UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

SISTEMAS HÍBRIDOS DE FILTRAÇÃO E SUA APLICAÇÃO NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA

Letícia Vitareli de Souza

Trabalho de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos

Orientadora: Profª. Drª. Mônica Lopes Aguiar

São Carlos – SP
2020

BANCA EXAMINADORA

Orientadora: Mônica Lopes Aguiar,
Universidade Federal De São Carlos

Convidado: Bruno José Chiaramonte de Castro
Universidade Federal De São Carlos

Professora da Disciplina: Rosineide Gomes da Silva Cruz, DEQ/UFSCar

Trabalho de Graduação apresentado no dia 16 de dezembro de 2020 perante a seguinte banca examinadora:

Mônica Lopes Aguiar
UFSCar

Bruno José Chiaramonte de Castro
UFSCar

Rosineide Gomes da Silva Cruz
UFSCar

RESUMO

O consumo crescente dos seres humanos e a expansão dos centros urbanos são grandes responsáveis pelo aumento da poluição do ar. Essa poluição tende a prejudicar a qualidade de vida dos seres vivos, sendo nociva à saúde dos mesmos. Dessa forma, estudar metodologias para diminuir a poluição atmosférica mostra-se de grande valor para a saúde da sociedade. Um dos grandes causadores da poluição atmosférica é o processo industrial, que recebeu nas últimas décadas uma regulamentação e fiscalização mais rígidas por parte do governo. Na indústria sucroenergética, a queima de biomassa é uma grande fonte de gases e aerossóis contendo íons e compostos orgânicos. Esse aumento na liberação de fumaça e fuligem está associado à presença de componentes prejudiciais à saúde humana, como por exemplo, componentes cancerígenos e mutagênicos. Atualmente, são conhecidos diferentes equipamentos para remover as partículas poluidoras da corrente de descarte industrial na atmosfera. Entre esses equipamentos estão os ciclones, precipitadores eletrostáticos, filtros e lavadores de gás. Cada equipamento possui sua condição de operação e eficiência, podendo depender do meio em que é inserido com suas respectivas características, como temperatura, tamanho de partícula, composição da partícula e vazão. Para aumentar a competitividade comercial dos equipamentos, busca-se evoluir a durabilidade, consumo energético e eficiência dos mesmos. Nesse contexto, entram os filtros híbridos, que são a junção do princípio de dois ou mais equipamentos de separação gás-solido com objetivo de melhorar o processo de filtração de gases. Analisando os sistemas híbridos compostos pela união de precipitadores eletrostáticos e filtros de manga foi possível classificar três tipos de tais soluções: filtro energizado eletricamente, filtro eletrostático híbrido e precipitador eletrostático híbrido. Todas essas construções permitem aumento da eficiência de coleta de partículas menores que 2,5 μm (PM2.5) e diminuição da queda de pressão através do filtro de mangas. A maioria dos sistemas híbridos estudados foram projetados para a remoção de partículas dos gases de combustão em usinas a carvão e o presente estudo tem o objetivo de expor os princípios e configurações desses sistemas híbridos, assim como concentrar os pontos principais de estudos já realizados e propor a utilização desses sistemas na indústria sucroenergética.

ABSTRACT

The increasing consumption of human beings and the expansion of urban centers are largely responsible for the increase in air pollution. This pollution tends to harm the quality of life of living beings, being harmful to their health. Thus, studying methodologies to reduce air pollution is of great value to the health of society. One of the major causes of air pollution is the industrial process, which has received stricter regulation and oversight by the government in recent decades. In the sugar-alcohol industry, biomass burning is a major source of gases and aerosols containing ions and organic compounds. This increase in the release of smoke and soot is associated with the presence of components harmful to human health, such as carcinogenic and mutagenic components. Currently, different equipment is known to remove polluting particles from the industrial disposal current in the atmosphere. These equipments include cyclones, electrostatic precipitators, filters and gas washers. Each equipment has its operating condition and efficiency, and may depend on the medium in which it is inserted with its respective characteristics, such as temperature, particle size, particle composition and flow. To increase the commercial competitiveness of the equipment, it seeks to evolve the durability, energy consumption and efficiency of the same. In this context, there are the hybrid filters, which are the junction of the principle of two or more gas-solid separation equipment in order to improve the gas filtration process. Analyzing the hybrid systems composed by the union of electrostatic precipitators and bag filters, it was possible to classify three types of such solutions: electrically energized filter, hybrid electrostatic filter and hybrid electrostatic precipitator. All these constructions allow increased particle collection efficiency smaller than 2.5 μm (PM2.5) and decreased pressure drop through the bag filter. Most of the studied hybrid systems were designed for the removal of particles from combustion gases in coal-fired plants and the present study aims to expose the principles and configurations of these hybrid systems, as well as to concentrate the main points of studies already carried out and to propose the use of these systems in the sugar and alcohol industry.

SUMÁRIO

RESUMO ii

ABSTRACT iii

LISTA DE FIGURAS v

LISTA DE TABELAS E QUADROS vi

1. INTRODUÇÃO 1

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 3

2.1 Filtros de Manga 3

2.1.1 Princípio de funcionamento 3

2.1.2 Aplicabilidade 7

2.2 Precipitadores eletrostáticos 9

2.2.1 Princípio de Funcionamento 9

2.2.2 Aplicabilidade 12

2.3 Sistemas de separação gás-sólido híbridos 13

2.3.1 Filtros eletricamente energizados 14

2.3.2 Filtro eletrostático híbrido 17

2.3.3 Precipitador eletrostático híbrido 20

3. SISTEMAS HÍBRIDOS E A INDÚSTRIA DE CANA DE AÇÚCAR 23

3.1 Panorama da emissão de particulados na indústria sucroenergética 23

3.2 Caracterização das partículas 27

3.3 Proposta de projeto de sistema híbrido 29

4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES 33

5. REFERÊNCIAS 34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Gaiola para sustentação das mangas 4
Figura 2 – Funcionamento de um filtro de manga 4
Figura 3 - Mecanismos de captura de partículas por uma fibra 7
Figura 4 – Processo de separação de um precipitador eletrostático 10
Figura 5– Precipitador eletrostático tipo placa 11
Figura 6– Precipitador eletrostático tipo tubo 11
Figura 7 – Interior de um precipitador eletrostático de placas a seco 12
Figura 8 – Esquema de um filtro fibroso energizado eletricamente com placas planas 15
Figura 9 – Esquema de um filtro de manga com fios metálicos entrelaçados 16
Figura 10 – Esquema de um filtro eletrostático híbrido com pré-carregador de partículas e filtro de mangas 18
Figura 11 – Filtro de manga com carregamento de partícula e coleta integrado em um campo elétrico e de fluxo combinado 18
Figura 12 – Eficiência de coleta em relação à umidade relativa: filtragem de ar auxiliada por ionizador 19
Figura 13– Esquema do precipitador eletrostático híbrido com eletrodos de coleta perfurados combinados com o filtro de manga (vista superior) 21
Figura 14 – Principais etapas de produção de açúcar e etanol em uma usina convencional 24
Figura 15 – Principais elementos do circuito de vapor e gases de uma caldeira a biomassa 30
Figura 16 – Temperatura de saída dos gases nos elementos de troca térmica do circuito .. 32

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Características de fibras usadas em filtros de manga 5
Tabela 2– Padrões de qualidade do ar segundo o CONAMA 25
Tabela 3 – Concentração mássica média de PM2,5 e contribuições dos componentes 27
Tabela 4 – Composição química da cinza do bagaço de cana de açúcar por espectroscopia de fluorescência de raios-X 28
Tabela 5 – Composição química de cinzas de carvão 29

1. INTRODUÇÃO

A poluição do ar pode ser definida como a presença na atmosfera de um ou mais contaminantes, como poeira, fumos, gases, névoas, odores, fumaça ou vapores em quantidade, características e duração, prejudiciais ao ser humano, plantas ou propriedade. Os poluentes do ar são divididos em dois grupos principais: particulados e gases. Como as partículas consistem em sólidos ou material líquido, os poluentes do ar abrangem todas as três formas básicas da matéria. Poluentes gasosos incluem formas gasosas de enxofre e nitrogênio. (WANG; PEREIRA; HUNG, 2004).

A preocupação da sociedade em relação à poluição do ar decorre de uma combinação de vários fatores, estando entre eles a urbanização e a industrialização, que reuniram um grande número de pessoas em pequenas áreas, além da poluição gerada pelas pessoas ser mais frequentemente liberada em locais próximos a onde eles vivem e trabalham, o que resulta em sua exposição contínua a níveis relativamente altos de poluentes. Também há o fato da população humana ainda estar em crescimento. Assim, com a indústria em expansão, estilos de vida cada vez mais urbanizados e uma população crescente, a preocupação com o controle de poluentes atmosféricos causados pelo homem é claramente uma necessidade.

O Brasil é um país com intensa atividade agrícola e o setor sucroenergético possui vasta presença no interior de São Paulo. Estudos mostraram que, durante a época de colheita de cana de açúcar, a queima de biomassa é uma grande fonte de gases e aerossóis contendo íons e compostos orgânicos. (ALVES et al. 2016; BARBOSA et al. 2012; LEITE et al. 2018).

Décadas de pesquisas toxicológicas, clínicas e epidemiológicas demonstram associações significativas entre a exposição à poluição do ar ambiente e efeitos deletérios à saúde humana, incluindo doenças respiratórias, doenças cardiovasculares e morte prematura. (ANENBERG et al., 2016). Assim, a legislação vem demandando controles mais rigorosos no que se diz respeito aos padrões de qualidade do ar, estando os materiais particulados entre critérios de inspeção.

Há atualmente no mercado equipamentos desenvolvidos para o controle desses poluentes, sendo o ciclone, filtro de manga, precipitador eletrostático e lavador de gás os mais utilizados. (SILVA F. M., 2019). Na indústria sucroenergética, vem crescendo a prática de queima controlada de palha e bagaço de cana de açúcar para a cogeração de energia, entretanto, o equipamento mais utilizado para reter os poluentes atmosféricos continua sendo

o lavador de gases, um método que necessita de água limpa, que é cada vez mais valiosa em processos produtivos, e possui geração de água residuária. Dessa forma, o método de retenção de particulados na indústria sucroenergética deveria evoluir juntamente com o aumento da cogeração de energia nas mesmas, abrindo espaço para novos métodos e equipamentos.

Formas de otimizar esses equipamentos de retenção vem sido estudadas e uma dessas alternativas é a utilização de filtros híbridos. Os filtros híbridos são junção de dois ou mais equipamentos de separação gás-sólido com objetivo de melhorar o processo de filtração.

Estudos sobre a aplicação de forças eletrostáticas em sistemas de filtração vem demonstrando aumento na eficiência de coleta para os materiais particulados finos, abaixo de 2,5 micrômetros (PM2,5), podendo operar com baixa queda de pressão, aumentando a vida útil das mangas, além de reduzir os gastos com energia e manutenção dos equipamentos de filtração. (FREDERICK, 1980; JAWOREK et al., 2019; SILVA F. M., 2019; WANG, 2001).

De acordo com Jaworek et al. (2019) a implementação de precipitadores eletrostáticos híbridos vem crescendo no meio industrial e hoje em dia está sendo uma das opções com melhor custo-benefício para as empresas e para o meio ambiente.

Entretanto, há ainda um potencial não explorado dos sistemas híbridos de filtração e sua utilização acaba sendo muitas vezes restrita às usinas a carvão. Dessa forma, o presente estudo tem o objetivo de expor os princípios e configurações desses sistemas híbridos, assim como concentrar os pontos principais de estudos já realizados e propor a utilização desses sistemas na indústria sucroenergética.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordadas as principais características de equipamentos utilizados para purificação de gases industriais além de um estudo dos sistemas híbridos. A escolha do equipamento com capacidade de coletar efetivamente partículas submicrométricas com alta eficiência de grandes fluxos de gás (a partir de 50 m^3/s) tende a ser limitada aos filtros de tecidos e precipitadores eletrostáticos, como abordagens com melhor custo (PARKER, 1997).

