



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



WASHINGTON ERLY CONTATO

ANÁLISE TEÓRICA DE EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA
TRATAMENTO DE MATERIAIS PARTICULADOS

UBERLÂNDIA

2023

WASHINGTON ERLY CONTATO

ANÁLISE TEÓRICA DE EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA
TRATAMENTO DE MATERIAIS PARTICULADOS

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

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Roberto Duarte

UBERLÂNDIA

2023

WASHINGTON ERLY CONTATO

ANÁLISE TEÓRICA DE EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA
TRATAMENTO DE MATERIAIS PARTICULADOS

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado para
obtenção do título de Bacharel do Curso de
Engenharia Química da Universidade Federal de
Uberlândia Campus Santa Mônica.

Uberlândia, 29 de agosto de 2023

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Cláudio Roberto Duarte / FEQUI – UFU

Vinícius Pimenta Barbosa - Doutor em Engenharia Química

Gabriel Reis Simplício de Souza - Eng. Químico

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, expresso minha profunda gratidão a Deus, cujo apoio foi fundamental ao longo desta jornada. Aos meus queridos pais, Aparecida de Fátima Moreira e Donizete Aparecido Contato, sou imensamente grato por serem fontes inesgotáveis de carinho e amor. Donizete, em particular, sempre me incentivou a perseguir a excelência acadêmica e a buscar uma vida melhor por meio da educação.

Também gostaria de estender meus agradecimentos ao meu inspirador irmão, Welinton Andrey Contato, cujo comprometimento e dedicação aos estudos têm sido um farol na nossa família. Sua influência me levou a buscar minha própria felicidade e a me esforçar constantemente para me aprimorar, independentemente da área em que estivesse envolvido.

Aos amigos incríveis que fiz ao longo da minha vida, Ignácio, Gabriel, Kennedy, José, João, Luiz, Oscar, Luísa, Márcio, Lauana, Guilherme Castanheira, Guilherme Moura e Julia, meu sincero agradecimento pelo carinho e pela camaradagem que compartilhamos durante esse percurso. Seja nas noites de estudo intenso ou nos momentos de celebração, a presença de vocês foi um apoio inestimável. Agradeço por estarem ao meu lado em diversos momentos e por se esforçarem para manter nossa amizade viva.

Minha gratidão se estende também aos professores que não apenas transmitiram conhecimento, mas também desempenharam um papel crucial na minha transformação de estudante a engenheiro. Em particular, gostaria de agradecer ao Profº Dr. Cláudio Roberto Duarte, que orientou este trabalho e demonstrou dedicação e paixão pelo ensino. Também gostaria de expressar minha apreciação à Profª Dra. Érika Ohta Watanabe, cuja atuação como tutora no PET-EQ teve um impacto significativo em minha visão de mundo, ampliando meus horizontes para além da engenharia.

Por fim, não posso deixar de agradecer à minha amada esposa, Angélica Peres Pulli, que esteve ao meu lado em todos os momentos desta jornada. Ela foi minha namorada, noiva e agora esposa maravilhosa, fornecendo apoio inabalável mesmo diante das dificuldades. Sua constante motivação foi fundamental para que eu concluísse cada etapa deste ciclo.

Sumário

AGRADECIMENTOS	4
Resumo	6
Abstract	7
1 Introdução	10
2 Fundamentação Teórica.....	13
2.1 Equipamentos	16
2.2 Lavadores de Gases	16
2.3 Lavadores de Venturi	17
2.4 Lavador de Placas de Impacto.....	19
2.5 Precipitador Eletrostático	21
2.5.1 PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO SECO	23
2.5.2 PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO ÚMIDO	25
2.6 Filtro de Manga	26
2.6.1 Limpeza por agitação mecânica	28
2.6.2 Limpeza por fluxo reverso.....	28
2.6.3 Limpeza por jato de ar pulsante.....	28
2.6.4 Limpeza por jato de ar pulsante.....	30
2.7 Ciclones	32
3 Conclusões.....	35

Resumo

O estudo de poluentes, especialmente material particulado, ganhou destaque a partir do século XIX, com a preocupação inicial voltada para a fumaça resultante da queima de madeira e carvão. Poluições graves resultaram em mortes em cidades devido à geração excessiva de particulados durante a industrialização urbana desenfreada, agravada por inversões térmicas. Isso impulsionou a necessidade de desenvolver equipamentos de controle, como lavadores de gases, ciclones, precipitadores eletrostáticos entre outros, e regulamentações de emissões, levando ao avanço de tecnologias e estudos para mitigar esses poluentes. Este trabalho visa aprofundar o entendimento dos mecanismos de tratamento em equipamentos amplamente empregados para lidar com gases contendo material particulado e outros poluentes. Assim, pode ser utilizado como um guia rápido e acessível para explorar oportunidades futuras ou introdução ao campo desses equipamentos.

Palavras-chave: Material Particulado, Ciclones, Lavadores Venturi, Precipitador Eletrostático.

Abstract

The study of polluting, especially particulate matter, gained prominence from the 19th century onwards, with the initial concern focused on the smoke resulting from the burning of wood and coal. Severe pollution has resulted in deaths in cities due to excessive generation of particulates during rampant urban industrialization, exacerbated by thermal inversions. This boosted the need to develop control equipment, such as gas scrubbers, cyclones, electrostatic precipitators, among others, and emission regulations, leading to the advancement of technologies and studies to mitigate these pollutants. This work aims to deepen the understanding of treatment mechanisms in equipment widely used to deal with gases containing particulate matter and other pollutants. Thus, it can be used as a quick and accessible guide to explore future opportunities or introduction to the field of these devices.

Keywords: Particulate Matter, Cyclones, Venturi Scrubbers, Gas scrubbers, Electrostatic Precipitators.

Lista de Figuras

- Figura 1 - Total de Gases Emitidos por Setores Económicos em 2020
- Figura 2 - Classificação de faixas de tamanho de particulados
- Figura 3 - Equipamentos por faixa de seleção de partículas
- Figura 4 - Captura de Colisão
- Figura 5 - Captura por Difusão
- Figura 6 - Captura por Interceptação
- Figura 7 - Lavadores mais utilizados na indústria
- Figura 8 - Principal princípio de funcionamento de lavadores Venturi
- Figura 9 - Funcionamento de um Lavador de Bandejas
- Figura 10 - Processo de Remoção por Campo Elétrico
- Figura 11 - Sistema de Precipitador de Placas
- Figura 12 - Princípio básico de um Filtro de Mangas
- Figura 13 - Formação da Torta Filtrante
- Figura 14 - Limpeza por Agitação Mecânica
- Figura 15 - Limpeza por Fluxo de Ar Reverso
- Figura 16 - Limpeza por Jato Pulsante
- Figura 17 - Limpeza de Filtro Manga Múltiplos Tubos
- Figura 18 - Tipos de Disposição dos Filamentos
- Figura 19 - Tipos de Entrelaçamento
- Figura 20 - Fluxos Dentro de um Ciclone
- Figura 21 - Componentes de um ciclone
- Figura 22 - Multiciclone de Dois Estágios Tanque Leopard 2
- Figura 23 - Estrutura do Sistema de Filtração

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Principais poluentes atmosféricos, suas fontes, seus locais de ação no sistema respiratório e seus efeitos na saúde humana

Tabela 2 - Classificações de Poluentes

Tabela 3 – Dados para seleção de equipamentos

Tabela 4 - Áreas Industriais Comuns de Atuação do Precipitador Eletrostático

Tabela 5 - Classificação de Filamentos por tipo de características de processo

Tabela 6 - Classificação de Entrelaçamento por Características de Processo

Tabela 7 - Tipos de Fibras Utilizadas em Filtro Manga

1 Introdução

Ao longo dos anos, a sociedade tem buscado melhorias em diversas áreas, incluindo a redução de desperdício e poluição associados à produção global. Estudos realizados por Wang (2004) confirmam que, nos últimos 50 anos, houve um desejo crescente de adotar medidas para proteger e restaurar o meio ambiente, mitigando os efeitos prejudiciais da poluição, como resíduos sólidos, líquidos, sonoros e atmosféricos. Além disso, muitos consideram o conceito de "emissões zero" como irrealista. Diante disso, surgem três questões essenciais: (1) qual é a gravidade da poluição? (2) Existe tecnologia disponível para reduzi-la? e (3) Os custos de redução são justificáveis?

Exemplos extremos de poluição resultaram na morte de pessoas na Europa e nos Estados Unidos. Um desses casos ocorreu no Vale do Meuse, na Bélgica, entre as cidades de Huy e Liège, em 1930, onde havia uma concentração de diversas indústrias em uma estreita faixa de aproximadamente 20 quilômetros. Em dezembro daquele ano, 60 pessoas morreram em decorrência da dispersão dos poluentes produzidos por essas indústrias locais. Poucos anos depois, em outubro de 1948, em Donora, Pensilvânia, 20 pessoas morreram, ao invés das duas esperadas, devido à falta de dispersão dos poluentes locais provocada por uma inversão térmica, um fenômeno meteorológico que cria uma camada de ar frio acima da superfície, impedindo a dissipação dos poluentes. O pior episódio ocorreu em Londres, durante o inverno de 1952, quando uma inversão térmica impediu a dispersão de uma nuvem composta principalmente de material particulado e enxofre provenientes da indústria local e aquecedores que utilizavam carvão como combustível. Esse evento resultou na morte de mais de 4.000 pessoas, em média, durante aquele período (Braga, 2001).

Diante desses eventos trágicos, diversos países passaram a estabelecer normas e padrões de poluição. Na década de 1960, os Estados Unidos formularam padrões de qualidade do ar para controlar seis poluentes atmosféricos: material particulado total (PM), dióxido de enxofre (SO₂), dióxidos de nitrogênio (NO₂), ozônio (O₃) e chumbo (Pb). Além disso, foi criada a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), que recebeu autoridade em 1990 para estabelecer parâmetros e padrões para controlar as emissões dessas substâncias.

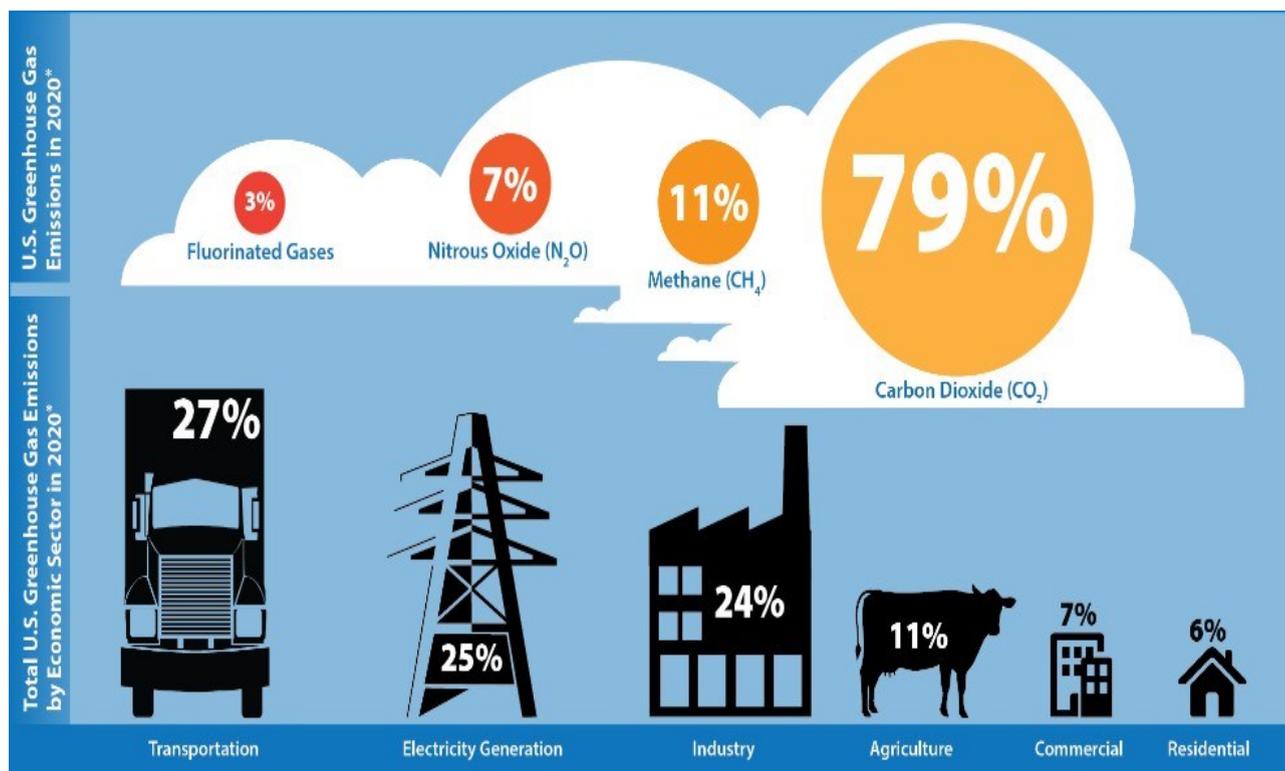
A EPA mantém um banco de dados que fornece informações sobre as emissões de gases de efeito estufa desde 1990, relacionando emissões e "sumidouros" (absorção desses gases por meios naturais) nos diversos setores econômicos dos Estados Unidos. Esses dados não apenas permitem manter um histórico das emissões, mas também auxiliam no estudo do impacto potencial desses poluentes e na análise das influências das ações globais nas emissões desses gases.

