



UNIVERSIDADE
ESTADUAL de LONDRINA

ANA PAULA DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE FILTRO SOSTentável PARA
PROTEÇÃO RESPIRATÓRIA DE TRABALHADORES DA
SAÚDE EXPOSTOS A RISCOS QUÍMICOS E BIOLÓGICOS**

ANA PAULA DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE FILTRO SOSTentável PARA
PROTEÇÃO RESPIRATÓRIA DE TRABALHADORES DA
SAÚDE EXPOSTOS A RISCOS QUÍMICOS E BIOLÓGICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Enfermagem da Universidade Estadual de Londrina (UEL), como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Enfermagem.

Orientador(a): Prof^a. Dra Renata Perfeito Ribeiro.

Coorientador(a): Prof^a. Dra Helenize Ferreira Lima Leachi.

LONDRINA

2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Silva, Ana Paula da Silva.

Desenvolvimento de filtro SOSstentável para proteção respiratória de trabalhadores da saúde expostos a riscos químicos e biológicos / Ana Paula da Silva Silva. - Londrina, 2026.
79 f. : il.

Orientador: Renata Perfeito Ribeiro.

Coorientador: Helenize Ferreira Lima Leachi.

Dissertação (Mestrado em Enfermagem) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências da Saúde, Programa de Pós-Graduação em Enfermagem, 2026.

Inclui bibliografia.

1. Saúde dos trabalhadores; - Tese. 2. Desenvolvimento sustentável; - Tese. 3. Riscos químicos em Centro cirúrgico; - Tese. 4. Dispositivos de proteção respiratória. - Tese. I. Perfeito Ribeiro, Renata. II. Ferreira Lima Leachi, Helenize. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências da Saúde. Programa de Pós-Graduação em Enfermagem. IV. Título.

CDU 616-083

ANA PAULA DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE FILTRO SOSTentável PARA
PROTEÇÃO RESPIRATÓRIA DE TRABALHADORES DA
SAÚDE EXPOSTOS A RISCOS QUÍMICOS E BIOLÓGICOS**

Exame de Qualificação/ Dissertação
apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Enfermagem da Universidade Estadual
de Londrina (UEL), como requisito parcial à
obtenção do título de Mestre em
Enfermagem.

BANCA EXAMINADORA

Prof(a). Dr(a) Renata Perfeito Ribeiro
Universidade Estadual de Londrina-PR

Prof(a). Dr(a). Rosangela Marion da Silva
Universidade Federal de Santa Maria-RS

Prof(a). Dr(a) Cibele Cristina Tramontini
Universidade Estadual de Londrina-PR

Londrina, 23 de janeiro de 2026.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais pelo amor incondicional, meu
noivo Rogério Endo pelo apoio e
companheirismo, amigos que de alguma forma
caminharam comigo nesta jornada e em
especial minhas orientadoras pela paciência,
exemplo e confiança.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por conceder-me saúde, força e sabedoria ao longo dessa caminhada.

À minha orientadora Prof.^a Dra.^a Renata Perfeito Ribeiro, que me acompanhou durante toda a trajetória com paciência e dedicação, sempre disponível a compartilhar todo o seu vasto conhecimento, grande exemplo de pessoa e pesquisadora. Me orientou com muita sabedoria e paciência, tranquilizando-me e confiando-me atividades que, muitas vezes, eu mesma acreditava não seria capaz. Obrigada por sempre me dar desafios! A partir disso, evolui como aluna e me fortaleci enquanto profissional. A senhora é uma inspiração!!

À minha coorientadora Prof.^a Dra.^a Helenize Leachi, que, com muita competência e dedicação me guiou ao longo desses anos, sempre me enxergando com olhos generosos e acolhedores. Agradeço pelas contribuições no meu estudo, por toda paciência e pelo carinho.

À Prof.^a Dra Aline Franco da Rocha um exemplo de pessoa, profissional e pesquisadora. Minha gratidão pelos dias de reflexões e discussões que foram fundamentais para concretização dessa pesquisa.

À Prof.^a Dra Rosangela Marion da Silva e à Prof.^a Dra Cibele Cristina Tramontini por aceitarem participar da minha banca. Obrigada pela dedicação na leitura, correção do meu trabalho, e pelas valiosas considerações que contribuíram para a melhoria deste estudo. À Prof.^a Dra Danielly Negrão Guassú Nogueirae ao Prof. Dra. Alessandro Rolim Scholze, por aceitarem ser suplente da minha banca. Obrigada pela dedicação na leitura.

À Prof^a Dra Daniela Sanches e a Prof^o Dra^o Leila minha profunda gratidão por contribuírem de forma significativa para o desenvolvimento desta pesquisa, pela generosidade em ceder o laboratório e disponibilizar tempo e conhecimento com dedicação e gentileza.