Segundo Jaworek et al. (2019), precipitadores eletrostáticos e filtros fibrosos são os dispositivos de limpeza de gás mais comumente usados para a remoção de partículas submicrométricas e de nanopartículas em usinas de energia e na indústria. No entanto, a eficiência de coleta dos precipitadores eletrostáticos diminui para partículas menores que 1 µm. Os filtros fibrosos fornecem maior eficiência de filtragem para partículas desse tamanho, mas a queda de pressão é maior e é necessária energia adicional para alimentar o ventilador de saída.

Como alternativa para esses problemas, os sistemas híbridos combinam os princípios de dois ou mais dispositivos convencionais de limpeza a gás em um único dispositivo para remoção de partículas de uma corrente de gás.

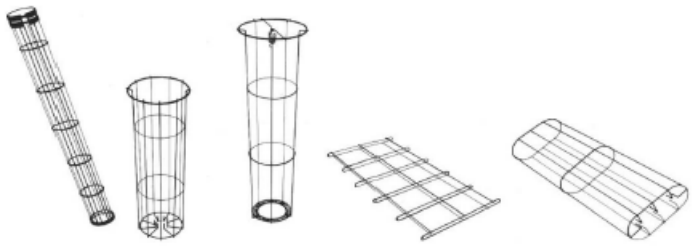
2.1 Filtros de Manga

2.1.1 Princípio de funcionamento

O principal princípio de funcionamento de filtros de manga (*baghouses*) consiste na passagem do ar contaminado por um conjunto de meios filtrantes constituídos de materiais naturais ou sintéticos denominados mangas. Dessa forma, o ar sai limpo para a atmosfera e o acúmulo do material particulado nas mangas forma as tortas, que passam a fazer parte do meio filtrante, afetando a porosidade. Após certo período de tempo, ou quando uma queda de pressão máxima é atingida no filtro devido ao acúmulo de particulados, ocorre a limpeza das mangas e a torta removida acumula-se na parte inferior da estrutura, onde é retirada.

As gaiolas sustentam as mangas de forma a deixar as mesmas esticadas e impedir a colisão entre elas, conforme são representadas na Figura 1.

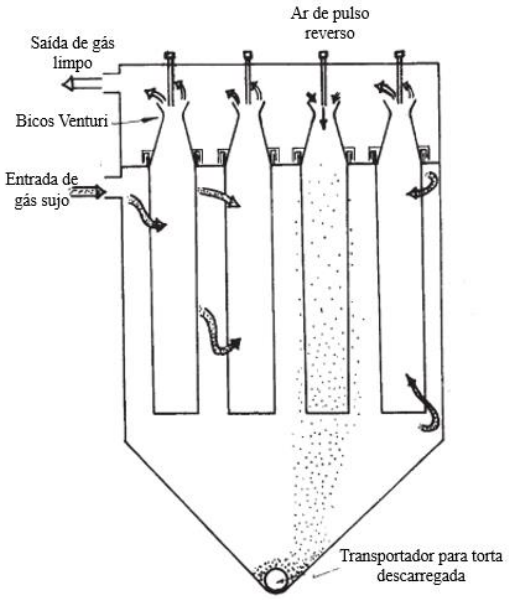
Figura 1- Gaiola para sustentação das mangas



Fonte: Adaptado de Mukhopadhyay (2009)

Os filtros podem ser classificados em cinco maneiras segundo Wang, Pereira e Wung (2004): de acordo com a energia requerida, o tipo de ciclo, o material filtrante empregado, o serviço e a aplicação. Em relação à energia requerida, os filtros podem ser classificados em alta energia ou baixa energia, dependendo se os filtros são operados a uma alta ou baixa queda de pressão. Sistemas de alta energia geralmente consistem em dispositivos de jato pulsante, enquanto sistemas de baixa energia utiliza agitação mecânica e fluxo reverso. Essa classificação também descreve o método de limpeza utilizado para remover as impurezas das mangas. No sistema de jato pulsante, rajadas de ar são sopradas em pulso no bico Venturi para liberar a impureza do tecido. Na Figura 2 está representado um esquema de funcionamento da manga para o sistema de limpeza por pulso de ar reverso.

Figura 2 – Funcionamento de um filtro de manga



Fonte: Adaptado de Wang; Pereira; Hung, 2004

O sistema de limpeza por agitação simplesmente implica em flexionar mecanicamente as mangas para limpá-las. Aplicações de fluxo reverso consistem em

introduzir ar em seções do sistema do filtro na direção oposta do escoamento de ar para remover as impurezas das mangas. Pode-se ter também casos em que nenhum sistema de limpeza é utilizado e se aplica a situações em que a manga é descartável. Os sistemas também podem ser categorizados como coletores contínuos ou intermitentes. Em um coletor contínuo, a limpeza é feita em partes, enquanto uma parte é limpa, a outra parte continua em operação, o que ocorre nos sistemas de limpeza de pulso de ar reverso. Nos coletores intermitentes, deve haver uma interrupção na vazão de gás enquanto o processo de limpeza ocorre, sendo o caso de sistemas de limpeza por vibração mecânica e por fluxo de ar reverso.

Os filtros também podem ser classificados de acordo com os materiais das mangas, que podem ser diferenciados em tecidos (*woven*) e não-tecidos (*nonwoven*). Tecnicamente, tecido é "uma estrutura produzida pelo entrelaçamento de um conjunto de fios de urdume e outro conjunto de fios de trama, formando ângulo de (ou próximo a) 90°." (ABINT, 1999). O não-tecido é definido como "uma estrutura plana, flexível e porosa, constituída de véu ou manta de fibras ou filamentos, orientados direcionalmente ou ao acaso, consolidados por processo mecânico (fricção) e/ou químico (adesão) e/ou térmico (coesão) e combinações destes" (ABINT, 1999).

Cada material da manga possui diferentes características e temperatura de operação. Diferentes materiais de filtro e suas características são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características de fibras usadas em filtros de manga

		Resistência[a]				
Tipo de fibra	Temperatura máxima de operação (°C)	Abrasão	Ácidos minerais	Ácidos orgânicos	Álcalis	Solvente
Algodão	82	MB	P	B	P	E
Lã	93	J/B	MB	MB	P/J	B
Modacrílico	71	J/B	E	E	E	E
Polipropileno	93	E	E	E	E	B
Poliamida em nylon	93	E	J	J	E	E
Acrílico	127	B	MB	B	MB	E
Poliéster	135	MB	B	B	G	E
Nylon aromático	191	E	J	B	E	E
Fluorocarbono	232	J/B	E	E	E	E
Fibra de vidro	260	J/B	B	B	B	E
Cerâmica (Nextel 312™)	482+	-	-	-	-	-

[a]P = resistência pobre; J = resistência justa; B = resistência boa; MB = resistência muito boa; E = resistência excelente

Fonte: Adaptado de Wang; Pereira; Hung, 2004

Uma quarta maneira pela qual os filtros de tecido podem ser classificados é pelo serviço. A remoção do particulado é o principal serviço executado pelos filtros de manga, no entanto, eles também podem ser usados para controle gasoso por adsorção física e química. Citando dois exemplos, a alumina sólida pode ser usada para adsorver cloro, e a amônia gasosa pode ser injetada para reagir com óxidos de enxofre para formar um sólido particulado, que pode ser filtrado. A quinta classificação dos filtros é por aplicação. Essas classes incluem temperatura, concentração de sólidos, tipo de poluição do gás de entrada, teor de umidade, aplicação de pressão, tamanho do filtro e eficiência do filtro. (WANG; PEREIRA; HUNG, 2004).

A taxa de escoamento de gás típica de um filtro de manga é de cerca de 10^3–10^4 m^3/h e o tipo de escoamento também está relacionado com o sistema de limpeza aplicado. O gás geralmente flui a partir do exterior para o interior da manga (sistemas de limpeza por pulso de ar reverso) ou, menos frequentemente, a partir do interior para o exterior (sistemas de limpeza por vibração mecânica e fluxo de ar reverso). A manga de tamanho normal tem tipicamente de 2,5 a 10 metros de comprimento e de 0,1 a 0,3 metros de diâmetro. (JAWOREK et al., 2019).

A carga de poeira é definida como a concentração de sólidos na corrente de gás de entrada. À medida que a carga de poeira aumenta, a quantidade de torta aumenta para uma determinada vazão volumétrica de gás. Para manter a velocidade de aproximação de gás necessária e ser capaz de operar um filtro intermitente por um tempo de ciclo razoável, pode ser desejável reduzir a carga de poeira na entrada. Um método para fazer isso é instalar dispositivos de coleta mecânica na frente do filtro de manga para remover sólidos de grande diâmetro. A introdução de ar como diluente pode reduzir a carga de poeira, no entanto, esse processo é usado com mais frequência para reduzir a temperatura de entrada ou umidade do gás (WANG; PEREIRA; HUNG, 2004).

Em correntes gasosas há diferentes mecanismos que proporcionam a retenção das partículas nas fibras. De acordo com Hinds (1982, apud CARVALHO, 2018) tais mecanismos são:

• Impactação inercial: ocorre quando o momento da partícula é suficientemente alto para se separar das linhas de fluxo e colidir com a fibra;

• Interceptação direta: a partícula não apresenta momento alto para se separar das linhas de fluxo, mas está suficientemente próxima da fibra, na qual colide e é coletada;

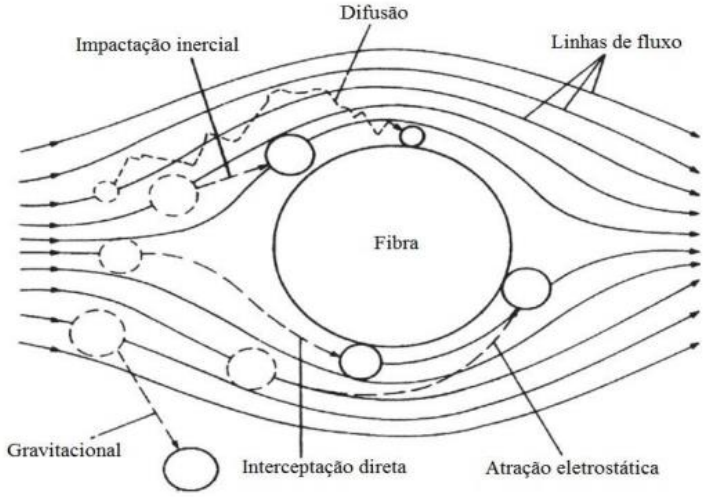
• Difusão: baseada no movimento Browniano, sendo aplicada para partículas pequenas com diâmetro menor que 0,5 μm. Seu movimento aleatório causa a separação da

linha de fluxo e possível coleta pela fibra. Quanto menor a partícula, mais intenso é o movimento Browniano e mais provável é sua captura;

• Atração eletrostática: causada por cargas eletrostáticas na partícula e na fibra, com consequente atração e captura;

• Gravitacional: devido à força da gravidade, a partícula alterna de linha de fluxo e é capturada pela fibra. Geralmente é desprezível, exceto no caso de uma partícula grande escoar por um fluido lento.

Figura 3 - Mecanismos de captura de partículas por uma fibra.



Fonte: Adaptado de Donovan (1985)

Em geral, a inércia das partículas contribui mais para partículas maiores que 1 μm, enquanto o movimento browniano causado por forças térmicas desempenha um papel maior para partículas menores que 0,1 μm. (WANG, 2001). Para partículas submicrônicas, na faixa de tamanho de 100 nm a 1 μm, tanto a inércia das partículas quanto o movimento térmico são relativamente fracas e, semelhante aos precipitadores eletrostáticos, a eficiência da filtração dos filtros fibrosos é mínima para partículas dentro dessa faixa de tamanho. (JAWOREK et al., 2019). Vale ressaltar que essa afirmação se aplica a filtros com mangas de materiais comuns, que requerem menores investimentos quando comparadas às mangas especiais.

2.1.2 Aplicabilidade

Os filtros de manga são extremamente eficientes na remoção de sólidos e operam próximo de 100% de eficiência (WANG; PEREIRA; HUNG, 2004). A eficiência dos filtros de manga depende do tamanho da partícula, velocidade do gás, temperatura, umidade

relativa, material e diâmetro da fibra, espessura do filtro, densidade de empacotamento e propriedades da superfície da partícula e da fibra (WANG, 2001).

