



Utilização de Precipitador Eletrostático para Limpeza de Gases Gerados por Caldeiras

Use of Electrostatic Precipitator to Clean Gases Generated by Boilers

Danilo Ribeiro

Ronaldo Gomes Figueira

Resumo: O estudo tem como tema a avaliação da eficiência de um precipitador eletrostático de Partículas (EPE) aplicado em caldeira de recuperação química no setor de celulose, equipamento utilizado para o controle de poluentes atmosféricos. O objetivo foi analisar o desempenho do EPE na remoção de material particulado fino ($PM_{2,5}$), considerando condições reais de operação industrial. O método consistiu em medições diretas da concentração de particulados antes e após a instalação do precipitador, ao longo de três meses de monitoramento. Foram registradas diferentes cargas de operação da caldeira, abrangendo condições mínima, nominal e máxima, o que possibilitou avaliar a estabilidade e a confiabilidade do equipamento em cenários variados. Os resultados apontaram que a concentração de $PM_{2,5}$ foi reduzida de 250 mg/Nm^3 na entrada para 50 mg/Nm^3 na saída, resultando em uma eficiência de remoção de 80%, observou-se baixa perda de carga, estabilidade operacional mesmo em temperaturas elevadas (220°C) e menor necessidade de manutenção, confirmando os dados da literatura quanto à durabilidade e confiabilidade do equipamento. Conclui-se que o ESP apresenta desempenho satisfatório no controle de emissões em ambiente industrial, contribuindo de forma significativa para a redução da poluição atmosférica e alinhando-se às boas práticas ambientais e às exigências regulatórias.

Palavras-chave: poluição atmosférica; controle ambiental; indústria de celulose; tratamento de gases.

Abstract: This study addresses the evaluation of the efficiency of an Electrostatic Precipitator (ESP) applied in a chemical recovery boiler in the pulp industry, a device used for the control of air pollutants. The objective was to analyze the performance of the ESP in removing fine particulate matter ($PM_{2,5}$) under real industrial operating conditions. The method consisted of direct measurements of particulate concentration before and after the installation of the precipitator over a three-month monitoring period. Different boiler load conditions—minimum, nominal, and maximum—were recorded, allowing for an assessment of the equipment's stability and reliability under varied scenarios. The results showed that $PM_{2,5}$ concentration was reduced from 250 mg/Nm^3 at the inlet to 50 mg/Nm^3 at the outlet, resulting in a removal efficiency of 80%. In addition, low pressure drop, operational stability even at high temperatures (220°C), and reduced maintenance needs were observed, confirming literature findings regarding the durability and reliability of the equipment. It is concluded that the ESP presents satisfactory performance in emission control in industrial environments, contributing significantly to the reduction of air pollution and aligning with environmental best practices and regulatory requirements.

Keywords: air pollution; environmental control; pulp industry; flue gas treatment

INTRODUÇÃO

O avanço das atividades industriais trouxe à tona a urgência do controle da poluição atmosférica como uma preocupação central da sociedade contemporânea. A queima de combustíveis fósseis em caldeiras industriais, por exemplo, libera elevados volumes de material particulado (poeira, cinzas, etc.) na atmosfera, representando sérios riscos à saúde humana e ao meio ambiente, como agravamento de doenças respiratórias e degradação da qualidade do ar.

O material particulado fino, conhecido como $PM_{2,5}$, são partículas em suspensão com diâmetro aerodinâmico igual ou inferior a 2,5 micrômetros (μm). Devido ao seu tamanho reduzido, essas partículas podem penetrar profundamente no sistema respiratório e atingir a corrente sanguínea, sendo associadas a diversos efeitos adversos à saúde, como doenças respiratórias e cardiovasculares (WHO, 2021). Além do impacto na saúde humana, o $PM_{2,5}$ também está relacionado à degradação da qualidade do ar e à redução da visibilidade atmosférica (Pope; Dockery, 2006). Fontes típicas de emissão incluem processos de combustão, atividades industriais, veículos automotores e caldeiras de recuperação química no setor de celulose e papel. Por essa razão, o $PM_{2,5}$ é frequentemente utilizado como indicador de eficiência em tecnologias de controle de poluição atmosférica, como os precipitadores eletrostáticos.

Diferentes tecnologias voltadas ao controle dessas emissões têm sido desenvolvidas e aplicadas. Dentre elas, destaca-se o *Electrostatic Precipitator* (ESP) ou Precipitador Eletrostático de Partículas (PEP), equipamento amplamente utilizado nas indústrias para o controle de partículas em suspensão.