No entanto, é importante destacar que a preocupação com a poluição e os esforços para combatê-la não se limitam aos Estados Unidos. Países ao redor do mundo têm implementado legislações e medidas para reduzir a poluição e proteger o meio ambiente. O avanço científico e tecnológico tem sido fundamental nesse processo, permitindo o desenvolvimento de soluções mais eficientes e sustentáveis para mitigar os impactos da poluição.

Em resumo, a busca por melhorias sociais e ambientais tem impulsionado a necessidade de enfrentar os desafios relacionados à poluição. Desde a Revolução Industrial, quando a concentração de emissões aumentou, até os dias atuais, vários eventos trágicos têm evidenciado a gravidade desse problema. A criação de padrões de poluição, como nos Estados Unidos, e a coleta de dados sobre emissões têm contribuído para o monitoramento e controle dos poluentes. No entanto, é necessário continuar avançando em direção a soluções mais sustentáveis, promovendo a redução da poluição em todas as suas formas e garantindo um ambiente saudável para as gerações futuras.

A Figura 1 apresenta os principais gases liberados na atmosfera de forma antropogénica no ano de 2020, com destaque para o dióxido de carbono (CO₂), que é o gás mais emitido. Essa emissão é amplamente atribuída ao considerável impacto do setor de transporte. Em seguida, temos o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O) e os gases fluorados, que são compostos contendo flúor.

Figura 1 - Total de Gases Emitidos por Setores Económicos em 2020



Fonte: EPA, 2020

A emissão de gases de efeito estufa nos Estados Unidos apresentou uma redução de 11% entre 2019 e 2020, sendo atribuída principalmente à pandemia, que teve um impacto significativo no setor de transporte. Como resultado, as emissões de transporte foram reduzidas em 13% (EPA, 2020).

Além dos impactos ambientais e das causas de morte, a exposição a esses gases pode resultar em doenças crônicas, alterações fisiológicas e uma série de problemas de saúde para os seres humanos.

A Tabela 1 ilustra os impactos que os poluentes emitidos na atmosfera podem causar à saúde humana, bem como os locais específicos do corpo onde esses efeitos podem ocorrer em pessoas expostas.

É importante destacar que a exposição prolongada e repetida a esses poluentes pode levar a problemas de saúde crônicos e debilitantes, enfatizando a necessidade de adotar medidas para reduzir a emissão desses gases e proteger a saúde pública.

Tabela 1 - Principais poluentes atmosféricos, suas fontes, seus locais de ação no sistema respiratório e seus efeitos na saúde humana

Poluentes	Fonte	Penetração no sistema respiratório	Patologias
Partículas Suspensas Totais	Fontes antropogênicas: poeira das ruas; poeira da estrada; atividades agrícolas; e atividades de construção. Fontes naturais: sal marinho; pólen; esporos; fungos; e cinzas vulcânicas. Queima de combustíveis fósseis e biomassa; usinas termelétricas	Nariz e garganta	Prejudica a atividade mucociliar e macrófago. Causa irritação das vias aéreas. Induz estresse oxidativo e, conseqüentemente, inflamação pulmonar e sistêmica. A exposição crônica causa remodelamento brônquico e DPOC. Pode ser cancerígeno.
PM ₁₀		Traqueia, brônquios e bronquíolos	
PM _{2.5}		Alvéolos	
PM _{0.1}		Alvéolos, tecido pulmonar e corrente sanguínea	
O ₃	Não é emitido diretamente para a atmosfera. É produzido por reações químicas complexas entre compostos orgânicos voláteis (VOCs) e óxidos de nitrogênio (Nox) na presença da luz solar. A luz solar e a temperatura estimulam tais reações, de modo que, em dias quentes e ensolarados, as concentrações de O ₃ atingem o pico. As fontes de emissão de VOC e Nox são veículos, indústrias químicas, lavanderias e atividades que utilizam solventes.	Traqueia, brônquios, bronquíolos e alvéolos	É um oxidante fotoquímico extremamente irritante. Induz inflamação da mucosa do trato respiratório. Em altas concentrações, irrita os olhos, a mucosa nasal e a orofaringe. Causa tosse e desconforto torácico. A exposição por várias horas produz danos ao epitélio que reveste as vias aéreas. Induz inflamação e obstrução das vias aéreas na presença de estímulos como frio e exercícios.
NO _x ; NO ₂	Fontes antropogênicas: ácido nítrico; ácido sulfúrico; e indústrias de motores de combustão (principal fonte); queima de combustíveis em altas temperaturas, em usinas termelétricas que utilizam gás ou incineração. Fontes naturais: descargas elétricas na atmosfera.	Traqueia, brônquios, bronquíolos e alvéolos	Um irritante. Afeta a mucosa dos olhos, nariz, garganta e trato respiratório inferior. Aumenta a reatividade brônquica e aumenta a suscetibilidade a infecções e alérgenos. É considerado um bom marcador de poluição veicular
SO ₂	Fontes antropogênicas: refinarias de petróleo; veículos a diesel; fornos; metalurgia; e fabricação de papel. Fontes naturais: atividade vulcânica.	Vias aéreas superiores, traqueia, brônquios e bronquíolos	Um irritante. Afeta a mucosa dos olhos, nariz, garganta e trato respiratório. Causa tosse e aumenta a reatividade brônquica, facilitando a broncoconstrição.
CO	Fontes antropogênicas: incêndios florestais; combustão incompleta de combustíveis fósseis ou outros materiais orgânicos; e transporte rodoviário. Áreas urbanas com tráfego intenso são a principal fonte contribuinte de emissões de CO. Fontes naturais: erupções vulcânicas e decomposição da clorofila.	Alvéolos e corrente sanguínea	Liga-se à hemoglobina, interferindo no transporte de oxigênio. Causa dor de cabeça, náusea e tontura. Tem um efeito deletério sobre o feto. Está associado ao baixo peso ao nascer recém-nascidos e morte fetal.

Fonte: Adaptado de Kunzli et al. (2010)

O tratamento desses gases é essencial para a qualidade de vida da população que se encontra nas proximidades de indústrias e/ou locais com alta taxa de emissão.

Tabela 2 - Classificações de Poluentes

Compostos de Enxofre	Compostos de Nitrogênio	Compostos Orgânicos	Monóxido de Carbono	Compostos Halogenados	Metais Pesados	Material Particulado	Oxidantes Fotoquímicos
SO ₂	NO	hidrocarbonetos álcoois	CO	HCl	Pb	mistura de compostos no estado sólido ou líquido	O ₃
SO ₃	NO ₂	aldeídos		HF	Cd		Formaldeído
Compostos de Enxofre Reduzido:	NH ₃	cetonas		cloretos	As		Acroleína
(H ₂ S, Mercaptanas, Dissulfeto de carbono, etc)	HNO ₃	ácidos orgânicos		fluoretos	Ni		PAN
Sulfatos	nitratos				etc.		etc.

Fonte: CETESB

Ao longo do tempo, foram desenvolvidos equipamentos para o tratamento de gases efluentes da indústria, visando a captura de componentes mencionados anteriormente, bem como a recuperação de materiais que seriam descartados, reintegrando-os à cadeia produtiva. Esses avanços têm contribuído significativamente para a redução da poluição e o aproveitamento sustentável dos recursos.

O objetivo deste trabalho é aprofundar o estudo sobre os equipamentos utilizados no tratamento de gases efluentes, abrangendo tanto aqueles abordados durante o curso de graduação em engenharia química da UFU, quanto outros que não foram estudados durante o curso. Busca-se compreender as diversas variações desses equipamentos encontradas na literatura, a fim de avaliar e definir as possibilidades de utilização na prática. Além disso, pretende-se auxiliar na busca de equipamentos voltados para a redução da poluição ou recuperação de materiais que, caso não sejam adequadamente recuperados em um sistema apropriado, seriam descartados.

2 Fundamentação Teórica

A remoção ou coleta de sólidos aerodispersóides possui diversas finalidades importantes:

- Controle da poluição do ar: Um exemplo é a remoção de cinzas geradas em usinas, visando reduzir a emissão de partículas sólidas que podem prejudicar a qualidade do ar.
- Redução da manutenção de equipamentos: A filtragem de ar de admissão do motor é um exemplo desse tipo de aplicação, evitando a entrada de sólidos que podem causar desgaste e danos nos componentes.
- Eliminação de riscos à segurança ou à saúde: A coleta de poeiras siliciosas e metálicas ao redor de equipamentos de moagem e perfuração é um exemplo desse tipo de remoção, protegendo os trabalhadores de exposição a substâncias perigosas.
- Melhoria na qualidade de produtos: A limpeza do ar durante a produção de produtos farmacêuticos contribui para a garantia da pureza e qualidade desses produtos.
- Recuperação de produtos com alto valor agregado: A coleta de particulados de secadores e fundição permite a recuperação de materiais valiosos que podem ser reintegrados ao processo produtivo.
- Coleta de produtos em pó: Isso inclui aplicações como transporte pneumático,

secagem por spray dryer de leite, ovos, sabão, colágeno e gelatina, além da fabricação de óxido de zinco de alta pureza (Perry, 1997).

É de extrema importância conhecer o tipo de efluente, pois isso influenciará diretamente na seleção do equipamento adequado para o tratamento. Além disso, essa informação é crucial para efetuar a remoção dos poluentes de maneira eficiente. Também é necessário garantir que o equipamento esteja em condições adequadas de operação, levando em consideração as variações nas condições de temperatura, concentração e vazão que são específicas de cada tipo de processo.

Conhecer a faixa de tamanho dos particulados e gases presentes no efluente é um dos aspectos fundamentais para o dimensionamento e escolha dos equipamentos de tratamento de gases. Essa informação permite selecionar os dispositivos de coleta, filtragem ou separação mais apropriados para lidar com as partículas e gases presentes no efluente.

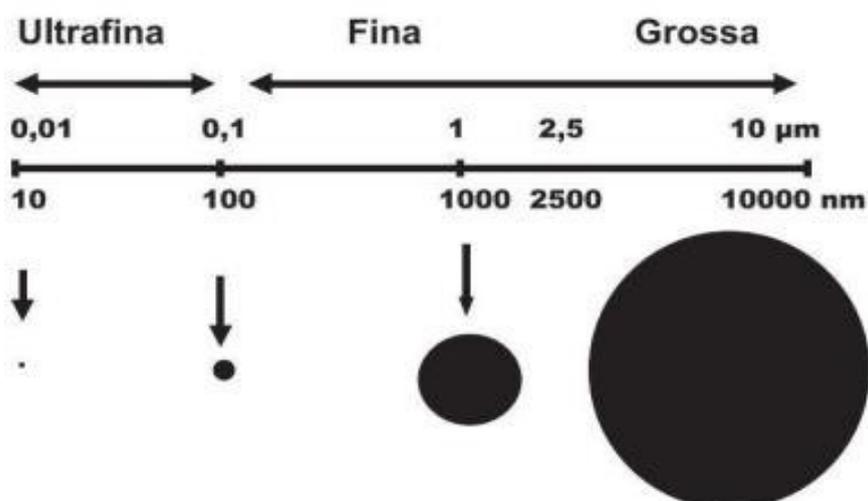
Portanto, a análise cuidadosa do efluente, considerando suas características físicas, químicas e particulares, é essencial para a adequada seleção e operação dos equipamentos de tratamento de gases, visando obter um processo eficiente e sustentável. Devido à necessidade de aprimorar o tratamento de gases, tanto para questões ambientais quanto para a recuperação de materiais que seriam perdidos devido descarte sem filtros ou separadores, a engenharia tem avançado gradualmente para ao buscar cada vez mais eficiência na remoção de partículas, inclusive na escala ultrafina, conforme ilustrado na Figura 2.