A eletrostática é conhecida por afetar a eficiência. Partículas, tecidos e gás podem ser influenciados eletrostaticamente e uma combinação adequada pode melhorar significativamente a eficiência. A torta de particulados também pode interferir na eficiência, sendo que quanto menores as partículas da base, menores são as partículas prováveis de transpassar o filtro e em menor quantidade (WANG; PEREIRA; HUNG, 2004).

É uma precaução eficaz operar filtros de manga em temperatura acima do ponto de orvalho pois se algumas poeiras molharem, elas podem entupir o filtro. Os métodos para manter o sistema acima do ponto de orvalho incluem aquecer o filtro ou o gás e usar gás de diluição quente e seco. (WANG; PEREIRA; HUNG, 2004)

O pó carregado no gás filtrado pode variar entre 1 g/m^3 e 1000 g/m^3. A carga no filtro, na qual é necessária a regeneração do filtro, está entre 100 e 200 g/m^2. A vida útil dos filtros de mangas convencionais está entre 3 e 5 anos. A manga é substituída quando a torta de poeira residual após a regeneração do filtro é muito grossa e difícil de remover, causando uma alta queda de pressão. (JAWOREK et al., 2019).

Podem ser pontuadas as seguintes vantagens do filtro de manga quando comparado a outros equipamentos de controle de particulados.

- Alta eficiência de coleta para partículas grandes e pequenas;
- Pode ser compartimentado para se evitar interrupções na operação devido à manutenção;
- Pouco sensível às flutuações dos parâmetros operacionais, como temperatura, volume do gás e carga de partículas;
- Filtragem do tecido é bem-sucedida mesmo sob temperaturas muito altas e sob diferentes condições químicas, basta usar tecidos de filtro resistentes ao calor;
- O desempenho do filtro de manga é mais eficaz comparado aos precipitadores eletrostáticos quando a resistividade elétrica de partículas de poeira é muito alta;
- Custo de capital geralmente menor do que o precipitador eletrostático;
- Ocupa um espaço físico razoável.

Como desvantagens do filtro de manga pode-se citar:

- Baixos limites de temperatura de tecidos padrão;
- Alta perda de carga;

- Em certos casos, os filtros não são confiáveis na operação devido à sua sensibilidade ao ponto de orvalho;
- Alto custo de manutenção;
- Para certos tipos de poeira, como poeira abrasiva, partículas muito quentes, poeiras leves e macias, mistura de partículas sólidas e líquidas, partículas que causam risco de incêndio ou explosão, partículas com fortes forças de adesão, etc., é necessária maior atenção ao design do filtro e ao tipo de meio filtrante a ser utilizado.

Problemas operacionais podem ser minimizados ou evitados pelo projeto adequado do material do filtro, através da seleção dos parâmetros apropriados de operação e design adequado.

2.2 Precipitadores eletrostáticos

2.2.1 Princípio de Funcionamento

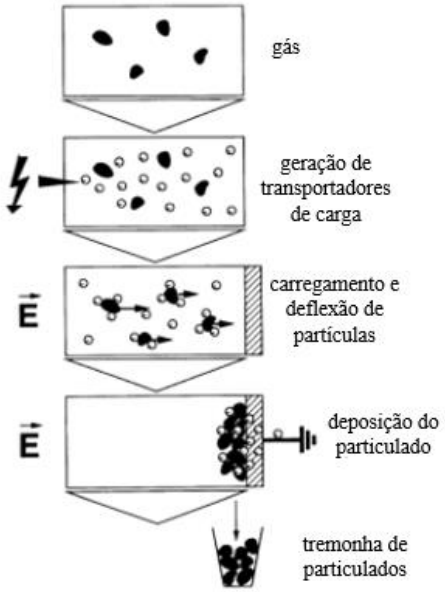
Comercialmente, precipitadores eletrostáticos têm sido usados por quase um século na coleta de partículas de poeira, fumaça e névoa de todos os tipos de processos. As aplicações iniciais, com base na indústria química e metalúrgica principalmente, eram para tanto reduzir a poluição do ar quanto para recuperar produtos valiosos. Mais recentemente, a maioria das aplicações têm sido no controle da poluição do ar para atender legislações específicas de emissões e, consequentemente, a eficiência agora se aproxima e às vezes excede 99,9% dependendo do tamanho da partícula e tipo do material particulado. (PARKER, 1997).

A teoria básica de operação consiste na passagem de uma alta corrente elétrica em um eletrodo gerando uma descarga corona, que ioniza o gás negativamente que por sua vez carrega eletricamente o material particulado que é atraído pela placa coletora de carga positiva. Assim, as partículas carregadas se movem através da corrente de gás do eletrodo negativo até serem depositadas no eletrodo positivo, o qual por conveniência é normalmente aterrado. Dos coletores, as partículas caem em tremonhas, tanto por procedimentos de batida mecânica em uma aplicação a seco ou por lavagem com água no caso de precipitadores úmidos. (TURNER, 1999).

De acordo com Parker (1997), o processo de separação pode ser dividido em 5 passos essenciais, como mostrados na Figua 4.

1) Geração de transportadores de cargas
2) Carregamento das partículas
3) Desvio e separação das partículas
4) Deposição da poeira
5) Remoção do particulado

Figura 4 – Processo de separação de um precipitador eletrostático



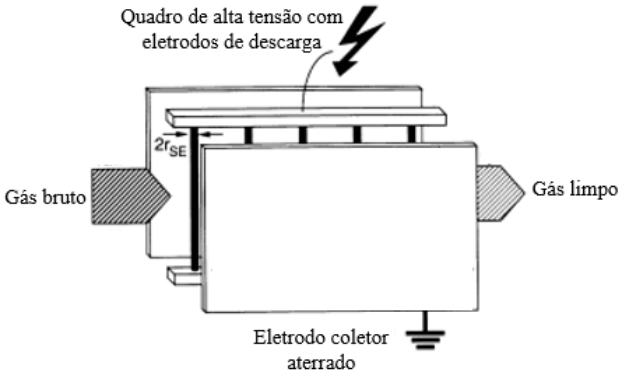
Fonte: Adaptado de Parker, 1997

Na maioria das aplicações os passos não são isolados como representado acima, mas eles podem ocorrer todos em uma seção operacional. Eles são chamados de precipitadores de estágio único, os quais são os mais importantes para processos industriais. Nos chamados precipitadores de dois estágios, os passos 1 e 2 são executados separadamente dos passos 3, 4 e 5 e no primeiro estágio os íons são produzidos e as partículas são carregadas enquanto no segundo estágio as partículas são coletadas e removidas. A configuração de dois estágios é somente utilizada em escalas pequenas, como por exemplo, em tecnologia de salas limpas (PARKER, 1997), ambiente no qual a limpeza do ar e outros parâmetros são controlados, sendo comum em laboratórios. Aqui será focado os precipitadores de único estágio devido à sua maior importância industrial.

Em precipitadores eletrostáticos de único estágio, existem dois principais modelos: tipo placa representado na Figura 5 e tipo tubo representado na Figura 6. Nos precipitadores tipo placa, uma fileira de fios de descarga (orientados ao longo do eixo gravitacional) são posicionados entre placas coletoras paralelas formando um duto. O pó é depositado nas

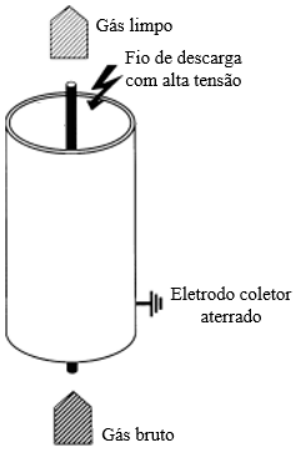
placas coletoras devido à forças elétricas e de Van der Waals. Os pratos são limpos e a camada de poeira cai nas tremonhas.

Figura 5– Precipitador eletrostático tipo placa



Fonte: Adaptado de Parker, 1997

Figura 6– Precipitador eletrostático tipo tubo



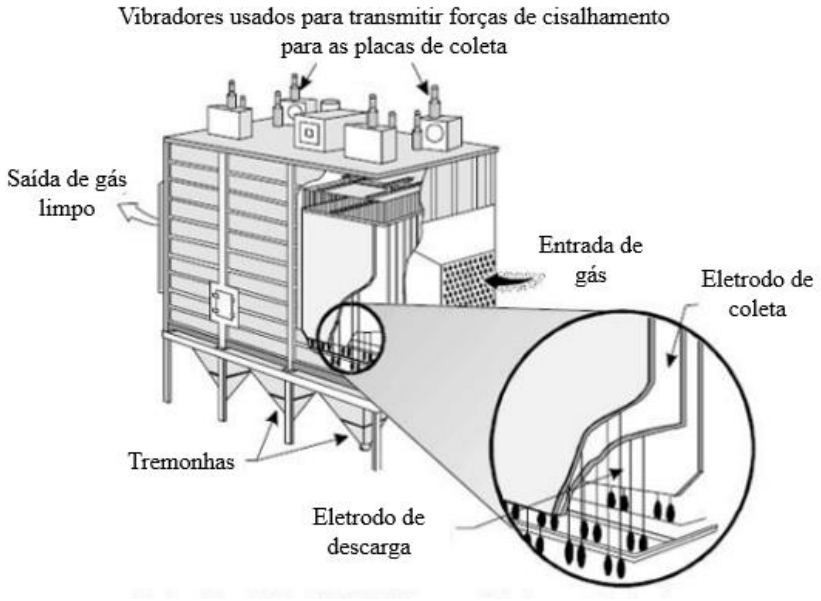
Fonte: Adaptado de Parker, 1997

Nos precipitadores industriais, o comprimento total da placa coletora é dividido em campos em série e paralelo. Um campo é caracterizado por uma fonte de alimentação independente. Portanto, os campos de um precipitador podem ser operados com diferentes condições elétricas, levando a diferentes situações de transporte para as partículas. Assim, as condições operacionais podem ser otimizadas a diferentes cargas de poeira e diferentes tamanhos de partículas à medida que o gás passa através do precipitador. Na Figura 7 está representado um precipitador eletrostático de placas.

Em contraste com o precipitador tipo placa, no tipo tubo, o fluxo de gás e o os fios de descarga estão alinhados. Além do arranjo do precipitador em questão, as condições de escoamento de gás devem ser cuidadosamente projetadas, uma vez que o arrastamento de

partículas devido à altas velocidades trazem com frequência problemas graves que impedem a obtenção de altas eficiências. Os precipitadores eletrostáticos tubulares compreendem apenas uma pequena parcela dos precipitadores e são mais comumente aplicados onde as partículas estão molhadas ou pegajosas. Esses precipitadores são geralmente limpos com água e têm perdas de reinserção de magnitude inferior à dos precipitadores de partículas secas. (TURNER, 1999).

Figura 7 – Interior de um precipitador eletrostático de placas a seco



Fonte: Adaptado de Practical Maintenance, 2017

De acordo com Parker (1997), normalmente o processo de carregamento é dividido em duas formas: uma região de carregamento por campo, que é predominante para partículas maiores que 1 µm, e uma região de carregamento por difusão, predominante para partículas menores que 0,1µm. Enquanto o carregamento por campo exige a presença de um campo elétrico, que impulsiona os portadores de carga móveis livres, o processo de difusão é baseado em íons de gás que se movem aleatoriamente, causados pela temperatura e descritos pela teoria cinética do gás, ou seja, movimento browniano. Em um precipitador eletrostático, partículas de todos os tamanhos experimentam ambas as situações simultaneamente.

2.2.2 Aplicabilidade

Os precipitadores eletrostáticos podem ser secos e úmidos, sendo que o precipitador eletrostático úmido, embora usado principalmente para a coleta de poeira, também controla poluentes gasosos. (MUKHOPADHYAY, 2009). Os precipitadores eletrostáticos são

ineficientes para partículas submicrométricas. Essa baixa eficiência de coleta é devido a uma baixa carga elétrica adquirida por partículas menores que 1 μm na descarga corona. Apenas algumas cargas elementares são transmitidas a uma partícula menor que 1 μm e partículas menores que 100 nm geralmente não são carregadas. (JAWOREK et al., 2019).