Aos meus amados pais, José e Maria, que, mesmo com pouco estudo, sempre me apoiaram e fizeram tudo o que esteve ao seu alcance. Agradeço o imenso amor, pelos ensinamentos e por me moldarem como pessoa, sempre enfatizando que a educação, o esforço e a humildade são as chaves que abrem portas.

Ao meu noivo, Rogério Endo, pelo companheirismo, pela paciência nos momentos mais difíceis e por estar sempre ao meu lado, oferecendo apoio, incentivo e amor. Sua presença foi essencial para que eu continuasse firme na realização deste sonho, pois a partir deste sonho, construiremos muitos outros.

À minha amiga-irmã Mariana Zanotti, pelo apoio incondicional, por ser a minha inspiração, exemplo de mulher forte, generosa e inteligente, sempre ao meu lado, celebrando as conquistas e me acolhendo nos desafios.

As minhas companheiras de apoio científico Francieli e Kawanna, pela ajuda constante, pela cumplicidade, companheirismo e sorrisos que tornaram essa jornada mais leve.

À Laís, que me orientou com as etapas para ingressar no grupo de pesquisa, tornar-me estudante especial e participar da seleção do mestrado, sendo fundamental nessa trajetória.

Ao Grupo de Pesquisa GeeST, pelo constante apoio, pelas valiosas trocas de experiências e pelo conhecimento generosamente compartilhado ao longo desta jornada.

Ao corpo docente do programa de pós-graduação em Enfermagem, o meu muito obrigada, por compartilhar todo o conhecimento com muita dedicação e carinho.

Por fim, agradeço a todos que torceram por mim. Cada gesto de apoio fez a diferença.

“Entrega o teu caminho ao Senhor;
confia nele, e ele tudo fará.”

Salmo 37:5

SILVA, Ana, Paula. **Desenvolvimento de filtro SOSTentável para proteção respiratória de trabalhadores da saúde expostos a riscos químicos e biológicos** 2026. 79 p. Exame de Defesa de Mestrado em Enfermagem – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2026.

RESUMO

Introdução: Os trabalhadores da saúde expostos à fumaça cirúrgica produzida pela eletrocirurgia enfrentam riscos químicos e biológicos em seus locais de trabalho. Apesar do uso de máscaras como equipamento de proteção respiratória, estas não oferecem proteção eficaz contra as partículas ultrafinas presentes na fumaça cirúrgica, identificando-se a inexistência de filtros que assegurem proteção respiratória eficiente aos trabalhadores expostos a este risco químico e biológico ocupacional por meio de sistema que possibilite filtração de partículas. **Objetivo:** Desenvolver e avaliar um substrato fiado com nanopartículas para proteção respiratória de trabalhadores da saúde expostos a riscos químicos e biológicos no ambiente de trabalho para ser utilizado na máscara *HeLP*. **Método:** Estudo metodológico, analítico descritivo. Na primeira fase da pesquisa foi realizado o desenvolvimento do filtro, tendo como substrato o *Spunbond-Meltblown-Spunbond*, na versão nova (sem esterilização de materiais) e na versão esterilizada (após o processo de esterilização de materiais) com o objetivo de reaproveitar esse material descartado após a abertura dos pacotes cirúrgicos, promovendo a sustentabilidade. Utilizou-se a técnica de eletrofiação para criar uma camada de nanofibras, composto de acetato de celulose, polímero biodegradável associado à adição de surfactante brometo de cetilpiridíneo para ação biocida. Na segunda fase da pesquisa, foi realizada a avaliação microestrutural do substrato fiado com nanopartículas por meio da análise realizada com Microscopia Eletrônica de Varredura. **Resultados:** Foram produzidas 240 amostras de filtros, sendo 120 filtros de substrato *Spunbond-Metblown-Spunbond* novo e 120 filtros *Spunbond-Metblown-Spunbond* esterilizado. No *Spunbond-Metblown-Spunbond* novo, a média do diâmetro das fibras foi de aproximadamente $0,084\ \mu\text{m}$, com desvio padrão de $0,096\ \mu\text{m}$ e no *Spunbond-Metblown-Spunbond* esterilizado, o diâmetro médio foi em torno de $0,046\ \mu\text{m}$, com desvio padrão de $0,042\ \mu\text{m}$. Os ensaios iniciais demonstraram viabilidade na associação do *Spunbond-Meltblown-Spunbond* novo e esterilizado às nanofibras produzidas pela técnica de eletrofiação. As imagens obtidas do material por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura não comprometem a estrutura microfísica e morfológica do substrato, evidenciando boa cobertura das fibras sobre o substrato e baixa formação de pérolas. **Conclusão:** Os resultados demonstraram o potencial do filtro desenvolvido como meio filtrante sustentável para a utilização na máscara *HeLP* e o seu uso como Equipamento de Proteção Individual, pois os diâmetros dos poros encontrados na Microscopia Eletrônica de Varredura, apresentam-se menores que as partículas ultrafinas presentes na fumaça cirúrgica, indicando o reaproveitamento do *Spunbond-Metblown-Spunbond* esterilizado para a fiação das nanopartículas. As próximas etapas da pesquisa pelo Grupo de Estudos em Gestão do Cuidado, Editoração Científica e Saúde do Trabalhador incluem testes de *performance* de filtração e de usabilidade da máscara *HeLP* com o filtro de *Spunbond-Meltblown-Spunbond* novo e esterilizado entre os trabalhadores expostos aos riscos químicos e biológicos.

