, perdendo milhões de dólares por ano e diminuindo drasticamente a qualidade do controle da poluição do ar (Theodore, 2008). A manutenção desses equipamentos deve ser feita de maneira contínua, visando mantê-los operando eficientemente o maior tempo possível.

São problemas que surgem nos filtros de tecido e que tornam possível identificar que algum parâmetro está desajustado ou que algo não está funcionando plenamente: alta queda de pressão através do equipamento, emissão visível de poeira na saída do gás limpo, diminuição na quantidade de poeira que normalmente é coletada,

barulhos altos provenientes do equipamento ou barulhos não usuais e corrosão severa do material.

Normalmente, são os elementos filtrantes os responsáveis pelo bom ou mau funcionamento do filtro de tecido. A deterioração dos elementos filtrantes pode acontecer em decorrência da alta abrasão provocada pelo aumento do volume de gás passado por área de tecido, abrasão em decorrência do choque de metais com o tecido, reações químicas, abrasão através do contato dos tecidos de bolsas funcionando em arranjos paralelos, abrasão em decorrência da velocidade de entrada do gás no equipamento, acidentes, aumento de variáveis de processo (como temperatura), filamento da trança do tecido defeituoso e má instalação do equipamento (Theodore, 2008).

Por fim, cabe salientar que ações têm sido tomadas para otimizar a filtração por tecidos, sendo possível citar: maior comprimento das bolsas de tecido, maior quantidade de sacos de tecido por área nos arranjos em paralelo, maior número de unidades sendo projetadas com limpeza por injeção de ar e novas membranas sendo desenvolvidas e empregadas (Theodore, 2008).

5.5 – Mecanismos de Controle de Poluentes Gasosos

A remoção de poluentes gasosos das correntes de processo pode ocorrer baseada em seis mecanismos distintos, cada um com suas vantagens, desvantagens e peculiaridades. São eles os mecanismos de

absorção, adsorção, condensação, e processos de combustão, como a oxidação catalítica, a incineração e os flares. (Schnelle, 2002).

É possível que equipamentos industriais baseados em um desses mecanismos sejam também capazes de remover material particulado das correntes gasosas, embora muita das vezes esse não seja o principal o objetivo do equipamento.

5.5.1 – Absorção

A absorção pode ser definida como uma operação de transferência de massa de caráter difusional, que no contexto de poluição do ar, é responsável pela remoção de um poluente gasoso solúvel de uma corrente de gás por dissolução em um solvente líquido, podendo ser um solvente aquoso ou não. Se a pressão parcial do gás poluente presente na corrente de gás for maior que a pressão de vapor do gás poluente em contato com o solvente líquido, haverá absorção. Os poluentes podem ser separados do solvente líquido e recuperados posteriormente em alguns casos, por meio de destilação ou processos de dessorção (o oposto da absorção), assim como o solvente líquido (Schnelle, 2002).

5.5.2 – Adsorção

A adsorção é um processo onde sólidos têm a capacidade de reter (adsorver) componentes gasosos ou líquidos que entram em

contato com sua área superficial. A adsorção ocorre de forma seletiva, pois os íons presentes nas superfícies dos sólidos precisam ter uma alta afinidade para com o poluente que se pretende remover da corrente a ser tratada. Quanto mais porosa for a superfície do sólido, maior a sua capacidade de reter os poluentes antes de sua saturação, pois a sua área superficial é maior.

O mecanismo de adsorção é a base de diversos equipamentos e processos que precisam tratar grandes volumes de ar com baixas concentrações de poluentes, sendo largamente aplicado no tratamento e recuperação de COVs (Schnelle, 2002).

5.5.3 – Processos de Combustão

São processos que consistem na queima de gases, principalmente os COVs, levando-os a dióxido de carbono e água, ou a dióxido de enxofre e ácido clorídrico, se os gases tiverem traços de enxofre ou de cloro. Existem três tipos de processos de combustão no tratamento de gases, os flares, a incineração e a oxidação catalítica.

Nos flares, os gases a serem tratados são liberados próximos da saída de uma chaminé em lugares afastados, e são queimados na saída da chaminé por uma chama de temperatura regulável, através da adição ou não de gás natural e outros gases combustíveis. A chama também é autossustentável pelos próprios COVs emitidos, com exceção de correntes gasosas com baixa concentração de COVs, quando se faz necessário a injeção de gás natural. O tempo de resposta dos flares são bastante rápidos, tornando possível um controle fino de acordo com as

flutuações das concentrações e composições dos gases na saída da chaminé.

Na incineração, o processo de combustão dos gases ocorre em uma câmara fechada construída de material refratário. Podem ser alcançadas altas temperaturas no interior da câmara incineradora, e gás natural pode ser injetado para elevá-la se necessário for. Uma temperatura de 1040°C garante a destruição de 99% dos COVs presentes na corrente de gás a ser tratada.

A eficiência de uma câmara incineradora aumenta com o tempo de residência, a temperatura de combustão dos gases e com a turbulência do gás no interior do equipamento. O calor gerado na câmara pode ser aproveitado para aquecer outras correntes de gases do processo, para geração do vapor e para pré-aquecer a própria corrente de gás a ser tratada no interior do incinerador, diminuindo a quantidade de combustível necessário para conduzir a combustão (Schnelle, 2002).

Por fim, a oxidação catalítica também é um processo de combustão de gases, porém é realizado a temperaturas menores graças a presença de um catalisador que promove a oxidação, reduzindo assim os custos de energia térmica e combustível.

São mais efetivos no tratamento de poluentes com concentração menor que 1% por volume, pois concentrações maiores que essa geralmente desativam os catalisadores por sobreaquecimento. Para oxidação de COVs, podem ser usados metais nobres como o paládio e platina, bem como óxidos de cobalto, óxidos de cobre, alumina, óxido de

manganês, entre outros. A temperatura ótima de operação varia para cada tipo de catalisador.

A desvantagem do uso de catalisadores diz respeito as suas sensibilidades à envenenamento por outros metais, como chumbo, mercúrio, bismuto e outros, bem como são sensíveis a inibição na presença de halogenados, enxofre e dióxido de nitrogênio. Materiais particulados também podem se depositar na superfície do catalisador, diminuindo a área efetiva de funcionamento do mesmo. De uma maneira geral, a vida útil de um catalisador compreende entre dois a cinco anos, se as condições de operação forem rigidamente controladas, supervisionadas e mantidas sob manutenção, garantindo uma alta eficiência na destruição dos poluentes (Schnelle, 2002).

5.5.4 – Condensação

A condensação pode ser usada para separar poluentes gasosos de uma corrente, onde os componentes mais voláteis das misturas gasosas são separados dos demais por saturação e posteriormente por mudança de fase. Essa mudança de fase pode ser alcançada pelo aumento da pressão a uma determinada temperatura ou pela diminuição da temperatura a uma dada pressão.

Os dois equipamentos baseados no mecanismo de condensação mais comumente utilizados para remoção de COVs são os condensadores de superfície e os condensadores de contato. Os condensadores de superfície são basicamente equipamentos onde o gás a ser tratado troca calor com um líquido refrigerante através de uma

parede fina de alta condutividade térmica. Os vapores condensados formam um filme sobre a superfície da parede que posteriormente é drenado de dentro do equipamento. Já os condensadores de contato resfriam a corrente gasosa a ser tratada através da aspersão de líquido refrigerante diretamente no gás, condensando os gases poluentes, porém gerando um resíduo líquido composto pelo poluente mais o líquido refrigerante que deve seguir para tratamento, aumentando os custos de recuperação seja dos poluentes, seja do líquido refrigerante (Schnelle, 2002).

5.6 – Equipamentos de Controle de Poluentes Gasosos

Os principais equipamentos de controle de poluentes gasosos serão citados nessa seção, com ênfase maior nas torres de spray e nos lavadores venturi, pois serão a base da proposta de construção de um sistema de bancada para lavagem de SO₂, que será desenvolvido no próximo capítulo.

5.6.1 – As Torres de Spray

As torres de spray são equipamentos úmidos indicados para controle tanto de material particulado como para alguns gases altamente solúveis no reagente pulverizado. Na coleta de material particulado, bicos pulverizadores atomizam o líquido do alto da torre, formando pequenas gotas que servem como coletoras das partículas presentes no gás carreador, através principalmente do mecanismo de impactação, já citado neste trabalho. Quanto maior for o espalhamento das gotas, maior

a possibilidade dela se chocar com a partícula, logo uma pulverização eficiente é vital para uma coleta bem sucedida.

As torres de spray designadas para coleta de material particulado só são justificáveis se as partículas presentes no gás carreador forem inflamáveis ou se o gás carreador for inflamável, pois por ser um aparelho úmido, consegue operar bem com esses tipos de condições. São ineficientes para coleta de material particulado menores que 10 μm , e acaba-se formando um lodo no fundo da torre que precisa ser tratado, em decorrência da mistura do líquido pulverizado e as partículas sólidas presentes no gás, configurando mais um problema e custo para o processo (USEPA, 2003a).

Por outro lado, as torres de spray são utilizadas constantemente em plantas de dessulfurização, com o objetivo de capturar SO_2 por meio do mecanismo de absorção. Das torres absorvedoras, as torres de spray são as que têm o funcionamento mais simples, mais barato e mais fácil de operar, quando comparada com as torres de prato ou as torres de recheio.

