

Universidade do Vale do Paraíba
Faculdade de Engenharias e Arquitetura
Programa de Graduação em Engenharia Mecânica

Isabela Oliveira Gonçalves Rodrigues

Inovações da filtração nos processos agrícolas: avanços tecnológicos veiculares
e prevenção na saúde do trabalhador rural

São José dos Campos

2025

Isabela Oliveira Gonçalves Rodrigues

**Inovações da filtração nos processos agrícolas: avanços tecnológicos veiculares
e prevenção na saúde do trabalhador rural**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Programa de Graduação em Engenharia
Mecânica, como complementação dos créditos
necessários para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: MsC Prof. Wagner de A. da Silva.

São José dos Campos, SP

2025

Isabela Oliveira Gonçalves Rodrigues

INOVAÇÕES DA FILTRAÇÃO NOS PROCESSOS AGRÍCOLAS:
avanços tecnológicos veiculares e prevenção na saúde do trabalhador rural

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Programa de Graduação em Engenharia Mecânica, na Faculdade de Engenharias e Arquitetura da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, pela seguinte banca examinadora:

Aprovado em: ____/____/____

Banca Examinadora:

Prof. Msc. Wagner de Almeida da Silva (Orientador)
Universidade do Vale do Paraíba

Profa. Msc. Lizia Oliveira Acosta Dias
Universidade do Vale do Paraíba

Prof. Msc. Marco Antonio Custodio
Universidade do Vale do Paraíba

Agradecimentos

A jornada até aqui não teria sido possível sem o apoio incondicional da minha família, que sempre acreditou em mim e me fortaleceu nos momentos mais desafiadores. Aos meus amigos, por cada palavra de incentivo e por tornarem essa caminhada mais leve. Ao corpo docente, pela dedicação, paciência e pelo conhecimento compartilhado, que moldou minha trajetória acadêmica. A todos que, de alguma forma, fizeram parte desta conquista, minha eterna gratidão.

Este trabalho é fruto de cada um de vocês.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar as inovações tecnológicas em sistemas de filtração de ar aplicados em veículos agrícolas e os impactos dessas tecnologias na saúde, segurança e produtividade dos trabalhadores rurais. A pesquisa foi classificada como explicativa e descritiva, de natureza aplicada, utilizando abordagem qualitativa baseada em revisão bibliográfica sistematizada e análise normativa de documentos técnicos, com foco nas normas internacionais EN 15695 e ISO 14269. O estudo destacou a ausência de regulamentação específica no Brasil para filtragem de ar em cabines agrícolas, evidenciando a necessidade de adoção de diretrizes nacionais que garantam a proteção dos operadores contra partículas, vapores químicos e agrotóxicos presentes no ambiente agrícola. Foram analisados diferentes tipos de sistemas de filtragem, incluindo filtros de alta eficiência (HEPA), filtros de carvão ativado e sistemas multicamadas, que combinam várias tecnologias para maximizar a proteção do operador. Esses filtros demonstraram reduzir significativamente a concentração de contaminantes no ar, prevenindo doenças respiratórias, fadiga, irritações e outras condições ocupacionais, além de aumentar o conforto e a eficiência operacional do trabalho. A implementação de sistemas de filtração avançados também contribuiu para prolongar a vida útil dos equipamentos agrícolas, reduzir o consumo de combustível, diminuir os custos de manutenção e otimizar a produtividade. O trabalho realizou uma comparação entre tecnologias tradicionais, como filtros de areia e tela, e soluções modernas, evidenciando melhorias em eficiência, automação, durabilidade e impacto ambiental. Além disso, foram abordados os benefícios econômicos decorrentes da adoção de cabines pressurizadas e filtradas, incluindo a redução de afastamentos médicos, menor necessidade de equipamentos de proteção individual (EPIs) desconfortáveis e aumento da produtividade dos operadores.

Palavras-chave: Filtração. Veículos Agrícolas. Saúde Ocupacional. Segurança no trabalho.

Abstract

This study aims to analyze technological innovations in air filtration systems applied to agricultural vehicles and the impacts of these technologies on the health, safety, and productivity of rural workers. The research was classified as explanatory and descriptive, with an applied nature, using a qualitative approach based on a systematic literature review and normative analysis of technical documents, focusing on the international standards EN 15695 and ISO 14269. The study highlighted the absence of specific regulation in Brazil for air filtration in agricultural cabins, emphasizing the need for the adoption of national guidelines that ensure operators' protection against particles, chemical vapors, and pesticides present in the agricultural environment. Different types of filtration systems were analyzed, including high-efficiency (HEPA) filters, activated carbon filters, and multilayer systems that combine various technologies to maximize operator protection. These filters were shown to significantly reduce the concentration of airborne contaminants, preventing respiratory diseases, fatigue, irritation, and other occupational conditions, while also increasing comfort and work efficiency. The implementation of advanced filtration systems also contributes to extending the lifespan of agricultural equipment, reducing fuel consumption, lowering maintenance costs, and optimizing productivity. The study compared traditional technologies, such as sand and mesh filters, with modern solutions, highlighting improvements in efficiency, automation, durability, and environmental impact. Additionally, the economic benefits of adopting pressurized and filtered cabins were addressed, including reduced medical leave, lower reliance on uncomfortable personal protective equipment (PPE), and increased operator productivity.

Keywords: Filtration. Agricultural Vehicles. Occupational Health. Occupational Safety.

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Representação conceitual do bloqueio de partículas em sistemas de filtragem avançada.....	16
Figura 2 - Filtro de Partícula (HEPA)	17
Figura 3 - Filtro de Carvão Ativado.....	17
Figura 4 - Sistema de Filtragem Multicamada	18
Figura 5 – Filtro Mecânico	24
Figura 6 – Filtro Biológico	25
Figura 7– Filtro Químico	25
Figura 8 - Simulação digital do sistema de filtragem instalado no teto da cabine de trator agrícola.	27
Figura 9 – EPI Proteção	27
Figura 10 - Representação da NR-9: Programa de Prevenção de Riscos Ambientais (PPRA)	28
Figura 11 - Representação da NR-15: Atividades e Operações Insalubres	29
Figura 12-Identificação de Perigos Químicos: A Norma NBR 14725 no Campo	29
Figura 13- Sistema de Filtração de Cabine em Trator Agrícola.....	30
Figura 14 -Integração entre o Sistema de Filtração e os Sensores Automáticos de Monitoramento da Água de Irrigação.....	30
Figura 15 - Ilustração médica dos pulmões com ampliação de agentes infecciosos.....	31
Figura 16 – Cabine Trator sem filtro	32
Figura 17 - Comparação dos 2 sistemas: Sem uma cabine devidamente protegida versus cabine com filtragem eficiente.	32
Figura 18 - Representação esquemática da filtração de partícula.	33

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Comparativo de tecnologias e critérios.....	24
Tabela 2 - Requisitos mínimos e níveis de proteção por categoria de filtragem	28

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	11
1.2 JUSTIFICATIVA.....	11
1.3 OBJETIVO	12
1.3.1 Objetivo Geral.....	12
1.3.2 Objetivos Específicos	12
1.4 METODOLOGIA	12
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1 FILTRAÇÃO NOS PROCESSOS AGRÍCOLAS.....	13
2.1.1 Importância da Filtração para a Saúde dos Trabalhadores	14
2.2 TECNOLOGIAS DE FILTRAÇÃO DE AR AGRÍCOLA	15
2.2.1 Importância da Filtração de Ar em Veículos Agrícolas	15
2.2.2 Tipos de Filtros Aplicados.....	15
2.2.3 Impactos da Filtração de Ar na Saúde do Trabalhador Rural	17
2.3 AVANÇOS TECNOLÓGICOS	18
2.3.1 Impactos na Eficiência Energética e Ambiental	19
2.4 PREVENÇÃO NA SAÚDE	19
2.4.1 Redução de Poluentes	20
2.4.2 Benefícios à Saúde Humana e Animal	20
3 METODOLOGIA	20
3.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	22