Descritores: Dispositivos de proteção respiratória; Saúde dos trabalhadores; Nanofibras; Desenvolvimento sustentável; Riscos químicos; Centro cirúrgico.

SILVA, Ana, Paula. **Development of a sustainable filter for respiratory protection of healthcare workers exposed to chemical and biological risks.** 2026. 79 p. Exame de Defesa de Mestrado em Enfermagem – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2026.

ABSTRACT

Introduction: Healthcare workers exposed to surgical smoke produced by electrosurgery face chemical and biological risks in their workplaces. Despite the use of masks as respiratory protection equipment, these do not offer effective protection against the ultrafine particles present in surgical smoke. There is a lack of filters that ensure efficient respiratory protection for workers exposed to this occupational chemical and biological risk through a system that allows particle filtration. **Objective:** To develop and evaluate a substrate spun with nanoparticles for respiratory protection of healthcare workers exposed to chemical and biological risks in the workplace, for use in the HeLP mask. **Method:** Methodological, analytical, and descriptive study. In the first phase of the research, the filter was developed using Spunbond-Meltblown-Spunbond as a substrate, in a new version (without material sterilization) and in a sterilized version (after the material sterilization process), with the aim of reusing this material discarded after the opening of surgical packages, promoting sustainability. The electrospinning technique was used to create a layer of nanofibers, composed of cellulose acetate, a biodegradable polymer associated with the addition of cetylpyridinium bromide surfactant for biocidal action. In the second phase of the research, the microstructural evaluation of the substrate spun with nanoparticles was carried out through analysis performed with Scanning Electron Microscopy. **Results:** 240 filter samples were produced, 120 filters of new Spunbond-Metblown-Spunbond substrate and 120 filters of sterilized Spunbond-Metblown-Spunbond. In the new Spunbond-Meltblown-Spunbond, the average fiber diameter was approximately 0.084 μm , with a standard deviation of 0.096 μm , and in the sterilized Spunbond-Meltblown-Spunbond, the average diameter was around 0.046 μm , with a standard deviation of 0.042 μm . Initial tests demonstrated the viability of combining new and sterilized Spunbond-Meltblown-Spunbond with nanofibers produced by electrospinning. Scanning Electron Microscopy images of the material do not compromise the microphysical and morphological structure of the substrate, showing good fiber coverage on the substrate and low bead formation. **Conclusion:** The results demonstrated the potential of the developed filter as a sustainable filtering medium for use in the HeLP mask and as Personal Protective Equipment, since the pore diameters found in Scanning Electron Microscopy are smaller than the ultrafine particles present in surgical smoke, indicating the reuse of the sterilized Spunbond-Meltblown-Spunbond for spinning nanoparticles. The next stages of the research by the Study Group on Care Management, Scientific Publishing and Occupational Health include filtration performance and usability tests of the HeLP mask with the new and sterilized Spunbond-Meltblown-Spunbond filter among workers exposed to chemical and biological risks.

Descriptors: Respiratory Protective Devices; Health, Occupational; Nanofibers; Sustainable Development; Chemical Risks; Surgicenters.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

ESTUDO 1

Figura 1 – Modelo unificado do Processo de Desenvolvimento de Produtos. São Paulo. Brasil, 2006.....	30
Figura 2 – Filtro de <i>Spunbond-Metblown-Spunbond</i> acoplado à máscara <i>HeLP</i> . Paraná. Brasil, 2025.....	32
Figura 3 – Amostras de <i>Spunbond-Metblown-Spunbond</i> acondicionadas em dessecador contendo sílica gel para remoção da umidade. Paraná, Brasil, 2025.....	36
Figura 4 – Esquema do processo de eletrofiação e seus componentes. Paraná, Brasil, 2025.	37