5.6.1.1 – Dimensionamento de uma torre de spray

Basicamente, as torres de spray usuais funcionam num mecanismo de contra-corrente: o gás a ser tratado entra na torre na sua parte de baixo, enquanto que o líquido é pulverizado próximo ao topo, promovendo um contato gás-líquido por toda a extensão da torre, até que o gás saia pela parte de cima da torre de spray. A Figura 21

apresenta uma torre de spray com vários bicos pulverizadores ao longo da mesma:

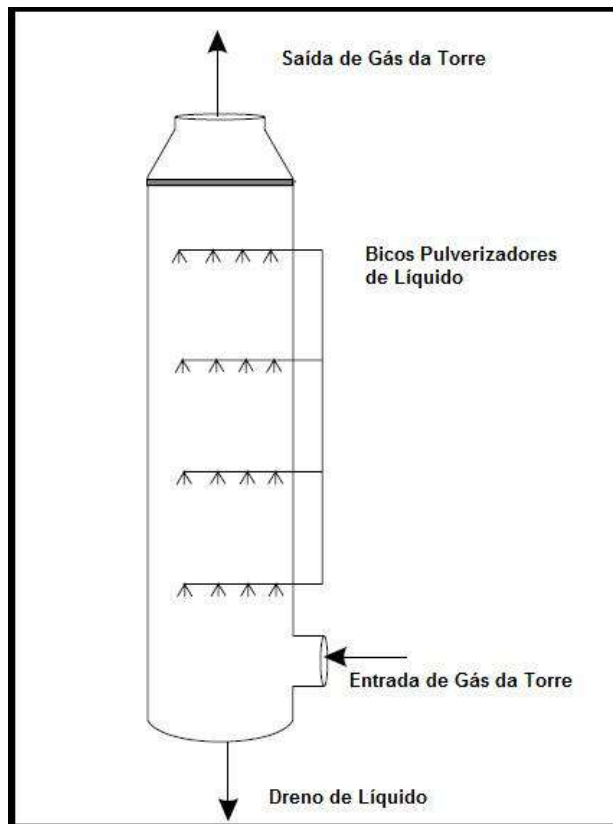


Figura 21:Exemplo de Torre de Spray

Apesar de serem simples no quesito funcionamento, não há muitos dados disponíveis na literatura que detalham as dimensões físicas de uma torre de spray para o alcance de uma específica eficiência. Sabe-se porém que, quanto maior for a altura da torre, maior o tempo necessário para o gás percorrer toda sua extensão, aumentando o tempo de contato gás/líquido, melhorando a eficiência de absorção.

Thakore e Bhatt (2008) propuseram um modelo para dimensionamento de colunas de spray, partindo de alguns dados de entrada. Para uma coluna de spray vertical, ele define que, para que não haja uma diminuição na eficiência do processo em contra-corrente, a

velocidade do gás carreador pela torre não pode ser maior que 2,3 m/s, e apenas 66% desse valor é usado para cálculo de projeto da torre. Esse valor leva em consideração que há apenas pulverizadores no topo da coluna.

O fluxo de gás é uma variável de entrada, pois pode ser regulado na entrada da torre. A equação 5.1 mostra a proposta de Thakore e Bhatt (2008) para o cálculo do diâmetro interno necessário da torre:

$$Di = \sqrt{\frac{q_v * 4}{u_g * \pi}} \quad (5.1)$$

Onde q_v é o fluxo gasoso na entrada da coluna, em m/s, e u_g é a velocidade do gás através da coluna. De posse do diâmetro interno da coluna, é possível calcular o número de unidades de transferência de massa do gás (NG) necessária para realizar a absorção, como mostrado na equação 5.2:

$$NG = \frac{y_1 - y_2}{y_2} \quad (5.2)$$

Onde y_1 é a concentração do poluente no gás carreador de entrada e o y_2 é a concentração desejada na saída da torre de spray, ambas na unidade kmol/kmol de gás carreador.

De posse do NG, pode-se calcular o volume útil da torre de pulverização, através da equação 5.3:

$$V = \frac{NG * G_m}{K_{ga}} \quad (5.3)$$

Onde G_m é a vazão molar de gás em kmol/s e K_{ga} é o coeficiente de transferência de massa volumétrico da fase gás, que tem unidade kmol/m³s. O K_{ga} pode ser obtido experimentalmente, a partir de uma torre já em operação com o determinado reagente e corrente que se deve tratar, inserindo os dados de volume, N_G e G_m , obtendo o K_{ga} (Thakore e Batt, 2008). De posse do volume, a altura da torre é obtida pela equação 5.4:

$$V = S * H \quad (5.4)$$

Na qual S é área transversal da torre e H a altura da torre.

Outros parâmetros relevantes no projeto de uma torre de spray envolvem a relação volumétrica Líquido-Gás, o diâmetro da gota pulverizada sobre o gás, a velocidade terminal das gotas atomizadas e o pH do líquido pulverizado. Não existem equações prontas que inserem todos esses parâmetros num modelo teórico. Os modelos propostos são empíricos, e provém de observações experimentais variando esses parâmetros e comparando as eficiências obtidas da torre de spray.

5.6.2 – O Lavador Venturi

Os Lavadores Venturi, assim como as torres de spray, são equipamentos capazes de controlar tanto material particulado quanto gases poluentes, apesar de diferirem um pouco na operação quando usados para cada uma dessas finalidades. Basicamente consiste em um aparelho onde o gás carreador, seja de partículas ou de gases poluentes, entra numa seção convergente até uma área de seção

transversal constante, chamada de garganta, onde o gás atinge a maior velocidade dentro do equipamento e onde é injetado líquido que é instantaneamente atomizado pelo gás carreador. No final da garganta, começa uma área de seção divergente, onde o gás é desacelerado. A Figura 22 ilustra as seções convergente, divergente e a garganta do Lavador Venturi:

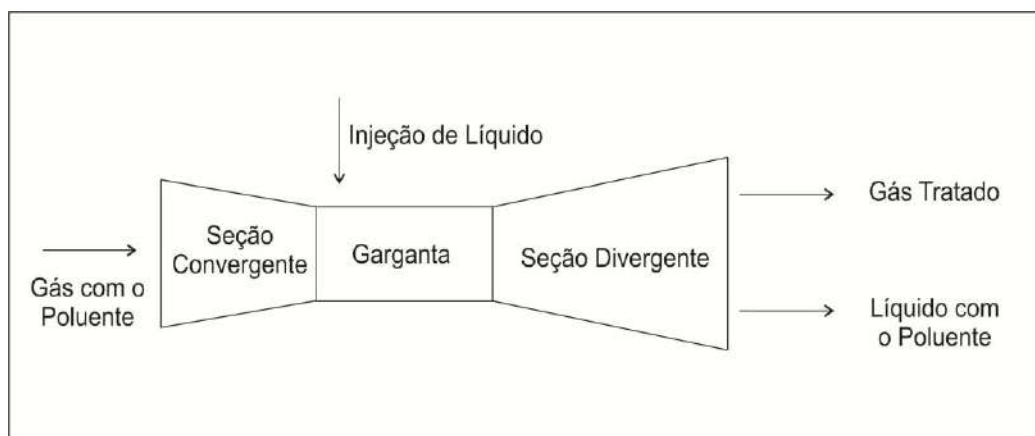


Figura 22: Estrutura de um tipo de Lavador Venturi

Existem várias conformações diferentes de Lavador Venturi, sendo a mais usual a esquematizada na figura 22, onde o líquido é atomizado pelo gás entrando em direções perpendiculares. A Figura 23 ilustra o desenho de um lavador convencional:

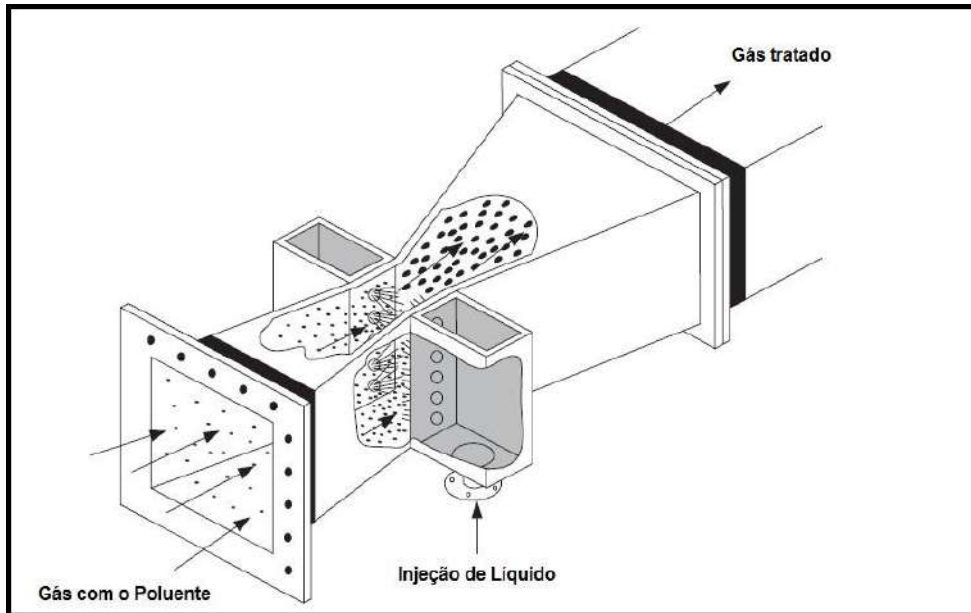


Figura 23: Lavador Venturi Convencional. Fonte: Schnelle, 2002

A Figura 24 mostra a configuração de um Lavador Venturi do tipo pulverizador da garganta:

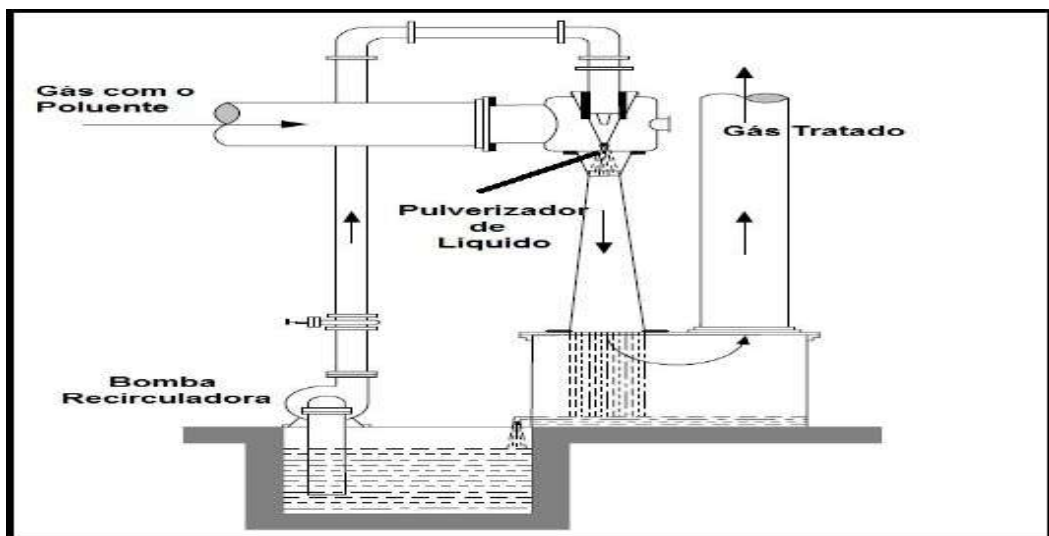


Figura 24: Lavador Venturi do Tipo pulverizador. Fonte: Schnelle, 2002.

Nele, o gás entra no equipamento antes da garganta, e é direcionado para a saída do venturi por um líquido pulverizado por um único pulverizador localizado no topo do venturi, concêntrico ao centro da garganta.

Para controle de material particulado, o Lavador Venturi coleta as partículas principalmente através do mecanismo de impactação. Quanto melhor for a distribuição das gotas na garganta do Venturi, mais eficiente será a coleta de partícula, portanto, a atomização adequada do líquido é um ponto crucial no processo. A desaceleração do gás na seção divergente também contribui para o aumento da impactação e aglomeração das partículas. O trabalho de Gomez Puentes (2008) desenvolve profundamente a atomização do líquido em um Lavador Venturi, obtendo vários resultados relacionados à variação da velocidade de entrada do gás, velocidade de entrada do líquido, ângulo de espalhamento de gota em função da velocidade de injeção do líquido. A Figura 25 mostra a formação das gotas por atomização perto do ponto de injeção de líquido:

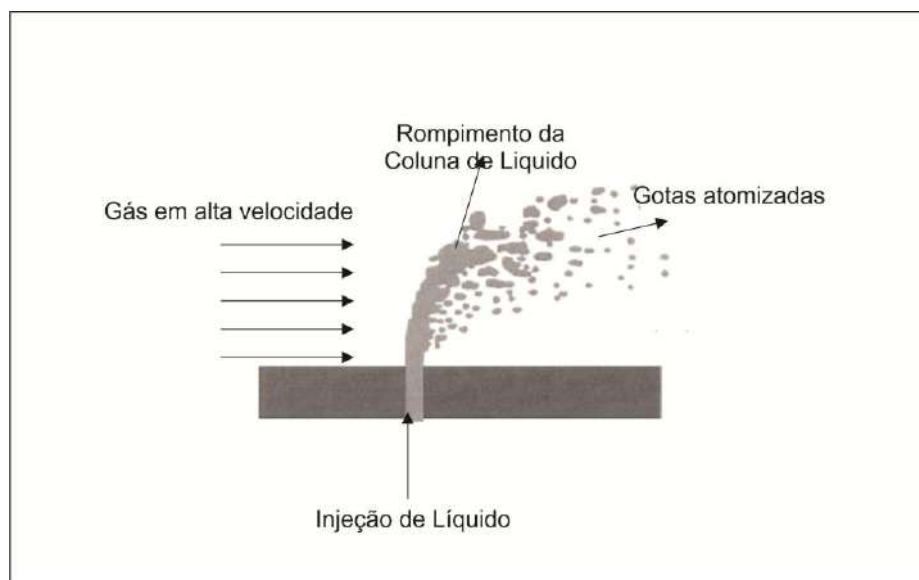


Figura 25: Atomização de Líquido. Fonte: Linne et al, 2005.

Segundo Schiffner (2002), um Venturi bem projetado é excelente na coleta de partículas de diâmetro na faixa de 1 μm a 20 μm . Os

parâmetros que influenciam na eficiência do Lavador Venturi para coleta de material particulado são a distribuição do diâmetro das partículas no gás carreador, vazão, temperatura e umidade do gás carreador, velocidade do gás carreador e a queda de pressão através do equipamento, relação volumétrica Líquido-Gás, diâmetro da gota atomizada e tempo de residência (USEPA, 2002).

O uso de Lavadores Venturi para absorção de gases é, assim como na torre de spray, restrito aos gases poluentes altamente solúveis no líquido que é injetado no sistema. Enquanto que uma vasta literatura está disponível para o dimensionamento de Lavadores Venturi destinado a coleta de material particulado, apenas alguns trabalhos foram desenvolvidos para Lavadores Venturi destinados a absorção de gases poluentes. De uma maneira geral, o Lavador Venturi para absorção de gases é mais comumente usado para absorção de SO_2 , através da injeção de soluções aquosas de hidróxido de sódio, ou soluções básicas de óxido de cálcio (cal) ou de carbonato de cálcio. Pode ser usado também na absorção de COVs, utilizando solventes líquidos compatíveis com o poluente em questão. A absorção se dá através da promoção do contato entre ambos. O trabalho de Wen e Uchida (1973) propôs um modelo matemático de transferência de calor e de massa num sistema de absorção de SO_2 em um Lavador Venturi, comparando diversos líquidos de lavagem, como água, solução de hidróxido de sódio, solução de carbonato de cálcio ou solução aquosa de óxido de cálcio. Propôs também equações diferenciais relacionando pressão total no equipamento, velocidade do líquido injetado, concentração de SO_2

absorvida no líquido. Uma das principais observações constatadas por Wen e Uchida (1973) foi que a transferência de massa e de calor é maior perto do injetor de líquido na garganta do Venturi.

5.6.2.1 – Dimensionamento de um Lavador Venturi para Absorção de Gases.

Assim como para as torres de spray, Thakore e Bhatt (2008) propuseram um modelo simplificado para projeto de um Lavador Venturi absorvedor de gases. O dimensionamento do venturi é basicamente feito a partir da equação 5.5:

$$\frac{y_1 - y_2}{y_2} = \eta * \frac{(1 - m \frac{x_2}{y_2})}{(1 + m \frac{G_{M'}}{L_{M'}})} \quad (5.5)$$

Onde y_1 e y_2 são respectivamente a composição do gás poluente no gás carreador na entrada do venturi, e y_2 a composição do gás poluente no gás carreador na saída do venturi, ambas na unidade de kmol/kmol de gás carreador.

η é a eficiência de transferência de massa no processo, e pode ser calculado pela equação 5.6:

$$\eta = 1 - \exp(-N_g) \quad (5.6)$$

N_g é o número de transferência de massa, e nos lavadores venturis, esse número varia de 1 a 2, sendo 1 o valor de segurança de projeto.

O termo m é o coeficiente angular da curva de equilíbrio do sistema composto pelo gás poluente e o líquido injetado no lavador venturi. Esse dado pode ser obtido em tabelas de pressão por temperatura do sistema em questão disponíveis na literatura, traçando uma reta tangente ao ponto na curva e calculando o coeficiente angular nesse ponto.

O termo x_2 é concentração do poluente no líquido injetado no lavador venturi, em kmol/kmol de líquido. Se o reagente não estiver sendo recirculado, a concentração de x_2 é igual a 0. Se o reagente estiver sendo recirculado, deve-se calcular a concentração absorvida pelo reagente na última passagem pelo lavador venturi.

Por fim, G_M' é o fluxo molar da fase gás, em kmol/m².s e L_M' é o fluxo molar da fase líquida, também em kmol/m².s. Ambas podem ser calculadas dividindo a vazão molar da fase pela área da seção transversal da garganta do lavador.

Conhecida a concentração do gás de entrada, encontrando m através das condições de pressão e temperatura da operação, estimando N_g para um valor de segurança, e fixando a concentração de saída e vazão molar do gás na entrada, pode-se mensurar a vazão molar de líquido necessária a ser injetada no Lavador Venturi.

Além da equação 5.5, Thakore e Bhatt (2008) propuseram uma relação para cálculo da queda de pressão através do equipamento, como mostrado na equação 5.7:

$$\Delta P = 2,584 * 10^{-3} * V_g * \rho_g * A_{th}^{0,133} * \left(\frac{L}{G}\right)^{0,78} \quad (5.7)$$

Onde ΔP é a queda de pressão em cm WC (centímetros de coluna de água), V_g é a velocidade do gás na entrada da garganta do venturi em m/s, ρ_g é a densidade do gás carreador em Kg/m³, A_{th} é a área da seção transversal da garganta do lavador venturi em cm² e L/G é a razão volumétrica entre o líquido injetado e o gás carreador, com o L em litros, e o G em m³.