Essas partículas, de tamanho extremamente reduzido, apresentam desafios adicionais em termos de coleta e separação, devido à sua tendência de dispersão e dificuldade de serem capturadas por meios convencionais.

Os avanços tecnológicos na engenharia têm possibilitado o desenvolvimento de sistemas mais sofisticados e eficientes, como filtros de alta eficiência, precipitadores eletrostáticos aprimorados, ciclones otimizados e outros dispositivos de separação. Essas soluções visam garantir uma remoção efetiva das partículas ultrafinas, contribuindo para a redução da poluição atmosférica e possibilitando a recuperação de materiais valiosos.

A contínua evolução nessa área é impulsionada pela crescente conscientização sobre os impactos ambientais e o maior rigor dos órgãos de fiscalização e controle de poluição ambiental do estado.

Figura 2 - Classificação de faixas de tamanho de particulados



Fonte: Arbex et al, 2004

Alguns equipamentos se destacam como principais para separação gás-partícula, a Tabela 3 mostra os principais equipamentos utilizados e seu grau de limpeza para particulados.

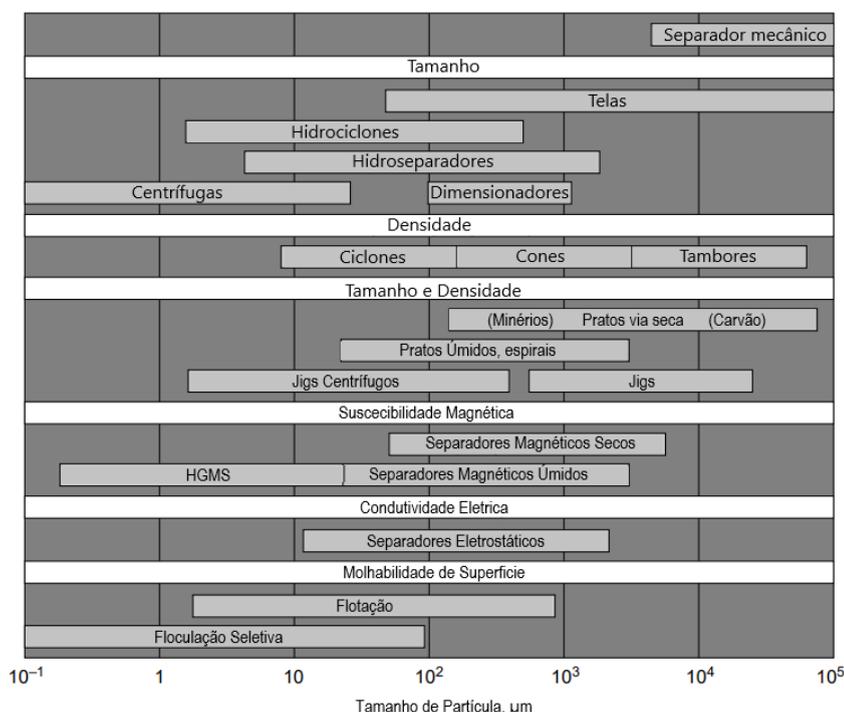
Tabela 3 – Dados para seleção de equipamentos

Equipamento	Dimensões das partículas (µm)	Queda de pressão (mm H ₂ O)	Grau de limpeza esperado	Eficiência global (%)
Ciclones	>10	25-75	80% em partículas < que 20 µm e mais de 95% para partículas > 50 µm.	85
Torres de nebulização	>3	50-175	98% em partículas > 5 µm e 50% para partículas < 3 µm	95
Lavadores Venturi	0,3-1,0	375-750	90-95% para partículas < 5 µm.	99
Filtros de mangas	0,5-1,0	25-250	95-99% para partículas < 5 µm.	99
Precipitadores eletrostáticos	>0,001	6 -12	De 80% até 99,9% para partículas < 5µm	99

Fonte: adaptado de LORA, 2002

Além dos dados apresentados na Tabela 3, que podem ser usados como referência preliminar para escolha do separador, é possível realizar uma pré-seleção através da Figura 3, que considera a faixa de tamanho das partículas a serem separadas/capturadas.

Figura 3 - Equipamentos por faixa de seleção de partículas



Fonte: Adaptado de Perry, 1997

No presente trabalho, serão detalhados alguns dos separadores destacados na

Figura 3. A seleção desses separadores baseou-se em sua maior incidência em processos industriais na região do Alto Paranaíba e Triângulo Mineiro.

A região do Alto Paranaíba e Triângulo Mineiro possui uma concentração significativa de atividades industriais, nas quais o tratamento de gases é uma preocupação importante. Portanto, é relevante analisar os separadores mais comumente utilizados nessa região.

A descrição detalhada desses separadores no presente trabalho permitirá uma compreensão mais aprofundada de suas características, funcionamento e aplicações específicas.

2.1 Equipamentos

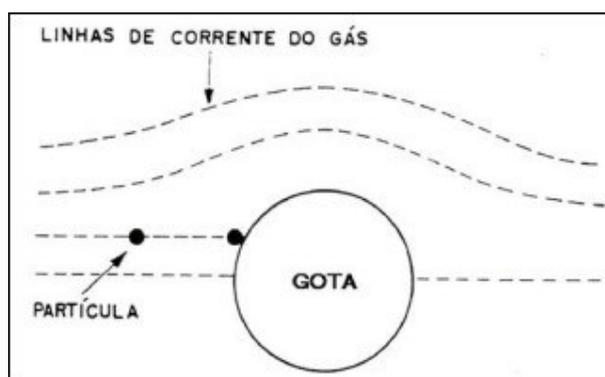
Dentro dos equipamentos presentes nesse trabalho se encontram os lavadores de gases que utilizam um meio aquoso para remoção de particulados, precipitadores eletrostáticos, onde a força eletromagnética atua sobre as partículas apenas para realizar a separação sólido/gás, filtros de manga onde a limpeza desses gases ocorre através de uma barreira física porosa onde as partículas ficarão retidas e por final os ciclones, que realiza essa separação através do aceleração desse gás por meio do seu corpo cônico.

2.2 Lavadores de Gases

Os lavadores de gases são equipamentos utilizados para remover impurezas e contaminantes de gases industriais antes de serem liberados na atmosfera. Eles são comumente usados em indústrias químicas, siderúrgicas, de papel e celulose, entre outras, para cumprir regulamentações ambientais e proteger a saúde pública.

O spray produz gotículas que atuam como os principais agentes na remoção dos gases. Os poluentes são removidos principalmente através da colisão por inércia, difusão, interceptação e/ou absorção do poluente em gotículas de líquido. O líquido contendo o poluente é então coletado para descarte. Na Figura 4 observamos o mecanismo de remoção por colisão inercial, no qual partículas dispersas em um fluxo gasoso encontram um obstáculo, e a inércia as impulsiona a abrir caminho através da corrente, embora algumas partículas colidam com o obstáculo.

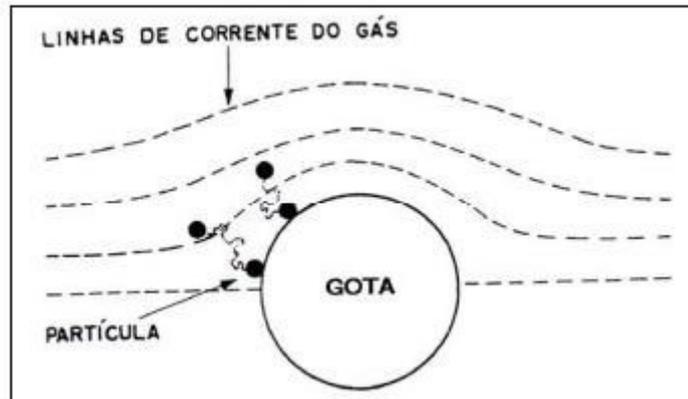
Figura 4 - Captura de Colisão



Fonte: Guerra, 2009

A Figura 5 mostra o efeito de difusão onde as partículas menores possuem um movimento browniano e não seguem as linhas de correntes de gás, tais partículas acabam sendo difundidas do gás para a superfície das gotas presentes no caminho. Ocorre principalmente com partículas de diâmetro menor a $0,3 \mu\text{m}$.

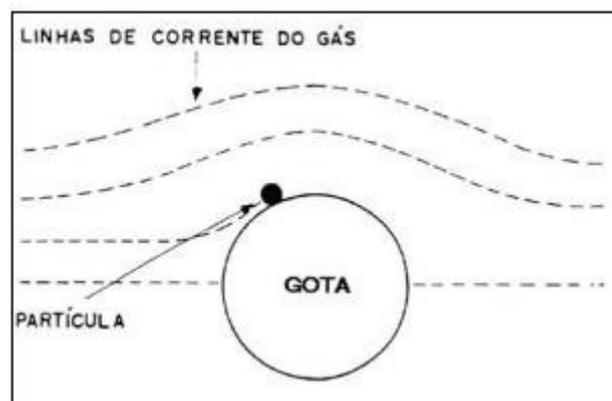
Figura 5 - Captura por Difusão



Fonte: Guerra, 2009

A interceptação é o fenômeno ilustrado na Figura 6, que ocorre quando uma partícula segue a trajetória do gás e se aproxima significativamente do corpo coletor, chegando a tocá-lo e, conseqüentemente, sendo removida do fluxo gasoso.

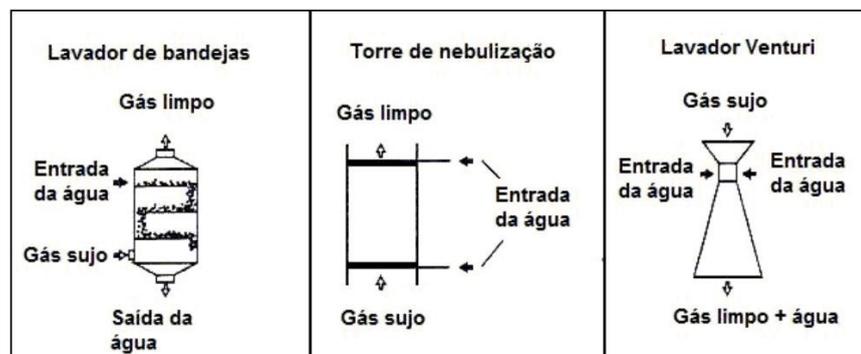
Figura 6 - Captura por Interceptação



Fonte: Guerra, 2009

Com base nos mecanismos citados acima os lavadores mais utilizados segundo (Lora, 2002) são os lavadores de bandeja, torre de nebulização e lavadores Venturi representados na Figura 7. Todos seguem o princípio de utilizar um líquido para limpeza do gás de entrada.

Figura 7 - Lavadores mais utilizados na indústria



Fonte: Adaptado de LORA, 2002

2.3 Lavadores de Venturi

O lavador Venturi é caracterizado por possuir três partes distintas: uma seção convergente, uma garganta e uma seção divergente. Cada uma dessas partes desempenha um papel fundamental no processo de remoção de impurezas e contaminantes dos gases.

A seção convergente do lavador tipo Venturi tem como objetivo reduzir a área por onde o gás sujo passa, resultando em um aumento na velocidade do fluxo. Esse aumento de velocidade é importante, pois favorece a colisão das partículas presentes no gás com as gotículas de líquido, promovendo a remoção eficiente dos poluentes.

Na garganta do lavador, geralmente é feita a injeção do líquido de limpeza, que pode ser água ou uma solução química apropriada. Esse líquido é disperso em forma de spray, gerando as gotículas que entrarão em contato com o gás e realizarão a captura dos poluentes.

Após a passagem pela garganta, o gás limpo e as gotículas contendo os poluentes seguem para a seção divergente do lavador. Nessa seção, ocorre a separação do gás limpo do líquido carregado com as impurezas. O gás limpo é direcionado para a saída do equipamento, enquanto o líquido é coletado para posterior tratamento ou descarte adequado.

Venturi são utilizados para controlar material particulado (PM), especialmente partículas com diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 10 e 2,5 micrômetros (PM_{10} e $PM_{2,5}$, respectivamente). Embora também possam controlar compostos orgânicos voláteis (VOC) de forma incidental, sua aplicação principal está voltada para o controle de PM e gases de alta solubilidade. Cheremisinoff (2002).