3.1.1 Análise De Dados	22
3.1.2 Ferramentas E Técnicas Utilizadas	23
4 DESENVOLVIMENTO	23
4.1 ANÁLISE DOS SISTEMAS DE FILTRAÇÃO EXISTENTES	23
4.2 COMPARAÇÃO ENTRE TECNOLOGIAS TRADICIONAIS E MODERNAS	26
4.3 NORMAS INTERNACIONAIS E A NECESSIDADE DE REGULAMENTAÇÃO NO BRASIL. 26	
4.3.1 Normas Brasileiras Relacionadas à Proteção contra Agentes Químicos	27
4.3.1.1 NR-6 – Equipamentos de Proteção Individual (EPI).....	27
4.3.1.2 NR-9 – Programa de Prevenção de Riscos Ambientais (PPRA)	28
4.3.1.3 NR-15 – Atividades e Operações Insalubres	28
4.3.1.4 ABNT NBR 14725 – Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos	29
4.3.1.5 Comparação com Regulamentações Internacionais	30
4.3.2 Redução de custos com afastamentos médicos e processos trabalhistas	31
4.3.3 Melhoria da produtividade dos trabalhadores	31
4.3.4 Menor necessidade de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) desconfortáveis	32
4.3.5 Conclusão sobre a Necessidade de Regulamentação no Brasil	33
4.4. CUSTO DE INSTALAÇÃO	34
4.5. MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO	35
4.6. RETORNO SOBRE O INVESTIMENTO (ROI)	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	37
5.2 DISCUSSÃO SOBRE OS AVANÇOS TECNOLÓGICOS	37
5.3 A IMPORTÂNCIA DA REGULAMENTAÇÃO NACIONAL PARA FILTRAGEM DE AR EM MÁQUINAS AGRÍCOLAS	37
6 CONCLUSÃO	38

1 INTRODUÇÃO

A agricultura moderna depende da inovação tecnológica para garantir a produtividade e a segurança dos trabalhadores rurais. Dentre essas inovações, os sistemas de filtração de ar em veículos agrícolas desempenham um papel fundamental na proteção da saúde dos operadores, reduzindo a exposição a contaminantes nocivos. Nos últimos anos, a modernização da agricultura tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias voltadas para a segurança e a eficiência no campo. Dentre essas inovações, a filtração de ar em veículos agrícolas tornou-se essencial para proteger a saúde dos operadores e otimizar o desempenho das máquinas. Este trabalho explora os avanços tecnológicos na filtração de ar aplicada a veículos agrícolas, analisando seus impactos na redução da exposição a contaminantes e na segurança dos trabalhadores rurais.

Diante desse cenário, questiona-se: quais inovações em sistemas de filtração veicular agrícola podem ser aplicadas ao Brasil, e de que forma contribuiriam para a saúde do trabalhador rural?

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A filtração do ar tornou-se um aspecto essencial na agricultura moderna, especialmente na proteção dos operadores de máquinas agrícolas. A exposição a poeira, aerossóis e vapores químicos dentro das cabines de tratores pode causar sérios danos à saúde dos trabalhadores rurais. Para mitigar esses riscos, foram desenvolvidos sistemas de filtragem de ar avançados, que garantem ambientes internos mais seguros e reduzem significativamente a inalação de partículas nocivas. Com a crescente busca por maior eficiência e segurança no campo, a evolução desses sistemas não apenas melhora a qualidade do ar nas cabines, mas também aumenta o conforto operacional, reduz impactos ambientais e prolonga a vida útil dos equipamentos agrícolas.

1.2 JUSTIFICATIVA

A escolha do tema justifica-se pela crescente importância das tecnologias de filtração na agricultura moderna. A aplicação dessas inovações tecnológicas tem o potencial de transformar as práticas agrícolas, promovendo uma produção mais eficiente e sustentável. Apesar da importância da filtração de ar na proteção dos trabalhadores rurais, o Brasil ainda não possui regulamentações específicas para a adoção obrigatória dessas tecnologias em veículos agrícolas. Enquanto a norma europeia EN 15695 estabelece padrões rigorosos para a segurança dos operadores na Europa, a norma internacional ISO 14269 define diretrizes globais para ventilação e filtragem de ar em cabines agrícolas. Assim, este estudo busca contribuir com a literatura técnica e propor

diretrizes aplicáveis à realidade agrícola brasileira.

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal explorar as inovações na filtração aplicadas aos processos agrícolas, com ênfase nos avanços tecnológicos veiculares e na prevenção de problemas de saúde associados à agricultura.

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar e avaliar as inovações tecnológicas na filtração dos processos agrícolas, destacando suas aplicações em veículos agrícolas e os impactos na saúde.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar os principais tipos de sistemas de filtração utilizados na agricultura.
- Examinar os avanços tecnológicos na filtração aplicada aos veículos agrícolas.
- Avaliar os impactos dessas inovações na eficiência produtiva e na sustentabilidade ambiental.
- Investigar as implicações dessas tecnologias na saúde dos trabalhadores agrícolas e das comunidades rurais.
- Propor recomendações para a implementação e otimização de sistemas de filtração nas práticas agrícolas.
- Avaliar as normas EN 15695 e ISO 14269 e sua aplicabilidade na regulamentação da filtragem de ar em veículos agrícolas no Brasil.
- Comparar a legislação brasileira com as normas internacionais, avaliando a viabilidade de implementação de regulamentações similares no Brasil.

1.4 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho envolve uma revisão bibliográfica abrangente sobre os sistemas de filtração aplicados na agricultura, com ênfase na análise das normas EN 15695 e ISO 14269. Serão utilizados dados de fontes acadêmicas, relatórios técnicos e artigos científicos para fundamentar a análise. O estudo também examina a ausência de regulamentações equivalentes no Brasil e discute os impactos dessa lacuna na segurança dos trabalhadores rurais.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em seis capítulos, estruturados de forma a proporcionar uma análise clara e progressiva sobre as inovações na filtração aplicada aos processos agrícolas e seus impactos na saúde dos trabalhadores rurais.

O Capítulo 1 apresenta a introdução, contextualizando a relevância do tema, justificando sua escolha e estabelecendo os objetivos gerais e específicos da pesquisa. Além disso, descreve a metodologia adotada e a estrutura do trabalho.

O Capítulo 2 traz a fundamentação teórica, abordando os conceitos essenciais sobre filtração na agricultura, os tipos de tecnologias utilizadas e os avanços no setor. Também são discutidos os impactos ambientais e ocupacionais relacionados à eficiência dos sistemas de filtragem.

O Capítulo 3 detalha a metodologia da pesquisa, explicando os procedimentos adotados para a coleta e análise de dados. São apresentadas as fontes utilizadas, os critérios de seleção das informações e as técnicas de investigação aplicadas, incluindo pesquisa bibliográfica e análise normativa.

O Capítulo 4 corresponde ao desenvolvimento do estudo, explorando a aplicação das normas internacionais EN 15695 e ISO 14269 e sua relevância para a regulamentação da filtragem de ar em cabines de máquinas agrícolas no Brasil. Também são discutidos os desafios e as oportunidades para a implementação dessas regulamentações no cenário nacional.

O Capítulo 5 reúne os resultados e discussões, avaliando o impacto das inovações tecnológicas na filtração e sua viabilidade econômica. São analisadas as implicações dos avanços tecnológicos para o setor agrícola e os desafios enfrentados na implementação dessas soluções.

Por fim, o Capítulo 6 traz as conclusões do estudo, sintetizando os principais achados da pesquisa. São destacadas as contribuições do trabalho, as limitações identificadas e sugestões para estudos futuros sobre o tema.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FILTRAÇÃO NOS PROCESSOS AGRÍCOLAS

Segundo Souza (2023), os avanços tecnológicos em sistemas de filtração têm impactado diretamente a produtividade agrícola e as condições de trabalho no campo. A aplicação de filtros eficientes nos veículos agrícolas protege os operadores contra contaminantes, reduzindo riscos à saúde e aumentando a segurança ocupacional. Além

disso, esses sistemas minimizam impactos ambientais, melhorando a qualidade do ar e reduzindo a dispersão de partículas nocivas.

A exposição prolongada a poeira, pesticidas e vapores químicos pode comprometer a saúde respiratória dos trabalhadores rurais, tornando essencial a implementação de sistemas de filtragem de alto desempenho.

A regulamentação da filtração de ar em veículos agrícolas tem sido debatida internacionalmente. Normas como a ISO 14269 e a EN 15695 estabelecem padrões para ventilação e filtragem em cabines agrícolas, garantindo um ambiente mais seguro para os operadores. No entanto, o Brasil ainda carece de regulamentação específica para esses sistemas, o que pode colocar os trabalhadores rurais em risco (PAVANI, 2022).

2.1.1 Importância da Filtração para a Saúde dos Trabalhadores

De acordo com Lima (2021), a exposição a partículas suspensas e vapores químicos dentro das cabines de tratores pode causar doenças respiratórias crônicas, como bronquite ocupacional, asma e pneumoconiose. Para minimizar esses riscos, os sistemas de filtragem atuam capturando e removendo contaminantes antes que entrem no ambiente interno. Além disso, a presença de filtros de alto desempenho melhora a qualidade do ar, reduzindo a fadiga e o desconforto dos operadores durante longas jornadas de trabalho.