ESTUDO 2

Figura 1 – Preparo de material para o recobrimento com carbono e análise de Microscopia Eletrônica de Varredura. Paraná, Brasil, 2025.....	54
Figura 2 – Microscopia Eletrônica de Varredura do substrato <i>Spunbond-Meltblown-Spunbond</i> novo. Paraná, Brasil, 2025.....	56
Figura 3 – Microscopia Eletrônica de Varredura do substrato <i>Spunbond-Meltblown-Spunbond</i> esterilizado. Paraná, Brasil, 2025.....	56
Figura 4 – Histograma da distribuição dos diâmetros das nanofibras produzidas sobre substrato de <i>Spunbond-Meltblown-Spunbond</i> novo e <i>Spunbond-Meltblown-Spunbond</i> esterilizado. Paraná, Brasil, 2025.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AORN	<i>Association of periOperative Registered Nurses</i>
AC	Acetato de Celulose
CC	Centro Cirúrgico
CPB	Brometo de Cetilpiridínio
EPI	Equipamento de Proteção Individual
EPR	Equipamento de Proteção Respiratória
G	Grande
GeeST	Grupo de Estudos em Gestão do Cuidado, Editoração Científica e Saúde do Trabalhador
HEPA	<i>High Efficiency Particulate Arrestance</i>
HPA	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
LAPAR	Laboratório de Análise em Poluição do Ar
LLM	<i>Large Language Model</i>
M	Médio
MP	Material Particulado
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
NBR	Norma Brasileira
NR	Norma Regulamentadora
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NIOSH	National Institute of Occupational Safety and Health
P	Pequeno
PNSTT	Política Nacional de Saúde do Trabalhador e da Trabalhadora
PTFE	Politetrafluoretileno
SINAN	Sistema de Informação de Agravos de Notificação
SMS	<i>Spunbond-Meltblown-Spunbond</i>
SUS	Sistema Único de Saúde
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OIT	Organização Internacional do Trabalho
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas

ULPA	<i>Ultra Low Penetration</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UEL	Universidade Estadual de Londrina

SUMÁRIO

1 APRESENTAÇÃO	11
2 CONTEXTUALIZAÇÃO	13
3 REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1 Saúde do Trabalhador	16
3.2 Riscos Ocupacionais	18
4 REFERENCIAL METODOLÓGICO	21
5 OBJETIVOS	25
5.1 Objetivo Geral	25
5.1.1 Objetivos Específicos	25
6 RESULTADOS	26
6.1 ESTUDO 1 FILTRO SOSTENTÁVEL DE NANOFIBRAS PARA PROTEÇÃO RESPIRATÓRIA DE TRABALHADORES DA SAÚDE PARA MÁSCARA <i>HELP</i>	26
6.1.1 Título	26
6.1.2 Resumo	26
6.1.3 Introdução	27
6.1.4 Material e Método	29
6.1.5 Resultados	37
6.1.6 Discussão	38
6.1.7 Conclusão	42
6.1.8 Referências	43
6.2 ESTUDO 2 FILTRO SOSTENTÁVEL DE NANOFIBRAS EM <i>SPUNBOND-MELTBLOWN-SPUNBOND</i> PARA A MÁSCARA <i>HELP</i> : MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	47
6.2.1 Título	47
6.2.2 Resumo	47
6.2.3 Introdução	48

6.2.4	Material e Método.....	51
6.2.5	Resultados	55
6.2.6	Discussão	57
6.2.7	Conclusão	61
6.2.8	Referências	62
 7 CONCLUSÕES		67
 REFERÊNCIAS		69

1 APRESENTAÇÃO

O início da minha trajetória profissional ocorreu em 2007, quando comecei a trabalhar como Agente Comunitária de Saúde e me identifiquei por essa área. Logo em seguida, iniciei o curso técnico em enfermagem e, após a conclusão, trabalhei em diversos setores (Estratégia Saúde da Família (ESF), sala de vacina, hospital e Serviço de Atendimento Móvel de Urgência (SAMU)), o que fortaleceu minha decisão de seguir nessa profissão.

Em 2013 iniciei a minha graduação em enfermagem, no Centro Universitário Filadélfia (UNIFIL) em Londrina - Pr. Desde os primeiros anos como técnica de enfermagem demonstrava um interesse especial pela área de saúde do trabalhador.

Após a conclusão da graduação, realizei uma pós-graduação em enfermagem do trabalho, prestei um concurso na área, porém não obtive a vaga pretendida. Posteriormente, fui aprovada em outro concurso para cargo de enfermeira assistencial do município de Guaraci-PR, onde atuo até hoje.

A administração pública municipal valoriza a formação contínua e esse incentivo foi determinante para que eu criasse a coragem de realizar esse sonho. Em 2023, decidi entrar no grupo de pesquisa da Prof^a Dra Renata Perfeito Ribeiro, o Grupo de Estudos em Gestão do Cuidado, Editoração Científica e Saúde do Trabalhador (GeeST), pois o grupo tem a linha de pesquisa que sempre tive afinidade “Saúde do Trabalhador”, no qual fiquei encantada e então decidi ficar.