E mesmo dentro dos lavadores tipo Venturi existem variações geométricas, porém seu princípio de funcionamento segue o mesmo. Segundo Cheremisinoff (2002), à medida que o gás entra na seção de convergência a velocidade e turbulência do fluido aumentam, o que melhora o contato de gás-líquido necessário para a remoção dessas partículas análogo a Figura 8. O líquido além de ser injetado na garganta pode possuir outros pontos e sentidos em relação ao gás, podendo ser injetado na seção de convergência antes da entrada do gás na garganta, onde pode ser contra o fluxo ou apenas injetado naquele ponto para que a turbulência faça com que o líquido seja atomizado.

Figura 8 - Principal princípio de funcionamento de lavadores Venturi



Fonte: Autoria própria

O lavador Venturi possui algumas vantagens em relação a outros equipamentos conforme Cheremisinoff (2002), sendo elas:

- É compacto, ocupando pouco espaço na instalação industrial.
- De design simples e fácil de instalar;
- Possui alta eficiência na coleta de partículas na faixa respirável (0,5 a 5 μm).
- Pode-se reutilizar o líquido de lavagem.
- Pode remover ao mesmo tempo contaminantes particulados e gasosos.

- Pode coletar pós explosivos, inflamáveis, pegajosos e aderentes, pelo fato de operar com coletores líquidos.
- Manutenção relativamente baixa;
- Fornece resfriamento para gases quentes;

Algumas das desvantagens são:

- Consome muita energia possuindo assim, um elevado custo operacional.
- Devido à alta queda de pressão global desse tipo de lavador, surge a necessidade de sopradores mais potentes.
- Após a coleta do contaminante da fase gasosa surge o problema do destino final do efluente líquido sujo que algumas vezes não pode ser descartado sem tratamento.
- Alto potencial para problemas de corrosão dependendo do tipo de gás tratado;
- O MP coletado pode estar contaminado e não ser reciclável;
- O descarte de lodo residual pode ser muito caro.
- Resíduos recolhidos estão úmidos sendo necessário a secagem a depender do destino final;
- Proteção contra congelamento necessária em regiões onde a temperatura pode chegar abaixo do ponto de fusão da água;

Os lavadores Venturi apresentam eficiências de coleta de material particulado (PM) que variam de 70 a mais de 99 por cento, dependendo da aplicação. As maiores eficiências de coleta são geralmente alcançadas para PM com diâmetros aerodinâmicos entre 0,5 e 5 μm . Alguns lavadores Venturi têm gargantas ajustáveis para controlar a velocidade do fluxo de gás e a queda de pressão. No entanto, aumentar a eficiência do lavador Venturi requer aumentar a queda de pressão, o que, por sua vez, aumenta o consumo de energia.

Segundo Wang (2004) a utilização desse equipamento requer que a temperatura do fluxo de gás seja mantida de 10 a 38°C acima do ponto de orvalho do gás. Ajustar a temperatura do fluxo de gás terá impacto nas suas propriedades físicas. Os principais parâmetros de design incluem a taxa de fluxo de gás saturado, a taxa de fluxo nas condições reais, a distribuição de tamanho de partícula no gás poluído e o tamanho da garganta. Alterar a temperatura do gás afetará a taxa de fluxo saturado. Em alguns casos, a coleta mecânica de poeira pode ser necessária como pré-tratamento. Para projetar um lavador Venturi, três opções são consideradas: confiar em projetos anteriores semelhantes, realizar testes pilotos ou coletar dados empíricos sobre o fluxo de ar a ser tratado para utilizar curvas de desempenho publicadas para o sistema Venturi.

2.4 Lavador de Placas de Impacto

O lavador de placas possui o mesmo princípio dentro dos lavadores e quando aplicado para controlar gases inorgânicos, é chamada de "lavadores de gases ácidos", sendo seu uso específico para controlar o dióxido de enxofre (SO_2) denominada "dessulfurização de gás de combustão (FGD)". Essa tecnologia é amplamente utilizada para controlar diversos poluentes atmosféricos, incluindo material particulado (PM), como PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$, e poluentes atmosféricos perigosos (HAP) em forma de partículas. Além disso, pode tratar fumaças, vapores e gases inorgânicos, como ácido crômico, sulfeto de hidrogênio, amônia, cloretos, fluoretos e SO_2 , e em algumas situações, também pode controlar compostos orgânicos voláteis (VOC). (EPA, 2022)

Segundo Cheremisinoff (2002) algumas vantagens desse equipamento são:

- Pode lidar com poeiras inflamáveis e explosivas com pouco risco;

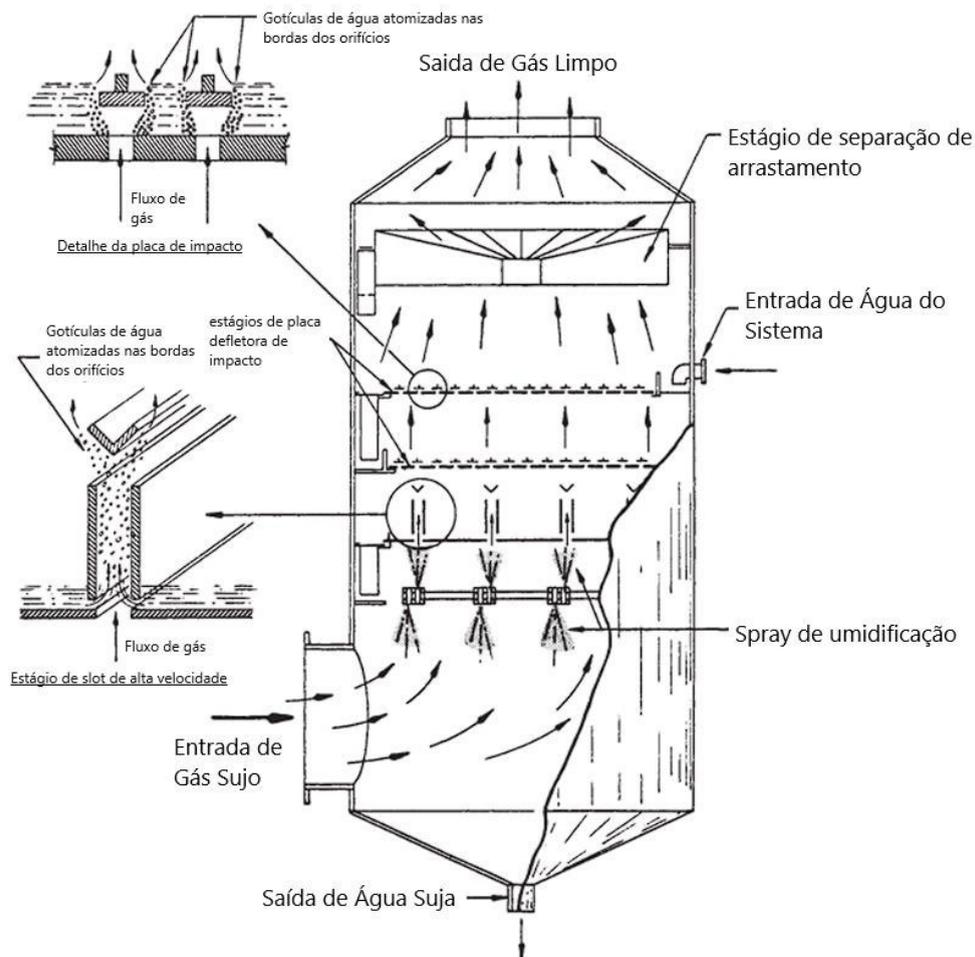
- Fornece absorção de gás e coleta de poeira em uma única unidade;
- Pode lidar com névoas;
- A eficiência da coleta pode ser variada;
- Fornece resfriamento para gases quentes;
- Gases e poeiras corrosivos podem ser neutralizados; e
- Melhora o contato gás-pasta para remoção de SO₂.

Sendo algumas desvantagens:

- O líquido efluente pode criar problemas de poluição da água;
- Resíduos recolhidos húmidos;
- Alto potencial para problemas de corrosão;
- Proteção contra congelamento necessária;
- O gás residual pode exigir reaquecimento para evitar vapor;
- O MP coletado pode estar contaminado e não ser reciclável;
- O descarte de lodo residual pode ser muito caro.

Essa tecnologia de coleta de poeira é muito similar aos dispositivos usados para absorção de gases. Ela é frequentemente utilizada quando é necessário remover tanto poeira quanto gases simultaneamente. A Figura 9 mostra o funcionamento de um lavador de bandejas junto com detalhes de diferentes placas que podem ser utilizadas.

Figura 9 - Funcionamento de um Lavador de Bandejas



Fonte: Adaptado de Perry, 1997

A placa defletora de impacto é comumente usada para coleta de poeira, onde as gotículas geradas a partir do líquido capturam as partículas, e não o impacto direto nos

defletores. O estágio de slot funciona como um lavador venturi em miniatura, e as bandejas de válvulas possuem múltiplos orifícios autoajustáveis que fornecem uma queda de pressão de gás quase constante em uma ampla faixa de variação no fluxo de gás. As torres de placa são mais propensas a entupimento e incrustação em comparação com os lavadores do tipo venturi. (Perry, 1997)

Segundo Cheremisinoff (2002) o líquido de lavagem flui através de cada placa e desce pelo interior da torre até a placa inferior. O líquido, juntamente com as partículas coletadas, é então escoado da parte inferior da torre. O lavador de placa de impacto é projetado para facilitar o acesso e a manutenção. Para contaminantes inorgânicos água é o solvente mais utilizado e para meios ácido um solvente cáustico pode ser utilizado. O limpador de placa de impacto, quando usado em sistemas FGD (Flue Gas Desulfurization - Dessulfurização de Gases de Combustão) o gás carregado com SO_2 entra na parte inferior da coluna e sobe através das perfurações nas bandejas. O solvente é geralmente uma solução alcalina, podendo ser calcário, hidróxido de cálcio ou uma mistura de calcário e cinzas alcalinas.

Em aplicações de controle de material particulado (PM) usando lavadores úmidos, o processo gera resíduos na forma de pasta, que precisa ser tratada para separar a água dos sólidos. A água tratada pode ser reutilizada ou descartada adequadamente, enquanto os resíduos sólidos podem ser aterrados ou, se forem valiosos, podem ser vendidos ou reciclados.

No caso de absorção de gases, o solvente utilizado para capturar os poluentes deve ser tratado para remover os contaminantes. Em algumas situações, o solvente tratado pode ser reciclado e reutilizado no sistema. No contexto da dessulfurização de gases de combustão (FGD), o gás residual carregado de SO_2 se combina com a pasta reagente, resultando em resíduos que podem ser descartados, reciclados ou transformados em produtos comerciais, como o gesso.

Embora a regeneração do reagente seja possível em alguns casos, ela é pouco utilizada devido aos altos custos de energia associados a esse processo. Portanto, a desidratação e descarte adequado dos resíduos sólidos são geralmente as etapas finais do tratamento dos resíduos provenientes dos lavadores úmidos de gases.

2.5 Precipitador Eletrostático

A precipitação eletrostática (ESP) é o uso de forças eletrostáticas para remover partículas sólidas carregadas ou gotículas líquidas suspensas em correntes de gás. É altamente popular e eficiente, segundo Cheremisinoff (2002), representando cerca de 95% dos controles de particulados em serviços públicos dos EUA. Existem dois tipos principais de precipitadores eletrostáticos: os precipitadores de placa e os precipitadores de tubo. As placas e tubos geralmente possuem polaridade positiva e os elétrodos têm polaridade negativa que carregam as partículas com uma descarga negativa para que sejam atraídos pelas placas com a polaridade oposta.

O precipitador se tornou um equipamento popular devido suas vantagens e eficiência, segundo Cheremisinoff (2002) as principais vantagens são:

- Alta eficiência de remoção de partículas/gotículas finas;
- Manuseio de grandes volumes de gás com baixa queda de pressão;
- Coleta de materiais em pó seco ou vapores/névoas úmidas;
- Sustentação de uma ampla faixa de temperatura de gás até aproximadamente 700°C ;
- Baixos custos operacionais, exceto em eficiências de remoção muito altas.