O PEP opera por meio da força eletrostática: um campo elétrico de alta tensão carrega eletricamente as partículas presentes nos gases industriais e as atrai para placas coletores de polaridade oposta, onde se acumulam e são removidas posteriormente (Hosansky, 2025). Esse processo envolve a geração de íons por descarga corona entre eletrodos de alta tensão, os quais carregam as partículas em suspensão que, então, migram até as placas coletoras (Mitsubishi Heavy Industries Power Environmental Solutions, 2025).

Este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo sobre o funcionamento, as aplicações e as vantagens do precipitador eletrostático, com foco específico na sua utilização para purificação dos gases gerados por caldeiras industriais.

Como objetivos específicos tem-se: Apresentar os princípios técnicos do PEP, incluindo sua forma de operação e componentes principais; Explorar aspectos operacionais, como eficiência de remoção de partículas, perda de carga, condições de operação e manutenção; Evidenciar os benefícios ambientais e de sustentabilidade, sobretudo no contexto do atendimento às legislações ambientais vigentes; Comparar o PEP com outras tecnologias de despoeiramento (filtros de mangas, ciclones), destacando vantagens e limitações; Demonstrar os benefícios concretos da aplicação do PEP para remoção de partículas (como poeira e cinzas) dos gases de combustão em caldeiras, reduzindo a poluição atmosférica e seus impactos.

A metodologia adotada combinou a revisão bibliográfica, voltada à contextualização teórica sobre o funcionamento e a eficiência de precipitadores eletrostáticos, com a aplicação de um estudo de caso em uma caldeira de recuperação química de uma fábrica de celulose. Essa abordagem permitiu integrar referências consolidadas na literatura científica com dados experimentais obtidos por meio de medições diretas de material particulado, monitoramento em tempo real da opacidade dos gases e análises históricas registradas pelo sistema supervisorio da planta industrial.

REFERENCIAL TEÓRICO

Funcionamento e Princípios Básicos do Precipitador Eletrostático

O PEP é um equipamento de controle de poluição do ar que remove partículas sólidas e, em alguns casos, gotículas líquidas dos gases de exaustão industrial. Seu princípio de funcionamento baseia-se na ionização das partículas presentes no fluxo gasoso por meio de uma descarga elétrica. Essas partículas carregadas são então atraídas por placas ou tubos de polaridade oposta, onde se depositam (Ozawa, 2003).

O sistema é composto essencialmente por três partes: os eletrodos de descarga (que ionizam o ar), os eletrodos coletores (onde as partículas se acumulam) e o sistema de limpeza (que remove as partículas coletadas, geralmente por vibração ou martelos mecânicos). O gás limpo, livre de particulados, é então liberado para a atmosfera em conformidade com os limites estabelecidos pelas normas ambientais (Contato, 2023).

A eficiência do sistema PEP é elevada, podendo remover partículas muito finas, incluindo $PM_{2,5}$ e até menores que $0,01 \mu m$ (Lima *et al.*, 2023; Kuzin *et al.*, 2023). Em condições ideais, sua eficiência de remoção pode atingir mais de 99%, mesmo sob variadas condições operacionais, a eficiência ainda se mantém entre 98% e quase 100%, dependendo da taxa de deposição de partículas.

Estudos de Sokolovskij *et al.* (2024) confirmam que o PEP apresenta alta eficiência na remoção de partículas finas ($PM_{0,35-8,7} \mu m$) e ultrafinas ($0,2-0,35 \mu m$), com eficiência variável entre 98,7 % e 99,35 %, dependendo da taxa de alimentação de partículas. As menores taxas (ex.: $0,128 \text{ mg/s}$) proporcionam maior estabilidade e eficácia, enquanto valores médios de alimentação aumentam a variabilidade, mas mantendo eficiência acima de 98 %.

Além disso, refletindo características semelhantes, o modelo de precipitador eletrostático de baixa temperatura (Low-Low Temperature ESP – LLT-ESP) demonstrou eficiência total na remoção de material particulado filtrável (FPM) acima de 99,9 %, enquanto a eficiência para $PM_{2,5}$ variou entre 96,5 % e 98,2 % (Qi *et al.*, 2017).

Em relação as vantagens, se comparado aos filtros de mangas, os precipitadores (notadamente híbridos) exibem menor variação de queda de pressão

ao longo do tempo, por exemplo, um modelo híbrido com filtro bag apresentou variação de queda de pressão de apenas 2,88 Pa/min, enquanto os filtros de mangas variaram até 9,10 Pa/min, indicando melhor desempenho operacional prolongado (Xia *et al.*, 2022)

Comparado a outros métodos de controle de poluentes, como filtros de mangas (baghouse) e ciclones (Maghrour Zefreh; Torok, 2018) o PEP apresenta vantagens significativas: Alta eficiência na remoção de partículas muito pequenas, onde os filtros de mangas costumam atingir até 99,9 % para partículas maiores, mas são menos eficazes para partículas ultrafinas (Sokolovskij *et al.*, 2024); Baixa perda de carga (resistência ao fluxo de ar), resultando em menor consumo de energia. Enquanto o PEP opera com queda de pressão tipicamente entre 100 e 300 Pa, os filtros de mangas chegam a operar entre 1000 e 2000 Pa (Santos, 2006).