O precipitador eletrostático pode ser resumido como tendo as seguintes vantagens comparado com outros equipamentos para remoção ou controle de particulados:

- Pode ser dimensionado para qualquer eficiência;
- Coleta úmida ou seca de material particulado;
- Opera em uma grande variedade de vazão com baixa perda de carga;
- Baixo custo de manutenção;
- Pode operar a temperaturas acima de 850°C;
- Pode operar com gases completamente saturados;
- Custos de operação elétrica aceitáveis;
- Coleta de diferentes tamanhos de partículas;
- Excelente confiabilidade;
- Vida útil longa, mais de 20 anos.

Como desvantagens pode-se citar:

- Alto custo de implementação;
- Ocupa grande espaço físico;
- Não é flexível a alterações de processo, como temperatura e volume do gás;
- Fortemente dependente da resistividade do material particulado, sendo a eficiência diminuída para resistividade alta.

2.3 Sistemas de separação gás-sólido híbridos

Uma alternativa para tornarem os sistemas de separação gás–sólido mais eficientes, principalmente na coleta de material particulado fino (abaixo de 1 μm) é o sistema de filtração híbrido, que consiste em unir o princípio de dois equipamentos convencionais de separação gás-sólido em um único dispositivo e desta forma melhorar o processo de limpeza de gases. (SILVA F. M., 2019).

Recentemente, foi dada atenção especial dos engenheiros às construções híbridas que aplicam campos e forças eletrostáticas para melhorar o desempenho dos filtros de mangas.

Foram investigados na literatura três tipos de tais soluções: filtro energizado eletricamente, filtro eletrostático híbrido e precipitador eletrostático híbrido.

No filtro energizado eletricamente, as fibras do filtro são energizadas por um campo elétrico para auxiliar a coleta. Já no filtro eletrostático híbrido, carregamento eletrostático é aplicado em partículas antes de serem filtradas por filtro de mangas, que neste caso, é o único equipamento de filtração utilizado. O precipitador eletrostático híbrido utiliza um precipitador eletrostático para a remoção de partículas grossas e um filtro de mangas subsequente para a remoção de partículas finas que saem do precipitador. Nos dois últimos casos, o filtro de mangas também pode ser energizado através da imposição de um campo elétrico externo na superfície do filtro, da mesma forma que os filtros energizados eletricamente. Os filtros de mangas, usados em sistemas eletrostáticos híbridos, não diferem daqueles que operam sozinhos, exceto quando construções especiais são usadas, por exemplo, com fios incorporados. Todas essas construções permitem aumento da eficiência de coleta de partículas menores que 2,5 μm (PM2.5) e diminuição da queda de pressão através do filtro de mangas. Os mecanismos eletrostáticos também têm sido empregados em, por exemplo, lavadores eletrostáticos, ciclones eletrostáticos e filtros de leito granular. (JAWOREK et al., 2019).

A maioria dos sistemas híbridos estudados foram projetados para a remoção de partículas dos gases de combustão em usinas a carvão. (JAWOREK et al., 2019; Liu et al. 2016; ORTIZ et al., 2007).

O estudo e processos com altas voltagens devem ser cautelosos, pois, voltagens acima da corrente corona podem gerar arcos elétricos em sistemas de laboratório. (SILVA F. M., 2019). Ademais, estudos de viabilidade técnica e econômica devem ser realizados para decidir o melhor método de filtração para sistemas específicos, assim, é possível alcançar uma filtração adequada e um projeto financeiramente viável.

2.3.1 Filtros eletricamente energizados

Efeitos eletrostáticos geralmente estão presentes nos processos de filtração porque as partículas e fibras são carregadas em alguns desses processos. No entanto, os efeitos são insignificantes, a menos que as partículas ou fibras sejam altamente carregadas. Existem basicamente duas maneiras de aplicar forças eletrostáticas significativas para aumentar a eficiência de coleta de um filtro: carregar as partículas transportadas pelo ar e criar um campo elétrico no filtro. (WANG, 2001).

No filtro energizado eletricamente, as fibras do filtro são energizadas por um campo elétrico para auxiliar a coleta. O campo elétrico pode ser perpendicular ou paralelo ao fluxo de gás. (PLACKS, 1988).

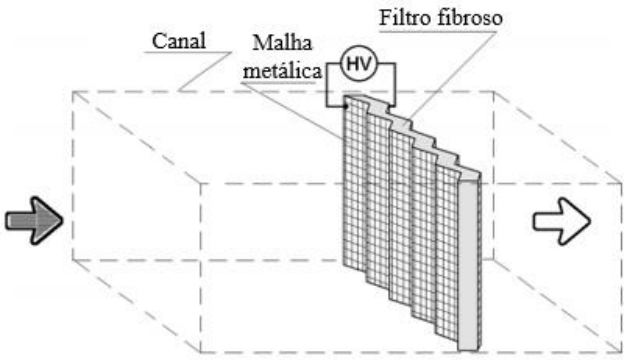
Esse mesmo sistema foi encontrado na literatura com a terminologia de filtração de tecido estimulada eletrostaticamente (*electrostatically stimulated fabric filtration*), que proporcionou redução na queda de pressão geralmente entre 40 e 50% quando comparado com um filtro simples desde em sistemas de laboratório com filtros de mangas pequenos até em unidades piloto de campo substanciais. (PLACKS, 1988).

As variáveis que influenciam a eficiência de coleta de um filtro na presença de forças eletrostáticas incluem composições químicas das partículas e fibras, cargas nas partículas, carga superficial das fibras e intensidade do campo elétrico aplicado externamente, além das variáveis que afetam a eficiência de coleta na ausência de forças eletrostáticas (WANG, 2001).

O campo elétrico pode ser produzido entre um par de eletrodos em malha (de configuração plana paralela ou cilíndrica) com o tecido colocado entre esses eletrodos (JAWOREK et al. 2019). Um esquema de um filtro fibroso entre eletrodos em malha paralela é mostrado na Figura 8.

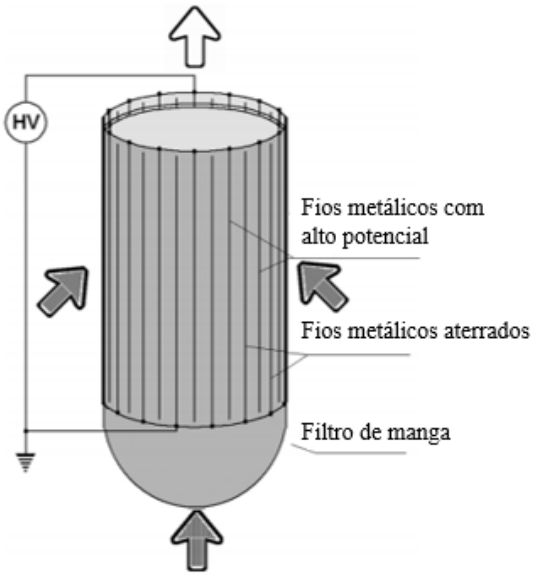
Em outras versões, os eletrodos estavam em uma espécie de suporte envoltos nas mangas ou costurados ou entrelaçado no tecido (PLACKS, 1988). Um exemplo de filtro energizado eletricamente com fios metálicos entrelaçados é mostrado na Figura 9.

Figura 8 – Esquema de um filtro fibroso energizado eletricamente com placas planas



Fonte: Adaptado de Jaworek et al., 2019

Figura 9 – Esquema de um filtro de manga com fios metálicos entrelaçados



Fonte: Adaptado de Jaworek et al., 2019

Segundo Donovan et al. (1982), os filtros de tecido são relatados por exibir queda de pressão reduzida (aumenta permeabilidade da torta de particulado) e maior eficiência de coleta quando operados com um campo elétrico externo na superfície do filtro. No entanto, em maiores cargas de poeira, a eficiência de filtração pode diminuir mais rapidamente porque partículas depositadas diminuem os efeitos eletrostáticos (WANG, 2001).

Devido à menor queda de pressão, o fluxo de gás pode ser aumentado sem diminuir a eficiência da coleta. Esta propriedade permite a redução do número de mangas utilizadas para a filtração. A regeneração de filtros de mangas energizados eletricamente é mais fácil e mais eficiente porque as partículas formam uma torta porosa, geralmente depositada apenas na parte frontal do filtro, com pequena quantidade de poeira penetrando através das fibras. Além disso, melhores resultados de filtração foram obtidos para filtros com fios de eletrodos tricotados no lado empoeirado do filtro quando comparado aos filtros que tiveram os eletrodos no lado traseiro. (JAWOREK et al. 2019).

Rodrigues et al. (2017), com a finalidade de verificar a deposição das partículas com diâmetro médio de Stokes de 3,25 μm em filtros de polipropileno, aplicou cargas elétricas de -3 e -6 kV nas partículas de rocha fosfática durante a filtração de gases a uma umidade do ar de aproximadamente 44%. Os autores observaram que a eficiência da filtração aumentou e houve uma redução nos valores de queda de pressão, além de que a penetração das partículas no filtro diminuiu substancialmente com o aumento do nível de carga das

partículas, especialmente para diâmetros de partículas menores que 3,5 μm e valores mais baixos de velocidade de filtração.

2.3.2 Filtro eletrostático híbrido

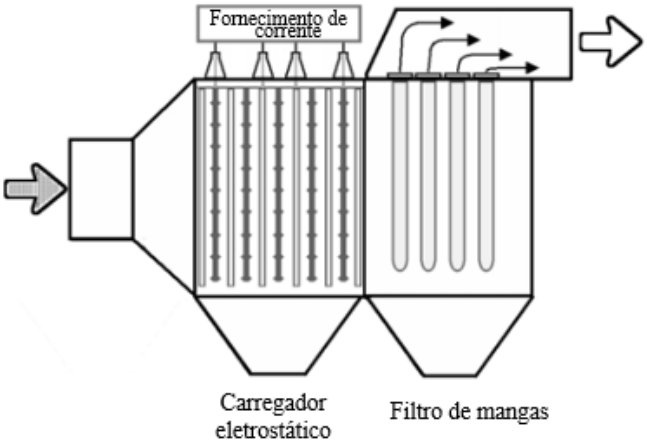
Os sistemas de filtragem eletrostática híbrida aplicam filtros fibrosos à captura de partículas finas, sendo que há o carregamento eletrostático das partículas, e opcionalmente, pode-se aplicar um campo elétrico no filtro de mangas para apoiar o processo de filtração (PLAKS, 1988; JAWOREK et al., 2019). Nos filtros eletrostáticos híbridos o particulado é removido apenas pelo filtro de mangas e o carregador eletrostático é usado exclusivamente para o carregamento da partícula.

Segundo Donovan et al. (1982), em concordância com publicações anteriores, o aumento tanto da força do campo elétrico ou da magnitude da carga/massa das cinzas volantes reduziu a taxa de aumento da queda de pressão nas mangas. Além disso, aumentando tanto o campo quanto a carga na poeira em conjunto produziu ainda mais redução na taxa de aumento de queda de pressão.

Existe uma falta de terminologia padrão em relação aos sistemas de filtragem eletrostática híbrida e construções similares são chamadas de maneira diferente por vários autores. O filtro eletrostático híbrido também foi chamado de filtro de ar incrementado eletrostaticamente (*electrostatically augmented air filters*) (LEE et al., 2001) e filtro auxiliado por ionizador (*filter assisted with ionizer*) (SHI; EKBERG, 2015).

Um esquema de um filtro eletrostático híbrido com um carregador corona é mostrado na Figura 10. O primeiro estágio é o carregador de partículas e o segundo estágio é um filtro de mangas convencional. As partículas são carregadas pela corrente de íons gerada por uma descarga elétrica nos eletrodos. Os eletrodos são mantidos em um alto potencial elétrico, geralmente de polaridade negativa, e são usados como fontes de íons. Os filtros eletrostáticos híbridos com pré-carregador de partículas são usados principalmente para remoção de partículas de cinzas volantes que saem das caldeiras de usinas elétricas, enquanto aqueles equipados com uma energia elétrica adicional, podem ser usados principalmente em sistema de ventilação (JAWOREK et al., 2019).