Ainda em 2023, ingressei como estudante especial nas disciplinas do Mestrado de Enfermagem da Universidade Estadual de Londrina (UEL) e antes de iniciar o mestrado conclui todos os créditos das disciplinas optativas.

Em 2024, um grande sonho se concretizou: Ingressei no Mestrado em enfermagem, sob orientação da Prof^a. Dra. Renata Perfeito Ribeiro. Desde então, venho me dedicando ao estudo científico dos riscos ocupacionais que estão expostos os trabalhadores da saúde, especialmente aqueles relacionados à inalação da fumaça cirúrgica, na qual originou o meu trabalho e o amor pela máscara *HeLP*, e a gratidão por contribuir com a saúde ocupacional.

Faço parte do projeto intitulado “Riscos ocupacionais que interferem na saúde de trabalhadores e estratégias de enfrentamento” e o meu subprojeto é o “Desenvolvimento de filtro sustentável para proteção respiratória de trabalhadores da

saúde expostos a riscos químicos e biológicos”. Trata-se de um recorte de pesquisa focado no desenvolvimento da Máscara *HeLP*, um produto inovador destinado à proteção dos trabalhadores expostos a exposição à fumaça cirúrgica, no qual originou a execução da presente dissertação do mestrado

A proposta surgiu da necessidade de oferecer uma solução eficaz, reutilizável e ambientalmente sustentável frente aos riscos ocupacionais presentes em ambientes hospitalares, especialmente em centros cirúrgicos.

Hoje, sigo atuando como enfermeira assistencial no município de Guaraci-PR, conciliando a prática profissional com as atividades acadêmicas e científicas.

Permaneço integrante do Grupo de Estudos em Gestão do Cuidado, Editoração Científica e Saúde do Trabalhador (GeeST), no qual participo ativamente de discussões, projetos e produções científicas voltadas à saúde do trabalhador. Atuo também no apoio científico da revista *Advances in Nursing and Health (ANH)*, contribuindo com a revisão de checklists e a diagramação das produções acadêmicas, para a disseminação de pesquisas de qualidade e integro ainda o Laboratório de Inovação em Saúde (LIvES), colaborando com a produção da máscara *HeLP*, um Equipamento de Proteção Individual (EPI) inovador voltado à proteção respiratória de profissionais expostos à fumaça cirúrgica. Pretendo dar continuidade a este estudo, desenvolvendo um indicador capaz de identificar o momento ideal para a troca do filtro da máscara *HeLP*, ampliando sua eficiência e segurança. Além disso, almejo seguir contribuindo com o GeeST para a finalização e validação completa da máscara, e colaborando com as pesquisas que estão por vir, voltadas a proteção dos trabalhadores da saúde expostos à fumaça cirúrgica e outros riscos ocupacionais.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO

A Saúde do Trabalhador é um campo interdisciplinar que busca garantir a proteção integral da saúde física, mental e social dos trabalhadores. Fundamentada na Política Nacional de Saúde do Trabalhador, adota uma abordagem coletiva, reconhecendo os determinantes físicos, sociais, culturais e psicológicos do trabalho como elementos centrais no processo saúde-doença (Brasil, 2012).

Nesse contexto, a análise do ambiente laboral torna-se essencial, uma vez que as condições em que o trabalho é realizado exercem influência direta sobre a saúde dos trabalhadores (Public policies for occupational safety and health in brasil, 2025).

O ambiente laboral, quando caracterizado por condições adversas como biológica, química, física, mecânica ou psicossocial, configura-se como um importante fator de risco para o adoecimento do trabalhador. A exposição frequente e prolongada a tais agentes potencializa a ocorrência de agravos à saúde, favorecendo o desenvolvimento de doenças ocupacionais (Barbey; Bonvallot; Clerc, 2024).

Os riscos químicos e biológicos estão presentes na grande maioria dos ambientes de trabalho, sendo inevitáveis em determinados contextos laborais (Fundacentro, 2024). No ambiente hospitalar, o risco mais conhecido pelos trabalhadores e gestores hospitalares é o risco biológico, que inclui o contato com fluidos dos pacientes como sangue e secreções, microrganismos como vírus e bactérias, podendo estar presentes nos acidentes ocupacionais durante o manuseio de materiais perfurocortantes (Bagheri *et al.*, 2024). Destacam-se também os riscos respiratórios, decorrentes da inalação de aerossóis, gotículas, fumos, gases e vapores. Tais exposições configuram-se como fatores importantes de adoecimento ocupacional (Fundacentro, 2024).

No ambiente do Centro Cirúrgico (CC) além do risco biológico, tem-se o risco químico proveniente da liberação de Material Particulado (MP) presente na fumaça cirúrgica gerada pela eletrocirurgia (Leachi *et al.*, 2023). O MP é definido como uma mistura de pequenas partículas e gotículas suspensas no ar de tamanho micro, classificado entre os poluentes que prejudicam a vida e a saúde humana (Filho, 2025).