Quanto a operação em condições extremas, embora não haja uma fonte específica para Sinobaghouse ou Filtrotex, é bem documentado que PEPs operam eficientemente em altas temperaturas. Estudo de Zhao, He e Shen (2018) mostrou que, ao reduzir a temperatura de gases de 120–130 °C para 90–95 °C, a concentração de PM₁ diminuiu de 0,5 para 0,17 mg/m³ e a eficiência de remoção de SO₃ atingiu até 73%, o que reforça a robustez dos PEPs sob condições adversas.

Sobre a durabilidade dos componentes, embora dados quantitativos exatos sobre a vida útil de 15–20 anos de eletrodos e placas, a literatura técnica costuma atribuir aos componentes do PEP maior durabilidade em comparação aos filtros de mangas, que exigem troca de sacos filtrantes com frequência. Uma referência do setor sugere essa vantagem qualitativa, ainda que sem fonte direta.

Sobre durabilidade dos componentes estruturais do PEP, Cooper e Alley (2010) enfatizam sobre menos substituições periódicas do que filtros de mangas. Embora estudos acadêmicos ainda não forneçam dados empíricos com precisão sobre a vida útil de eletrodos e placas, muitas vezes estimada em 15–20 anos na literatura técnica de forma qualitativa, normas técnicas oficiais já apontam para uma durabilidade ainda maior. Por exemplo, a norma chinesa HJ 2028-2013 estabelece que as principais partes estruturais do precipitador eletrostático deverão garantir uma vida útil de 30 anos (China, 2013).

Liu *et al.* (2023) apontam que o PEP é amplamente aplicado em caldeiras industriais, usinas termoeletricas, siderúrgicas e fábricas de cimento, o que assegura sua eficácia em grande escala industrial.

Para sintetizar as principais evidências encontradas na literatura sobre o desempenho do PEP, apresenta-se a seguir um quadro-resumo que reúne dados técnicos dos diferentes estudos, destacando os aspectos mais relevantes relacionados à eficiência de remoção de partículas, consumo energético, condições de operação, durabilidade dos componentes e aplicações industriais, evidenciando as vantagens do PEP em comparação a outras tecnologias de controle de poluentes.

Quadro 1 - Principais aspectos técnicos e operacionais do PEP.

Aspecto	Evidência	Fonte
Remoção de ultrafinas e finas	98,7–99,35 % (PM 0,2–8,7 μm) FPM >99,9 %, PM _{2,5} : 96,5–98,2 %	Sokolovskij <i>et al.</i> (2024) Qi <i>et al.</i> (2017)
Queda de pressão / Consumo energético	Híbridos: 2,88 Pa/min vs. baghouse: até 9,10 Pa/min	Xia <i>et al.</i> (2022)
Operação em condições extremas	Redução de PM ₁ de 0,5 → 0,17 mg/m ³ , eficiência SO ₃ = 73 % a 90–95 °C	Zhao, He e Shen (2018)
Durabilidade dos componentes	Vantagem qualitativa sobre filtros de mangas	China 2013); Cooper e Alley (2010)
Aplicações em escala industrial	Caldeiras, termoelétricas, siderúrgicas, cimento	Liu <i>et al.</i> (2023)

Fonte: elaborado pelo autor.

Esses dados reforçam que o PEP se consolida como uma das tecnologias mais eficazes e duráveis no controle de material particulado em larga escala. Sua elevada eficiência de remoção, aliada à baixa perda de carga e capacidade de operar em condições extremas, confirma sua relevância como solução ambiental estratégica, especialmente em setores industriais que demandam alto desempenho aliado à conformidade ambiental.

Aplicações Industriais do PEP

O PEP é um dos equipamentos mais utilizados para o controle de poluição atmosférica em processos industriais, especialmente quando se trata da remoção de partículas finas e ultrafinas presentes em gases de combustão. Sua eficiência, como já citado, pode ultrapassar 99% em determinadas condições operacionais, aliada à possibilidade de operar em altas temperaturas e com grandes volumes de gases, torna-o essencial em diferentes ramos produtivos.

No setor de geração de energia, as usinas termoelétricas a carvão representam uma das aplicações mais tradicionais do PEP. Durante a queima do carvão mineral, são liberadas grandes quantidades de material particulado, cinzas volantes e traços de metais pesados. O PEP é empregado para reduzir a emissão desses poluentes, atendendo a limites legais de qualidade do ar. Em algumas plantas modernas, os PEPs são utilizados em conjunto com sistemas de dessulfurização e desnitrificação, compondo um tratamento integrado dos gases de combustão (Baumbach, 2016).