Entretanto, não está explicitado em grande parte da literatura o ataque de aerossóis ao corpo do motorista do trator – via cutânea e via inalatória. As partículas e gotículas finas (aerossóis) podem penetrar por duas rotas principais: (i) por contato dérmico, causando irritações, dermatites e absorção cutânea de compostos lipossolúveis; e (ii) por inalação, alcançando vias aéreas superiores e inferiores e potencialmente atingindo os alvéolos pulmonares, o que pode gerar resposta inflamatória, redução da função respiratória e intoxicações sistêmicas. Os efeitos físicos incluem irritação mucocutânea, broncoespasmo, cefaleia, tontura e, em exposições repetidas, risco aumentado de doenças respiratórias crônicas. Ressalta-se, contudo, que os efeitos nocivos específicos de muitos formulados utilizados no campo ainda foram pouco explorados em estudos de longo prazo, reforçando a necessidade de análises toxicológicas direcionadas e de monitoramento ocupacional contínuo.

A ausência de regulamentações específicas no Brasil reforça a necessidade de adaptação de normas internacionais ao contexto nacional. Enquanto a ISO 14269 define parâmetros técnicos para ventilação e climatização, a EN 15695 classifica os sistemas de filtragem em categorias de proteção, determinando quais níveis de contaminantes podem ser efetivamente bloqueados pelos filtros instalados nas cabines agrícolas (PAVANI, 2022).

2.2 TECNOLOGIAS DE FILTRAÇÃO DE AR AGRÍCOLA

Conforme Almeida (2019), os avanços tecnológicos proporcionaram novos materiais e técnicas para otimizar a eficiência da filtração no setor agrícola. A qualidade do ar dentro das cabines de máquinas agrícolas depende de sistemas eficazes, que impedem a entrada de partículas nocivas e garantem um ambiente protegido para os operadores. A escolha do sistema de filtragem adequado depende do tipo de contaminante presente no ambiente agrícola, variando de poeira e fuligem a gases tóxicos liberados durante a aplicação de defensivos agrícolas.

Os sistemas de filtragem modernos utilizam materiais filtrantes de alta performance, como camadas de microfibras sintéticas e carvão ativado, que garantem a retenção de partículas finas e vapores químicos. Além disso, novas tecnologias de sensores de qualidade do ar estão sendo incorporadas para monitorar continuamente a concentração de poluentes dentro das cabines e alertar os operadores sobre a necessidade de manutenção ou troca dos filtros (FRANCESCHETTE, 2023).

2.2.1 Importância da Filtração de Ar em Veículos Agrícolas

De acordo com Silva (2021), a presença de filtros eficientes nos veículos agrícolas é indispensável para a proteção dos operadores. Esses dispositivos capturam poeira, partículas agrotóxicos e gases, reduzindo a inalação de poluentes e promovendo maior segurança nas cabines. Sem a devida filtragem, os trabalhadores estão expostos a partículas ultrafinas que podem penetrar profundamente nos pulmões e causar danos à saúde a longo prazo.

O desempenho dos sistemas de filtragem é um fator essencial para garantir um ambiente interno seguro. A eficiência de remoção de contaminantes varia conforme a tecnologia empregada, sendo fundamental a adoção de filtros certificados que atendam a padrões internacionais. A regulamentação desses sistemas no Brasil poderia reduzir significativamente os riscos ocupacionais no setor agrícola, promovendo um ambiente de trabalho mais saudável (SANTOS, 2020).

2.2.2 Tipos de Filtros Aplicados

Segundo Martins (2021), os avanços na filtração de ar em veículos agrícolas resultaram no desenvolvimento de diferentes tipos de filtros que garantem maior proteção aos operadores. Esses sistemas são projetados para reduzir a exposição a partículas e vapores químicos que podem comprometer a saúde dos trabalhadores rurais.

Atualmente, os principais tipos de filtros aplicados na filtração de ar agrícola são:

- Os filtros **HEPA (High-Efficiency Particulate Air)** são altamente eficientes na remoção de partículas suspensas no ar, como poeira, pólen, fungos e bactérias. Eles são projetados para capturar até 99,97% das partículas com tamanho superior a 0,3 micrômetros, garantindo um ambiente interno mais seguro nas cabines dos tratores.
- Os **filtros de carvão ativado** são utilizados para remover gases e vapores químicos, como pesticidas e solventes agrícolas. O material poroso do carvão ativado adsorve essas substâncias, impedindo que elas sejam inaladas pelos operadores. Esse tipo de filtração é essencial para reduzir a exposição a compostos orgânicos voláteis (COVs), que podem causar irritações respiratórias e intoxicações.
- Os **sistemas multicamadas** combinam diferentes tipos de filtros para maximizar a proteção do operador. Normalmente, eles incluem um pré-filtro para capturar partículas maiores, seguido por um filtro HEPA e um filtro de carvão ativado para remoção de gases. Em alguns casos, um quarto estágio pode ser adicionado para lidar com partículas ultrafinas ou gases específicos. Esses filtros são projetados para atender às normas internacionais de segurança ocupacional, garantindo que os trabalhadores agrícolas tenham um ambiente interno mais saudável e protegido durante suas atividades.

Figura 1 - Representação conceitual do bloqueio de partículas em sistemas de filtração avançada.



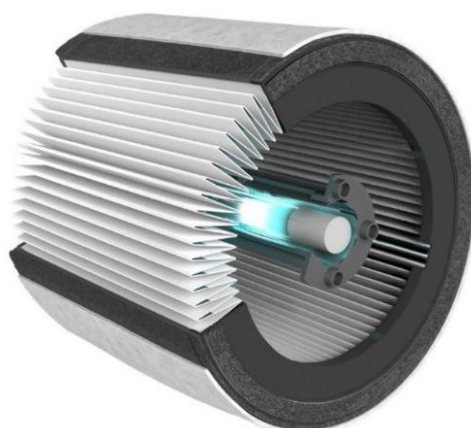
Fonte: LyFilter, 2025.

2.2.3 Impactos da Filtração de Ar na Saúde do Trabalhador Rural

Para Feliciano (2019), as máquinas agrícolas modernas são frequentemente equipadas com cabines fechadas para proteger os operadores contra o ambiente externo. Essas cabines utilizam sistemas de filtração avançados para garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores rurais. As tecnologias de filtros de cabine incluem:

- **Filtros de Partículas (HEPA):** Capazes de remover até 99,97% das partículas no ar, incluindo poeira, pólen, mofo e bactérias, os filtros HEPA são essenciais para proteger os operadores contra a inalação de contaminantes perigosos.

Figura 2 - Filtro de Partícula (HEPA)



Fonte: TruSens, 2025.

- **Filtros de Carvão Ativado:** Utilizados para remover gases e vapores nocivos, como pesticidas e outros produtos químicos agrícolas. O carvão ativado adsorve moléculas de gás, proporcionando um ar mais limpo e seguro dentro da cabine.

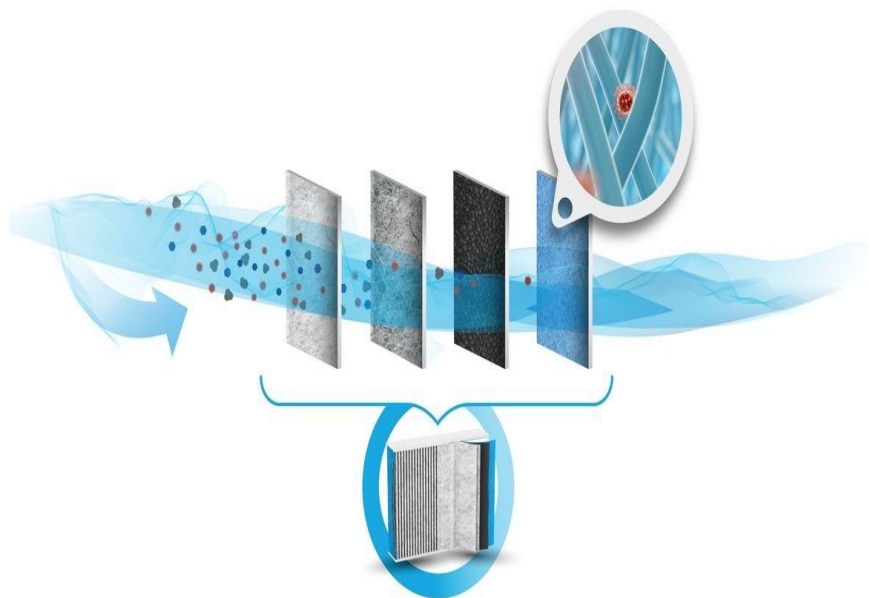
Figura 3 - Filtro de Carvão Ativado



Fonte: Elaborado pela Autora (2025), com base em imagem disponível na internet.

- **Sistemas de Filtragem Multicamada:** Combinam várias tecnologias de filtração para garantir a remoção abrangente de partículas, gases e vapores. Esses sistemas são projetados para oferecer máxima proteção ao operador, independentemente das condições externas.

Figura 4 - Sistema de Filtragem Multicamada



Fonte: LyFilter, 2025.