5.6.2.2 – Operação do Lavador Venturi

Segundo Theodore (2008), deve-se atentar para alguns possíveis acontecimentos na operação de um lavador venturi. Um dos problemas é o entupimento parcial do bico injetor de líquido, que influencia diretamente na formação das gotas atomizadas, causando uma má formação e distribuição das mesmas na garganta do venturi. Vazão de gás abaixo da necessária ou acima da permitida podem causar problemas de eficiência, porém esses problemas podem ser solucionados pelo emprego de válvulas de qualidade e malhas de controle bem ajustadas.

Podem ocorrer incrustações ao longo das seções de garganta ou da seção divergente, dependendo da natureza do gás carreador e do reagente utilizado. As incrustações podem causar corrosão do material da parede interna do lavador, diminuindo o tempo de vida útil do aparelho. A má distribuição de líquido e gás pode constituir um problema

para transferência de massa e calor ao longo do equipamento, diminuindo a eficiência do aparelho pelo não aproveitamento pleno do volume útil do mesmo. O selamento das partes de encaixe do equipamento deve estar perfeita, pois qualquer problema relacionado ao selamento configura o vazamento de gás para fora do equipamento e o mau funcionamento dos equipamentos de instrumentação, diminuindo a eficiência do lavador e deturpando as medições de controle realizadas.

5.6.3 – Torre de Recheio

As torres de recheio são equipamentos baseados no mecanismo de absorção que promovem contato entre o gás poluente e um líquido que absorve ou reage com o gás poluente, retirando-o da corrente de gás carregado através da torre. O gás carreador é injetado no fundo da torre, e o líquido absorvente é injetado na parte superior da torre, escoando por meio de um recheio poroso que promove um contato líquido-gás muito maior que em uma torre de spray (Theodore, 2008).

A distribuição de líquido no topo da torre de recheio deve ser bem feita, de modo a promover o maior contato possível entre o gás ascendente e o líquido descendente. Caminhos alternativos por onde o gás não entra em contato com o líquido são danosos a eficiência da torre. Da mesma forma, o líquido não pode preencher todos os espaços vazios da torre de recheio, pois isso aumenta a queda de pressão ao longo do equipamento e faz com o que o gás arraste líquido em direção ao topo da coluna, situação conhecida como “flooding”, que também diminui a eficiência do equipamento (Theodore, 2008).

O recheio da torre é geralmente feito de cerâmica, vidro, plástico ou outro material que seja totalmente inerte ao gás e ao líquido que serão operados no equipamento. Recheios não inertes reagem durante a operação e comprometem a eficiência da torre de recheio. Deve ser resistente tanto a abrasão quanto a pressão exercida no interior da coluna, e no tratamento de compostos que se depositam na forma de incrustações, devendo ser feitas lavagens periódicas do recheio utilizado, evitando que a pressão aumente no interior da coluna em função dos entupimentos (Schiffner, 2002).

A Figura 26 apresenta um esquema simplificado de uma torre com duas seções de recheio:

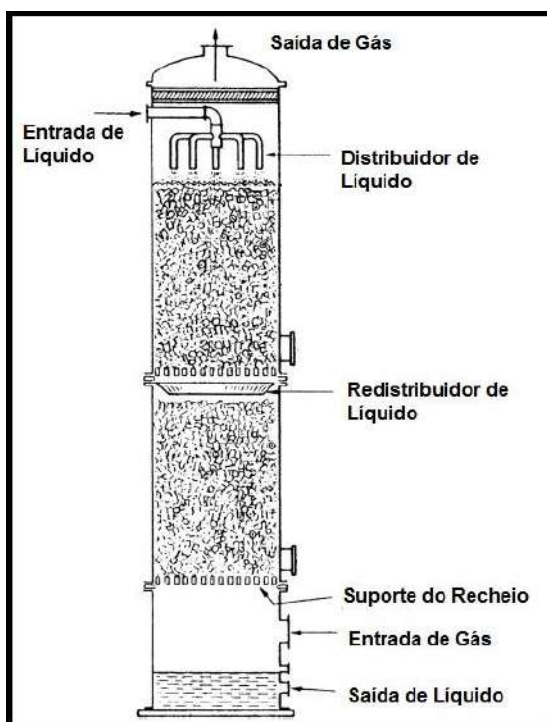


Figura 26: Torre de Recheio. Fonte: Theodore (2008).

5.6.4 – Torre de Pratos

A torre de pratos funciona como uma torre absorvedora, onde, ao longo de sua altura, pratos com pequenos furos bem distribuídos preenchem a área de seção transversal repetidamente. Esses pratos são inundados com o líquido descendente do alto da torre que gotejam no prato abaixo e assim sucessivamente. O gás ascendente força o caminho por meio desses furos, competindo com o líquido descendente, borbulhando através do líquido a cada passagem de prato. Esse contato promove a transferência de massa e absorção do poluente (Theodore, 2008). São menos usuais que as torres de recheio.

5.6.5 – Leitos de Adsorção

Os leitos de adsorção são basicamente equipamentos como colunas ou câmaras, preenchidos com algum tipo de material com características adsorptivas, como resinas, carvão ativado, alumina, sílica gel, por onde o gás poluente é forçado a passar e entrar em contato. Por meio dos mecanismos de adsorção, o poluente gasoso fica retido no adsorvente até que seja feita uma regeneração do adsorvente (Schnelle, 2002).

Existem vários tipos de leitos de adsorção, leitos fixos, leitos fluidizados, de múltiplos leitos, entre outros. São extremamente usados para controle de COVs, obtendo altas eficiências de remoção, próximas de 100% (Schnelle, 2002). O carvão ativado, por exemplo, é amplamente utilizado como adsorvente, e apresenta altos índices de

adsorção para vários COVs e alguns outros poluentes inorgânicos, conforme mostrado na Tabela 6 a seguir:

Tabela 6 – Capacidade de Adsorção de Carvão Ativado.

Fonte: <http://www.islandcleanair.com/pdf/Activated%20Carbon%20Explained.pdf>. Acessado em 01/11/2013.

Poluente	Índice	Poluente	Índice
Ácido Acético	4	Gás Carbônico	1
Acetona	2	Monóxido de Carbono	1
Anilina	4	Cresol	4
Aminas	2	Formaldeído	2
Odores de animal	3	Acetato de Etila	4
Diclorobenzeno	4	Piridina	4
Etano	1	Fenol	4
Tolueno	4	Tetracloroeto de Carbono	4
Nitrobenzeno	4	Pentanona	4
Gases Corrosivos	3	Dióxido de Enxofre	2

Índice:

1 – Baixa Capacidade de Adsorção

2 – Moderada Capacidade de Adsorção

3 – Satisfatória Capacidade de Adsorção

4 – Alta Capacidade de Adsorção

É aconselhável que se faça a regeneração do adsorvente periodicamente, com o objetivo de reduzir os custos de produção e manter a eficiência de remoção sempre alta. Os leitos de adsorção são regenerados geralmente através da passagem de vapor ou de uma solução regenerante, que varia de acordo com o adsorvente utilizado. Existem tipos de adsorventes que não são passíveis de regeneração, necessitando de um devido tratamento ou inertização antes de uma deposição final, encarecendo os custos de produção.

Capítulos 6 – Proposta de Construção de um Sistema Lavador de Gases em Escala de Bancada

6.1 – Motivação

Frente a necessidade de buscar alternativas para remoção de poluentes gasosos como COVs ou SO₂ emitidos anualmente pelas diversas indústrias de refino de petróleo no Brasil e no mundo, é interessante constatar a não utilização das Torres de Spray e dos Lavadores Venturi para remoção dos poluentes em questão, mesmo quando se conhece reagentes líquidos nos quais os gases poluentes são solúveis ou reativos.

A pequena literatura disponível para torres de spray e lavadores venturi usados com absorvedores de gases poluentes talvez seja um dos fatores predominantes para o não uso desses equipamentos, apesar das suas potencialidades na promoção da transferência de massa entre as fases, resistência a altas pressões e temperatura de entrada e suas versatilidades no quesito recirculação de reagente e mudanças de reagentes.

Por exemplo, para remoção de SO₂, o Lavador Venturi quase não é utilizado, mesmo com a existência do trabalho de Wen e Uchida (1973), que fala sobre a efetividade de absorção de SO₂ em lavadores venturis a partir do uso de soluções alcalinas a base de carbonato de cálcio ou de cal, soluções essas que podem ser regeneradas e

recirculadas no lavador venturi, diminuindo os custos de produção e mantendo uma alta eficiência.

As torres de spray podem ser utilizadas para simular condições atmosféricas nas quais os COVs possam reagir, baseado nas informações de como determinados COVs são removidos da atmosfera naturalmente.

Diante dessas possibilidades, a seção a seguir apresenta a proposta de construção de um sistema lavador de bancada versátil e adaptável para experiências de remoção de poluentes gasosos, que possa servir como base para projeto e construção de lavadores específicos e de escala industrial.