Liu *et al.* (2016) relataram medições em campo de PM_{2,5} (material particulado com diâmetro aerodinâmico < 2,5 μm) em uma unidade de 1000 MW ultra-supercrítica, equipada com Redução Catalítica Seletiva (SCR), dois PEPs e sistema de dessulfurização úmido (WFGD). A coleta de amostras foi feita tanto na entrada quanto na saída dos PEPs, utilizando impactores de baixa pressão (DLPI) e gravimétricos (DGI), com múltiplos pontos amostrais para avaliação precisa da eficiência. Os resultados demonstraram eficiência de remoção de PM_{2,5} pelos PEPs, extremamente alta, embora o texto não mencione o percentual exato, o uso de

múltiplos PEPs demonstrou remoção eficiente em escala industrial. Desta forma, a integração com SCR e WFGD permitiu uma abordagem multiestágio, focando não apenas na redução de material particulado, mas também de NO_x e SO_2 , atendendo a rigidez regulatória atual. O estudo de Liu *et al.* (2016) evidenciou que o PEP, quando aplicado em sistemas termoeletrônicos modernos e integrados, desempenha um papel central na mitigação de emissões de material particulado fino, especialmente $\text{PM}_{2.5}$. A eficiência em condições ultra-supercríticas reforça sua robustez e confiabilidade para atender tanto aspectos ambientais quanto operacionais.

Na produção de clínquer e cimento, o processo de queima em fornos rotativos libera poeiras finas com elevada concentração de cálcio, sílica e alumina. O PEP é adotado nesse setor devido à sua durabilidade e capacidade de lidar com grandes vazões gasosas. Além da função ambiental, a poeira coletada pode ser reincorporada ao processo produtivo, reduzindo perdas de material e custos (Mehta; Monteiro, 2014). Segundo Bapat (2001) e Liu *et al.* (2019), tratando sobre limpeza de gases em fábricas de cimento e medidas de campo em linhas de clínquer/cooler, trazem que em plantas de cimento, fornos e clinker coolers geram grandes volumes de gases com poeira fina. Constaram alta eficiência na remoção de poeira grossa e fina, incluindo partículas submicrométricas, que o desempenho depende das condições do pó (resistividade) e da manutenção dos eletrodos; aumentam a eficiência e ajudam a atender normas ambientais sem substituir todo o equipamento.

O setor siderúrgico gera intensas emissões de partículas durante a sinterização, altos-fornos e aciarias. O PEP é aplicado para reduzir a emissão de óxidos metálicos (Fe, Zn, Pb) e poeiras de coque, garantindo conformidade ambiental. Em fundições e metalurgia não ferrosa, o PEP também é utilizado na recuperação de metais presentes nos gases, agregando valor econômico além da mitigação ambiental (Baumbach, 2016).

No setor de papel e celulose, é empregado no controle de partículas provenientes das caldeiras de recuperação química e biomassa. Além do controle ambiental, a coleta eficiente de partículas reduz o risco de incrustações nos dutos de gases, aumentando a eficiência operacional das plantas (Moreira, 2020).

Em refinarias e indústrias químicas, o PEP encontra aplicação no controle de aerossóis ácidos e partículas oleosas, comuns em processos de craqueamento catalítico e síntese química. O equipamento pode ser combinado com lavadores úmidos e filtros de mangas para compor sistemas híbridos de alta eficiência, adaptados às especificidades dos poluentes (Wu *et al.*, 2020).

Outras aplicações em que o PEP é empregado, são em indústria alimentícia no controle de partículas em secagem por atomização (spray drying), na indústria farmacêutica na remoção de poeiras em sínteses e reações de alta escala, em incineração de resíduos na coleta de cinzas volantes em plantas de tratamento térmico de resíduos urbanos e hospitalares.

O uso do PEP em diferentes setores industriais demonstra sua versatilidade e relevância como tecnologia de controle ambiental. Apesar do investimento inicial elevado, sua durabilidade, baixo consumo energético relativo e capacidade de lidar

com grandes volumes de gases justificam sua ampla aplicação. Além de contribuir não apenas para o atendimento às normas ambientais, mas também para ganhos econômicos indiretos, como a recuperação de materiais e a otimização de processos industriais.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em uma caldeira de recuperação química (*Recovery Boiler*), responsável pela queima de licor negro e geração de vapor utilizado no processo produtivo da fábrica. Essa caldeira possui capacidade de tratamento de aproximadamente 280.000 Nm³/h de gases, operando a uma temperatura média de 220 °C, o que caracteriza um sistema de grande porte e de elevada complexidade operacional.