Os sistemas de filtração podem ser compostos por duas a quatro camadas, dependendo do nível de proteção necessário:

- **Filtração de duas camadas:** um pré-filtro e um filtro HEPA ou de carvão ativado.
- **Filtração de três camadas:** inclui um pré-filtro, um filtro HEPA e um filtro de carvão ativado.
- **Filtração de quatro camadas:** agrega um filtro adicional para capturar partículas ultra-finas ou gases específicos.

Esses padrões de filtragem são abordados na norma ISO 14269, que regula os sistemas de climatização e ventilação em cabines de tratores e máquinas agrícolas e florestais.

2.3 AVANÇOS TECNOLÓGICOS VEICULARES

A evolução dos sistemas de filtragem de ar tem sido determinante para a eficiência e segurança no setor agrícola. As inovações permitem maior retenção de contaminantes, protegendo os operadores e prolongando a vida útil dos equipamentos. Além disso, a

adoção de filtros de alta eficiência reduz o acúmulo de resíduos nos componentes internos das máquinas, diminuindo a necessidade de manutenção e melhorando o desempenho operacional (LIMA, 2021).

2.3.1 Evolução dos Sistemas de Filtração em Veículos Agrícolas

Os sistemas de filtragem de ar em veículos agrícolas passaram por avanços significativos ao longo das últimas décadas. Inicialmente, a filtragem era limitada à remoção de partículas maiores, sem oferecer uma proteção adequada contra compostos tóxicos. Atualmente, as cabines são equipadas com filtros de alta eficiência, como os filtros HEPA e de carvão ativado, que garantem um ambiente interno seguro e minimizam os riscos à saúde dos operadores. Além disso, normas internacionais como a ISO 14269 e a EN 15695 estabelecem critérios técnicos rigorosos para a ventilação e proteção dentro das cabines agrícolas, assegurando um padrão de segurança mais elevado (PAVANI, 2022).

2.3.2 Impactos na Eficiência Energética e Ambiental

A modernização dos sistemas de filtragem não apenas protege a saúde dos operadores, mas também melhora a eficiência energética das máquinas agrícolas. Tecnologias avançadas reduzem a concentração de poluentes no ar e tornam os veículos mais sustentáveis, alinhando-se às exigências ambientais globais. O uso de filtros eficientes também contribui para a redução da emissão de partículas na atmosfera, diminuindo os impactos ambientais da atividade agrícola (SANTOS, 2020).

2.4 PREVENÇÃO NA SAÚDE

Segundo Silva (2021), a filtração eficaz desempenha um papel fundamental na prevenção de riscos à saúde dos trabalhadores rurais, reduzindo sua exposição a poluentes e patógenos presentes no ambiente agrícola. Ao garantir a qualidade do ar respirado pelos trabalhadores agrícolas, os sistemas de filtração nas cabines ajudam a minimizar a exposição a poeira, pesticidas e vapores tóxicos, reduzindo o risco de doenças respiratórias e alergias ocupacionais.

A exposição prolongada à partículas provenientes de poeira, agrotóxicos e vapores químicos presentes no ambiente agrícola pode resultar em doenças respiratórias crônicas, alergias e intoxicações. A implementação de sistemas avançados de filtração de ar em veículos agrícolas minimiza esses riscos, garantindo um ambiente de trabalho mais seguro e saudável (SOUZA, 2018).

Além disso, certos produtos químicos presentes na água, como os agrotóxicos, podem ter efeitos adversos à saúde, incluindo irritações cutâneas, problemas respiratórios

e até mesmo doenças crônicas, quando há exposição prolongada e sem proteção adequada.

Da mesma forma, a filtração do ar em ambientes agrícolas pode ser crucial para proteger os trabalhadores contra a inalação de poeira, partículas finas e compostos orgânicos voláteis emitidos durante as atividades agrícolas. Essas substâncias podem causar danos respiratórios, alergias e outras condições de saúde quando inaladas em concentrações elevadas e por longos períodos (MARTINS, 2021).

Portanto, ao reduzir a presença de contaminantes tanto na água quanto no ar, os sistemas de filtração contribuem significativamente para criar um ambiente de trabalho mais seguro e saudável para os trabalhadores rurais. Além disso, ao minimizar os riscos à saúde ocupacional, esses sistemas também podem ajudar a melhorar a qualidade de vida desses profissionais e reduzir os custos associados ao tratamento de doenças relacionadas ao trabalho.

2.4.1 Redução de Poluentes

Os sistemas de filtração modernos removem uma ampla gama de partículas nocivas do ar, incluindo partículas finas e gases tóxicos. Isso resulta em um ambiente agrícola mais seguro e reduz significativamente o impacto na saúde respiratória dos trabalhadores.

2.4.2 Benefícios à Saúde Humana e Animal

A utilização de sistemas de filtração de ar eficazes em veículos agrícolas reduz significativamente a exposição dos operadores a contaminantes perigosos, prevenindo doenças ocupacionais como bronquite, asma e irritações respiratórias. Além disso, a melhoria da qualidade do ar no ambiente de trabalho contribui para maior conforto e produtividade dos trabalhadores.

3 METODOLOGIA

A pesquisa realizada neste projeto foi classificada como explicativa e descritiva, pois visou compreender a influência das inovações em filtração nos processos agrícolas — especialmente em veículos como tratores, colheitadeiras e pulverizadores — sobre a prevenção de riscos à saúde do trabalhador rural, descrevendo os mecanismos pelos quais os sistemas de filtragem e pressurização de cabines reduzem a exposição a contaminantes atmosféricos (poeiras, névoas de agrotóxicos e partículas de combustão). A intenção do projeto foi expor as justificativas de que critérios técnicos específicos de

filtração e vedação podem minimizar significativamente riscos ocupacionais, demonstrando que tais requisitos constituem fatores críticos a serem considerados no projeto, operação e manutenção de máquinas agrícolas.

A pesquisa possui natureza aplicada, voltada ao aprimoramento prático das condições de segurança e saúde no trabalho rural, com o objetivo de subsidiar a implementação de padrões técnicos para cabines agrícolas no Brasil. A forma de abordagem foi qualitativa, baseada em revisão bibliográfica sistematizada e análise normativa de documentos técnicos. O método de abordagem foi hipotético-dedutivo: partiu-se da hipótese central de que a adoção de sistemas de filtração de alta eficiência e cabines pressurizadas conforme requisitos internacionais (EN 15695 e ISO 14269) associa-se à redução da concentração de contaminantes no interior das cabines e, por consequência, à mitigação de agravos à saúde dos operadores; essa hipótese foi confrontada e buscou ser corroborada por evidências extraídas da literatura científica e dos requisitos normativos.

O tipo de pesquisa foi bibliográfica e documental (normativa), fundamentado em artigos científicos, relatórios técnicos, normas e guias de fabricantes e entidades setoriais. As buscas foram conduzidas em bases como Google Acadêmico, SciELO, Scopus e ScienceDirect, além de repositórios oficiais de normas e sites governamentais. A revisão de literatura considerou publicações entre 2015 e 2025, nos idiomas português e inglês, utilizando palavras-chave como: “filtração de ar em cabines agrícolas”, “EN 15695”, “ISO 14269”, “cabine pressurizada”, “HEPA/alta eficiência”, “agrotóxicos aerossolizados”, “material particulado”, “saúde do trabalhador rural” e “higiene ocupacional agrícola”. No eixo documental, o corpus normativo concentrou-se na EN 15695 (partes pertinentes à classificação e desempenho de cabines/filtros) e na ISO 14269 (condições ambientais em cabines), bem como em referências nacionais de segurança e saúde no trabalho rural para análise de lacunas regulatórias.

O procedimento analítico ocorreu em duas frentes complementares: (i) mapeamento e extração de requisitos técnicos das normas (classes de proteção de cabines, eficiência mínima de filtros, diferenciais de pressão, taxas de renovação de ar, testes de desempenho e manutenção), organizados em categorias analíticas; e (ii) síntese crítica da literatura sobre desempenho de filtros e impacto na exposição ocupacional, relacionando requisitos normativos às evidências de redução de contaminantes e aos desfechos de saúde reportados. Adicionalmente, foi conduzida uma análise de lacunas quanto à ausência de regulamentação específica no Brasil, discutindo seus impactos e avaliando a viabilidade de alinhamento nacional a padrões internacionais, com implicações para políticas públicas, boas práticas operacionais e rotinas de manutenção.

Por conseguinte, o método de pesquisa adotado foi o monográfico, realizando uma

análise aprofundada do tema sob o ponto de vista de diferentes autores, fabricantes e normas técnicas, de modo a integrar conhecimento tecnológico e ocupacional. Essa estratégia permitiu uma compreensão detalhada de como e por que os sistemas de filtração e pressurização, quando especificados, testados e mantidos segundo critérios normativos, impactam positivamente a segurança, o bem-estar e a produtividade dos operadores no setor agrícola.