O eletrocautério, por sua vez, é um aparelho utilizado em procedimentos cirúrgicos com a função de coagulação e dissecação dos tecidos,

facilitando a visualização do campo operatório, diminuindo sangramento e tempo cirúrgico (Limchantra *et al.*, 2019).

A fumaça cirúrgica é composta por 95% de vapor d'água e 5% de MP que causam riscos à saúde dos expostos (Zhou *et al.*, 2023). Essa composição difere de acordo com os diferentes tipos de cirurgias, do tipo, frequência e tempo da eletrocirurgia e o tecido/órgão cauterizado (Li *et al.*, 2022).

O MP atmosférico pode ser definido como um material sólido ou líquido ou a mistura das fases e de tamanho micrométrico (μm) que ficam suspensas no ar (Colbeck, 2008). São considerados os poluentes que mais afetam as pessoas em seu dia a dia e são compostos de partículas inativas, produtos químicos, patógenos, células ativas (Zhou *et al.*, 2023), vírus, fungos, bactérias e materiais orgânicos, sulfatos, nitratos, amônia, cloreto de sódio, *black carbon*, poeira mineral e água, formando uma suspensão líquida ou sólida no ar (Medeiros *et al.*, 2022).

Esses poluentes podem ser classificados conforme o seu diâmetro em MP10 (partículas com diâmetro aerodinâmico de 10 μm ou menores – chamadas de particulado grosso), MP 2,5 (partículas com diâmetro aerodinâmico de 2,5 μm ou menores chamado de particulado fino) e o MP abaixo de 0,1 μm (partículas com diâmetro aerodinâmico menores que 0,1 μm) que são as mais prejudiciais à saúde humana (Seinfeld; Pandis, 2012; Li, *et al.*, 2022)

Uma das medidas eficazes para a segurança dos trabalhadores expostos à fumaça cirúrgica é o uso do Equipamento de Proteção Respiratória (EPR) que tem o objetivo de proteger os trabalhadores da inalação de substâncias perigosas e evitar a exposição a ambientes com deficiência de oxigênio (Fundacentro, 2016).

O uso de máscaras é uma medida eficaz para prevenir a exposição à fumaça cirúrgica (Zhou *et al.*, 2023), sendo as mesmas consideradas Equipamentos de Proteção Individual (EPI), protegendo o sistema respiratório da inalação de MP transportadas pelo ar e presentes na fumaça cirúrgica (Bieniek *et al.*, 2022).

A máscara cirúrgica é a mais comumente usada em ambientes perioperatórios e outros ambientes hospitalares, porém ela não fornece proteção contra partículas transportadas pelo ar (aerossol) e não impedem a inalação dos gases tóxicos, aerossóis e componentes químicos resultantes da coagulação dos tecidos (Zhou *et al.*, 2023).

O EPI recomendado pelo *National Institute of Occupational Safety and Health* (NIOSH) e *Association of periOperative Registered Nurses* (AORN) na

presença da fumaça cirúrgica é a máscara N95 considerada de alta filtração (Centers for Disease Control and Prevention, 2025; Williams, 2022) porém, a mesma deve estar bem encaixada à face do usuário para a vedação completa (Leachi *et al.*, 2023). A máscara N95 é considerada uma máscara de alta filtração (Yim *et al.*, 2020), porém pode não capturar gases e vapores presentes na fumaça cirúrgica, pela falta do filtro para adsorção dos componentes químicos (Centers for Disease Control and Prevention, 2025).

Os filtros do tipo *High Efficiency Particulate Arrestance (HEPA)* são os mais amplamente avaliados, demonstrando reduções significativas nas concentrações de MP em diferentes cenários, com resultados variando, de modo geral, entre 70% e 80%. Outros filtros, como os do tipo *Ultra Low Penetration Air (ULPA)*, filtros de politetrafluoretileno (PTFE), filtros eletrostáticos e sistemas portáteis de purificação do ar, também apresentaram capacidade de redução de partículas finas, incluindo MP_{2,5}, bem como diminuição do potencial oxidativo associado à exposição ao MP (Faustino *et al.*, 2025).

Contudo, embora os filtros *HEPA*, *ULPA* e PTFE se mostrem eficazes em ambientes controlados ou estacionários, sua aplicação direta em dispositivos de proteção respiratória individual apresenta limitações, especialmente no que se refere à adsorção de gases, vapores e compostos químicos voláteis, indicando a necessidade de soluções específicas para uso ocupacional individual (Faustino *et al.*, 2025).