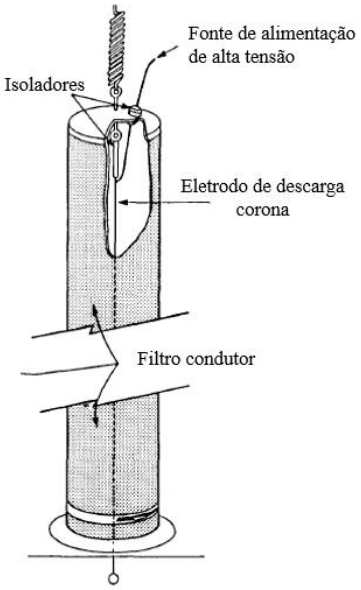
Figura 10 – Esquema de um filtro eletrostático híbrido com pré-carregador de partículas e filtro de mangas



Fonte: Adaptado de Jaworek et al., 2019

O pré-carregador de partículas pode ser construído como um estágio separado, antes do filtro de mangas ou acoplado ao filtro, assim, o processo de carregamento e filtragem de partículas ocorre em um único dispositivo, como mostra a Figura 11.

Figura 11 – Filtro de manga com carregamento de partícula e coleta integrado em um campo elétrico e de fluxo combinado

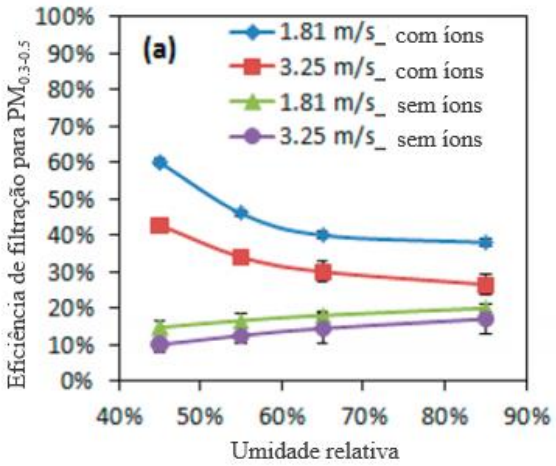


Fonte: Adaptado de Plaks, N. (1998)

No estudo de Shi, Ekberg, (2015) foram realizados experimentos em laboratório e em campo filtrando aerossol do ar livre de Gotemburgo, Suécia, durante 7 meses para averiguar a influência do tempo no sistema de filtração, além de outros fatores. Sem

ionização, a eficiência do filtro sintético M6 rapidamente diminuiu com o tempo de operação, de acima de 92% para cerca de 20%. Com a ionização, a eficiência da filtração aumentou em mais de 20% nos primeiros dias e manteve-se com aumento de cerca de 40% durante a maior parte do tempo de operação para partículas de 0,3 μm a 0,5 μm. Ademais, testes de laboratório mostraram que o aumento da eficiência foi maior para partículas com diâmetro menores. A captura coulômbica pode ser a principal causa de um aumento de eficiência maior em pequenas partículas. Isso é porque a captura coulômbica aumenta com a diminuição de partículas e, além disso, isso torna-se significativo quando um ambiente aerossol é substancialmente carregado por íons. A Figura 12 apresenta um gráfico da eficiência de filtração para diferentes umidades relativas a uma temperatura de 20°C e concentração de PM0.3-0.5 de $1x10^7$ partículas/m³. Nesta figura, a eficiência de filtração do ar com ionizador diminuiu com o aumento da umidade relativa, enquanto os valores de eficiência medidos sem o ionizador aumentaram ligeiramente com o aumento da umidade relativa. Para o caso sem ionizador, o ar úmido umidifica o filtro, o que reduz a porosidade e resulta no aumento da eficiência de filtração. No caso com ionizador, o ar úmido pode levar a uma menor ionização, o que resulta em um menor aumento de eficiência do que o do caso com ar seco.

Figura 12 – Eficiência de coleta em relação à umidade relativa: filtragem de ar auxiliada por ionizador



Fonte: Adaptado de Shi, Ekberg, (2015)

Considerando os efeitos dos fatores estudados, espera-se que este sistema de filtração de ar auxiliado por ionizador mostre níveis muito altos de eficiência quando o sistema está operando com baixa umidade relativa, baixa concentração de partículas e baixa velocidade

do ar. Portanto, pode ser vantajoso instalar um pré-filtro e uma bobina de aquecimento/resfriamento frente deste sistema de filtração de ar auxiliado por ionizador para fornecer baixa umidade relativa e baixa concentração de partículas no ar de suprimento. (SHI; EKBERG, 2015)

2.3.3 Precipitador eletrostático híbrido

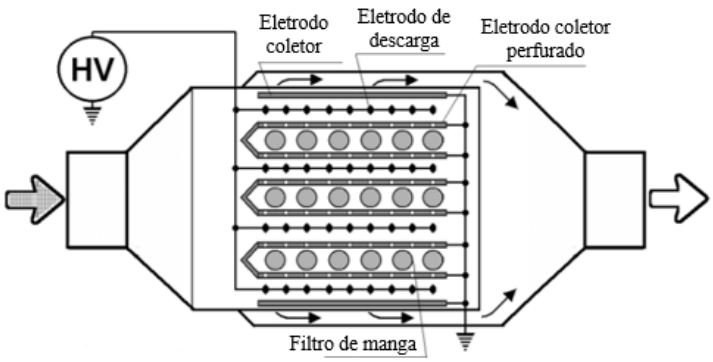
Nos precipitadores eletrostáticos híbridos, os particulados maiores são removidos por um precipitador eletrostático. A corrente de gás que sai desse equipamento vai para um filtro de mangas, responsável normalmente pela coleta das partículas menores. As partículas que saem do precipitador eletrostático geralmente estão carregadas, o que pode melhorar ainda mais a filtração pelo filtro de manga subsequente, sem a necessidade de energia adicional para o carregamento de partículas.

Também há uma falta de terminologia padrão para esse sistema. O mesmo sistema do precipitador eletrostático híbrido foi encontrado como filtro híbrido (*hybrid filter*) (ARAGON et al., 2015), coletor híbrido (*hybrid collector*) (ORTIZ et al., 2007), precipitador de filtro eletrostático híbrido *(hybrid electrostatic filter precipitator*) (LIU et al., 2016), entre outros.

O gás contendo o material particulado escoa inicialmente no precipitador eletrostático, as placas coletoras retêm as partículas grossas, deixando assim, as partículas finas chegarem ao filtro de mangas. Estas partículas, com o auxílio do efeito corona produzido dentro do precipitador, conseguem formar tortas de filtração mais porosas, consequentemente com maior permeabilidade, facilitando o escoamento do gás pelas mangas, ou seja, a saída do gás limpo do equipamento com menor queda de pressão. (SILVA F. M., 2019). Esse tipo de dispositivo é usado em usinas de energia para a remoção de partículas de cinzas volantes dos gases de escape e é raramente aplicado aos sistemas de ventilação (JAWOREK et al., 2019).

Para aumentar a eficiência de coleta de sistemas híbridos, os processos de carregamento de partículas, precipitação e sua filtração por um filtro de manga podem ser combinados em um único dispositivo. Um esquema de precipitador eletrostático híbrido combinado com filtro de manga é mostrado na Figura 13.

Figura 13– Esquema do precipitador eletrostático híbrido com eletrodos de coleta perfurados combinados com o filtro de manga (vista superior)



Fonte: Adaptado de Jaworek et al., 2019

Nesse dispositivo, as partículas são carregadas e precipitadas por um precipitador eletrostático com eletrodos de coleta perfurados. As partículas pequenas, que não são precipitadas, passam pelas aberturas dos eletrodos de coleta e fluem diretamente para as mangas, posicionadas entre eletrodos de coleta paralelos adjacentes. No filtro de mangas, o gás flui de fora para dentro de cada manga e escapa pela abertura superior da manga. (JAWOREK et al., 2019).

Silva F. M. (2019) utilizou um precipitador eletrostático seguido de um filtro de mangas para avaliar o efeito da aplicação de diferentes cargas eletrostáticas aplicadas nas partículas de cimento em um meio filtrante de fibra de vidro. Para as cargas de -1, -2 e -4 kV aplicadas nas partículas verificou-se que a resistência específica da torta e a queda de pressão diminuíram enquanto a quantidade de material particulado retido no meio filtrante e o tempo total de filtração aumentaram. Para um mesmo ponto de massa retida o valor da queda de pressão chegou a uma diminuição de 30% para carga de -1 kV. Já para as tensões de -10 e -12 onde o efeito corona foi atuante, o precipitador eletrostático chegou a reter 89% do material particulado alimentado no processo e dessa forma a penetração das partículas no tecido diminuiu e o tempo de filtração aumentou em até 6 vezes para curva de -12 kV. A umidade relativa do ar foi mantida em 20% e o diâmetro do material polidisperso foi de aproximadamente 0,4 μm a 57 μm.

Liu et al. (2016) analisaram a eficiência de coleta entre um precipitador eletrostático e um precipitador eletrostático híbrido de duas centrais elétricas a carvão, cada uma com capacidade de eletricidade de 135 MW. O precipitador eletrostático híbrido era idêntico ao precipitador eletrostátático utilizado com a diferença de uma substituição dos dois últimos campos por filtros de manga. A eficiência de remoção de PM2,5 foi de 98,90% e 99,96%

para o precipitador eletrostático e o precipitador eletrostático híbrido, respectivamente. Uma diferença significativa aparece na faixa de tamanho 0,1-2 μm, onde o a eficiência de remoção do material particulado no precipitador eletrostático é ± 1,5% menor que a do sistema híbrido.

Em experimentos de laboratório, Feng et al. (2016) utilizaram um sistema híbrido de filtração eletrostática que continha um sistema com um precipitador eletrostático e um filtro fibroso instalado a jusante do precipitador eletrostático. Um segundo sistema em que o filtro fibroso era instalado antes do precipitador eletrostático também foi estudado, porém o aumento da eficiência de filtração foi muito menor quando comparado com o primeiro sistema. A velocidade do ar no estudo foi mantida a 0,1 m/s e utilizou-se um filtro de polietileno e partículas de dioctilftalato de 0,4 a 2,5 μm. Os autores concluíram que o sistema híbrido podia operar a uma maior eficiência com uma voltagem aplicada, geração de ozônio e queda de pressão menores. Foi observado que a eficiência de coleta de partículas de 0,4 μm aumentou de 5% para 60% e que a eficiência aumentou conforme o aumento do diâmetro das partículas, chegando próximo de 100% para partículas de 2,5 μm. Foi observado que uma maior eficiência mecânica de coleta antes do sistema de filtração, ou seja, menores cargas de material particulado, aumentou a eficiência do sistema. Além disso, a eficiência do filtro no sistema híbrido em que foi fornecido voltagem positiva foi ligeiramente menor do que para voltagem negativa. Segundo os autores, três fatores levaram a uma maior eficiência do filtro no sistema híbrido. Primeiro, a força imagem entre as partículas carregadas e a fibra dielétrica foi benéfica para a remoção de partículas. Esse efeito fraco poderia ser ignorado em um filtro fibroso altamente carregado. Segundo, a partícula carregada depositada carregou eletricamente o meio filtrante, dessa forma, as partículas unipolares carregadas que se aproximam da superfície do filtro foram afetadas por uma força repelente de Coulomb. Essa força causou certa desaceleração das partículas nas proximidades da superfície do filtro. Em terceiro lugar, a força do campo elétrico através do meio filtrante, que é formado devido à filtração de partículas carregadas, melhora a eficiência da filtração.