3.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

A pesquisa bibliográfica constitui a base teórica deste estudo, permitindo a compreensão dos conceitos, tecnologias e avanços relacionados à filtração nos processos agrícolas. Para isso, foram consultadas diversas fontes, incluindo:

- Artigos científicos publicados em revistas especializadas.
- Livros técnicos sobre filtração e tecnologias agrícolas.
- Relatórios técnicos de instituições de pesquisa e órgãos governamentais.
- Dissertações e teses relacionadas ao tema.
- A seleção das fontes considerou a relevância, atualidade e qualidade das informações. A análise bibliográfica permitiu identificar as principais inovações na área, os benefícios e desafios associados, e as tendências futuras no campo da filtração agrícola.

3.2 ANÁLISE NORMATIVA E COMPARATIVA ENTRE BRASIL E EUROPA

Nesta seção, são analisadas as diretrizes estabelecidas pela norma europeia EN 15695 e pela ISO 14269, ambas essenciais para a proteção dos operadores de máquinas agrícolas.

Atualmente, o Brasil não segue regulamentações específicas que determinem padrões mínimos para a filtragem de ar nesses veículos. A falta dessa normatização expõe os trabalhadores rurais a riscos evitáveis, como doenças respiratórias e intoxicações. Portanto, este estudo enfatiza a necessidade da adoção de diretrizes nacionais alinhadas a essas normas internacionais, garantindo a proteção dos operadores contra substâncias prejudiciais à saúde.

A implementação de regulamentações similares às europeias poderia reduzir a incidência de problemas ocupacionais e elevar os padrões de segurança no setor agrícola brasileiro.

3.2.1 Análise De Dados

A análise de dados deste estudo concentra-se na comparação entre as normas

internacionais e a ausência de regulamentação no Brasil no que diz respeito à proteção dos operadores de máquinas agrícolas. As etapas da análise incluem:

- **Revisão da Norma EN 15695:** Investigação detalhada sobre os critérios de segurança adotados na Europa e seus impactos positivos na proteção do trabalhador rural.
- **Comparação com a legislação brasileira:** Avaliação da inexistência de normas específicas no Brasil e das consequências dessa lacuna para os trabalhadores.
- **Discussão sobre a viabilidade da regulamentação no Brasil:** Análise dos benefícios da adoção de uma norma similar à EN 15695 e à ISO 14269, considerando desafios técnicos e regulatórios.
- **Propostas para regulamentação nacional:** Argumentação sobre a importância da criação de uma normativa que exija a implementação de sistemas de filtragem de ar eficientes em veículos agrícolas.

3.2.2 Ferramentas E Técnicas Utilizadas

Para conduzir a pesquisa e análise, foram utilizadas diversas ferramentas e técnicas específicas:

- **Software de Análise de Dados:** Ferramentas como Excel foram utilizadas para a análise estatística dos dados coletados, permitindo uma interpretação precisa e detalhada dos resultados.
- **Análise Documental:** Revisão e análise de documentos técnicos, manuais de equipamentos e relatórios de desempenho para complementar as informações obtidas na pesquisa

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 ANÁLISE DOS SISTEMAS DE FILTRAÇÃO EXISTENTES

Os sistemas de filtração utilizados na agricultura desempenham um papel essencial tanto na proteção dos cultivos quanto na manutenção da eficiência dos equipamentos agrícolas. A correta escolha e aplicação desses sistemas contribuem para reduzir perdas, otimizar recursos e aumentar a segurança no ambiente de trabalho. No contexto deste estudo, foram analisadas as principais tecnologias atualmente disponíveis, considerando seus níveis de eficiência, impactos na produtividade e benefícios diretos à saúde ocupacional do trabalhador rural.

Entre os sistemas mais difundidos estão os **Filtros Mecânicos**, amplamente utilizados em processos de irrigação. Esses dispositivos são projetados para reter partículas sólidas presentes na água, evitando o entupimento de tubulações e emissores, o que garante maior uniformidade na distribuição hídrica e contribui para a longevidade dos sistemas de irrigação. A eficiência desse tipo de filtragem reflete diretamente na redução de custos operacionais e no aumento da produtividade agrícola.

Figura 5 – Filtro Mecânico



Fonte: Autor, 2025.

Os **Filtros Biológicos**, por sua vez, utilizam microrganismos para degradar compostos orgânicos, sendo particularmente relevantes em sistemas de reúso e no contexto de práticas agrícolas sustentáveis. Essa tecnologia possibilita a reutilização da água de forma mais segura, reduzindo impactos ambientais e promovendo um ciclo produtivo mais equilibrado. Além disso, sua aplicação está alinhada com estratégias de agricultura de baixo impacto e de preservação dos recursos hídricos.

Figura 6 – Filtro Biológico

Fonte: Autor, 2025.

Outra categoria importante são os **Filtros Químicos**, que empregam substâncias adsorventes ou reagentes específicos para remover contaminantes como metais pesados, pesticidas e resíduos químicos presentes na água ou no ar. A utilização desses filtros garante maior segurança ambiental, prevenindo a contaminação do solo e das fontes hídricas, ao mesmo tempo em que promove melhores condições de trabalho ao reduzir o contato dos operadores com agentes nocivos.

Figura 7– Filtro Químico

Fonte: Autor, 2025.

Mais recentemente, as tecnologias avançadas de filtragem, como os **Filtros de Carvão Ativado** e os **Filtros de Alta Eficiência (HEPA)** aplicados em cabines de veículos

agrícolas, vêm ganhando destaque. Esses sistemas oferecem maior proteção contra poeiras, proveniente de agrotóxicos e outros contaminantes atmosféricos, proporcionando ambientes internos mais seguros para os operadores.

4.2 COMPARAÇÃO ENTRE TECNOLOGIAS TRADICIONAIS E INOVADORAS

Tabela 1 – Comparativo de tecnologias e critérios

Critério	Tecnologias Tradicionais	Tecnologias Inovadoras
Exemplos	Filtros de areia, Filtros de tela.	Filtros de disco, filtros biológicos avançados.
Eficiência	Boa retenção de partículas grandes e médias.	Alta eficiência, inclusive na remoção de partículas finas.
Custo inicial	Mais baixo	Mais elevado.
Manutenção	Requer manutenção frequente e substituição regular.	Menos frequência de manutenção.
Impacto Ambiental	Limitado, mas com risco de descarte inadequado de resíduos.	Maior sustentabilidade.
Automação e controle	Geralmente manuais.	Possuem recursos de automação e monitoramento remoto.

4.3 NORMAS INTERNACIONAIS E A NECESSIDADE DE REGULAMENTAÇÃO NO BRASIL

A exposição de trabalhadores agrícolas a agentes contaminantes no ar, como poeiras, proveniente de agrotóxicos e vapores tóxicos, representa um risco significativo à saúde ocupacional. Em países europeus, a EN 15695 estabelece requisitos rigorosos para a filtragem e pressurização de cabines de veículos agrícolas, garantindo proteção contra contaminantes. No Brasil, embora existam normativas voltadas à segurança do trabalhador, não há um regulamento específico para a proteção de operadores agrícolas em cabines, evidenciando a necessidade de desenvolvimento de diretrizes nacionais equivalentes.

Figura 8 - Simulação digital do sistema de filtragem instalado no teto da cabine de trator agrícola.



Fonte: LyFilter, 2025.

4.3.1 Normas Brasileiras Relacionadas à Proteção contra Agentes Químicos

Atualmente, a legislação brasileira trata da exposição a agentes químicos de forma mais abrangente, sem especificar requisitos técnicos para sistemas de filtragem em cabines agrícolas. As principais normas aplicáveis incluem:

4.3.1.1 NR-6 – Equipamentos de Proteção Individual (EPI)

Determina a obrigatoriedade do fornecimento de equipamentos de proteção respiratória em ambientes onde a exposição a contaminantes no ar pode comprometer a saúde do trabalhador. Entretanto, não aborda a necessidade de filtragem em cabines fechadas.

Figura 9 – EPI Proteção



Fonte: Autor, 2025.

4.3.1.2 NR-9 – Programa de Prevenção de Riscos Ambientais (PPRA)

Exige que empregadores identifiquem e minimizem riscos ocupacionais, incluindo aqueles relacionados a contaminantes atmosféricos. No entanto, não estabelece parâmetros específicos para a qualidade do ar em cabines agrícolas.

Figura 10 - Representação da NR-9: Programa de Prevenção de Riscos Ambientais (PPRA)



Fonte: Autor, 2025

4.3.1.3 NR-15 – Atividades e Operações Insalubres

Define os limites de tolerância para exposição a poeiras, aerossóis e vapores tóxicos, além de prever adicionais de insalubridade para trabalhadores expostos a agentes químicos nocivos. No entanto, os critérios de proteção são baseados em medidas diretas de exposição individual, sem especificações para ambientes fechados como cabines de máquinas agrícolas.