Além das limitações relacionadas à eficácia na retenção de gases, vapores e aerossóis químicos (Faustino *et al.*, 2025), a utilização predominante de EPI descartáveis nos serviços de saúde tem contribuído para o aumento da geração de resíduos sólidos hospitalares, acarretando impactos ambientais, sanitários e econômicos. Nesse contexto, a incorporação dos princípios da sustentabilidade no desenvolvimento de tecnologias em saúde torna-se fundamental, especialmente no que se refere à redução de resíduos, ao uso racional de materiais e à ampliação da vida útil dos dispositivos de proteção (Lyu *et al.*, 2024).

Alinhada à Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, proposta pela Organização das Nações Unidas (ONU), a busca por soluções inovadoras e ambientalmente responsáveis atende diretamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 3 (Saúde e Bem-Estar), 8 (Trabalho Decente e

Crescimento Econômico), 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e 12 (Consumo e Produção Responsáveis) (Organização das Nações Unidas, 2023).

Diante disso foi desenvolvido uma inovação tecnológica, a máscara *HeLP*, ergonômica e sustentável para proteção respiratória de trabalhadores da saúde. A máscara *HeLP* foi assim denominada, pois entende-se como um “socorro” aos trabalhadores expostos a riscos químicos e biológicos nos seus locais de trabalho (Leachi *et al.*, 2023).

A *HeLP* é uma máscara de proteção ocupacional desenvolvida contra riscos químicos e biológicos, produzida em impressora 3D, com resina flexível, maleável, passiva de desinfecção, com adaptação em diferentes tamanhos de rostos (Pequeno, Médio e Grande), confortável e com vedação adequada à face, sem causar danos ao rosto do trabalhador que a utiliza por longos períodos de trabalho (Leachi *et al.*, 2023).

Nesse contexto, o desenvolvimento da máscara *HeLP* representa uma alternativa sustentável aos EPI descartáveis tradicionais, ao possibilitar a desinfecção, reutilização e redução do volume de resíduos gerados, sem comprometer a proteção respiratória dos trabalhadores da saúde frente aos riscos químicos e biológicos presentes nos ambientes assistenciais. Dessa forma, a inovação proposta contribui simultaneamente para a promoção da saúde ocupacional e para a redução dos impactos ambientais (Lyu *et al.*, 2024).

Para que a máscara *HeLP*, além de ergonômica e sustentável, seja eficaz na proteção ocupacional a riscos químicos e biológicos de trabalhadores expostos, tem-se a necessidade do desenvolvimento de um filtro que promova a adsorção e filtração de componentes químicos e biológicos presentes nos ambientes de trabalho da saúde, garantindo desta forma, a proteção ocupacional respiratória adequada para os trabalhadores da saúde (Leachi *et al.*, 2023).

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Saúde do Trabalhador

A Saúde do Trabalhador é um campo interdisciplinar da Saúde Coletiva que tem como propósito promover e proteger a saúde física, mental e social dos trabalhadores, reconhecendo o trabalho como um determinante fundamental do processo saúde-doença. Essa área propõe uma abordagem ampliada e coletiva,

voltada não apenas ao diagnóstico e tratamento de doenças ocupacionais, mas principalmente à transformação das condições e dos processos de trabalho, com foco na prevenção e na promoção de ambientes laborais saudáveis (Brasil, 2025).

Nesse sentido, a compreensão e a identificação dos riscos ocupacionais presentes nos ambientes de trabalho constituem um dos pilares centrais das ações para a Saúde do Trabalhador, uma vez que permitem analisar de forma objetiva os fatores que interferem na saúde dos trabalhadores e subsidiar estratégias de prevenção, vigilância e intervenção (Brasil, 2012).

No contexto internacional, a Organização Mundial da Saúde (OMS) e a Organização Internacional do Trabalho (OIT) definem a Saúde Ocupacional como uma disciplina que busca a promoção e a manutenção do mais alto grau de bem-estar físico, mental e social dos trabalhadores de todas as ocupações, prevenindo desvios de saúde causados pelas condições de trabalho, protegendo-os contra riscos e adaptando o trabalho às capacidades do ser humano (World Health Organization, 2025; International Labour Organization, 2014).

Essa visão reforça que a saúde laboral não depende apenas da ausência de doenças, mas da existência de condições seguras, dignas e psicologicamente equilibradas que favoreçam a qualidade de vida no trabalho. (Brasil, 2025). No Brasil, essa concepção foi incorporada ao Sistema Único de Saúde (SUS) por meio da Política Nacional de Saúde do Trabalhador e da Trabalhadora (PNSTT), a Portaria 1.823 publicada em 2012 que estabelece diretrizes para a vigilância dos ambientes e processos de trabalho, a redução dos riscos e agravos, e a integração das ações de promoção, prevenção, assistência e reabilitação (Brasil, 2012).