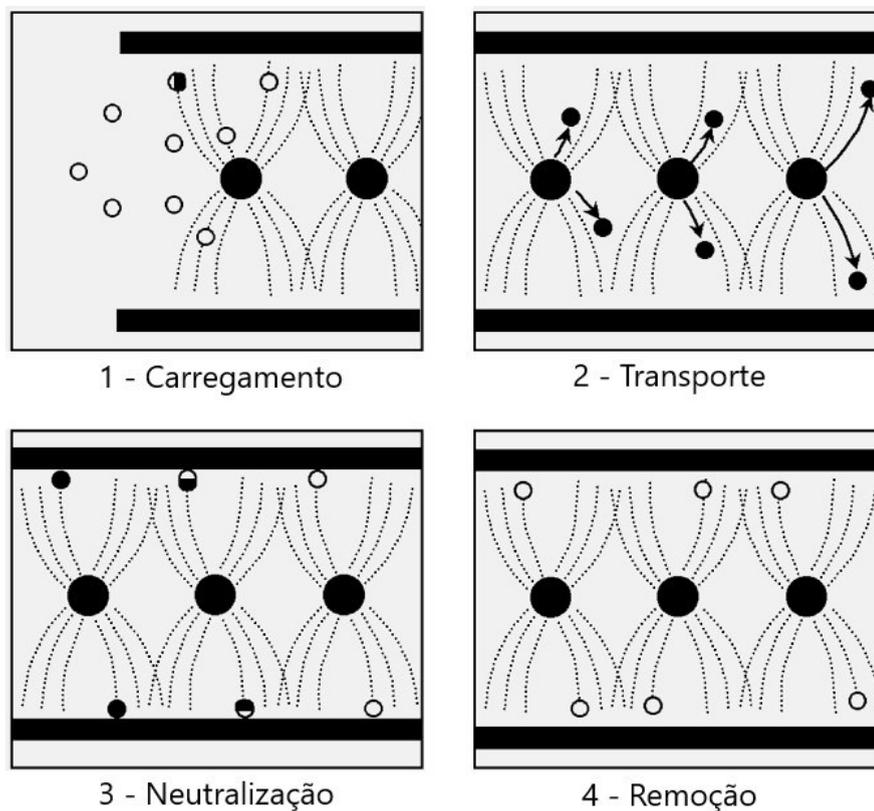
Porém algumas desvantagens que esse equipamento tem são:

- Custos de capital;

- Incapaz de coletar poluentes gasosos;
- Exigência de grande espaço;
- Inflexibilidade das condições operacionais;
- Variação da eficiência de remoção em casos de fluxo fora do dimensionamento.

Os precipitadores eletrostáticos são altamente eficientes e sofisticados em comparação com outros dispositivos de controle de partículas. Eles aplicam forças eletrostáticas diretamente nas partículas suspensas nos campos eletrostáticos, em vez de trabalhar em todo o fluxo de gás durante o processo de limpeza. O processo de precipitação envolve carregar, transportar, neutralizar e remover as partículas/gotículas, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Processo de Remoção por Campo Elétrico



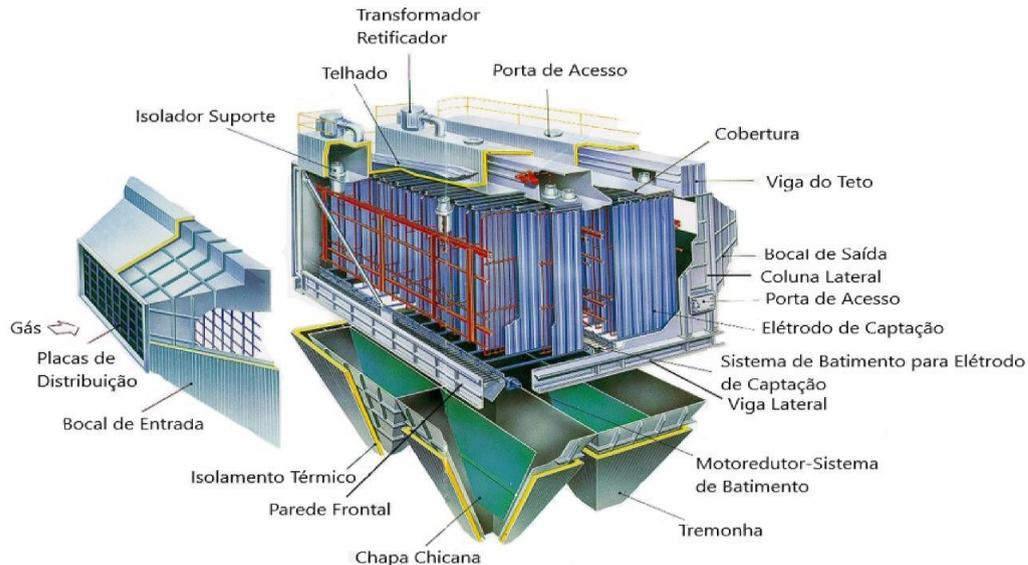
Fonte: Adaptado de Wang, 2004

O princípio de funcionamento do dispositivo segue os pontos abaixo:

1. Carregamento das partículas/gotículas ao passarem por um campo eletrostático ionizado.
2. Transporte das partículas/gotículas carregadas pela força eletrostática em direção às superfícies de eletrodos coletores, que possuem polaridade oposta e estão aterrados.
3. Neutralização das partículas/gotículas carregadas ao chegarem às superfícies dos eletrodos coletores.
4. Remoção das partículas/gotículas coletadas das superfícies dos eletrodos coletores através de batedores ou outros meios, direcionando-as para uma tremonha localizada sob o precipitador eletrostático.

A Figura 11 representa um modelo de precipitador e suas principais características.

Figura 11 - Sistema de Precipitador de Placas



Fonte: Adaptado de OZAWA, 2003

Nele é possível observar os eletrodos, de coleta, entrada do sistema entre outras partes da composição do equipamento. Os precipitadores eletrostáticos são dispositivos construídos em uma ou duas etapas. Os precipitadores de uma etapa combinam eletrodos de descarga e eletrodos coletores em uma única seção e podem ser de duas formas básicas: tipo superfície plana (também chamado de precipitador placa-fio), que possui várias placas paralelas aterradas servindo como eletrodos coletores, junto com uma série de fios paralelos de alta tensão montados em um plano entre cada par de placas; ou tipo cilindros, que consiste em um conjunto de cilindros ou tubos aterrados servindo como eletrodos coletores, e cada cilindro tem um fio coaxial de alta tensão que atua como eletrodo de descarga corona.

Segundo Wang (2004) no caso de precipitadores de uma etapa, a ionização e a coleta de partículas/gotículas são realizadas em uma única etapa, enquanto em precipitadores de duas etapas, a ionização é realizada na primeira etapa perto dos fios de descarga corona, seguida pela coleta das partículas na segunda etapa, onde um campo eletrostático move as partículas carregadas previamente para a superfície dos eletrodos coletores.

Um fluxo de gás contendo partículas ou gotículas suspensas é direcionado entre as placas paralelas ou através dos cilindros do precipitador. Ao aplicar uma diferença de potencial adequada entre os eletrodos de descarga e coletores, uma corona se forma ao redor dos fios de descarga, gerando íons positivos e negativos. As partículas ou gotículas em movimento pelo fluxo de gás atravessam o espaço entre os eletrodos, sendo intensamente bombardeadas pelos íons negativos e, assim, adquirindo uma alta carga elétrica em pouco tempo. Como resultado da diferença de potencial, as partículas ou gotículas carregadas são atraídas para os eletrodos coletores e, conseqüentemente, separadas do fluxo de gás. Partículas sólidas se acumulam na superfície dos coletores, enquanto gotículas líquidas formam um filme que goteja em um reservatório.

Os precipitadores de uma etapa são amplamente utilizados para limpar gases industriais contaminados, enquanto os de duas etapas são mais comuns em purificadores de ar internos domésticos e comerciais, especialmente quando se deseja evitar a geração de ozônio.

2.5.1 PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO SECO

O precipitador eletrostático a seco é altamente versátil e eficaz na remoção de partículas em diversas indústrias e processos. A Tabela 4 apresenta uma lista de setores industriais e operações onde esse equipamento pode ser utilizado com sucesso.

Tabela 4 - Áreas Industriais Comuns de Atuação do Precipitador Eletrostático

Classificação Industrial	Processo
Utilitários E Caldeiras A Combustível De Usinas Industriais	Carvão - Pulverizado Carvão - Ciclone Óleo Madeira - Casca Bagaço
Polpa E Papel	Caldeira De Recuperação Kraft Caldeira De Recuperação De Soda Forno De Cal
Produtos De Rochas	Cimento - Seco Cimento - Umido Gesso Alumina Calcário Bauxita Óxido De Magnésio
Aço	Conversor Para Oxigênio Básico Forno Martin Forno Elétrico Calcinação De Minério Forno De Cúpula Calcinação De Piritas Calcinação De Taconite Escoamento Térmico
Mineração E Metalúrgica	Torrador De Zinco Fundição De Zinco Torrador De Cobre Forno Reverberatório De Cobre Conversor De Cobre Aluminum-Hall Process Processo Alumínio-Soderberg Secador De Ilmenita Processo De Dióxido De Titânio Torrador De Molibdênio Beneficiamento De Minério
Diversos	Regenerador De Catalisador De Refinaria Incineradores Municipais Incineradores De Apartamentos Secagem Por Pulverização Refinaria De Metais Preciosos

Fonte: Adaptado de Cheremisinoff, 2002

Apesar dos exemplos mencionados acima, o precipitador eletrostático a seco não está restrito apenas a esses processos específicos e pode ser aplicado em outras aplicações industriais. No entanto, devido ao seu custo e complexidade, é importante realizar um cuidadoso projeto e seleção do sistema de controle antes de sua implementação.

Segundo Cheremisinoff (2002), para melhorar a eficiência do precipitador

eletrostático a seco (ESP), é possível utilizar coletores mecânicos, como ciclones ou resfriadores de spray, para reduzir a carga do ESP em situações com partículas maiores. Além disso, o uso de equipamentos de condicionamento de gás, como injeção de agentes como SO₂, H₂SO₄, compostos de sódio, amônia e água, pode aumentar a migração das partículas e melhorar a coleta pelo ESP. Essas medidas podem ser aplicadas tanto em projetos originais quanto em ESPs já existentes.

2.5.2 PRECIPITADOR ELETROSTÁTICO ÚMIDO

Os precipitadores eletrostáticos úmidos (ESPs úmidos) são empregados em situações em que os ESPs secos não são adequados, especialmente quando o material a ser coletado é úmido, pegajoso, inflamável, explosivo ou possui alta resistividade. O uso crescente de ESPs úmidos é impulsionado pela busca por maior eficiência de coleta. Eles são amplamente utilizados em diversas indústrias, incluindo têxtil, celulose e papel, metalurgia, incineração de resíduos perigosos e produção de ácido sulfúrico. Existem quatro tipos de precipitadores que empregam água em seu funcionamento (Cheremisinoff, 2002) sendo eles:

2.3.2.1 Precipitadores de placas paralelas de descarga intermitente:

O precipitador de placas paralelas de descarga intermitente é um equipamento construído em caixas cilíndricas ou quadradas, que utiliza pulverização intermitente para remover as partículas coletadas dos eletrodos. Os sprays são aplicados com cuidado para não afetar a intensidade do campo e são frequentemente usados em aplicações de alto-forno.

2.3.2.2 Precipitadores tipo tubo:

As unidades do tipo tubo são construídas em um invólucro cilíndrico com tubos coletores aninhados que atuam como eletrodos coletores. Os eletrodos de descarga são pendurados acima dos tubos coletores. A água é introduzida no invólucro e flui sobre os anéis de açude nivelados, lavando as paredes da coleção com uma fina película de água.

2.3.2.3 Precipitadores de dois estágios com descarga intermitente:

O precipitador de tubo úmido coleta partículas carregadas em um filme de água, neutraliza-as e drena-as na parte inferior. É comumente usado para escarificação, remoção de alcatrão e coleta de névoa de ácido sulfúrico. O precipitador de dois estágios é empregue quando baixa geração de ozônio é necessária, especialmente para limpar ventilação recirculada. As partículas são carregadas no primeiro campo e coletadas em um segundo estágio não corona. A descarga mecânica intermitente é usada para a limpeza.

2.3.2.4 Pulverização contínua, placas paralelas, precipitadores eletrostáticos úmidos:

O projeto de precipitadores eletrostáticos com pulverização contínua e placas paralelas utiliza sprays localizados acima do campo eletrostático para limpar as placas coletoras. As finas gotas de água depositam-se electrostaticamente nas superfícies coletoras, garantindo um umedecimento contínuo e uniforme, sem interromper a potência do campo eletrostático. Esse sistema é mais eficiente no controle da deposição de materiais e elimina problemas de acúmulo úmido/seco. Comparado a outros projetos, o precipitador úmido contínuo é mais versátil e adaptável, adequado para diversas aplicações.