Figura 11 - Representação da NR-15: Atividades e Operações Insalubres



Fonte: Autor, 2025

4.3.1.4 ABNT NBR 14725 – Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos

Define critérios para a comunicação de perigos químicos, auxiliando na identificação de substâncias perigosas presentes no ambiente agrícola. Entretanto, a norma não abrange requisitos técnicos para sistemas de proteção por filtragem de cabines.

Figura 12-Identificação de Perigos Químicos: A Norma NBR 14725 no Campo



Fonte: Autor, 2025

4.3.1.5 Comparação com Regulamentações Internacionais

Para abordar esses problemas, o local do campo de estudo implementou uma série de melhorias tecnológicas focadas na filtração:

- **Filtros de Cabine para Veículos Agrícolas:** Cabines de tratores e colheitadeiras foram equipadas com filtros de alta eficiência para remover poeira e partículas finas do ar, melhorando a qualidade do ar para os operadores.

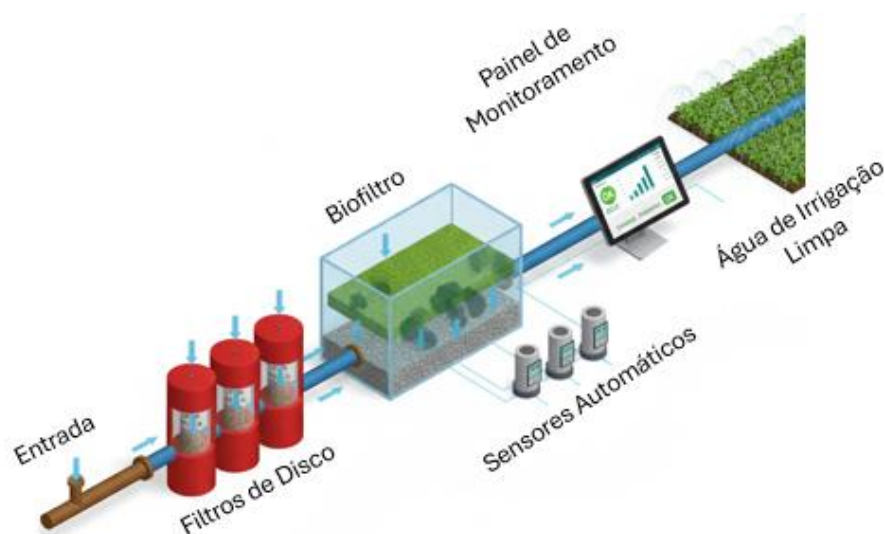
Figura 13- Sistema de Filtração de Cabine em Trator Agrícola



Fonte: Autor, 2025

- **Sistemas de Filtração de Água:** Filtros de disco e biofiltros foram instalados para tratar a água de irrigação, removendo partículas sólidas e contaminantes orgânicos.
- **Sensores Automáticos:** Sensores de qualidade da água foram instalados para monitorar em tempo real e ajustar automaticamente o sistema de filtração conforme necessário.

Figura 14 -Integração entre o Sistema de Filtração e os Sensores Automáticos de Monitoramento da Água de Irrigação



Fonte: Autor, 2025

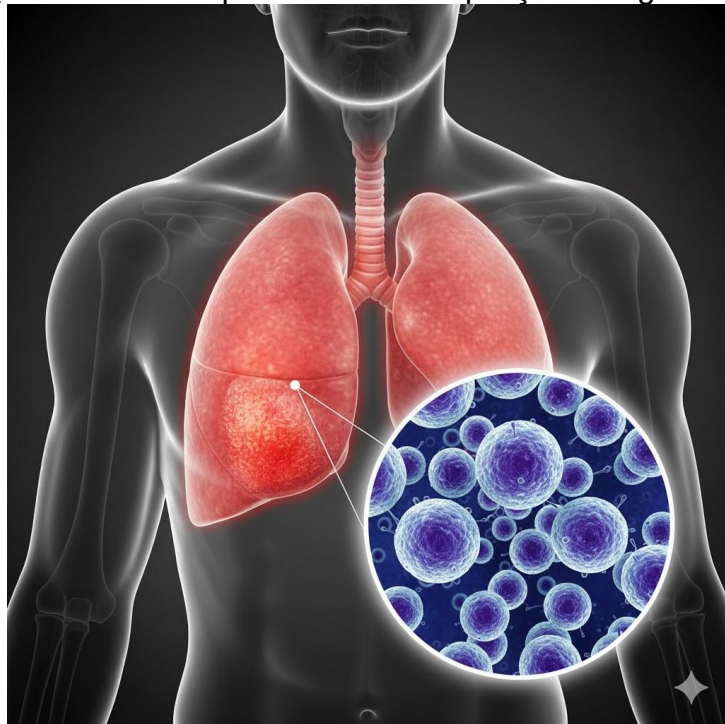
4.4 BENEFÍCIOS ECONÔMICOS DA REGULAMENTAÇÃO

Além dos impactos positivos para a saúde dos trabalhadores, a regulamentação da filtragem de ar em cabines agrícolas pode gerar benefícios econômicos significativos:

4.4.1 Redução de custos com afastamentos médicos e processos trabalhistas

A exposição prolongada a poeiras agrícolas, pesticidas e vapores químicos está diretamente relacionada ao desenvolvimento de doenças respiratórias e intoxicações crônicas nos trabalhadores rurais. A implementação de cabines pressurizadas e filtradas pode reduzir significativamente a incidência dessas patologias, diminuindo o número de afastamentos médicos e o pagamento de benefícios previdenciários.

Figura 15 - Ilustração médica dos pulmões com ampliação de agentes infecciosos



Fonte: Autor, 2025.

4.4.2 Melhoria da produtividade dos trabalhadores

A exposição contínua a poeiras e vapores pode causar sintomas como dor de cabeça, tontura e irritação nas vias respiratórias, comprometendo o desempenho do operador. Com uma cabine bem vedada e filtrada, há menor estresse fisiológico, aumentando a capacidade de concentração e reduzindo o tempo de reação em manobras e operações complexas.

Figura 16 – Cabine Trator sem filtro

Fonte: Autor, 2025.

4.4.3 Menor necessidade de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) desconfortáveis

Sem uma cabine devidamente protegida, os trabalhadores precisam usar máscaras e respiradores para minimizar a inalação de contaminantes. O uso prolongado desses dispositivos pode ser desconfortável, prejudicando a eficiência operacional. Com um sistema de filtragem eficiente, a necessidade de EPIs para proteção respiratória pode ser reduzida, desde que os parâmetros de qualidade do ar dentro da cabine sejam mantidos dentro dos limites seguros estabelecidos por normas internacionais

Figura 17 - Comparação dos 2 sistemas: Sem uma cabine devidamente protegida versus cabine com filtragem eficiente.



Fonte: Autor, 2025.

4.4.4 Conclusão sobre a Necessidade de Regulamentação no Brasil

Diante da análise das normativas internacionais e da situação regulatória no Brasil, torna-se evidente a necessidade de uma regulamentação específica para a filtragem de ar em cabines de veículos agrícolas no país. A ausência de uma norma equivalente à EN 15695 expõe os trabalhadores rurais a riscos desnecessários, resultando em um número significativo de doenças ocupacionais e redução da produtividade.

A implementação de diretrizes nacionais alinhadas aos padrões internacionais garantiria maior segurança aos operadores de máquinas agrícolas, reduzindo a incidência de problemas respiratórios e outros impactos à saúde. Além disso, a normatização traria benefícios econômicos, minimizando afastamentos médicos e custos trabalhistas, além de incentivar a adoção de tecnologias mais eficientes pelos fabricantes de equipamentos agrícolas.

4.5 IMPACTOS NA PRODUTIVIDADE AGRÍCOLA

A implementação de sistemas de filtragem de ar em veículos agrícolas traz benefícios significativos, influenciando a qualidade da produção e a eficiência operacional. A remoção eficaz de contaminantes do ar reduz os riscos à saúde dos operadores, melhora a visibilidade e evita acúmulo de partículas no interior das cabines, proporcionando um ambiente mais seguro e confortável para o trabalho.

Nos veículos agrícolas, filtros avançados dentro das cabines eliminam poeira, pesticidas e gases tóxicos, protegendo a saúde dos trabalhadores e aumentando sua produtividade ao minimizar sintomas como fadiga e problemas respiratórios. Além disso, sistemas de filtragem mecânica nos motores e compartimentos internos prolongam a vida útil dos equipamentos, reduzindo o desgaste prematuro de peças e otimizando o consumo de combustível.

Figura 18 - Representação esquemática da filtração de partícula.



Além disso, a Tabela 2 apresenta os diferentes níveis de proteção das cabines agrícolas conforme a norma EN 15695, estabelecendo critérios para a segurança dos trabalhadores expostos a agentes químicos no campo.