3. SISTEMAS HÍBRIDOS E A INDÚSTRIA DE CANA DE AÇÚCAR

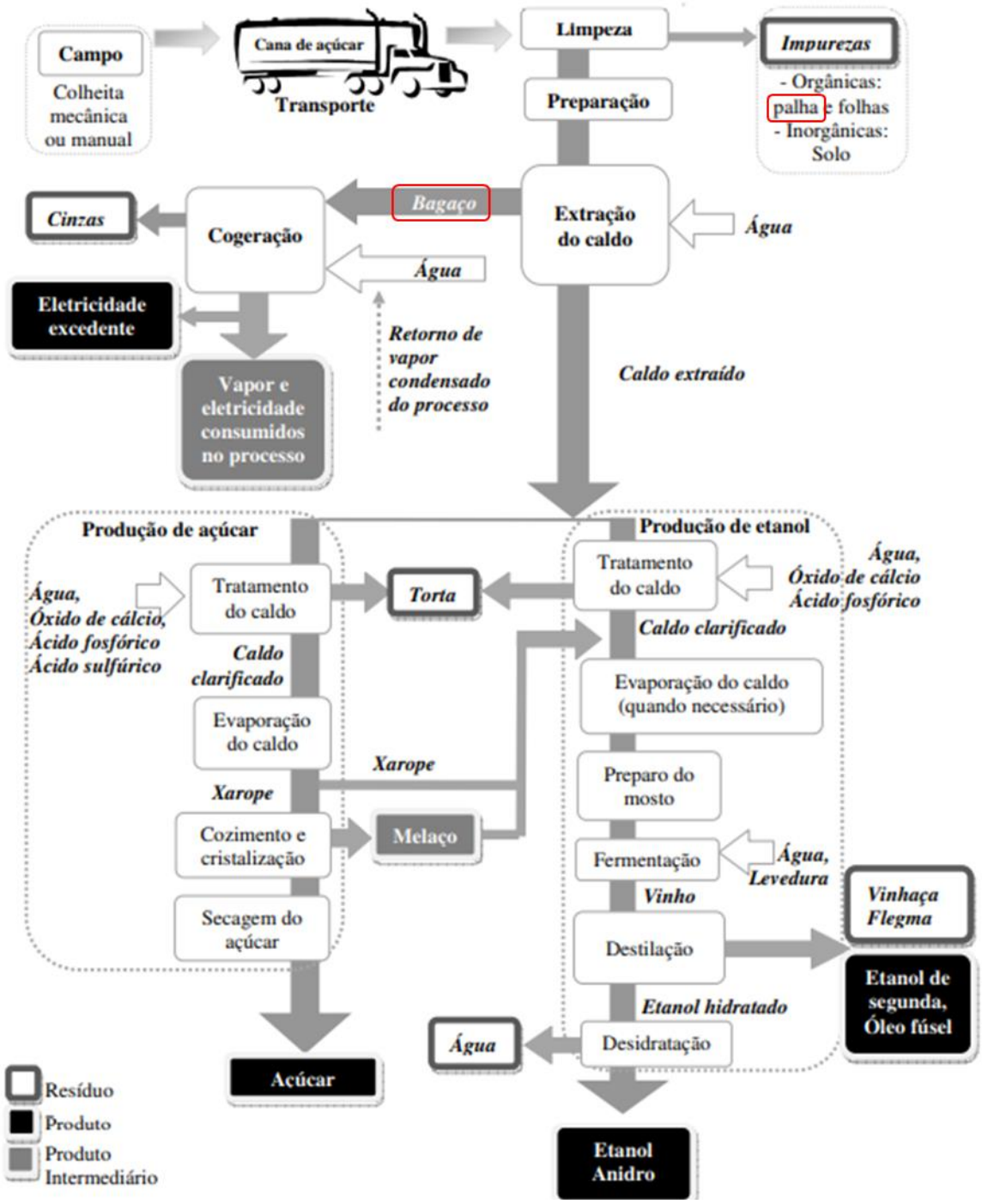
3.1 Panorama da emissão de particulados na indústria sucroenergética

A queima da palha e do bagaço de cana de açúcar tem sido utilizada para geração de energia em diversas indústrias sucroenergéticas, mostrando-se uma alternativa promissora ao agregar valor em um resíduo e transformando-o em um coproduto de alto valor agregado.

A participação da biomassa de cana-de-açúcar na produção e comercialização de energia elétrica vem aumentando nos últimos anos. Além de garantir a autonomia energética, parte das unidades sucroenergéticas do país tem aumentado suas receitas com a comercialização da energia elétrica excedente gerada pela queima de biomassa. A energia termelétrica, em especial a produzida por meio de biomassa de cana-de-açúcar, é uma alternativa sustentável ao abastecimento e à segurança energética do país, uma vez que é complementar e substituta primária da energia hidrelétrica. (TROMBETA; FILHO, 2017). Nesse contexto, o manejo da palha tem se tornado uma nova atividade a ser administrada pelas unidades produtivas com potencial energético ainda pouco explorado, uma vez que somente 22% das 77 usinas estudadas por Trombeta, Filho (2017) apresentam estrutura específica para processamento de palha.

Atualmente, de acordo com a Aneel (2020), a biomassa possui capacidade instalada operante no Brasil de 15,14 GW de geração de energia elétrica, o que representa 8,7% do total no país. Focando somente no estado de São Paulo, a participação da biomassa aumenta para 25,55%, ou seja, 6,14 GW somente no estado, sendo que 96,65% vem do bagaço de cana de açúcar. Na Figura 14 estão representadas as principais etapas da produção de açúcar e etanol, com destaque para a origem da palha e bagaço de cana-de-açúcar.

Figura 14 – Principais etapas de produção de açúcar e etanol em uma usina convencional



Fonte: Adaptado de Albarelli, 2013

De acordo com Trombeta, Filho (2017) no que diz respeito às projeções da participação das biomassas de cana-de-açúcar na matriz energética nacional, um estudo decenal da Empresa de Pesquisa Energética - EPE 2015 indicou que o potencial técnico de geração de energia para 2023, tendo como matérias-primas o bagaço e a palha de cana-de-açúcar, é de 19,5 GW médios. Nesse contexto, as expectativas para o uso da energia de

biomassa são positivas. Ainda de acordo com Trombeta, Filho (2017), a partir dos estudos desenvolvidos pelo Plano Nacional de Energia 2030, ainda se verifica potencial de aumento da capacidade tecnológica industrial, a qual deve ampliar o processamento de biomassa de cana-de açúcar e produção de energia elétrica excedente.

Ademais, a legislação vem demandando controles mais rigorosos no que se diz respeito aos padrões de qualidade do ar, estando os materiais particulados entre critérios de inspeção. De acordo com o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), a resolução nº 491 de 2018 estabelece padrões de qualidade do ar, que estão divididos em etapas, representados na Tabela 2. A primeira etapa, que está em vigor, compreende os Padrões de Qualidade do Ar Intermediários PI-1. Os Padrões de Qualidade do Ar Intermediários e Final, PI-2, PI-3 e PF, serão adotados de forma subsequente levando em consideração os Planos de Controle de Emissões Atmosféricas e os Relatórios de Avaliação da Qualidade do Ar, elaborados pelos órgãos estaduais e distrital de meio ambiente.

Tabela 2– Padrões de qualidade do ar segundo o CONAMA

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1 µg/m³	PI-2 µg/m³	PI-3 µg/m³	PF µg/m³	PF ppm
Material Particulado - MP10	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual[1]	40	35	30	20	-
Material Particulado - MP2,5	24 horas	60	50	37	25	-
	Anual[1]	20	17	15	10	-
Dióxido de Enxofre - SO_2	24 horas	125	50	30	20	-
	Anual[1]	40	30	20	-	-
Dióxido de Nitrogênio - NO_2	1 hora[2]	260	240	220	200	-
	Anual[1]	60	50	45	40	-
Ozônio - O_3	8 horas[3]	140	130	120	100	-
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual[1]	40	35	30	20	-
Monóxido de Carbono – CO	8 horas[3]	-	-	-	-	9
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	-	-	-	240	-
	Anual[4]	-	-	-	80	-
Chumbo - Pb5	Anual[1]	-	-	-	0,5	-

[1]média aritmética anual; [2]média horária; [3]máxima média móvel obtida no dia;

[4]média geométrica anual; [5]medido nas partículas totais em suspensão.

Fonte: Adaptado da Resolução nº 491, 2018

Uma prática que tem sido reduzida com o passar dos anos mas ainda é uma questão a ser erradicada no futuro próximo é a queima de canaviais como método facilitador do corte de cana-de-açúcar. A prática ocorre principalmente na época de colheita, entre maio e novembro, e tem sido discutida por órgãos governamentais. Assim, a queima a céu aberto da palha tende a ser substituída por uma queima controlada para geração de energia.

A lei estadual nº 11.241, de 19 de setembro de 2002, dispõe sobre a eliminação do uso do fogo como método despalhador e facilitador do corte da cana-de-açúcar. A eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar deve chegar a 100% em 2021 para áreas mecanizáveis e a 100% em 2031 para áreas não mecanizáveis e/ou para queima menor que 150 hectares.

Recentemente, com o objetivo de consolidar as melhores práticas de sustentabilidade na cadeia de produção sucroenergética paulista, foi assinado o Protocolo Etanol Mais Verde entre o Governo do Estado de São Paulo e Setor Sucroenergético em junho de 2017. Entre as diretivas técnicas está a eliminação da queima como método agrícola para despalha e para colheita de cana-de-açúcar, além do aproveitamento dos subprodutos da cana-de-açúcar. A adesão ao protocolo é gratuita e voluntária, sendo que o atendimento às diretivas técnicas configura a condição essencial para emissão do certificado “Etanol Mais Verde”. (SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE, 2020)

Estudos mostraram que, durante a época de colheita de cana de açúcar, a queima de biomassa é uma grande fonte de gases e aerossóis contendo íons e compostos orgânicos. Esse aumento na liberação de fumaça e fuligem está associado à presença de componentes prejudiciais à saúde humana, como por exemplo, componentes cancerígenos e mutagênicos. (ALVES et al. 2016; BARBOSA et al. 2012; LEITE et al. 2018).

A geração de energia através da queima de biomassa, a possibilidade de utilização das cinzas em outros processos, a legislação e incentivo por parte do governo para indústrias cada vez mais sustentáveis, a relação da queima de biomassa com doenças causadas por material particulado, além de uma sociedade cada vez mais preocupada com os impactos ambientais das indústrias e parabenizando marcas que possuem ações ambientais, apontam que a queima controlada de biomassa e a redução dos poluentes emitidos pela mesma tendem a crescer nos próximos anos. Cabe o estudo e utilização de tecnologias adequadas para o controle mais rígido dos poluentes, sendo sistemas híbridos de filtração uma alternativa promissora.

3.2 Caracterização das partículas

Leite et. al (2018) realizaram o monitoramento de material particulado PM2.5 na lavoura de cana de açúcar durante o período de pré-colheita e no período de colheita. As medianas e faixas interquartis das concentrações de PM2.5 foram de 27,0 (23,0–33,0) e 101,0 (31,0–139,5) μg/m³ para o período pré-colheita e de colheita, respectivamente. Ou seja, houve um aumento de 374% na emissão de PM2.5 no período de colheita.

Segundo Allen et al. (2010), em uma região rural do sudeste do Brasil com forte expansão da cana de açúcar, a queima de biomassa, produtos de reações secundárias e re-suspensão de poeira do solo são responsáveis por 43%, 31% e 21% da massa do MP2.5 na atmosfera da região, respectivamente. O estudo também aponta que a queima de biomassa está fortemente relacionada com a liberação de PM2.5 de espécies carbonáceas, PO_4^{3-}, K^+, CH_3COO^- e $HCOO^-$. As concentrações mássicas de particulados foram maiores durante a estação seca (inverno), o que pode ser explicado pela forte sazonalidade da queima de biomassa, além da escassez de chuva. A Tabela 3 mostra a contribuição de componentes para a massa total de PM2.5.

Tabela 3 – Concentração mássica média de PM2,5 e contribuições dos componentes

	Concentração mássica total de PM2.5 (μg m-³)	26,5
Contribuição para massa total (%)	CH_3COO^-	0,21
	$HCOO^-$	0,08
	Cl^-	0,19
	NO_3^-	3
	SO_4^{2-}	9,52
	PO_4^{3-}	0,35
	Na^+	0,37
	NH_4^+	2,79
	K^+	2,58
	Mg^{2+}	0,12
	Ca^{2+}	0,51
	Carbono elementar	16,23
	Carbono orgânico	36,6
	Soma da contribuição dos componentes mensurados	72,54

Fonte: Adaptado de Allen et al. 2010

Os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos são compostos amplamente associados à mutagenicidade por material particulado e estão relacionados com a queima de biomassa. (ALVES et al. 2016; SILVA et al. 2015).