2.5.3 Descarga Corona

O princípio de funcionamento do precipitador ocorre devido a corona direta de alta voltagem, é uma descarga de gás estável e constante entre um eletrodo de descarga e um eletrodo coletor. Quando a diferença de potencial entre esses eletrodos é elevada, o gás próximo ao eletrodo mais curvo se decompõe, criando uma região brilhante e ativa conhecida como corona. Os processos de ionização ocorrem nessa região de brilho ou em sua proximidade.

Na descarga corona, a maioria da ionização é causada por elétrons livres, que se unem às moléculas de gás, formando moléculas de gás ionizado. O tipo de corona formada depende da polaridade do eletrodo de descarga: com eletrodo positivo, íons negativos são acelerados em direção ao eletrodo, resultando em uma corona brilhante. Com eletrodo negativo, íons positivos são atraídos em direção ao eletrodo, e íons negativos são repelidos também gerando uma descarga corona.

É possível aplicar potencial positivo ou negativo ao eletrodo de descarga. O potencial negativo geralmente resulta em maior corrente a uma determinada tensão, e a tensão de ignição, que determina o limite máximo do potencial operacional do precipitador, também é geralmente mais alta. Além disso, a corona positiva tende a ser esporádica e instável. Em precipitadores industriais, utiliza-se geralmente a corona negativa, enquanto em precipitadores domésticos e comerciais, opta-se pela corona positiva devido a sua menor geração de ozônio.

2.6 Filtro de Manga

Filtros de mangas são compostos por uma série de mangas de tecido ou outro material filtrante que são presas em uma estrutura de suporte. Quando o gás ou o ar passa através das mangas, as partículas sólidas são retidas pelo material filtrante. Eles também são usados em sistemas de ar-condicionado e outros sistemas de ventilação para remover partículas do ar ambiente.

Existem vários tipos de filtros de manga, incluindo filtros de manga plana e filtros de manga dobrado. Cada tipo é mais adequado para determinadas aplicações e condições de processo.

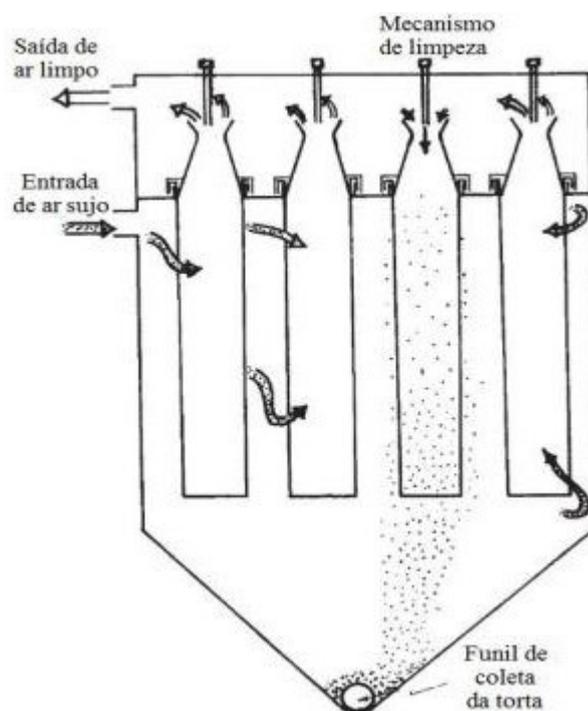
Os filtros de manga são eficientes na remoção de partículas finas e podem ser usados para remover uma ampla variedade de contaminantes. Este equipamento é utilizado para a captura de Material Particulado (PM), incluindo material particulado menor ou igual a 10 micrômetros.

Segundo Cheremisinoff (2002) os filtros de tecido têm um longo histórico de desempenho eficaz em uma ampla variedade de aplicações. Aplicações comuns usando sistemas de limpeza por jato de pulso incluem:

- Caldeiras de utilidade (carvão);
- Caldeiras Industriais (carvão, madeira);
- Caldeiras Comerciais/Institucionais (carvão, madeira);
- Fabricação de Asfalto;
- Moagem de Grãos;
- Processamento de metais ferrosos (por exemplo, produção de ferro e aço e fundições de aço);
- Produtos minerais (por exemplo, fabricação de cimento, limpeza de carvão e pedra);
- Extração e Processamento;

O princípio básico da filtração por filtro de manga se encontra na separação física dos sólidos por um meio filtrante onde sua composição e porosidade dependem do material a ser tratado, o mecanismo básico de operação é representado na Figura 12.

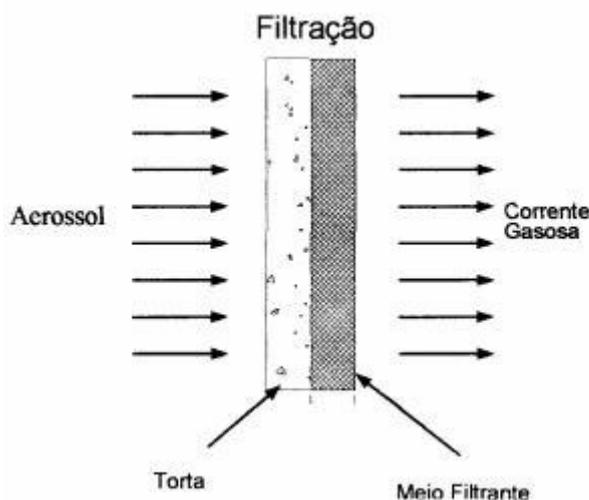
Figura 12 - Princípio básico de um Filtro de Mangas



Fonte: Adaptado de Wang, 2004

Os filtros podem ser utilizados em quase todos os tipos de processos que geram poeira e uma de suas principais características é a possibilidade de coletar o material e depositados em um local centralizado possibilitando a recuperação, a Figura 13 ilustra a formação da torta que acumula na superfície dos tecidos filtrantes.

Figura 13 - Formação da Torta Filtrante



Fonte: Rodrigues 2004

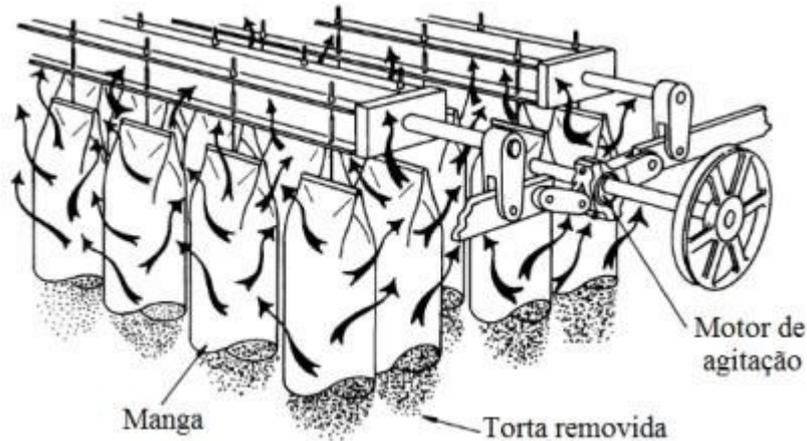
Os filtros geram uma torta que auxilia na filtração do gás a ser tratado, mas com aumento dessa torta a queda de pressão aumenta e é necessário realizar a limpeza.

Os filtros de mangas atuais possuem três classificações que se dividem pela forma de limpeza que operam, são elas limpeza por agitador, limpeza por fluxo reverso e limpeza por pulso reverso. O modo de classificação se encontra no modo de limpeza uma vez que o sistema de filtração é igual nos três.

2.6.1 Limpeza por agitação mecânica

Na Figura 14 amostra o sistema de limpeza por agitação mecânica em funcionamento, no qual os filtros estão conectados a sistemas de vibração e agitação. Durante o processo de limpeza, essa agitação desaloja as partículas acumuladas das superfícies internas dos filtros, fazendo com que caiam no compartimento de remoção de resíduos.

Figura 14 - Limpeza por Agitação Mecânica

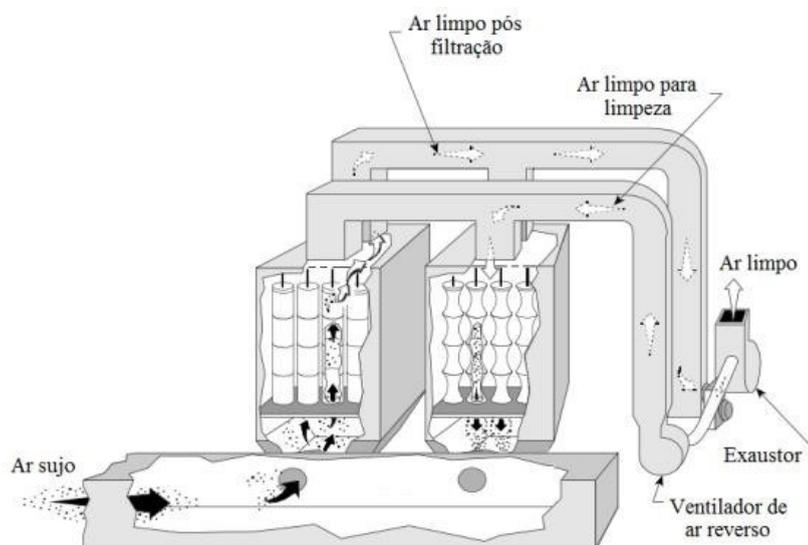


Fonte: Carvalho, 2018

2.6.2 Limpeza por fluxo reverso

O sistema de fluxo reverso, Figura 15, utiliza um fluxo de ar no sentido inverso ao fluxo de gás sujo para remoção das partículas presentes nos filtros. Nesse tipo de limpeza é necessária a entrada de ar limpo no topo do filtro manga, sendo no sentido de fluxo inverso, para que o ar limpo possa remover as partículas presentes no filtro.

Figura 15 - Limpeza por Fluxo de Ar Reverso



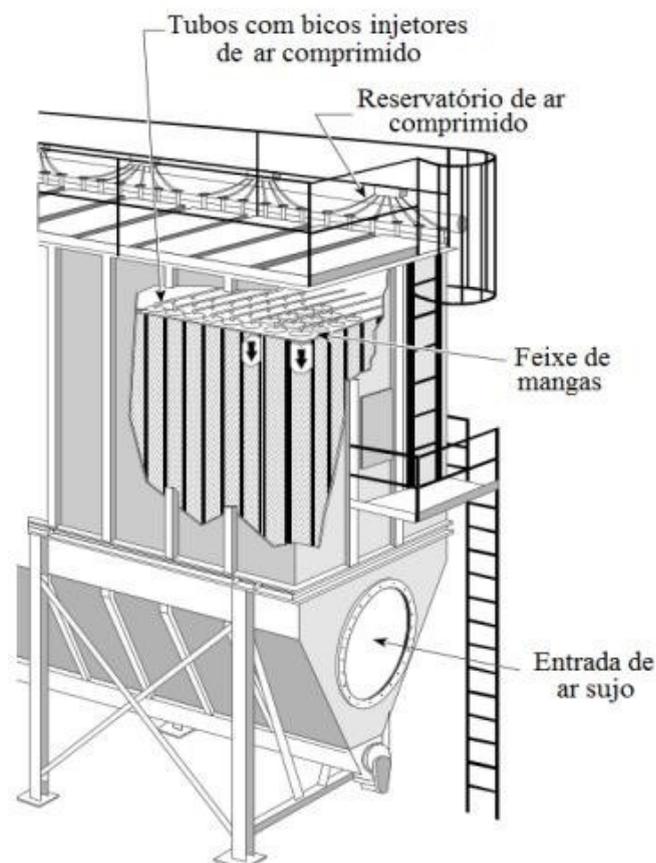
Fonte: Carvalho, 2018

2.6.3 Limpeza por jato de ar pulsante

E por último foi desenvolvido a limpeza por jato de ar pulsante uma vez que para as limpezas acima era necessário parar a filtração do ar para realizá-las. As limpezas que eram necessárias essas paradas foram denominadas off-line e o jato pulsante recebeu a denominação online pois como a velocidade de sua ação é muito curta pode ser utilizada

sem a necessidade dessas paradas, a Figura 16 ilustra essa ação.