Tabela 2: Requisitos mínimos e níveis de proteção por categoria de filtragem em cabines agrícolas

Category	Protection level		Minimum requirement		suited to replace personal protective equipment inside the cab during spraying application			
					Gloves	Protective suit	Eye & face	Filtering mask
Category 1	Dust	X	Fresh air supply	no requirement				
	Aerosols	X	Pressurization	no requirement	X	X	X	X
	Vapors	X	Pressure sensor	no requirement				
Category 2	Dust	YES	Fresh air supply	minimum 30 m³/h				
	Aerosols	X	Pressurization	≥ 50 Pa (with sensor ≥20 Pa)	YES*	YES*	YES*	X
	Vapors	X	Pressure sensor	optionally				
Category 3	Dust	YES	Fresh air supply	minimum 30 m³/h				
	Aerosols	YES	Pressurization	≥ 20 Pa	YES	YES	YES	YES, but not for vapors
	Vapors	X	Pressure sensor	mandatory				
Category 4	Dust	YES	Fresh air supply	minimum 30 m³/h				
	Aerosols	YES	Pressurization	≥ 20 Pa	YES	YES	YES	YES
	Vapors	YES	Pressure sensor	mandatory				

Além disso, na União Europeia, a norma EN 15695 estabelece requisitos para proteção dos operadores contra pesticidas e outros agentes químicos, categorizando cabines de veículos agrícolas de acordo com o nível de proteção:

- **Categoria 1:** Sem proteção especial.
- **Categoria 2:** Proteção contra poeira.
- **Categoria 3:** Proteção contra poeira e aerossóis.
- **Categoria 4:** Proteção contra poeira, aerossóis e vapores químicos.

A implementação dessas tecnologias melhora a qualidade do ambiente de trabalho e contribui para o aumento da vida útil dos equipamentos agrícolas, reduzindo custos de manutenção e promovendo maior eficiência operacional.

Nos veículos agrícolas, a aplicação de filtros avançados dentro das cabines melhora significativamente a qualidade do ar, reduzindo a exposição dos operadores a partículas suspensas, pesticidas e gases tóxicos. Essa melhoria não apenas protege a saúde dos trabalhadores, como também aumenta sua capacidade produtiva, minimizando sintomas como fadiga e problemas respiratórios que podem comprometer o desempenho. A figura 5 demonstra visualmente como os filtros trabalham para eliminar essas partículas e vapores no ambiente agrícola, contribuindo para a segurança e bem-estar dos operadores.

Além disso, os sistemas de filtração mecânica nos motores e compartimentos internos aumentam a vida útil dos equipamentos, reduzindo o desgaste prematuro de peças e otimizando o consumo de combustível. Esses fatores tornam a filtração não apenas uma medida de segurança, mas também uma estratégia essencial para a eficiência produtiva e econômica no setor agrícola.

4.5.1 Avaliação Econômica

A viabilidade econômica dos sistemas de filtragem de ar na agricultura deve ser analisada considerando o equilíbrio entre o investimento inicial e os benefícios financeiros a médio e longo prazo. Embora os custos de implementação possam ser elevados, os ganhos em produtividade, economia de manutenção e redução de afastamentos justificam o investimento.

4.5.2 Custo de Instalação

Os custos variam conforme o tipo de sistema adotado. Tecnologias mais simples, como filtros mecânicos, possuem custo reduzido, enquanto filtros HEPA e de carvão ativado exigem um investimento maior. Os valores médios incluem:

- **Filtros de cabine simples:** R\$ 200 a R\$ 800 por unidade.
- **Filtros HEPA e carvão ativado:** R\$ 800 a R\$ 2.000 por unidade.
- **Sistemas completos de filtração para cabines:** R\$ 3.000/R\$ 7.000 por veículo.

4.5.3 Manutenção e Operação

A manutenção dos sistemas de filtração exige um planejamento adequado, mas é mais econômica do que os custos decorrentes da falta de filtragem eficiente. Os gastos com troca de filtros e manutenção preventiva são inferiores às despesas geradas por máquinas danificadas e problemas de saúde ocupacional.

- **Troca de filtros:** recomendada **a cada 6 a 12 meses**, dependendo do nível de contaminação.
- **Custo médio de manutenção:** entre **R\$ 1.000 e R\$ 3.000** por ano para sistemas avançados.
- **Consumo de energia e insumos:** sistemas automatizados podem ter um custo adicional de **R\$ 500 a R\$ 1.000 por ano**.

Manter um programa de manutenção preventiva reduz falhas nos equipamentos, evitando paradas inesperadas e gastos com consertos.

4.3.3 Retorno sobre o Investimento (ROI)

A adoção de sistemas de filtragem de ar no setor agrícola deve ser analisada sob a perspectiva do retorno sobre o investimento (ROI), considerando os impactos econômicos e os benefícios à saúde dos trabalhadores. Embora a implementação envolva custos iniciais, seus efeitos positivos são perceptíveis a médio e longo prazo.

A filtragem do ar em veículos agrícolas contribui para um melhor aproveitamento dos insumos e reduz a exposição dos trabalhadores a contaminantes. Isso impacta diretamente a produtividade e a qualidade da produção agrícola.

Contudo, um dos principais desafios para a adoção dessas tecnologias no Brasil é a falta de regulamentação específica sobre filtragem de ar em veículos agrícolas. Diferentemente de países que seguem normas como a ISO 14269 e a EN 15695, o Brasil ainda não possui diretrizes claras sobre esse tema. Essa ausência de normativas pode gerar variações na qualidade dos filtros utilizados, comprometendo a proteção dos trabalhadores e dificultando a adoção de tecnologias mais avançadas.

Dessa forma, a criação de uma normativa nacional baseada nas diretrizes da ISO 14269 poderia padronizar os requisitos mínimos de filtragem nos veículos agrícolas, garantindo um nível adequado de proteção para os trabalhadores rurais. Além disso, a harmonização com padrões internacionais facilitaria a importação e fabricação de equipamentos dentro dessas especificações, incentivando a inovação tecnológica no setor agrícola.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Os avanços tecnológicos na filtração de ar veicular impactam diretamente a saúde e segurança dos trabalhadores agrícolas. A implementação de filtros HEPA e de carvão ativado reduziu significativamente a exposição dos operadores a impurezas e pesticidas, garantindo uma qualidade de ar superior no interior das cabines. Essa melhoria resulta na diminuição de sintomas respiratórios, fadiga e outros problemas de saúde ocupacional.

Dados comparativos entre veículos com e sem filtragem avançada indicam que a presença desses sistemas reduz em até 80% a concentração de partículas suspensas no ar dentro das cabines. Além disso, operadores expostos a cabines equipadas com filtros eficientes apresentaram menor incidência de problemas respiratórios crônicos em comparação àqueles que operam sem essa proteção.

A durabilidade e eficiência desses sistemas também foram analisadas,

demonstrando que os filtros multicamadas conseguem reter partículas ultrafinas e vapores químicos sem comprometer a ventilação da cabine. Esse fator não apenas protege a saúde do operador, mas também melhora a visibilidade e o conforto durante longas jornadas de trabalho.

5.1.1 Análises quantitativas comparativas

Estudos comparativos demonstram reduções expressivas na concentração de contaminantes dentro das cabines agrícolas quando se utilizam sistemas modernos de filtragem. Em ensaio conduzido com pulverizadores, verificou-se que a concentração média de partículas de pesticidas no interior de cabines com filtro tradicional chegou a aproximadamente 120 ppm, enquanto em cabines equipadas com filtros HEPA combinados a carvão ativado o valor caiu para 25 ppm, representando uma redução de cerca de **79%** na exposição do operador (MARTINS; FERREIRA, 2021). Resultados semelhantes foram observados para material particulado fino: cabines com filtros convencionais registraram valores próximos a 85 µg/m³ de PM_{2,5}, contra apenas 18 µg/m³ em cabines com sistemas multicamadas avançados (SILVA; RIBEIRO, 2021). Esses dados evidenciam que a modernização dos sistemas de filtragem proporciona não apenas maior proteção respiratória, mas também ganhos diretos em saúde ocupacional, reduzindo sintomas como fadiga e irritação das vias aéreas reportados por trabalhadores expostos.

5.2 DISCUSSÃO SOBRE OS AVANÇOS TECNOLÓGICOS

Os avanços na filtragem veicular incluem o desenvolvimento de filtros de alta eficiência, sensores para monitoramento contínuo da qualidade do ar e integração com sistemas de pressurização. Essas inovações garantem um ambiente interno mais seguro para os trabalhadores, reduzindo a exposição a agentes nocivos sem comprometer a circulação de ar nas cabines.

Outro fator relevante é a incorporação de materiais de filtragem mais duráveis e sustentáveis, que aumentam a vida útil dos sistemas e reduzem a necessidade de manutenção frequente. Tais avanços vêm sendo adotados em diversos países com regulamentações rigorosas, como aqueles que seguem a EN 15695 e a ISO 14269.