6.2 – Construção de um Sistema Completo do Lavador

Primeiramente, foi desenvolvido no programa Microsoft Visio o fluxograma pensado para o Sistema Lavador, demonstrado na Figura 27:

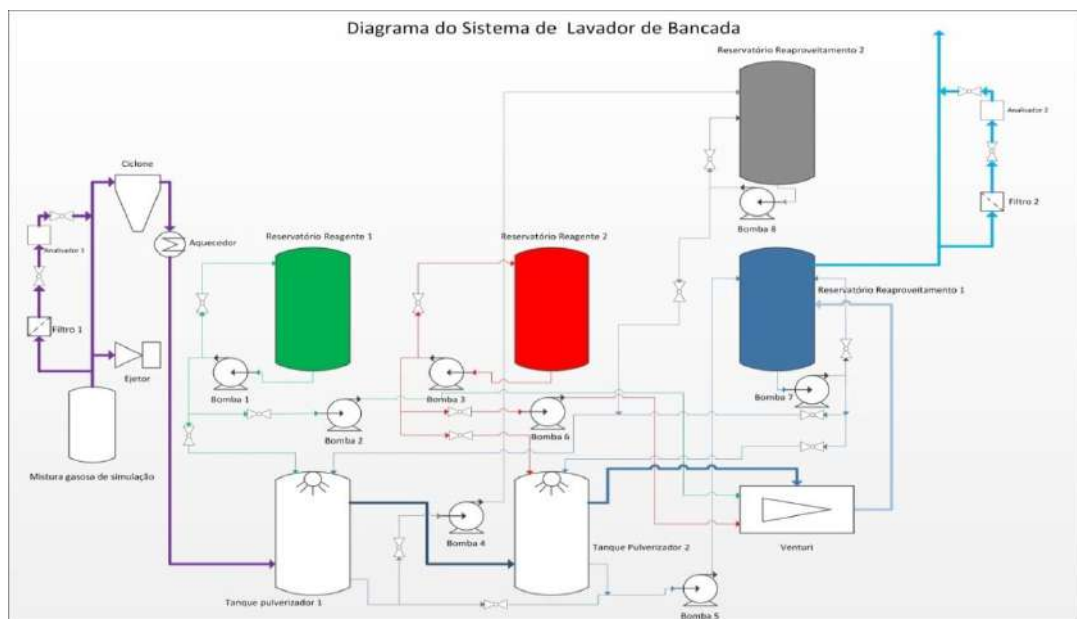


Figura 27: Diagrama do Sistema de Lavador de Bancada

A mistura gasosa de simulação, contendo os poluentes, é analisada previamente em um analisador de gases (um cromatógrafo gasoso, um detector de gases portátil), com objetivo de mensurar a concentração de poluentes na corrente de entrada. De posse dos dados iniciais, a mistura gasosa passa por um ciclone, com o objetivo de remover materiais particulados grosseiros de modo que os mesmos não criem uma mistura viscosa que impossibilitem o funcionamento do mecanismo hidráulico ou que causem incrustações que diminuam a eficiência dos aparelhos subsequentes.

No tanque de pulverização número 1, é pulverizado o reagente proveniente do reservatório de reagente número 1, como pode ser visto na Figura 28:

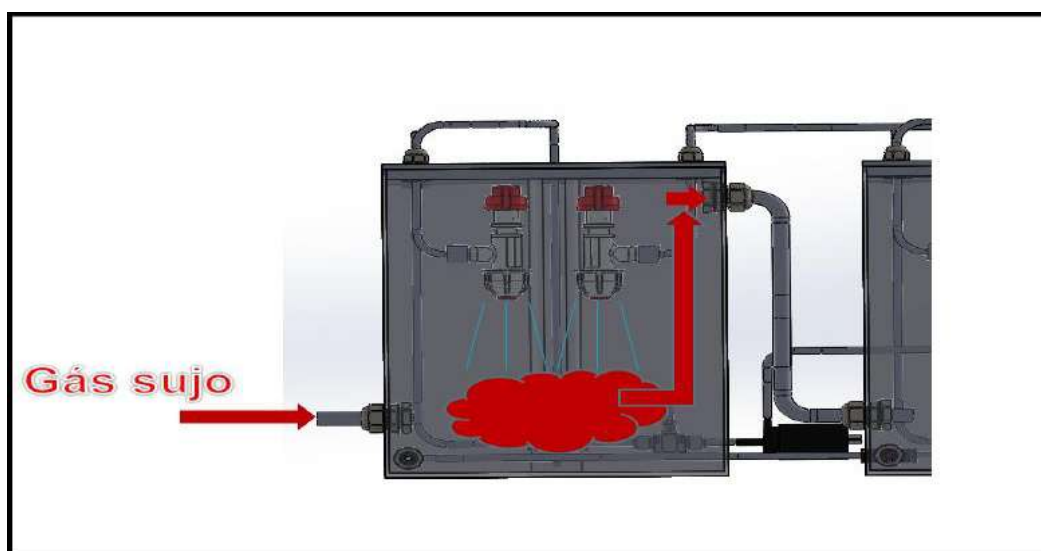


Figura 28: Pulverização na primeira torre

Nota-se, porém que também podem ser repulverizados reagentes do tanque de reaproveitamento número 1, como reagentes do tanque de

reaproveitamento número 2, de modo a aproveitar o máximo as capacidades limpantes dos reagentes. O ar poluído entra numa seção mais baixa do tanque e entra em contato com os reagentes em contra corrente, até sair do tanque de pulverização pela parte superior. Os reagentes líquidos captadores de impurezas são bombeados no fundo do tanque para os reservatórios de reagente número 1 ou número 2, de acordo com a necessidade e a estratégia de limpeza. O processo é repetido no tanque de pulverização número 2, onde a mistura gasosa parcialmente tratada entra numa seção mais baixa do segundo tanque de pulverização, entrando em contato com o reagente pulverizado agora do tanque de reagente número 2, e o reagente recirculado proveniente do reservatório de reaproveitamento número 1, como mostrado na Figura 29:

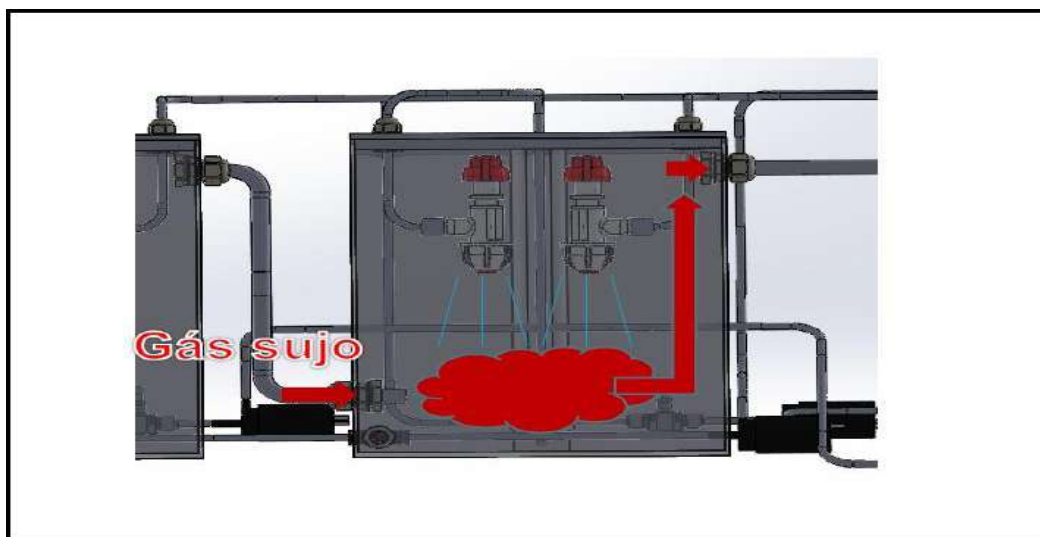


Figura 29: Segunda torre de pulverização

O gás tratado no segundo tanque pulverizador entra numa alta velocidade num lavador venturi, onde novamente os reagentes são

pulverizados puros (juntos ou separados), diretamente do reservatório de reagentes 1 e 2, entrando em contato com a mistura gasosa em uma seção transversal de área menor, promovendo um contato ainda maior entre os reagentes e as impurezas, como mostrado na figura 30:



Figura 30: Lavador Venturi e seu funcionamento

Por fim, a mistura gasosa entra no reservatório de reaproveitamento número 1, onde o líquido é separado por gravidade novamente do gás, com o gás tratado saindo pela parte superior do tanque de reaproveitamento número 1, passando por uma nova análise para evidenciar a eficiência de remoção do equipamento, conforme mostrado na Figura 31:

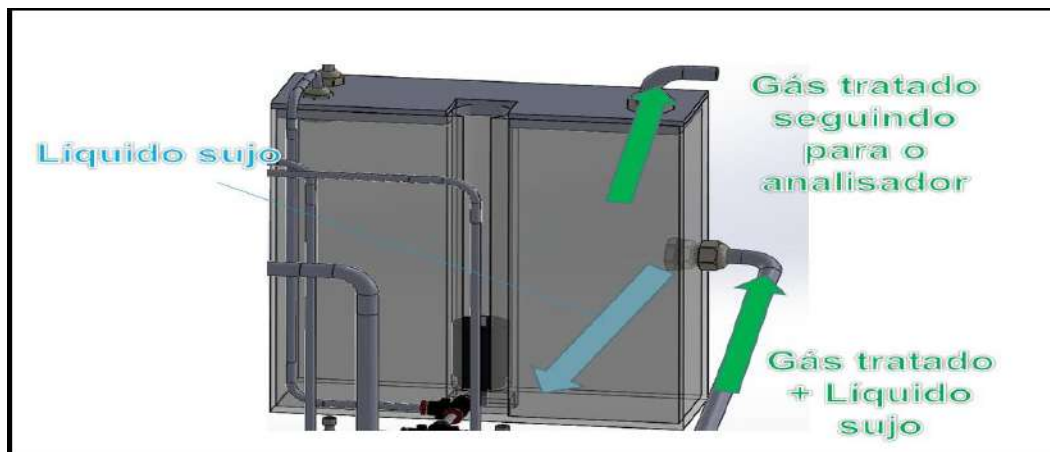


Figura 31: Reservatório de Reaproveitamento nº 1

Com a idéia concebida, o sistema foi projetado em 3D, com o auxílio do programa SolidWorks 2013. A Figura 32 mostra o sistema em 3D:

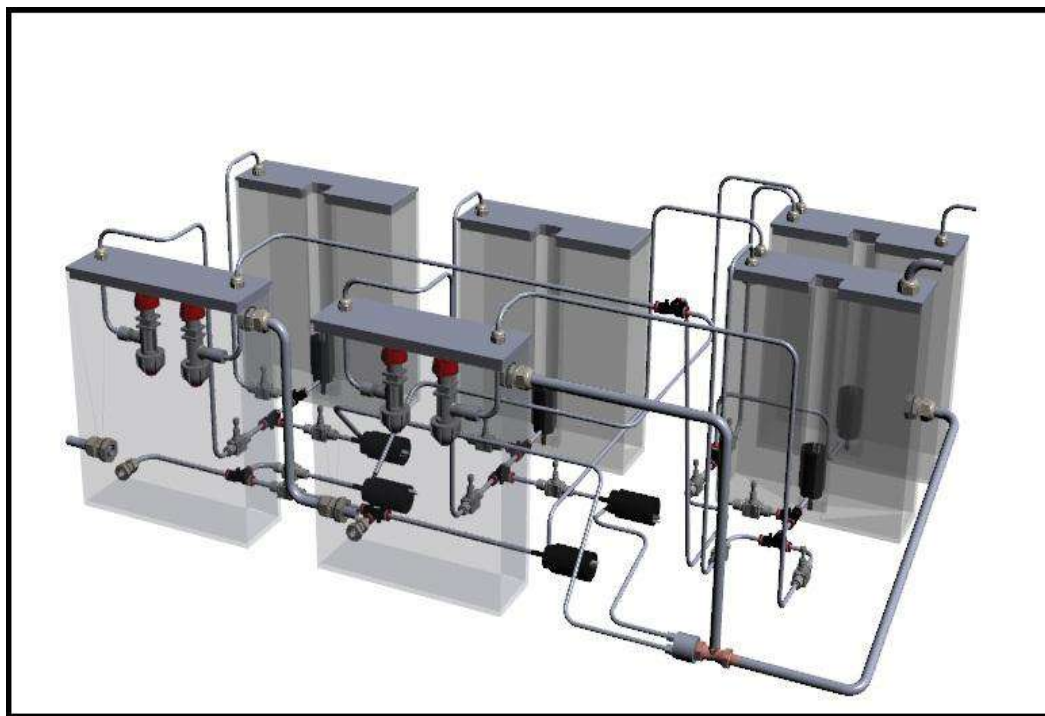


Figura 32: Sistema de Lavador de Gases em 3D

O sistema gerado em 3D é constituído apenas das torres pulverizadoras, dos reservatórios de reagente e reaproveitamento, e do lavador venturi, bem como bombas, válvulas e conexões.

6.3 – Componentes do Sistema

O sistema é constituído de duas torres de pulverização, dois reservatórios de armazenamento de reagentes, dois reservatórios de reaproveitamento de reagentes, e um lavador venturi. As bombas hidráulicas utilizadas na concepção são as mesmas utilizadas nos motores de carro para partida a frio, totalizando 8 bombas. São utilizadas ainda 13 válvulas manuais de 6mm, 10 conexões do tipo “T” de 6mm, 6 prensa-cabos de meia polegada, e 11 prensa-cabos de ¼ de polegada. A tubulação será de poliuretano e os bicos pulverizadores totalizam 4 ao todo, e são os mesmos utilizados na agropecuária para pulverização de ambientes, como mostrado na Figura 33:



Figura 33: Bicos pulverizadores

6.4 – Controle de pH nos reservatórios de reaproveitamento

O principal parâmetro a ser estudado para otimização do reaproveitamento de reagentes é o pH. Como muitas das reações de remoção de gases poluentes e impurezas têm mecanismos de reação ácido-base, propõe-se que os reservatórios de reaproveitamento tenham um indicador de pH para que, de acordo com o seu valor, se justifique a repulverização ou não nas torres de pulverização 1 e 2. Sabendo disso, foi construída uma placa capaz de monitorar o pH de maneira online.

6.4.1 – Construção da placa de pH

A placa foi construída em um *protoboard*, uma placa de testes utilizada na concepção de circuitos eletrônicos. O circuito de pH modelo foi encontrado na internet, usado em um software chamado Aquarix Software, e a Figura 34 mostra o circuito base sem modificações:

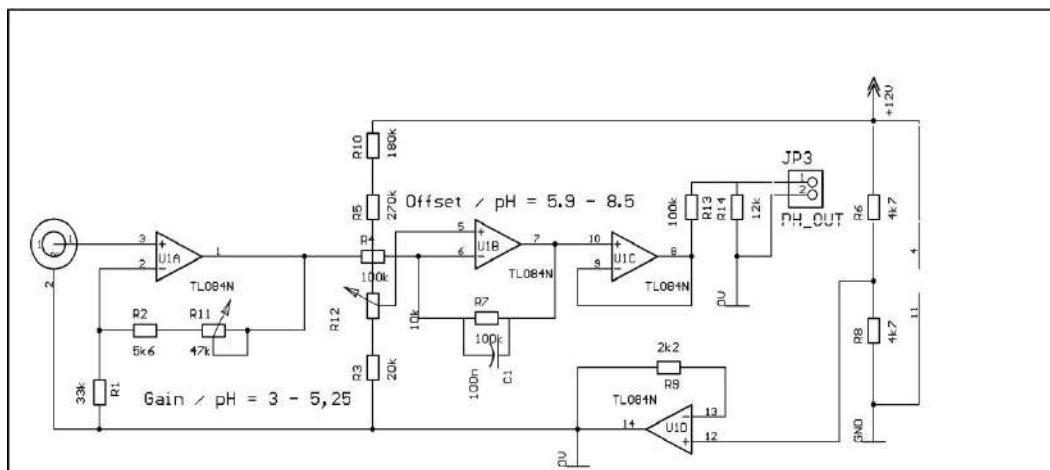


Figura 34: Modelo de Circuito de pH Aquarix Software. Fonte: <http://www.aquarix.de/de/diy/img/phmeter.gif>

6.4.2 – Materiais e Métodos envolvidos na construção da placa de pH

Foram necessários alguns materiais eletrônicos na construção da placa de pH, conforme a lista que segue:

- 1 *Protoboard*
- 1 resistor cerâmico de 33k Ω de 0,25W
- 1 resistor cerâmico de 5,6k Ω de 0,25W
- 1 resistor cerâmico de 20k Ω de 0,25W
- 3 resistores cerâmicos de 100k Ω de 0,25W
- 1 resistor cerâmico de 270k Ω de 0,25W
- 2 resistores cerâmicos de 4,7k Ω de 0,25W
- 1 resistor cerâmico de 2,2k Ω de 0,25W
- 1 resistor cerâmico de 180k Ω de 0,25W
- 1 resistor cerâmico de 12k Ω de 0,25W
- 1 Mini potenciômetro ajustável (Trimpot) de 100k Ω
- 1 Mini potenciômetro ajustável (Trimpot) de 47k Ω
- 1 Fonte de 12V
- 1 Capacitor de 100 nanômetros
- Fios de baixa resistência
- 1 sensor de pH
- 1 multímetro de alta precisão
- 1 amplificador operacional TL084

A placa de pH montada no protoboard pode ser observado na Figura 35:

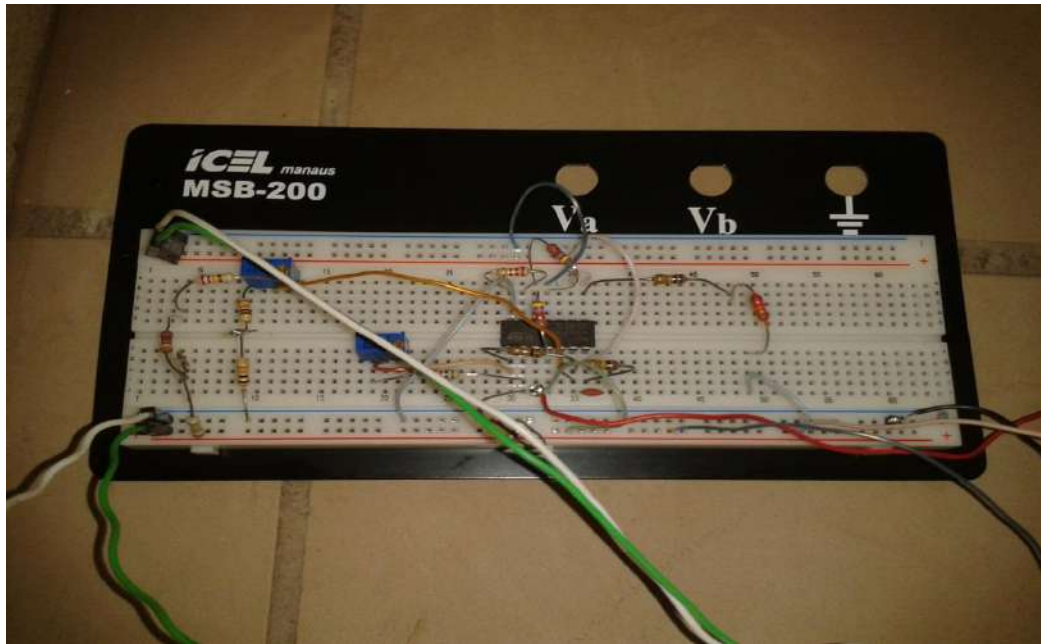


Figura 35: Placa de pH montada no protoboard

O multímetro de alta precisão usado na medição das voltagens das soluções durante o procedimento pode ser observado na Figura 36, enquanto que a fonte de 12V utilizada pode ser observada na Figura 37:



Figura 36: Multímetro de alta precisão



Figura 37: Fonte de 12V

Para validar o funcionamento da placa recém montada, foram usadas três soluções padrões para construção da equação da reta do gráfico pH x Voltagem, a uma determinada temperatura. Esse procedimento foi repetido para várias outras temperaturas, resultando em várias equações da reta. Os valores obtidos eram comparados com um phmetro de laboratório para validação dos resultados. Para temperaturas intermediárias, o resultado foi aproximado pelo uso da equação da reta mais próxima da temperatura constatada, e novamente o resultado foi comparado com a medição do phmetro do laboratório.