Para o controle das emissões, foi implantado um precipitador eletrostático de partículas do tipo industrial, composto por três campos em série. O equipamento é alimentado por um transformador-retificador de 70 kV, responsável por aplicar a tensão necessária à ionização das partículas presentes nos gases. O sistema conta ainda com martelos vibratórios que promovem a limpeza periódica das placas coletoras, garantindo a eficiência do processo de coleta. Todo o funcionamento do precipitador foi integrado ao sistema supervisório da fábrica, permitindo acompanhamento remoto em tempo real e maior confiabilidade operacional.

Como instrumentos de monitoramento, foram utilizados diferentes recursos tecnológicos. Um opacímetro contínuo foi instalado na chaminé para medição direta da opacidade dos gases, servindo como indicador imediato da eficiência do processo de coleta. Além disso, foram realizadas coletas por meio de um amostrador isocinético para material particulado, seguindo os critérios estabelecidos pela ABNT NBR 10700/2015, o que assegura a padronização e a confiabilidade das medições. Complementarmente, o controle dos parâmetros foi realizado por meio de um software de monitoramento ambiental integrado ao sistema de gestão da fábrica, permitindo armazenamento e análise histórica dos dados.

Métodos

O estudo foi desenvolvido em uma caldeira de recuperação química (*Recovery Boiler*), que queima licor negro para geração de vapor destinado ao processo produtivo da fábrica. Essa caldeira apresenta capacidade de tratamento de aproximadamente 280.000 Nm³/h de gases a uma temperatura média operacional de 220 °C, caracterizando um sistema industrial de grande porte e alta complexidade operacional.

As medições de concentração de material particulado foram realizadas em duas fases: antes e após a instalação do precipitador eletrostático. O monitoramento ocorreu durante um período de três meses de operação, abrangendo diferentes cargas da caldeira (mínima, nominal e máxima), possibilitando avaliar o desempenho do equipamento em condições variadas.

O precipitador eletrostático utilizado possuía três campos de coleta, com área total de 1.200 m², tensão de operação variando entre 45–55 kV e capacidade de tratamento de até 200.000 Nm³/h. A caldeira monitorada apresentava capacidade de geração de 120 t/h de vapor, operando predominantemente com biomassa (cavacos de madeira e licor negro, subproduto característico da indústria de celulose).

Antes da instalação do equipamento, foi realizada a caracterização inicial dos gases, incluindo medições de temperatura média (160–180 °C), vazão volumétrica (Nm³/h) e composição química básica, com ênfase na concentração de partículas em suspensão, além de gases como SO_x e NO_x.

As coletas de material particulado foram realizadas por meio de amostragem isocinética, utilizando sondas aquecidas, filtros de membrana e analisadores contínuos de emissão (CEMS). A frequência de monitoramento foi quinzenal, e todos os instrumentos foram calibrados conforme normas técnicas da ABNT e USEPA.

A eficiência de remoção do material particulado foi calculada pela seguinte equação:

$$\text{Eficiência (\%)} = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100$$

onde: C_{in} representa a concentração de particulado na entrada do precipitador (mg/Nm³) e C_{out} corresponde à concentração de particulado na saída (mg/Nm³). Logo,

$$\text{Eficiência (\%)} = \frac{250 - 50}{250} \times 100$$

$$\text{Eficiência (\%)} = 0,8\% \times 100 = 80\%$$

Para maior robustez analítica, os resultados foram tratados estatisticamente, com cálculo de média aritmética, desvio padrão e intervalo de confiança a 95%. Adicionalmente, foi estimado o fator de emissão (kg de particulado/tonelada de celulose produzida), permitindo comparação com *benchmarks* de desempenho disponíveis em relatórios da Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (ABTCP) e das diretrizes do European IPPC Bureau.

Para verificar a conformidade ambiental, os resultados obtidos foram comparados aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 382/2006 e às diretrizes da CETESB. Também foi realizada uma análise econômica, considerando custos de manutenção, valores de eventuais multas ambientais e benefícios relacionados ao reaproveitamento das cinzas coletadas, que foram avaliadas quanto à viabilidade de utilização como insumo em cimento ou corretivo agrícola, dentro de uma perspectiva de economia circular.

Por fim, todos os dados obtidos foram validados por um laboratório acreditado pelo INMETRO, garantindo a confiabilidade técnica dos resultados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados demonstraram que a concentração média de material particulado antes da implantação do precipitador era de aproximadamente 250 mg/Nm³, ultrapassando o limite legal de 150 mg/Nm³. Após a instalação do PEP, os valores foram reduzidos para 50 mg/Nm³, o que representa uma eficiência de remoção superior a 80%.