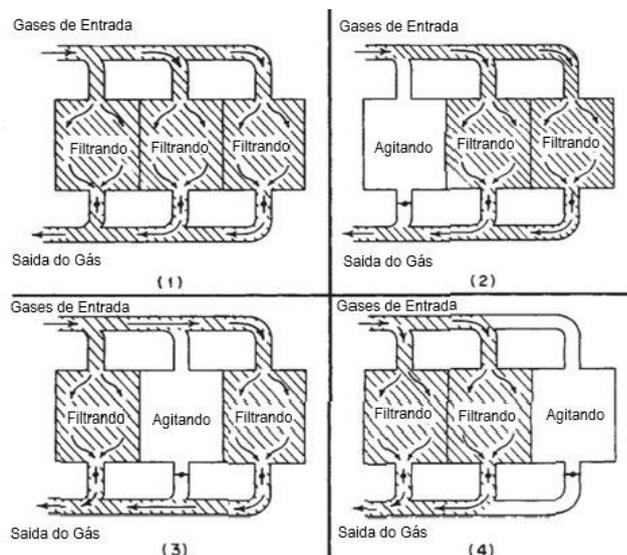
Figura 16 - Limpeza por Jato Pulsante



Fonte: Carvalho, 2018

Uma das principais vantagens dos filtros manga é a utilização de múltiplos tubos de forma que a limpeza possa ser executada individualmente enquanto o sistema continua operando, a Figura 17 mostra as etapas simplificadas em diferentes pontos onde é possível evitar paradas para limpeza. Dessa maneira, o equipamento não é totalmente parado em momentos de limpeza mesmo que o fluxo de gás tratado pode ser reduzido.

Figura 17 - Limpeza de Filtro Manga Múltiplos Tubos



Fonte: Adaptado de Perry, 1997

Além dos tipos de limpeza outra característica que se destaca no filtro de manga é

o tecido utilizado para as filtragens. Que podem influenciar diretamente em características operacionais sendo importantes na hora de selecioná-las.

2.6.4 Limpeza por jato de ar pulsante

Segundo (Carvalho, 2018), um meio filtrante deve possuir algumas características para que possa entrar como meio filtrante ideal de um sistema de tratamento:

- Resistência ao desgaste químico e mecânico;
- Alta eficiência de limpeza;
- Possuir resistência ao entupimento irreversível que causa o aumento da queda de pressão do sistema;
- Alta permeabilidade.

Dentro das características acima ainda pode-se classificar os meios filtrantes do filtro de manga entre tecidos e não tecidos *woven* e *nonwoven*.

Os tecidos *woven* são caracterizados por serem produzidos em forma de entrelaçamento de fios próximos a 90° sendo naturais (seda, algodão) ou sintéticos (fibra de vidro, polímero) e *nonwoven* são uma estrutura plana, porosa e flexível que possuem uma manta ou véu de filamentos e fibras que podem ser orientados ou não.

A disposição das fibras que compõem os meios filtrantes influencia a características do processo de filtração do filtro de manga. Essa influência pode afetar a vida útil, tendência de entupimento, baixa queda de pressão e remoção da torta formada ao longo do processo. A Tabela 5 retirada de Purchas (2002) mostra de que maneira pode-se selecionar o tipo de disposição conforme a característica desejada para o processo fornecendo a ordem de preferência entre os tipos de disposição.

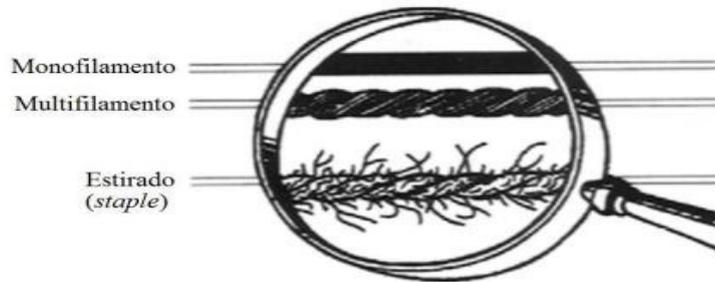
Tabela 5 - Classificação de Filamentos por tipo de características de processo

Característica desejável	1 ^a	2 ^a	3 ^a
Baixa queda de Pressão	Monofilamento	Multifilamento	Estirado
Fácil Remoção de Torta	Monofilamento	Multifilamento	Estirado
Máxima Vida Útil	Estirado	Multifilamento	Monofilamento
Tendência Mínima de Entupimento	Monofilamento	Multifilamento	Estirado

Fonte: Purchas, 2002.

A composição da trama do tecido de Monofilamento é constituído por um único fio contínuo, resultando em um tecido com superfície lisa e estrutura mais aberta, facilitando a limpeza e proporcionando maior durabilidade. O Multifilamento é composto por vários fios entrelaçados, com superfície texturizada, ideal para filtragens finas e captura eficiente de partículas menores, mas poder ser mais difícil de limpar e desgastar mais rapidamente. O Estirado é obtido a partir de fios multifilamentos esticados, com poros menores e uniformes, proporcionando uma filtração altamente eficiente, especialmente para partículas finas e microscópicas, adequado para aplicações que exigem alta retenção de partículas. Na Figura 18, pode ser observado as diferentes estruturas dos tecidos filtrantes com base nos tipos de filamentos utilizados.

Figura 18 - Tipos de Disposição dos Filamentos



Fonte: Adaptado de Purchas, 2002.

Juntamente com o filamento os entrelaçamentos dos fios caracterizam o processo de filtragem presente no filtro da manga, a Tabela 6 abaixo fornece uma ordem de preferência de escolha do tipo de entrelaçamento.

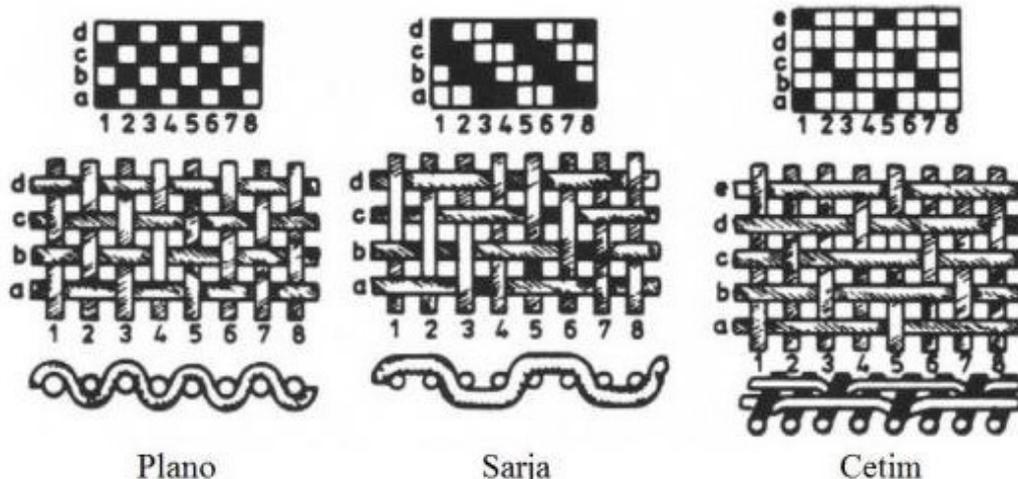
Tabela 6 - Classificação de Entrelaçamento por Características de Processo

Característica desejável	1ª	2ª	3ª
Baixa queda de Pressão	Cetim	Sarja	Plano
Fácil Remoção de Torta	Cetim	Sarja	Plano
Máxima Vida Útil	Sarja	Plano	Cetim
Tendência Mínima de Entupimento	Cetim	Sarja	Plano

Fonte: Carvalho, 2018

A diferença entre os modos Cetim, Sarja e Plano estão representados na Figura 19:

Figura 19 - Tipos de Entrelaçamento



Fonte: Adaptado de Purchas, 2002

Além do tipo de filamento e entrelaçamento, um ponto observado é o acabamento dado a malha de filtragem. Segundo Carvalho (2018) os principais tratamentos utilizados são termofixação (também chamada de calandragem), chamuscagem e recobrimento

com membrana que tem como objetivo manter estabilidade, modificar características superficiais e regular permeabilidade. A termofixação consiste em fundir um material na superfície da malha onde se obtém uma superfície lisa que facilita a remoção da torta após a filtragem. A chamuscagem tem como objetivo remover as felpas do tecido através de uma chama e possui o objeto da calandragem. E por último o recobrimento das fibras por uma membrana, sendo utilizado o Teflon (politetrafluoretileno) com objetivo de dificultar a penetração de partículas finas no meio filtrante.

Por último, deve ser considerado o tipo das fibras de acordo com as características envolvidas no processo de filtragem. A Tabela 7 mostra características de temperatura, resistência a abrasão, estabilidade química e custo relativo.

Tabela 7 - Tipos de Fibras Utilizadas em Filtro Manga

Fibras	Temperatura Máx (°C)		Resistência a Abrasão	Estabilidade Química					Custo Relativo
	Operação	Pico		Hidrólise	Ácido	Base	Solvente	Óxido	
Polipropileno	77	107	E	E	E	E	R	B	1
Acrílico	125	150	B	E	B	NR	E	B	2
Poliéster	132	140	E	NR	B	NR	E	B	1
Aramida (Nomex®)	204	240	E	R	NR	Base	E	R	4
PPS (Ryton®)	240	250	B	B	E	E	E	NR	5
Poliimida(P84®)	250	260	R	R	B	R	B	B	6
Fibra de Vidro	260	-	R	E	NR	R	-	E	3
PTFE (Teflon®)	260	290	B	E	E	E	E	E	7

E - Excelente; B - Bom; R - Regular, NR - não recomendado.

Fonte: Carvalho, 2018.

Deste modo, pode-se cobrir os principais pontos de importância no processo de filtragem de filtro de manga.

2.7 Ciclones

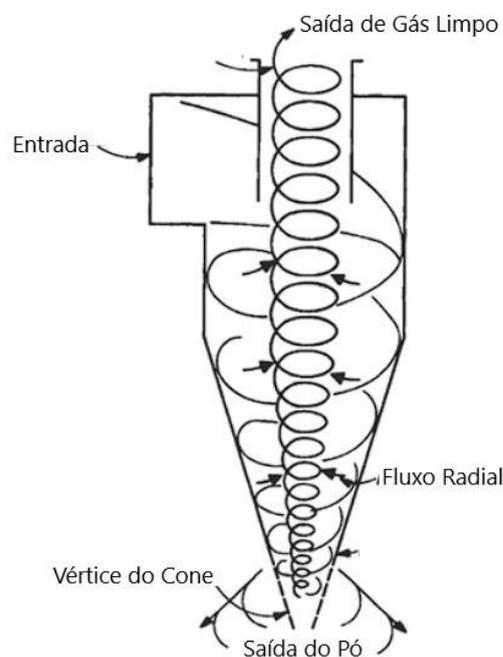
Os ciclones são amplamente utilizados em aplicações de tratamento de particulados, especialmente em processos industriais, como a remoção de partículas de poeira de gases de combustão em usinas de energia e a remoção de partículas de cinzas volantes em sistemas de queima de resíduos. Eles são eficientes na remoção de partículas de tamanhos médios e grandes, mas podem ter dificuldades para remover partículas muito finas.

Segundo Cooper e Alley (1986) e Perry (1997) os ciclones são o tipo de equipamento de coleta de poeira mais amplamente utilizado no qual o gás carregado de poeira entra tangencialmente em uma câmara cilíndrica ou cônica em um ou mais pontos e sai por uma abertura central. Os separadores de ciclone têm sido usados nos Estados Unidos há cerca de 100 anos e ainda estão entre os mais amplamente utilizados de todos

os dispositivos industriais de limpeza de gás. As principais razões para o uso generalizado de ciclones são que eles são de baixo custo, não possuem partes móveis e podem ser construídos para suportar condições operacionais adversas, a Figura 20 mostra o fluxo dentro de um ciclone e sua estrutura básica.

Mesmo possuindo um dos melhores custos de equipamentos, os ciclones possuem baixa eficiência para partículas menores que $5 \mu\text{m}$. Devido a essas características podem ser chamados de “pré-limpadores”, pois muitas vezes são utilizados para reduzir a carga de material particulado presentes para outros equipamentos que se encontram após o ciclone. Podem ser utilizados em sistemas paralelos, utilizando vários pequenos ciclones ou em série dependendo do objetivo e nesse modo são chamados de tudo múltiplo, multiciclone ou bateria de ciclones.

Figura 20 - Fluxos Dentro de um Ciclone



Fonte: Cheremisinoff, 2002

Embora possam ser usados para partículas acima de $200 \mu\text{m}$ existem outros equipamentos como câmaras de sedimentação por gravidade que podem ser utilizados no lugar para um pré-tratamento.