6.4.3 – Dados experimentais

A Tabela 7 a seguir mostra os dados obtidos coletados para construção das equações da reta:

Tabela 7- Dados coletados do experimento de pH

Temperatura		Solução Padrão	Solução Padrão	Solução Padrão
		pH 4	pH 7	pH 9
25°C	pH pHmetro	4,01	7,01	9,04
	Voltagem	0,762 V	1,230 V	1,562 V
	Multímetro			
30°C	pH pHmetro	4,02	7,00	9,03
	Voltagem	0,746 V	1,223 V	1,554 V
	Multímetro			
35°C	pH pHmetro	4,03	6,99	9,03
	Voltagem	0,739 V	1,215 V	1,553 V
	Multímetro			
40°C	pH pHmetro	4,04	6,98	9,02
	Voltagem	0,733 V	1,209 V	1,545 V
	Multímetro			
45°C	pH pHmetro	4,05	6,98	9,02
	Voltagem	0,723 V	1,196 V	1,536 V
	Multímetro			
50°C	pH pHmetro	4,04	6,98	9,00
	Voltagem	0,712 V	1,191 V	1,532 V
	Multímetro			
55°C	pH pHmetro	4,04	6,98	9,00
	Voltagem	0,697 V	1,185 V	1,524 V
	Multímetro			

A partir desses dados, foi possível construir as equações da reta para cada uma dessas temperaturas, relacionando pH com voltagem, como mostrado na Tabela 8:

Tabela 8 - Equações da reta pH x Voltagem

Temperatura	Equação da reta	R ²
25°C	$\text{pH} = 6,2955610948 * V - 0,7714747103$	0,9998298356
30°C	$\text{pH} = 6,2037933076 * V - 0,6019879409$	0,9999740294
35°C	$\text{pH} = 6,1474802076 * V - 0,5030710294$	0,9999316701
40°C	$\text{pH} = 6,1359049114 * V - 0,4519668087$	0,9999774575
45°C	$\text{pH} = 6,1182767535 * V - 0,3628820611$	0,9999216383
50°C	$\text{pH} = 6,0545592768 * V - 0,2591370386$	0,9999035155
55°C	$\text{pH} = 5,9994754068 * V - 0,1380710785$	0,9999907915

Os resultados das equações provenientes da leitura do multímetro foi comparado com as leituras de pH oriundas do pHmetro, como pode ser visto na Tabela 9:

Tabela 9 - Resultados Comparativos de pH

Temperatura	Solução padrão	pH via leitura do pHmetro	pH via equação da reta	Erro absoluto
25°C	pH = 4,0	4,01	4,03	0,02
25°C	pH= 7,0	7,01	6,97	0,04
25°C	pH= 9,0	9,04	9,06	0,02
30°C	pH = 4,0	4,02	4,03	0,01
30°C	pH= 7,0	7,00	6,99	0,01
30°C	pH= 9,0	9,03	9,04	0,01
35°C	pH = 4,0	4,03	4,04	0,01
35°C	pH= 7,0	6,99	6,97	0,02
35°C	pH= 9,0	9,03	9,04	0,01
40°C	pH = 4,0	4,04	4,05	0,01
40°C	pH= 7,0	6,98	6,97	0,01
40°C	pH= 9,0	9,02	9,03	0,01
45°C	pH = 4,0	4,05	4,06	0,01
45°C	pH= 7,0	6,98	6,95	0,03
45°C	pH= 9,0	9,02	9,03	0,01

50°C	pH = 4,0	4,04	4,05	0,01
50°C	pH= 7,0	6,98	6,95	0,03
50°C	pH= 9,0	9,00	9,02	0,02
55°C	pH = 4,0	4,04	4,04	0
55°C	pH= 7,0	6,98	6,97	0,01
55°C	pH= 9,0	9,00	9,01	0,01

Para efeito de teste, foram coletadas as voltagens das soluções padrões em temperaturas intermediárias, que eram inseridas nas equações de temperatura mais próxima da Tabela 8, e posteriormente, o valor era comparado com o valor obtido pelo pHmetro. Os resultados seguem na Tabela 10:

Tabela 10 - Comparativo dos valores de pH em temperaturas intermediárias.

Temperatura	Solução padrão	Voltagem lida no Multímetro	pH via equação da reta	pH via leitura do pHmetro	Erro absoluto
38°C	pH = 4,0	0,736	4,06	4,04	0,02
38°C	pH= 7,0	1,212	6,98	6,98	0
38°C	pH= 9,0	1,546	9,03	9,03	0
48°C	pH = 4,0	0,717	4,08	4,04	0,04
48°C	pH= 7,0	1,193	6,96	6,98	0,02
48°C	pH= 9,0	1,534	9,03	9,02	0,01
53°C	pH = 4,0	0,704	4,09	4,04	0,05
53°C	pH= 7,0	1,187	6,98	6,98	0
53°C	pH= 9,0	1,524	9,02	9,02	0

A maior diferença observada foi a de solução de pH 4,0 à 53°C, o erro absoluto entre valor medido no pHmetro de bancada e o circuito de medição de pH foi de 5 centésimos, diferença mínima que não influenciaria uma eventual tomada de decisão. Em todos os outros valores experimentais obtidos, o erro absoluto também teve valor mínimo, atestando o uso do circuito de pH na medição de soluções em qualquer temperatura da faixa entre 25°C e 55°C.

Capítulo 7 – Conclusão

7.1 – Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros

Apesar de existirem limites (padrões primários e secundários) para os compostos legislados, e o monitoramento e controle das emissões ficarem a cargo dos órgãos reguladores competentes de cada estado da federação, é importante que os órgãos reguladores façam uma revisão desses limites de tempos em tempos, para que os padrões não fiquem defasados e obsoletos frente ao aumento de fontes móveis e fixas de acordo com cada cidade e região.

Uma sugestão é que os limites fossem definidos de acordo com a densidade de emissão de cada região, excetuando as áreas de reservas ecológicas. Por exemplo, se uma região possui um alto índice de emissão, tanto fixa quanto móvel, os limites de emissão deveriam ser mais rigorosos, e os padrões primários e secundários modificados especialmente para aquela área. Ou seja, o sugerido é que se reformulassem a atual divisão de apenas 3 classes de regiões (Classe 1, Classe 2 e Classe 3) para impedir as altas taxas de poluição do ar e para desmotivar a instalação de novas indústrias poluidoras nos grandes centros urbanos. As indústrias também deveriam ser obrigadas a mensurar acuradamente pelos órgãos competentes a quantidade de poluentes legislados emitidos por dia, além das vistorias já feitas em caldeiras e outros equipamentos emissores, e entregar relatórios aos órgãos responsáveis, para que fossem avaliados. Essa pressão exercida

pelos órgãos reguladores certamente acarretariam em um maior investimento por parte das empresas em novas tecnologias ou metodologias de controle de poluição do ar, beneficiando a população.

Com relação aos compostos não legislados, seria importante um trabalho em conjunto dos órgãos ambientais de cada federação, com o objetivo de mapear os compostos não legislados mais emitidos, tanto em quantidade quanto em frequência, para assim, fornecer subsídios para uma reformulação da legislação e estabelecimento de novos compostos legislados. Certamente, um mapeamento desse porte direcionaria as pesquisas tecnológicas na direção da não emissão desses potenciais compostos legislados, aquecendo ainda mais as pesquisas acadêmicas e favorecendo o surgimento de novas tecnologias, equipamentos e meios de detecção.

O presente trabalho apresentou os compostos legislados, os principais compostos não legislados e suas principais formas de remoção da atmosfera. Conhecer como os compostos reagem naturalmente na atmosfera é o primeiro passo para o desenvolvimento de equipamentos que possibilitem a remoção desses compostos antes de suas respectivas incorporações às correntes de gás a serem emitidas. Foram apresentados diversos equipamentos, baseados em mecanismos de remoção que funcionam melhor pra certos tipos de poluentes, de acordo com o comportamento dos mesmos. De todos os equipamentos apresentados, os mais versáteis são as torres de spray e os lavadores venturi, pois englobam diversos mecanismos de remoção e podem ser usados como equipamento de estudo para remoção de

poluentes. Nas torres de spray pode-se inclusive tentar simular a atmosfera propícia para remoção de certo poluente, desde que o tempo de contato entre gás e reagente para que ocorra a reação não seja grande de modo a influenciar no tratamento de grandes fluxos gasosos, enquanto que o lavador venturi pulveriza as partículas ou moléculas com uma turbulência muito maior, sendo mais efetivo que a torre de spray, porém um pouco menos versátil.