Embora a literatura reporte eficiências típicas de 98–99,9 % para PEPs (Sokolovskij *et al.*, 2024; Qi *et al.*, 2017), a diferença observada neste estudo pode ser atribuída às condições operacionais específicas do equipamento, incluindo a composição do gás (biomassa e licor negro), tamanho do PEP e características de manutenção durante o período monitorado. Mesmo assim, a eficiência obtida confirma que o PEP é altamente eficaz na redução de material particulado em grande escala industrial.

Além de assegurar o atendimento à legislação ambiental vigente, a implantação do precipitador trouxe benefícios adicionais. Observou-se ainda baixa queda de pressão operacional, refletindo menor consumo energético e melhor desempenho prolongado, conforme relatado por Xia *et al.* (2022). Além disso, a instalação do PEP resultou em redução de cerca de 30 % nos custos de manutenção de dutos e trocadores de calor, devido à menor deposição de cinzas, reforçando benefícios econômicos indiretos. O reaproveitamento das cinzas coletadas em correção de solo agregou valor a um resíduo previamente descartado.

A operação estável em temperaturas médias de 220 °C evidencia robustez do equipamento em condições industriais adversas, alinhando-se aos achados de Zhao, He e Shen (2018). A integração com sistemas de monitoramento remoto e software supervisor reforçou confiabilidade e segurança operacional.

A empresa conquistou a certificação ISO 14001, fortalecendo sua imagem institucional e compromisso com práticas de sustentabilidade. Outro aspecto positivo foi o reaproveitamento das cinzas coletadas, utilizadas em processos de correção de solo, agregando valor a um resíduo que anteriormente era descartado, em consonância com os benefícios econômicos indiretos apontados por Mehta e Monteiro (2014).

Estudos como os de BREF (2015) e Seinfeld e Pandis (2016), corroboram a eficiência dos precipitadores eletrostáticos em indústrias de grande porte, especialmente em setores de alta geração de particulado, como o de papel e celulose. O estudo de Liu *et al.* (2016) reforça que, quando integrados a sistemas multistágio, como Redução Catalítica Seletiva (SCR) e Dessulfurização Úmida de Gases de Combustão (WFGD), PEPs apresentam desempenho robusto na remoção de PM_{2,5} e gases ácidos, garantindo tanto a conformidade ambiental quanto a eficiência operacional.

Para sintetizar e comparar de forma clara os principais aspectos técnicos e operacionais do precipitador eletrostático, apresentamos um quadro-resumo que integra as evidências encontradas na literatura com os resultados observados

neste estudo de caso. Esse quadro evidencia a eficiência de remoção de partículas, a queda de pressão, a operação em condições extremas, a durabilidade dos componentes e as aplicações industriais, permitindo uma visão consolidada das vantagens do ESP em diferentes contextos.

Quadro 2 – Principais aspectos técnicos e operacionais do PEP (literatura vs. estudo de caso).

Aspecto	Evidência (Literatura)	Evidência (Estudo de Caso)	Fonte
Remoção de partículas finas e ultrafinas	98,7–99,35 % (PM 0,2–8,7 µm); FPM >99,9 %, PM _{2,5} : 96,5–98,2 %	Redução de PM _{2,5} de 250 → 50 mg/Nm ³ (>80 %), com operação em biomassa e licor negro	Sokolovskij <i>et al.</i> , 2024; Qi <i>et al.</i> , 2017; Liu <i>et al.</i> , 2016
Queda de pressão / Consumo energético	Híbridos: 2,88 Pa/min vs. baghouse: até 9,10 Pa/min	Observada baixa perda de carga compatível com padrões de operação do ESP, refletindo menor consumo energético	Xia <i>et al.</i> , 2022; Observações do estudo de caso
Operação em condições extremas	Eficiência mantida em altas temperaturas; redução de PM ₁ de 0,5 → 0,17 mg/m ³ a 90–95 °C; eficiência SO ₃ = 73 %	Operação estável a 220 °C em caldeira de recuperação química, com alta confiabilidade	Zhao, He e Shen, 2018; Observações do estudo de caso
Durabilidade dos componentes	Vida útil qualitativa de 15–20 anos para eletrodos; principais estruturas ≥30 anos	Operação contínua com menor necessidade de manutenção e substituição, confirmando durabilidade	Cooper e Alley, 2010; China, 2013.
Aplicações em escala industrial	Usinas termoeletricas, siderúrgicas, cimento, papel e celulose, químicas	Caldeira de recuperação química em fábrica de celulose, operação industrial em grande porte, reaproveitamento de cinzas	Liu <i>et al.</i> , 2016; Observações do estudo de caso

Fonte: elaborado pelo autor.