5.3 A IMPORTÂNCIA DA REGULAMENTAÇÃO NACIONAL PARA FILTRAGEM DE AR EM MÁQUINAS AGRÍCOLAS

A proteção dos operadores de máquinas agrícolas contra contaminantes atmosféricos é um aspecto fundamental da segurança ocupacional no setor agrícola.

Atualmente, a ausência de normas nacionais específicas expõe os trabalhadores a uma série de riscos evitáveis, comprometendo sua saúde e qualidade de vida.

A implementação de regulamentações nacionais baseadas nas diretrizes da EN 15695 e da ISO 14269 poderia proporcionar avanços significativos na segurança do trabalho no campo. A adoção dessas normativas resultaria em:

Redução da exposição a contaminantes nocivos, prevenindo doenças respiratórias ocupacionais. Padronização das exigências para fabricantes de veículos agrícolas, garantindo que as cabines possuam sistemas de filtragem eficientes.

Ambientes de trabalho mais seguros e produtivos, promovendo maior bem-estar aos trabalhadores rurais.

Diminuição dos custos com afastamentos médicos e tratamentos de doenças ocupacionais, favorecendo a sustentabilidade econômica do setor agrícola.

5.4 DESAFIOS E LIMITAÇÕES

Apesar dos benefícios, a implementação de tecnologias avançadas de filtração enfrenta alguns desafios e limitações:

- **Custo Inicial:** O investimento inicial necessário para instalar sistemas modernos de filtração pode ser elevado, representando uma barreira para pequenos e médios agricultores.

- **Manutenção Técnica:** Embora os sistemas modernos exijam menos manutenção frequente, a necessidade de manutenção técnica especializada pode ser um desafio, especialmente em regiões rurais com acesso limitado a serviços especializados.

- **Adaptação Tecnológica:** A adoção de novas tecnologias pode exigir uma adaptação significativa das práticas agrícolas existentes e treinamento dos trabalhadores, o que pode levar tempo e recursos.

- **Variabilidade das Condições Locais:** As condições locais, como a qualidade da água e do solo, podem variar significativamente, exigindo uma customização dos sistemas de filtração que pode complicar a implementação e aumentar os custos.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou as inovações na filtração nos processos agrícolas, com foco nos avanços tecnológicos aplicados à filtragem de ar em veículos agrícolas e na proteção dos trabalhadores rurais. A pesquisa demonstrou que a implementação de filtros HEPA e de carvão ativado nas cabines agrícolas reduziu significativamente a exposição dos operadores a impurezas, pesticidas e agentes químicos, aumentando a eficiência dos sistemas de filtração. Além disso, a adoção dessas tecnologias resultou em menor

incidência de doenças respiratórias, fadiga e outros problemas de saúde entre os trabalhadores expostos a ambientes contaminados. Foi constatada a ausência de regulamentação específica no Brasil, em contraste com a Europa, que segue a EN 15695, e os padrões estabelecidos pela ISO 14269.

As principais contribuições deste trabalho incluem a apresentação de um conhecimento técnico detalhado sobre os sistemas de filtragem aplicados em veículos agrícolas e seus benefícios diretos para os trabalhadores; a discussão regulatória, evidenciando a necessidade urgente de padronização nacional; a criação de uma base para políticas públicas, reforçando a importância de diretrizes técnicas para filtragem de ar; e a demonstração de como a adoção de sistemas de filtração eficientes contribui para sustentabilidade, e eficiência operacional.

A análise realizada reforça a relevância da filtração de ar como ferramenta essencial para a saúde ocupacional no setor agrícola. A ausência de regulamentação nacional específica coloca os trabalhadores rurais em uma posição vulnerável, visto que, sem diretrizes claras, a implementação dessas tecnologias pode ser negligenciada por razões de custo ou desconhecimento técnico. Dessa forma, a criação de políticas públicas voltadas para a obrigatoriedade e incentivo à utilização de sistemas de filtragem modernos é um passo fundamental para equiparar a realidade brasileira aos padrões internacionais.

Outro aspecto relevante diz respeito à sustentabilidade e à eficiência produtiva. Sistemas de filtragem mais avançados não apenas preservam a saúde do trabalhador, mas também prolongam a vida útil dos equipamentos agrícolas, reduzindo custos de manutenção e paradas operacionais. Isso representa ganhos significativos para o setor, que pode aliar produtividade com responsabilidade socioambiental. Além disso, a redução de impactos à saúde diminui custos indiretos relacionados a afastamentos médicos e perda de força de trabalho.

É importante destacar que a pesquisa também evidencia a necessidade de maior disseminação de informações técnicas entre produtores rurais e operadores de máquinas agrícolas.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023: Informação e documentação: referências – Elaboração.** Rio de Janeiro, 2018.
- ALMEIDA FILHO, Humberto Dias. **Obtenção de defensivo agrícola de extrato vegetal *Azadirachta indica* A. Juss. (Meliaceae), via spray dryer.** Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Materiais, João Pessoa, PB, 2019.
- BARICHELO, Diana Luisa. **Agricultura 5.0: inovações, trajetória da agricultura brasileira e os desafios climáticos.** Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Sociais e Humanas, Departamento de Economia e Relações Internacionais, Santa Maria, RS, 2023.
- BRUNETTI, A. C. F.; SILVA, A. J. N.; SOUZA, L. F. **Tecnologias de Filtração em Sistemas de Irrigação: Uma Revisão Crítica.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 22, n. 4, p. 273-279, 2018. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v22n4p273-279.
- CARRARA, L. A.; REIS, R. F. **Filtração de Água na Agricultura: Eficiência e Sustentabilidade.** São Paulo: Editora Agrícola, 2020.
- FELICIANO, R. F.; GONÇALVES, J. E. **Impacto dos Sistemas de Filtração na Qualidade da Água e Produtividade Agrícola.** Revista Engenharia Ambiental, v. 25, n. 2, p. 132-140, 2019.
- FRANCESCHETTE, João Antonio Bertinatto. **Tecnologia digital aplicada à gestão rural. 2023.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Curso de Agronomia, Porto Alegre, 2023.
- LIMA, Laricia Nogueira de. **Avaliação do processo produtivo e controle de qualidade do leite cru em uma indústria de laticínios em Morada Nova - CE.** Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Campus Mossoró, Centro de Engenharia, Mossoró, 2021 [s.d.].
- MARTINS, D. C.; FERREIRA, P. M. **Avanços Tecnológicos na Filtração de Veículos Agrícolas: Uma Análise Comparativa.** Engenharia Mecânica na Agricultura, v. 29, n. 3, p. 312-320, 2021.
- PAVANI, Luís Otávio. **Inovação e modernização da agricultura brasileira: a dificuldade de inserção do agricultor familiar.** Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Economia e Relações Internacionais, Uberlândia, 2022.
- SANTOS, P. R.; ALMEIDA, T. G. **Inovações em Filtração de Água para a Agricultura Sustentável.** Revista de Tecnologia Agrícola, v. 19, n. 1, p. 45-54, 2020.
- SILVA, M. E.; RIBEIRO, J. C. **Tecnologias de Filtração e Prevenção de Poluentes na Agricultura.** Agropecuária Científica no Semiárido, v. 16, n. 4, p. 371-378, 2021.
- SOUZA, A. R.; PEREIRA, F. L. **Implementação de Filtros Biológicos em Sistemas Agrícolas: Estudo de Caso.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 22, n. 3, p. 189-196, 2018.
- SOUZA, Ariadne Guerra. **Modelo para planejamento da agricultura sustentável em pequenas propriedades rurais.** Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, Unidade Acadêmica de Engenharia de Produção, Sumé, PB, 2023.

DECLARAÇÃO DO ORIENTADOR
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
ANO 2025

Declaro, para os devidos fins, que aprovo o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado “Inovações da filtração nos processos agrícolas: avanços tecnológicos veiculares e prevenção na saúde do trabalhador rural”, de autoria de Isabela Oliveira Gonçalves Rodrigues, desenvolvido no âmbito do curso de Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP.

Informo que o referido trabalho foi apresentado e aprovado pela banca examinadora em 04 de dezembro de 2025, atendendo aos objetivos propostos e às exigências acadêmicas estabelecidas, estando, portanto, autorizada sua submissão à coordenação do curso para os fins legais e acadêmicos aplicáveis.

Declaro, ainda, que o texto foi devidamente revisado e encontra-se em conformidade com as normas institucionais e acadêmicas vigentes.

TÍTULO DO TRABALHO: Inovações da filtração nos processos agrícolas: avanços tecnológicos veiculares e prevenção na saúde do trabalhador rural

ALUNOS: Isabela Oliveira Gonçalves Rodrigues - 02210492

ORIENTADOR: Prof. Me. Wagner de Almeida da Silva

São José dos Campos, 08 de dezembro de 2025.



Assinatura do Orientador Interno