Oliveira (2015) agrupou dados de diferentes estudos sobrea composição das cinzas provenientes da queima de biomassa, apresentados na Tabela 4. Variações na composição das cinzas acontecem de acordo com o tipo de material queimado, suas impurezas e variáveis de processo. A partir dos dados da Tabela 4, constata-se que o silício é o elemento mineral dominante na cinza da queima do bagaço, representando, nas nove amostras, valores superiores a 59%. Os restantes dos elementos possuem proporções variáveis, sendo os principais o ferro, alumínio, cálcio, magnésio e o potássio.

Tabela 4 – Composição química da cinza do bagaço de cana de açúcar por espectroscopia de fluorescência de raios-X

	Autor, ano								
Composto químico (%)	Paula et al., (2009)	Paya et al., (2009)	Cordeiro et al., (2009)	Frias et al., (2007)	Silveira (2010)	Lima et al., (2009) *CBC-J	Lima et al., (2009) *CBC-I	Lima et al., (2009) *CBC-B	Lima et al., (2009) *CBC-A
SiO2	83,7	59,87	60,97	70,2	62,58	88,2	96,2	62,7	93,5
Fe2O3+Al2O3	6,6	26,45	0,18	4,02	11,63	7,4	1,9	13,3	3,8
K2O+Na2O	6,1	1,48	9,72	3,55	2,62	1,4	0,3	1,9	0,8
CaO	1,2	3,36	5,97	12,2	1,13	0,6	0,1	0,9	0,4
MgO	----	1,87	8,65	1,95	1,14	0,4	<0,1	0,6	0,3
SO3	0,7	1,03	------	4,1	---	<0,1	0,1	0,2	<0,1
P2O5	------	------	8,34	1,4	----	0,4	0,1	0,7	0,2
P.F.	5	0,63	5,7	1,81	19,38	0,35	1,04	16,28	0,34

P.F.= Perda ao fogo; *CBC-B: cinza coletada na Usina Da Barra em Barra Bonita; CBC-A: cinza coletada na Usina Tamoio, em Araraquara; CBC-J: cinza coletada na Usina Diamante em Jau; CBC-I: cinza coletada na Usina Da Serra, em Ibaté SP.

Fonte: Adaptado de Oliveira, 2015

Como mostrado anteriormente nesse trabalho, sistemas híbridos de filtração mostraram resultados de melhoria na coleta de particulados de centrais elétricas a carvão, as quais possuem como matéria prima material orgânico, assim como o bagaço de cana de açúcar. De maneira geral, estudos mostraram que para particulados de baixa resistividade, como aqueles de carbono, a filtração aumenta depois do carregamento de partículas.

A composição química de cinzas volantes provenientes de centrais elétricas a carvão possui geralmente como principais elementos, em ordem decrescente, o oxigênio, silício, alumínio, cálcio, ferro, carbono, potássio, magnésio e enxofre. (VASSILEV, 2005).

Observa-se semelhança nos principais componentes das cinzas provenientes do carvão e da biomassa de cana de açúcar. Na Tabela 5 está representada a composição química de cinzas volantes de alto teor de cálcio de uma usina a carvão na China.

Tabela 5 – Composição química de cinzas de carvão

Composição Química Mássica das Cinzas (%)										
SiO2	CaO	Al2O3	SO3	Fe2O3	MgO	Na2O	P2O5	TiO2	K2O	MnO
34,65	30,88	15,61	3,77	7,38	3,05	1,67	1,11	0,92	0,91	0,04

Fonte: Adaptado de Zhao, 2010

3.3 Proposta de projeto de sistema híbrido

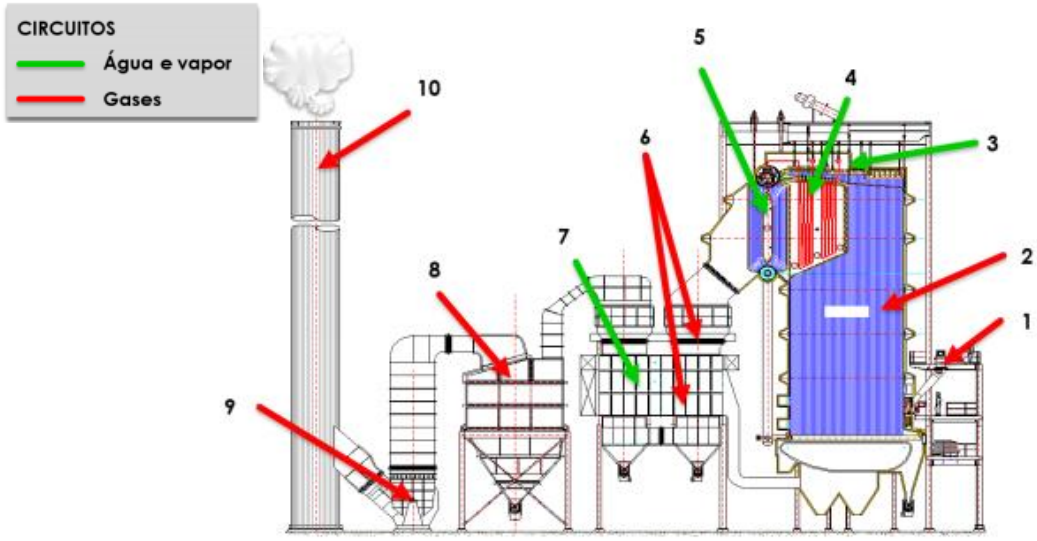
Para se obter uma eficiência de coleta adequada utilizando um único equipamento, muitas vezes se torna necessário incremento nos custos do projeto, como utilizar precipitadores eletrostáticos maiores, materiais especiais nas mangas e energia adicional para alimentar o ventilador, além do projeto poder se tornar inviável por falta de espaço físico ou outros fatores limitantes. Ademais, os equipamentos mais utilizados industrialmente para coleta de particulados, o precipitador eletrostático e o filtro de mangas convencionais, apresentam eficiência reduzida na captura de partículas menores que 1 µm. Com a união dos princípios dos dois equipamentos é possível otimizar a coleta de particulado, atingindo a eficiência desejada e reduzindo a emissão de particulados provenientes da queima da palha e bagaço de cana-de-açúcar.

Lavadores de cinzas e gases são equipamentos utilizados em algumas indústrias sucroenergéticas para o controle de emissão de particulados e gases. O estudo de SILVA, B. M., et al. (2019) analisou, em laboratório, a taxa de emissão de material particulado proveniente da queima de palha e bagaço de cana de açúcar em um lavador Venturi. Foram analisadas amostragens de 3 faixas de diâmetro: material particulado maior que 2,5 µm; entre 1,0 e 2,5 µm; e menor que 1,0 µm. Os testes evidenciaram que a concentração de material particulado antes do fluxo gasoso atingir o lavador Venturi foi maior para partículas com diâmetros menores que 1,0 µm e menor para partículas maiores que 2,5 µm. Obteve-se uma eficiência de coleta de material particulado de 96,6% para partículas maiores que 2,5 µm; de 85,5% para partículas entre 1,0 µm e 2,5 µm; e de 66,9% para partículas menores que 1,0 µm. Desvantagens que valem ser mencionadas no uso dos lavadores são o consumo de água no processo, além de que a quantidade de água utilizada na lavagem gera igual volume de água residuária, que não deve ser descartada sem prévio tratamento.

Há diversos estudos sobre a utilização das cinzas da queima do bagaço e palha de cana de açúcar na construção civil. Entre eles, Santos (2018) aponta o uso de cinzas do bagaço de cana de açúcar em bases de pavimentação e Pletsch (2019) sugere o emprego da cinza em produtos manufaturados como pavers, blocos de vedação, murões e demais artefatos de cimento. Para a produção desses produtos, é utilizada cinzas secas, o que torna o sistema híbrido de coleta de particulados mais vantajoso nesse aspecto quando comparado ao lavador de cinzas.

Mello (2018) realizou um estudo envolvendo a combustão em caldeiras a bagaço de cana de açúcar em uma indústria que realiza a cogeração de energia. A caldeira utilizada no trabalho é um gerador de vapor aquatubular ZANINISERMATEC, possui vazão de operação de 200 t/h de vapor, pressão de operação de 67 bar e temperatura de operação de 525 °C. A Figura 15 fornece uma visão geral dos principais circuitos e elementos da caldeira. Os gases de combustão saem da câmara de combustão da caldeira subindo até a região superior da fornalha e passando em seguida através dos superaquecedores, feixe convectivo, pré-aquecedores de ar, economizador, lavador de gases, ventiladores de tiragem induzida e saem pela chaminé.

Figura 15 – Principais elementos do circuito de vapor e gases de uma caldeira a biomassa



Fonte: Adaptado de Mello, 2018

Sendo:

1 – Sistema de alimentação de bagaço;

2 – Fornalha;

A fornalha da caldeira é constituída de um conjunto de tubos aletados em que as paredes tubulares são resfriadas por água. Possui grelha com bocais aspersores de vapor, para arrastar as cinzas até a parte frontal da caldeira onde é instalada uma moega de descarga de cinzas da grelha.

3 – Coletor principal de vapor;

4 – Superaquecedores de vapor:

Tem como função elevar a temperatura do vapor saturado até 525°C através da troca térmica com o gás quente proveniente da fornalha.

5 – Feixe tubular convectivo;

Possui área para troca térmica com os gases e propicia a convecção da água em ebulição nos tambores e é provido de sopradores de fuligem a vapor, necessários para limpeza das superfícies de trocas térmicas. No circuito de gases, o feixe convectivo é o segundo elemento de troca térmica, logo após os superaquecedores.

6 – Pré-aquecedorde de ar a gás - LT (ar primário) e HT (ar secundário);

Tem por finalidade realizar a troca térmica entre o ar de combustão que será injetado na fornalha e os gases efluentes da caldeira. Ambos os ares LT e HT são adicionados na fornalha, porém, de maneira diferente.

7 – Economizador:

O economizador é um trocador de calor que tem por finalidade aumentar a eficiência da unidade por meio da troca térmica entre a água de alimentação e os gases efluentes do pré-aquecedor.

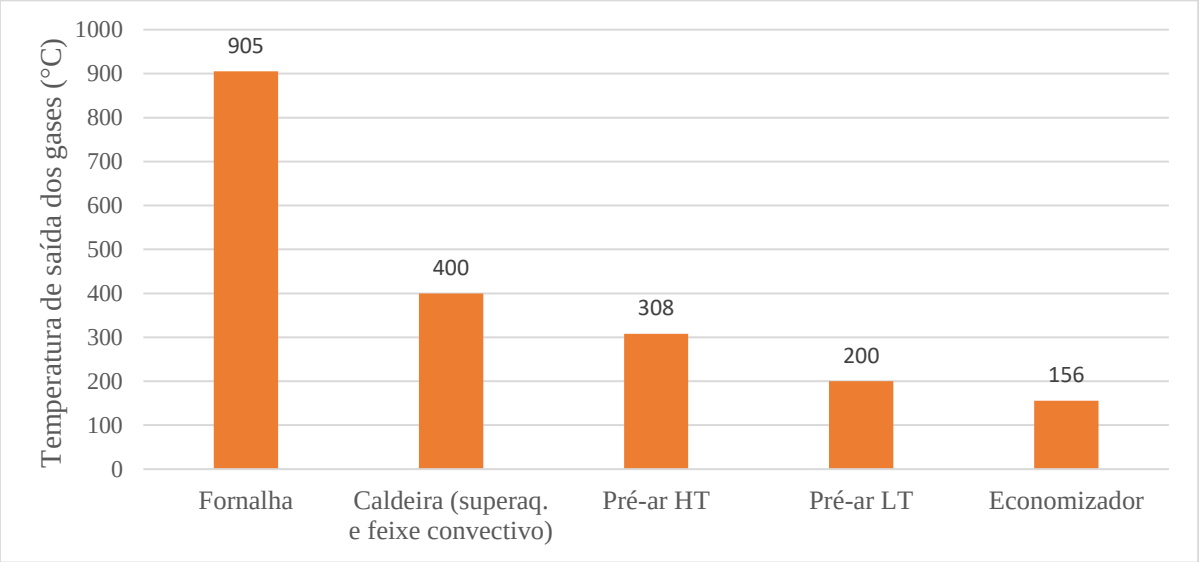
8 – Sistema de lavagem dos gases;

9 – Exaustores;

10 – Chaminé.