Na proposta de construção do sistema lavador, conclui-se que a idéia de recircular reagentes após seu uso de modo a tirar o máximo proveito de suas capacidade limpantes justifica a construção e o estudo para diversos sistemas gás – reagentes, com o objetivo de diminuir os custos e tornar viáveis processos hoje que não são devido ao grande gasto com reagentes. Algumas sugestões para a construção do sistema lavador são:

- Construção do Sistema Lavador de Gás;
- Construção de placas eletrônicas para o controle de potência das bombas do sistema, visando adequar a vazão do reagente para os bicos pulverizadores e para o lavador venturi;
- Construção de uma placa de pH fixa seguindo os moldes do circuito desse trabalho, porém acompanhada de um micro controlador que faça a interface sensor-placa-computador, para que os resultados medidos sejam monitorados e arquivados constantemente;
- Utilização de válvulas de controle que atuem em consonância com os resultados medidos pelos sensores no sistema;

- Construção de um sensor de Temperatura para cada tanque;
- Utilização de sensores de nível nos tanques de reaproveitamento, de modo a evitar transbordamentos e
- Desenvolvimento de um software capaz de realizar as tomadas de decisão de maneira automática ou manual. O Microsoft Visual Studio pode ser uma importante ferramenta para o desenvolvimento do programa.

Capítulo 8 – Referências Bibliográficas

- Activated Carbon Capacity Index Chart Explanation, disponível em <<http://www.islandcleanair.com/pdf/Activated%20Carbon%20Explained.pdf>> Acessado em 01/11/2013.
- ANDRADE, J. B. e SARNO, P. ; Química Nova, 1990, Capítulo 13, Página 213.
- ARCURI, A. S. A et al; Efeitos da Exposição ao Benzeno para Saúde. São Paulo, Fundacentro, 2012.
- ATKINSON, R.; AREY, J.; Atmospheric Degradation of Volatile Organic Compounds. Chemical Reviews, American Chemical Society, volume 103, nº 12, p. 4605 – 4638, 2003.
- ATMOSPHERIC COMPOSITION CHANGE THE EUROPEAN NETWORK OF EXCELLENCE (ACCENT) – Volatile Organic Compounds in the Polluted Atmosphere. Accent Secretariat, Report 4.2007, Urbino, Itália, 2005.
- BRASIL. Lei nº 6938, de 31 de agosto de 1981, art. 3º.
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Relatório de Qualidade do ar no Estado de São Paulo 2005. São Paulo, Brasil, 2005. Disponível em <<http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/qualidade-do-ar/31-publicacoes-e-relatorios>>. Acessado em 14 de julho de 2013.
- COSTA, D. F.; Prevenção da Exposição ao Benzeno no Brasil. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2009.
- ENVIRONMENT PROTECTION AUTHORITY (EPA) – Photochemical Smog: What it means for us. Adelaide, Austrália, 2004. Disponível em <http://www.epa.sa.gov.au/xstd_files/Air/Information%20sheet/info_phot_omsg.pdf> Acessado em 22 de julho de 2013
- FEAM – Fundação Estadual de Meio Ambiente / Minas Gerais. Plano de Controle da Poluição por Veículos em Uso em Minas Gerais - PCPV/MG. Relatório Técnico. Minas Gerais, Brasil, 2001.
- GLOSSARY OF VOLATILE ORGANIC COMPOUNDS, Centers For Disease Control and Prevention (CDC), Atlanta, Estados Unidos, 2013. disponível em: <<http://www.cdc.gov/nceh/clusters/fallon/glossary-voc.pdf>>. Acessado em 12/10/2013.
- GOMEZ PUENTES, N. A; Atomização de um Jato Líquido em um Lavador Venturi. São Carlos, Universidade Federal de São Carlos, 2008.

- HESTER, R. E.; HARRISON, R. M. ; Issues in Environmental Science and Technology – Volatile Organic Compounds in the Atmosphere. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, Reino Unido, 1995.
- INEA – Instituto Estadual do Ambiente. Relatório Anual da Qualidade do Ar do Estado do Rio de Janeiro 2009. Rio de Janeiro, Brasil, 2009. Disponível em <<http://www.inea.rj.gov.br/fma/qualidade-ar.asp>>. Acessado em 13 de Junho de 2013.
- KOPPMANM, R.; Volatile Organic Compounds in the Atmosphere. Blackwell Publishing, Oxford, Reino Unido, 2007.
- LINNE, M. A., PACIARONI, M.; GORD, J.R.; MEYER, T.R.; Ballistic imaging of the liquid core for a steady jet in crossflow. Optical Society of America, v.44, n.31, p. 6627 – 6633, Estados Unidos, 2005.
- MANAHAN, STANLEY E.; Environmental Chemistry, CRC Press LLC, Florida, Estados Unidos, 2000.
- RESOLUÇÃO CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990.
- REVISTA MEIO AMBIENTE INDUSTRIAL, julho/agosto de 2009, página 27.
- RIEDEL, K.; LASSEY, K.; Detergent of the Atmosphere. Water & Atmosphere, NIWA, volume 16, número 1, p. 22 – 23, 2008.
- SCHIFFTNER, KENNETH C.; Air Pollution Control Equipment Selection Guide, CRC Press LLC, Florida, Estados Unidos, 2002.
- SCHNELLE, KARL B.; Air Pollution Control Technology Handbook, CRC Press LLC, Florida, Estados Unidos, 2002.
- SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. Atmospheric Chemistry and Physics. From Air Pollution to Climate Change, USA: John Wiley & Sons, 1988.
- SOUZA, S.R; CARVALHO, L.R.F. Origem e Implicações dos Ácidos Carboxílicos na Atmosfera. Química Nova, V. 24 (1), 2001, p. 60 – 67.
- THAKORE, S. B; BHATT, B. I; Introduction to Process Engineering and Design, Tata McGraw Hill Publishing Company Limited, Nova Déli, Índia, 2008.
- THEODORE, LOUIS ; Air Pollution Control Equipment Calculations, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, Estados Unidos, 2008.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) – Air pollution control technology fact sheet: Spray-Chamber/Spray Tower Wet Scrubber. 2003a (EPA-425/F-03-016).

Disponível em <<http://www.epa.gov/ttn/catc/products.html>>. Acessado em 13 de Junho de 2013.

- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) – Air pollution control technology fact sheet: Venturi Scrubber. 2003b (EPA-425/F-03-017). Disponível em <<http://www.epa.gov/ttn/catc/products.html>>. Acessado em 13 de Junho de 2013.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) – Air Quality Criteria for Particulate Matter, Volume I (EPA/600/p-99/002aF). Carolina do Norte, Estados Unidos, 2004a. Disponível em <<http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=87903>>. Acessado em 18 de julho de 2013.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) – Air Quality Criteria for Ozone and Related Photochemical Oxidants. Carolina do Norte, Estados Unidos, 2013 (EPA/600/R-10/076-F). Disponível em <<http://cfpub.epa.gov/ncea/isa/recordisplay.cfm?deid=247492>> Acessado em 19 de julho de 2013.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) – EPA Air Pollution Control Cost Manual. Carolina do Norte, Estados Unidos, 2002 (EPA/452/B-02-001).
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) – Integrated Science Assessment for Particulate Matter (EPA/600/R-08/139F). Carolina do Norte, Estados Unidos, 2009a. Disponível em <<http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=216546>>. Acessado em 18 de julho de 2013.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) – Integrated Science Assessment for Sulfur Oxides – Health Criteria. Carolina do Norte, Estados Unidos, 2008b (EPA/600/R-08/047F). Disponível em <<http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=198843>>. Acessado em 18 de julho de 2013.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) – Integrated Science Assessment for Oxides of Nitrogen and Sulfur – Ecological Criteria. Carolina do Norte, Estados Unidos, 2008c (EPA/600/R-08/082F). Disponível em <<http://www.epa.gov/ncea/isa/publications.htm>> Acessado em 18 de julho de 2013.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) – Integrated Science Assessment for Carbon Monoxide.

Carolina do Norte, Estados Unidos, 2010a (EPA/600/R-09/019F). Disponível em <<http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=218686>> Acessado em 18 de julho de 2013.

- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) – Integrated Science Assessment for Oxides of Nitrogen – Health Criteria. Carolina do Norte, Estados Unidos, 2008d (EPA/600/R-08/071). Disponível em <<http://www.epa.gov/ncea/isa/publications.htm>> Acessado em 21 de julho de 2013.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) - Latest Findings on National Air Quality – Status and Trends through 2006 (EPA-454/R-07-007). Carolina do Norte, Estados Unidos, 2008a. Disponível em <<http://www.epa.gov/airtrends/2007/>>. Acessado em 18 de julho de 2013.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) – Ozone and Your Health. Washington, Estados Unidos, 2009c (EPA-456/f-09-001). Disponível em <<http://www.epa.gov/airnow/ozone-c.pdf>>. Acessado em 20 de julho de 2013.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) – Particle Pollution and Your Health (EPA/452/F-03-001). Carolina do Norte, Estados Unidos, 2003c. Disponível em <http://cfpub.epa.gov/ols/catalog/catalog_display.cfm?&FIELD1=AUTHOR&INPUT1=Stone&TYPE1=ALL&item_count=28>. Acessado em 18 de julho de 2013.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) – Principles and Practices of Air Pollution Control – Student Manual. Carolina do Norte, Estados Unidos, 2003d.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA) – Risk and Exposure Assessment to Support the Review of the SO₂ Primary National Ambient Air Quality Standards : Final Report (EPA-452/R-09-007). Carolina do Norte, Estados Unidos, 2009b. Disponível em <<http://www.epa.gov/ttn/naaqs/standards/so2/data/200908SO2REAFinalReport.pdf>>. Acessado em 18 de julho de 2013.
- WEN, C. Y.; UCHIDA, S.; Absorption of SO₂ by Alkaline Solutions in Venturi Scrubber Systems, Universidade de West Virginia, Estados Unidos, 1973.