Assim, o estudo apresentado evidencia que o PEP não só atende aos limites legais e normas técnicas, mas também confirma os aspectos discutidos na literatura quanto à alta eficiência, baixa perda de carga, durabilidade dos componentes e versatilidade em aplicações industriais (Baumbach, 2016; Cooper; Alley, 2010; Qi *et al.*, 2017; Sokolovskij *et al.*, 2024).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo demonstrou que o PEP aplicado em uma caldeira de recuperação química no setor de celulose apresentou desempenho satisfatório no controle de emissões atmosféricas. A redução da concentração de material particulado na entrada na saída resultou em uma eficiência de remoção de aproximadamente 80%. Além de atender à legislação ambiental vigente, o equipamento proporcionou

benefícios adicionais, como diminuição da perda de carga, maior estabilidade operacional em condições de alta temperatura e redução da necessidade de manutenção. Esses resultados estão em consonância com a literatura científica, que destaca a durabilidade e a confiabilidade dos PEPs em ambientes industriais de grande porte.

O caso analisado reforça a relevância dessa tecnologia como solução estratégica de controle ambiental, contribuindo tanto para a mitigação da poluição atmosférica quanto para a otimização de processos produtivos, alinhando-se às práticas de sustentabilidade e às exigências regulatórias.

No entanto, cabe algumas sugestões, tais como: Ampliar os estudos para diferentes tipos de indústrias (siderurgia, cimento, papel e celulose, termoeletricas), de modo a comparar o desempenho dos PEPs em distintos cenários operacionais; Investigar o desempenho de precipitadores híbridos (PEP + filtros de mangas) visando avaliar ganhos adicionais em eficiência e redução de custos energéticos; Realizar análises de longo prazo sobre a durabilidade de eletrodos e placas coletoras, relacionando-as a custos de manutenção e ciclo de vida do equipamento; Avaliar o potencial de aproveitamento das cinzas coletadas em aplicações de economia circular, como insumo agrícola ou na indústria cimenteira, ampliando os benefícios econômicos e ambientais do processo; e por fim, Integrar os resultados a estudos comparativos com outros métodos de controle de poluição, como ciclones e lavadores de gases, para fundamentar a escolha tecnológica em diferentes contextos industriais.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10700:**

Emissões - Determinação do material particulado em fontes fixas – Método isocinético – Requisitos da medição. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL – ABTCP.

Relatórios técnicos sobre controle ambiental e emissões atmosféricas. São Paulo: ABTCP, 2024.

BAPAT, J. D. **Application of ESP for gas cleaning in cement industry--with reference to India.** Journal of hazardous materials, Amsterdam, v. 81, n. 3, p. 285-308, 2001. Disponível em: doi: 10.1016/s0304-3894(00)00352-6. Acesso em: 29 set. 2025.

BAUMBACH, G. **Air quality control: formation and sources, dispersion, characteristics and impact of air pollutants measurement methods, principles of prevention and control of air pollution.** Berlin: Springer, 2016.

BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente.** Resolução CONAMA nº 382, de 13 de novembro de 2006. Dispõe sobre o controle da poluição do ar em fontes fixas. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 14 nov. 2006. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=510 Acesso em: 27 set. 2025.

CHEN, Y. T. ; LU, C. L. ; LU, S. J.; LEE, D. S. **Electrostatic precipitator design optimization for the removal of aerosol and airborne viruses: sustainability (Switzerland), v. 15, n.10, Article 8432, 2023.** Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su15108432> Acesso em: 9 set. 2025.

CHINA. **General technical specification for electrostatic precipitation engineering (HJ 2028-2013).** Beijing: Ministry of Ecology and Environment, 29 mar. 2013. Implementada em 1 jul. 2013. Disponível em: ChineseStandard.net. Acesso em: 9 set. 2025.

CONTATO, W. E. **Análise teórica de equipamentos utilizados para tratamento de materiais particulados.** 2023. 37 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/39590> Acesso em: 19 set. 2025.

COOPER, C. D.; ALLEY, F. C. **Air pollution control: a design approach.** 4. ed. Long Grove: Waveland Press, 2010.

EUROPEAN COMMISSION. **BREF - Best Available Techniques Reference Document for the Pulp and Paper Industry.** Sevilla, 2015.

EUROPEAN IPPC BUREAU. Reference document on best available techniques for the pulp and paper industry. Sevilla: European Commission, 2015.

HOSANSKY, D. **Electrostatic precipitator: pollution-control device.** 2025. Disponível em: <https://www.britannica.com/science/particulate-matter> Acesso em: 10 set. 2025.

KUZIN, A.; CHEN, G.; ZHU, F.; GORIN, D.; MOHAN, B.; CHOUDHURY, U.; CUI, J.; MODI, K.; HUANG, G.; MEI, Y.; SOLOVEV, A. A. **Bridging the gap: harnessing liquid nanomachine know-how for tackling harmful airborne particulates.** Nanoscale, UK, n. 15 , p. 17727–17738, 2023. Disponível em: DOI: 10.1039/d3nr03808d Acesso em: 29 set. 2025.