Segundo Cheremisinoff (2002), os ciclones possuem as vantagens listadas abaixo:

- Baixo custo de capital;
- Sem partes móveis, portanto, poucos requisitos de manutenção e baixos custos operacionais;
- Queda de pressão relativamente baixa (coluna de água de 2 a 6 polegadas), em comparação com a quantidade de PM removido;
- As limitações de temperatura e pressão dependem apenas dos materiais de construção;
- Remoção e eliminação a seco;
- Requisitos de espaço relativamente pequenos.

Porém possuem as seguintes desvantagens:

- Eficiências de coleta de PM relativamente baixas, particularmente para PM com menos de $10 \mu\text{m}$ de tamanho;
- Incapaz de lidar com materiais pegajosos ou com alta umidade devido a

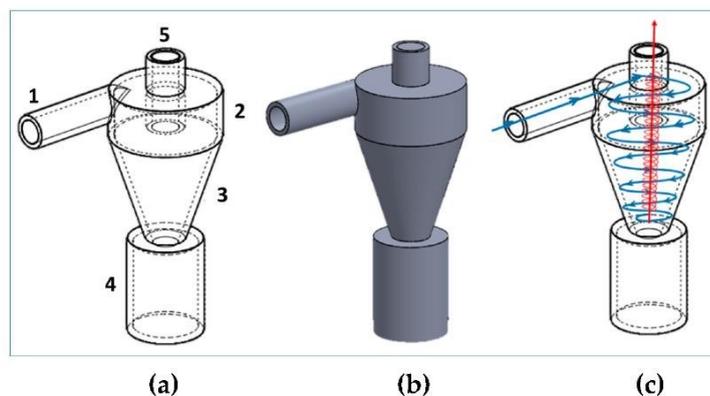
- entupimento;
- Unidades de alta eficiência podem sofrer altas quedas de pressão.

Os ciclones podem ser divididos em ciclones tangenciais, de alta eficiência e multivórtices.

Segundo Perry (1997), em alguns casos isolados em que a poeira é altamente floculada ou em altas concentrações os ciclones conseguem remover tamanhos de partículas pequenos. Em certos casos, eficiências tão altas quanto 98 por cento foram alcançadas em pós com tamanho final de partícula de 0,1 a 2,0 μm devido ao efeito predominante da floculação. Além de poderem ser operados com temperaturas próximas às 1000 $^{\circ}\text{C}$ e pressões de 500 atm.

Brar e Wasilewski (2023), separam os ciclones em três formas de visualização na Figura 21, pode-se observar os pontos principais de um ciclone (a) sendo (1) a entrada de ar com PM; (2) um corpo cilíndrico que permite o início do vórtice que é gerado dentro do ciclone; (3) um tronco de cone com determinado diâmetro e comprimento determina a eficiência do ciclone; (4) um recipiente de coleta de particulados e (5) um tubo de escape ou saída.

Figura 21 - Componentes de um ciclone



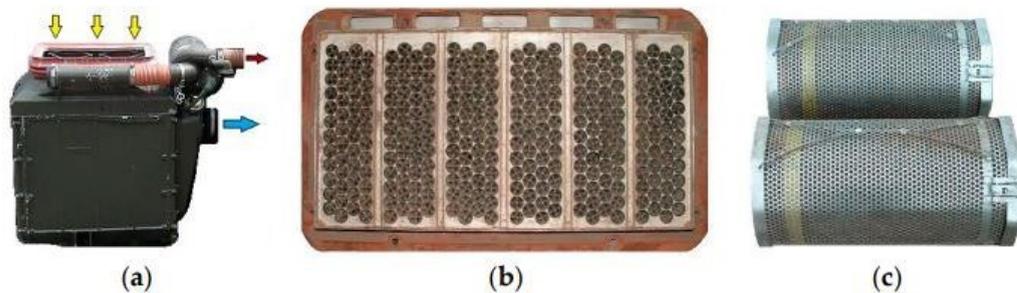
Fonte: BRAR and WASILEWSKI, 2023

Na remoção de poeira, a eficiência da coleta pode ser levemente alterada através de variações nas condições de operação. O diâmetro do ciclone é o principal fator de projeto que controla a eficiência de coleta, pois unidades menores operam com maior eficiência em uma queda de pressão fixa. No entanto, ciclones de menor diâmetro exigirão múltiplas unidades em paralelo para atingir uma capacidade específica. (Perry, 1997)

O estudo realizado por Dziubak (2012), apresenta o uso de um mult ciclone em tanque para a entrada de ar conforme a Figura 22. Essa escolha foi feita devido ao tamanho do equipamento, tornando o mult ciclone uma opção adequada e eficiente para atender às necessidades específicas do sistema.

Para veículos especiais (tanques, veículos blindados e veículos de combate) podem ser utilizados o sistema na Figura 22. (a) Visão do Filtro, (b) Entrada de ar dos mult ciclone e (c) cartucho de filtro.

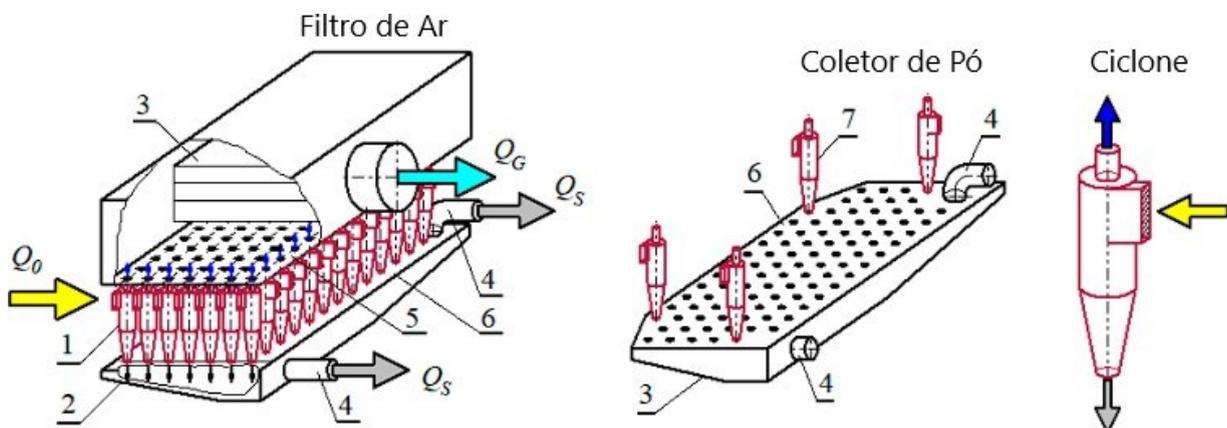
Figura 22 - Multiciclone de Dois Estágios Tanque Leopard 2



Fonte: DZIUBAK, 2012

Devido o fluxo de ar não constante e sua variação de particulados pode ocasionar na redução global da eficiência de remoção, a figura 23 mostra o sistema completo adaptado para esses veículos.

Figura 23 - Estrutura do Sistema de Filtração



Fonte: Adaptado de Dziubak, 2012

A figura 23 mostra como o sistema multiciclone é dividido. Sendo, (1) multiciclone, (2) coletor de pó, (3) cartucho filtrante, (4) dutos de sucção de pó, (5) placa superior de fixação dos ciclones, (6) placa inferior de fixação (coletor para cima por parede) de coletores, (7) Ciclone. Os multiciclones, por sua vez, atingem eficiência de coleta de 80% a 95% para partículas de 5 μm .

É importante destacar que esses equipamentos são mais adequados para o controle de emissão de fontes pontuais estacionárias. Nesse sentido, garantir um sistema contínuo de alimentação dentro do projeto é essencial para assegurar uma eficiência adequada do processo. Isso permite que o equipamento opere de forma consistente e eficaz na remoção das partículas, contribuindo para o cumprimento das regulamentações ambientais e a manutenção de um ambiente mais limpo e seguro.

3 Conclusões

Ao longo deste trabalho, ficou evidente a relevância do tratamento de gases na indústria para a proteção do meio ambiente e da saúde pública. Dentre as tecnologias analisadas, como ciclones, lavadores de gases, lavadores Venturi, precipitadores

eletrostáticos e filtros de mangas, percebe-se que cada uma possui suas particularidades e eficiências de coleta, tornando fundamental a escolha adequada para cada aplicação industrial.

A utilização correta desses sistemas é essencial para assegurar a remoção eficaz de contaminantes e o cumprimento das normas e regulamentos ambientais vigentes. Os ciclones são eficazes na remoção de partículas maiores, enquanto os lavadores de gases são ideais para coletar gases ácidos e poluentes solúveis em água. Já os lavadores Venturi se destacam na remoção de partículas menores, e os precipitadores eletrostáticos mostram-se altamente eficientes para coletar partículas finas em diversas indústrias. Por sua vez, os filtros de mangas são amplamente empregados para remover partículas finas em diferentes setores industriais.

No entanto, para otimizar o desempenho desses sistemas, é importante considerar fatores como tamanho e tipo de partículas, vazão de gases, temperatura de alimentação e a correta manutenção dos equipamentos. O uso adequado dessas tecnologias, aliado a um sistema de monitoramento e controle eficiente, é fundamental para garantir a qualidade do ar e reduzir o impacto ambiental das atividades industriais.

Assim, é imprescindível que as indústrias conduzam estudos detalhados, adotem projetos bem estruturados e sigam os padrões de operação e manutenção para assegurar a eficiência do tratamento de gases. Somente assim, poderemos contribuir efetivamente para a preservação do meio ambiente e garantir um futuro mais sustentável para as próximas gerações.

Referências

AGÊNCIA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DOS ESTADOS UNIDOS (EPA). EPA home page. Disponível em: <https://www.epa.gov/>. Acesso em: 15 maio 2023.

IARC WORKING GROUP ON THE EVALUATION OF CARCINOGENIC RISKS TO HUMANS et al. Some non-heterocyclic polycyclic aromatic hydrocarbons and some related exposures. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, v. 92, p. 1, 2010.

Arbex, Marcos Abdo, et al. "Queima de biomassa e efeitos sobre a saúde." *Jornal Brasileiro de Pneumologia* 30 (2004): 158-175.

BRAGA, Alfesio et al. Poluição atmosférica e saúde humana. *Revista USP*, n. 51, p. 58-71, 2001.

BRAR, Lakhbir Singh; WASILEWSKI, Marek. Investigating the effects of temperature on the performance of novel cyclone separators using large-eddy simulation. *Powder Technology*, v. 416, p. 118213, 2023.

Carvalho, Max Vinícius Aparecido de. "Avaliação de meios filtrantes para filtro de mangas com sistema de limpeza de jato de ar pulsante do processo de despoejamento secundário da aciaria de uma indústria siderúrgica." (2018).

Cheremisinoff, Nicholas P. *Handbook of Air Pollution Prevention and Control*. N&P Limited, USA, 2002.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB)[s.d.]. Poluentes atmosféricos. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>. Acesso em: 15 maio 2023.

Cooper, 1994. David Cooper and F. Alley, *Air Pollution Control: A Design Approach*, 2nd Edition, Waveland Press, Prospect Heights, IL, 1994.

DZIUBAK, Tadeusz. Experimental Studies of Dust Suction Irregularity from Multi-Cyclone Dust Collector of Two-Stage Air Filter. *Energies*, v. 14, n. 12, p. 3577, 2021.

EPA: Monitoring and Control Technique: Wet Scrubber - Particulate URL: <https://www.epa.gov/air-emissions-monitoring-knowledge-base/monitoring-control-technique-wet-scrubber-particulate-0>

GUERRA, Vádila Giovana. *Investigação do efeito de injeção de líquido por orifícios múltiplos na formação de gotas em um lavador Venturi*. 2009.

LORA, E. E. S. *Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte*. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência. 2002. p. 364.

OZAWA, Marcelo. *Determinação experimental da resistividade ôhmica de cinzas volantes para projeto de precipitadores eletrostáticos*. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PURCHAS, D. B. *Handbook of Filter Media*. 2. ed. Kidlington: Elsevier Science & Technology Books, 2002.

RH, Perry; GREEN, D. W. *Perry's chemical engineers' handbook*. McGraw-Hill, 1997.

Rodrigues, A. C. M.; "Estudo da formação e remoção de tortas de filtração de gases em filtros de tecidos de polipropileno e de algodão." 2004. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos. Disponível em: < <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/4060> >

WANG, Lawrence K. et al. (Ed.). *Air pollution control engineering*. Totowa, NJ: Humana press, 2004.