O perfil de temperaturas no circuito de gases da caldeira é exibido na Figura 16.

Figura 16 – Temperatura de saída dos gases nos elementos de troca térmica do circuito



Fonte: Adaptado de Mello, 2018

Propõe-se nesse trabalho a substituição do sistema de lavagem dos gases por um filtro eletrostático híbrido, composto por um energizador de partículas e um filtro de manga a jusante.

Esse sistema é proposto pois espera-se que o material particulado que sai do economizador seja na sua maioria fino, uma vez que os particulados maiores tendem a ser depositados em etapas anteriores, como na grelha e dutos. Além disso, como mencionado anteriormente, os testes de SILVA, B. M., et al. (2019) evidenciaram que a concentração de material particulado é maior para partículas com diâmetros menores que 1,0 µm. Dessa forma, não seria necessário um precipitador eletrostático antes para tirar as partículas mais grossas, sendo que o carregamento das partículas juntamente com um filtro de manga tende a ser uma opção adequada. A temperatura de saída do gás de 156°C permite o uso de mangas de materiais comuns no mercado, como por exemplo, o nylon aromático. Ademais, sistemas híbridos já são utilizados em usinas a carvão com vazões industriais, o que indica que a vazão não será um problema. Assim, a substituição do sistema de coleta de particulados tem perspectivas de trazer maior eficiência de coleta, redução do consumo de água e possível geração de valor através da venda do material.

4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Com base nos dados e estudos analisados é possível concluir que os sistemas híbridos possuem resultados positivos no aumento de eficiência de coleta de material particulado de baixa resistividade, sendo o aumento da eficiência maior para particulados finos (PM2.5).

Os sistemas híbridos consistem na junção de dois ou mais equipamentos de separação gás-sólido, sendo a união entre os princípios de precipitadores eletrostáticos e filtros de mangas os mais utilizados. A aplicação desses sistemas híbridos ainda é pouco explorada, ficando concentrada em centrais elétricas a carvão e possuem potencial de expansão para outras indústrias, como a sucroenergéticas. Tal indústria é um mercado em potencial para os sistemas híbridos de filtração pois há tendência crescente de realizar a queima controlada industrialmente de palha e bagaço de cana de açúcar, impulsionada pela cogeração de energia e pela maior fiscalização governamental na emissão de particulados.

Sugere-se estudos práticos da utilização de sistemas híbridos na coleta de particulados provenientes da queima de palha e bagaço de cana-de-açúcar, além de um estudo de dimensionamento de equipamentos para uma estação de queima de bagaço. Alguns pontos relevantes que devem ser observados nos testes é a influência da temperatura de saída dos gases, a carga de particulados, umidade da corrente e velocidade da corrente gasosa, pois são fatores que possuem grande influência na coleta desses sistemas.

5. REFERÊNCIAS

ABINT. **Classificação, Identificação e Aplicações de Não tecidos**. Disponível em: <http://www.abint.org.br/pdf/Manual_ntecidos.pdf>. Acesso em: 15 de dez. de 2019.

ALBARELLI, J.Q.; **Produção de Açúcar e Etanol de Primeira e Segunda Geração: Simulação, Integração Energética e Análise Econômica.** Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas, 11 de março de 2013.

ALLEN, A. G; CARDOSO A. A.; et al. **Influence of intensive agriculture on dry deposition of aerosol nutrients**. J. Braz. Chem. Soc. vol.21 n°.1, São Paulo, 2010.

ALVES, D. K. M.; KUMMROW, F.; CARDOSO, A. A; MORALES, D. A.; UMBUZEIRO, G. A. **Mutagenicity profile of atmospheric particulate matter in a small urban center subjected to airborne emission from vehicle traffic and sugar cane burning**. Environmental and Molecular Mutagenesis 57:41-50, 2016.

ANEEL. **Sistema de Informações de Geração da ANEEL – SIGA**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acesso em 28 de abril de 2020.

ANENBERG S.C.; BELOVA A.; BRANDT J.; FANN N.; GRECO S.; GUTTIKUNDA S.; HEROUX M.E.; HURLEY F.; KRZYZANOWSKI M.; MEDINA S.; MILLER B.; PANDEY K.; ROOS J.; VAN DINGENEN R. **Survey of Ambient Air Pollution Health Risk Assessment Tools**. Risk Analysis, Vol. 36, No. 9, 2016.

ARAGON, G. et al. **Enhanced Control of Fine Particle Emissions from Waste Biomass Combustion Using a Hybrid Filter**. Energy & Fuels, v. 29, n. 4, p. 2358–2371, 2015.

BARBOSA, C.M.; TERRA-FILHO, M.; DE ALBUQUERQUE, A. L P., et al. **Burnt sugarcane harvesting - cardiovascular effects on a group of healthy workers, Brazil**. PLoS One, 2012.

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 despoeiramento secundário da aciaria de uma indústria siderúrgica**. Tese de mestrado. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2018.

DONOVAN, R. P. **Fabric Filtration for Combustion Sources - Fundamentals and Basic Technology**. New York and Basel: Marcel Dekker, 1985.

DONOVAN, R.P.; HOVIS, L.S.; RAMSEY,G.H.; ENSOR, D.S. **Electric-field-enhanced fabric filtration of electrically charged flyash**, Aerosol Science and Technology. 1:4, p. 385–399, 1982

FENG Z.; LONGA Z.; YUB T. **Filtration characteristics of fibrous filter following an electrostatic precipitator**. Journal of Electrostatic 83 52-62, 2016.

FREDERICK, E.R. **Fibers, electrostatics, and filtration: a review of new technology**. Journal of the Air Pollution Control Association. 30:4 p. 426–431, 1980.

JAWOREK, A.; SOBCZYKA, A.T; KRUPA, A.; MARCHEWICZA, A.; CZECH, T.; ŚLIWIŃSKI, L. **Hybrid electrostatic filtration systems for fly ash particles emission control**. A review, Separation and Purification Technology, v. 213, p. 283-302, 2019.

LEE, J.K.; KIM, S.C.; SHIN, J.H.; LEE J.E.; KU, J.H.; SHIN, H.S. **Performance evaluation of electrostatically augmented air filters coupled with a corona pre-charger**. Aerosol Science & Technology, 35 p.785 – 791, 2001.

LEITE, M.R.; ZANETTA, D. M. T.; ANTONANGELO, L.; MARÇAL, L. J.; RAMOS, D.; BURDMANN, E. M.; SANTOS, P. U. **Burnt sugarcane harvesting work: effects on pulmonary and systemic inflammatory markers**. Inhalation Toxicology, vol. 30, N° 6, p. 205–212, 2018.

LIU, X.; XU, Y.; FAN, B.; LV, C.; XU, M.; PAN, S.; ZHANG, K.; LI, L.; GAO, X. **Field Measurements on the Emission and Removal of PM2.5 from Coal-Fired Power Stations: 2. Studies on Two 135 MW Circulating Fluidized Bed Boilers Respectively Equipped with an Electrostatic Precipitator and a Hybrid Electrostatic Filter Precipitator**. Energy & Fuels, 30, 7, p.5922–5929, 2016.

MELLO, FERNANDO MARTINS DE. **Controle Nebuloso (“Fuzzy”) Aplicado à Combustão em Caldeiras a Bagaço De Cana. Tese de pós-graduação**. Universidade Federal de São Carlos, 2018.

MUKHOPADHYAY, A. **Pulse-jet filtration: An effective way to control industrial pollution Part I: Theory, selection and design of pulse-jet filter**. Textile Progress, v. 41, n. 4, p. 195–315, 2009.

OLIVEIRA, D. L. A. **Caracterização da Cinza de Bagaço de Cana-de-açúcar e Aplicação no Solo**. Tese de doutorado. Universidade Estadual Paulista – UNESP, Jaboticabal, 2015.

ORTIZ, F.J.G; NAVARRETE, B.; CAÑADAS, L.; SALVADOR, L**. A technical assessment of aparticle hybrid collector in a pilot plant**. Chemical Engineering Journal 127 p. 131–142, 2007.

PARK, H.S.; PARK, Y.O. **Simulation of particle deposition on filter fiber in an external electric field**. Korean journal of chemical engineering, v.22, Edição 2, p. 303-314, 2005.

PARKER, K.R. **Applied Electrostatic Precipitation**. Primeira edição. Londres: Blackie Academic & Professional, p.1– 86, 1997.

PLAKS, N. **Fabric filtration with integral particle charging and collection in combined electric and flow field. Part I: Background, Experimental Work, Analysis of Data, and Approach to the Development of a Mathematical Engineering Design Model**. Journal of Electrostatatics. 20 p. 247–266, 1988.

PLETSCH, A. **Avaliação da Carbonatação em Materiais Cimentícios com Substituição de Cimento Portland por Cinza do Bagaço da Cana-de-açúcar**. Tese de mestrado em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2019.

SHAH, K. P. **Practical Maintenance. Construction, Working, Operation and Maintenance of Electrostatic Precipitators (ESPs)**. Disponível em: <https://practicalmaintenance.net/wp-content/uploads/Construction-Working-Operation-and-Maintenance-of-Electrostatic-Precipitators-ESPs.pdf>. Acesso em 28 de abril de 2020.

RODRIGUES, M. V. **Determinação da carga Eletrostática em Aerossóis e seu Efeito na Filtração de Gases**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2005.

RODRIGUES, M.V.; BARROZO, M.A.S.; GONÇALVES, J.A.S.; COURY, J.R. **Effect of Particle Electrostatic Charge on Aerosol Filtration by a Fibrous Filter**. Powder Technology 313, 323–331, 2017.

SANTOS, O. J. **Estudo da Incorporação de Cinzas de Bagaço de Cana-de-açúcar no Material de Base de Pavimentação**. Tese de pós-graduação em geotecnia. Universidade Federal de Ouro Preto, 2018.

Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente. **Etanol Verde**. Disponível em < https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/etanolverde/>. Acesso em 28 de abril de 2020.

SHI, B.; EKBERG, L. **Ionizer Assisted Air Filtration for Collection of Submicron and Ultrafine Particles – Evaluation of Long-Term Performance and Influencing Factors**. Environmental Science and Technology. 49, 11 p. 6891–6898, 2015.

SILVA, B. M.; COELHO, S. G.; DONATO, G. M.; DUSSÁN, K. J.; COSTA, M. A. M. **Controle de Material Particulado Originado da Queima de Palha e Bagaço de Cana-de-açúcar em Lavador Venturi**. Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. Universidade Estadual Paulista, 2019.

SILVA, F. M. O. **Influência das Cargas Eletrostáticas na Filtração de Partículas em Meios Filtrantes de Fibra de Vidro**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2019.

SILVA, F. S. et al. **Elemental Composition of PM2.5 in Araraquara City (Southeast Brazil) during Seasons with and without Sugar Cane Burning**. Journal of Environmental Protection, 6, 426-434, 2015.

TROMBETA, N. C.; FILHO, J. V. C. **Potencial e Disponibilidade de Biomassa de Cana-de-açúcar na Região Centro-Sul do Brasil: indicadores agroindustriais**. Rev. Econ. Sociol. Rural vol.55 n°3 Brasília 2017.

TURNER, J. H., et al. United States Environmental Protection Agency. **Particulate Matter Controls, chapter 3: Electrostatic Precipitators**, 1999. Disponível em: <https://www3.epa.gov/ttncatc1/cica/files/cs6ch3.pdf>. Acesso em 20 de abril de 2020.

VASSILEV, S. V.; VASSILEVA, C. G. **Methods for Characterization of Composition of Fly Ashes from Coal-Fired Power Stations: A Critical Overview**. Energy & Fuels, v. 19, p. 1084-1098, 2005.

WANG, C.S. **Electrostatic Forces in Fibrous Filters – a review**. Powder Technology. 118 p. 166–170, 2001.

WANG, L. K.; PEREIRA, N. C.; HUNG, Y. T. **Handbook of Environmental Engineering. Volume 1: Air Pollution Control Engineering**. New Jersey: Humana Press, . v.1 p. 59–192, 2004.

Zhao, Y., et al. **Mineralogy and Chemical Composition of High-Calcium Fly Ashes and Density Fractions from a Coal-Fired Power Plant in China**. Energy Fuels, v. 24, p. 834 – 843, 2010.