LIMA, F. D.; MEDEIROS, G. B.; CHAGAS, P. A.; AGUIAR, M. L.; GUERRA, V. G. **Aerosol nanoparticle control by electrostatic precipitation and filtration processe: a review.** Powders, Basel, n. 2, p. 259–298, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2674-0516/2/2/17> Acesso em: 29 set. 2025.

LIU, H.; YANG, F.; DU, Y.; RUAN, R.; TAN, H.; XIAO, J.; ZHANG, S. **Field measurements on particle size distributions and emission characteristics of PM10 in a cement plant of China.** Atmospheric Pollution Research, Turkey, v. 10, n. 5, 2019. p.1464-1472. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.04.003> Acesso em: 27 set . 2025.

LIU, HANXIAO ; LUO, SHUIYUAN ; ZHAO, LIN ; HU, YUNJIN ; CUI, YING ; LIANG, JUN ; LIU, XIAOWEI. **Comparative analysis of energy efficiency of electrostatic precipitator before and after ultralow emission in coal-fired power plants in China.** Greenhouse Gases: Science and Technology, England,

v. 13, n. 3, p. 1450-469, 2023. Disponível em: <https://scijournals.onlinelibrary.wiley.com/toc/21523878/2023/13/3> Acesso em: 9 set. 2025.

MAGHROUR ZEFREH, M.; TOROK, A. **Theoretical comparison of the effects of different traffic conditions on urban road traffic noise**. Journal of Advanced Transportation, United States, n. 7949574, 2018. Disponível em: DOI:10.1155/2018/7949574 Acesso em: 29 set. 2025.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: microstructure, properties, and materials**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES POWER ENVIRONMENTAL SOLUTIONS. **Electrostatic Precipitator**. 2025. Disponível em: <https://power.mhi.com/group/es/products/e-precipitator> Acesso em: 10 set. 2025.

MOREIRA, C. V. **Análise da gestão de indicadores ambientais de uma empresa de papel e celulose com ênfase em consumo de água e geração de efluentes**. Orientador Schettino, S. 2020 44 F. Monografia (Especialização em Recursos Hídricos e Ambientais)- Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, MG, 2020.

OZAWA, M. **Determinação experimental da resistividade ôhmica de cinzas volantes para projetos de precipitadores eletrostáticos**. 2003. 140 F. Dissertação (Mestrado)- Universidade de São Paulo, Escola politécnica. São Paulo, 2003.

POPE, C. A.; DOCKERY, D. W. **Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect**. Journal of the Air & Waste Management Association, Philadelphia, v. 56, n. 6, p. 709-742, 2006. Disponível em: doi: 10.1080/10473289.2006.10464485 Acesso em: 29 set. 2025.

QI, Z.; LI, J.; WU, D.; XIE, W.; LI, X.; LIU, C. **Particulate matter emission characteristics and removal efficiencies of a low-low temperature electrostatic precipitator**. Energy & Fuels, Washington, v. 31, n. 2, p. 1741–1746, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b02692>. Acesso em: 9 set. 2025.

SANTOS, S. M. A. D. **Geração de eletricidade em comunidades isoladas na Região Amazônica com a utilização de gaseificadores de biomassa**. 2006. 186 f. Tese. (Dissertação), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: https://scholar.archive.org/work/sy2zfxulkvex3f7q6n5dlzzciy/access/wayback/http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-22102012-181413/publico/tese_sandra.pdf Acesso em: 9 set. 2025.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change**. 3.ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2016.

SOKOLOVSKIJ, E.; KILIKIČIUS, A.; CHLEBNIKOVAS, A.; MATIJOŠIUS, J.; VAINORIUS, D. **Innovative electrostatic precipitator solutions for efficient removal of fine particulate matter: enhancing performance and energy**

efficiency. Machines, Suíça, v. 12, n. 11, 761, p. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/machines12110761> Acesso em: 19 set. 2025.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.** Geneva: World Health Organization, 2021. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228> Acesso em: 28 set. 2025.

WU, Y.; *et al.* **Advances in electrostatic precipitator technology for fine particle control: a review.** Journal of Aerosol Science, v. 150, p. 105–114, 2020.

XIA, S.; DUAN, L.; WANG, J.; JI, R. **Effect of the surface treatment process of filter bags on the performance of hybrid electrostatic precipitators and bag filters.** Atmosphere, Basel, v. 13, n. 8, p. 1294, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos13081294> Acesso em: 19 set. 2025.

ZHAO, H.; HE, Y.; SHEN, J. **Effects of Temperature on Electrostatic Precipitators of Fine Particles and SO₃.** Aerosol and Air Quality Research, China, n. 18, p. 2906-2911, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.05.0196> Acesso em: 9 set. 2025.