A relevância dessa política torna-se ainda mais evidente diante do cenário epidemiológico nacional, no qual o SUS registrou cerca de 3 milhões de casos de doenças ocupacionais entre 2007 e 2022, de acordo com dados do Sistema de Informação de Agravos de Notificação (SINAN) do Ministério da Saúde. Dentro dessas notificações 52,9% corresponderam a acidentes de trabalho graves, evidenciando os impactos das condições laborais sobre a saúde do trabalhador (Brasil, 2023).

A Norma Regulamentadora 32 (NR-32) estabelece diretrizes essenciais para a implementação de medidas de proteção à segurança e à saúde dos trabalhadores da área da saúde. Seu foco principal está nos riscos biológicos, físicos e químicos, conforme descrito na NR-01, fortalecendo o conjunto de normas

e diretrizes voltado à proteção da saúde do trabalhador (Brasil, 2022; Dalmolin *et al.*, 2022).

3.2 Riscos Ocupacionais

Os riscos ocupacionais são classificados de acordo com a natureza dos agentes presentes no ambiente de trabalho e o tipo de exposição a que o trabalhador está sujeito. A literatura técnico-científica e as normativas do Ministério da Saúde e do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE) agrupam esses riscos em cinco categorias: físicos, químicos, biológicos, ergonômicos e psicossociais (Brasil, 2025; Barbey; Bonvallot; Clerc, 2024).

Os gestores devem antecipar os perigos presentes no ambiente laboral por meio de ações que bloqueiem, controlem e eduquem os trabalhadores envolvidos, aumentando o nível de conscientização para a segurança e saúde ocupacional (Gregório, 2017). Essas ações devem abranger os a prevenção de riscos ocupacionais: físicos, químicos, biológicos, ergonômicos e psicossociais ou mecânicos, que, quando não gerenciados adequadamente, podem comprometer a integridade física, mental e social dos trabalhadores (Brasil, 2025).

Os riscos físicos são definidos como ruído, vibração, calor, frio, pressões anormais, radiações ionizantes e não ionizantes e iluminação inadequada. São agentes ambientais manifestados sob a forma de energia, capazes de gerar algum tipo de efeito ou impacto sobre o corpo humano, resultando em alterações nos seus órgãos e sistemas (Lousa, 2019).

O risco biológico está relacionado à exposição a microrganismos, como bactérias, vírus, fungos e parasitas, presentes em materiais biológicos ou superfícies contaminadas (Lousa, 2019).

Os riscos ergonômicos também chamada de engenharia humana dizem respeito à organização do trabalho e ao esforço físico exigido. A má postura, a repetitividade de movimentos, o levantamento inadequado de cargas e o ritmo acelerado de trabalho podem resultar em distúrbios osteomusculares, fadiga e estresse ocupacional (Lousa, 2019).

Já os riscos psicossociais decorrem de fatores como sobrecarga de trabalho, assédio moral, falta de reconhecimento e ambientes laborais conflituosos,

comprometendo a saúde mental e emocional do trabalhador (Ministério do Trabalho e Emprego, 2025).

Por fim, o risco químico é caracterizado pela exposição a substâncias potencialmente tóxicas sob forma líquida, sólida ou gasosa, como: poeiras, fumos, névoas, neblinas, gases vapores e substâncias compostos ou produtos químicos, que podem penetrar no organismo por inalação, ingestão ou contato dérmico (Lousa, 2019).

No ambiente do CC, os trabalhadores da saúde estão expostos diariamente a riscos biológicos e a riscos químicos. Os riscos químicos são decorrentes da inalação de MP, presente na fumaça cirúrgica gerada pelo uso do eletrocautério (Li *et al.*, 2022), compostos químicos provenientes de medicamentos utilizados na assistência (Leso *et al.*, 2022), inalação de anestésicos utilizados em procedimentos cirúrgicos (Kiani *et al.*, 2023) e produtos químicos utilizados na limpeza do ambiente cirúrgico (Salomen *et al.*, 2024).

A fumaça cirúrgica é composta por 95% de água ou vapor e 5% de detritos celulares na forma de MP (Zhou *et al.*, 2023). O MP é considerado um dos poluentes mais nocivos à saúde humana e a exposição contínua a esse contaminante ao longo da jornada de trabalho, configura um risco ocupacional significativo para os trabalhadores da saúde, que estão constantemente expostos a esse risco ocupacional, aumentando a probabilidade do desenvolvimento de doenças (Ulmer, 2008; Zhou *et al.*, 2023).

A preocupação com os efeitos da fumaça cirúrgica é documentada em meados na década de 1970, quando estudos pioneiros começaram a relatar a presença de substâncias tóxicas liberadas durante procedimentos com bisturi elétrico. Naquela época, as pesquisas ainda eram incipientes, e a fumaça era tratada apenas como um desconforto olfativo e visual, sem potenciais riscos ocupacionais associados (Ulmer, 2012).

Com o avanço da tecnologia e o aumento do número de cirurgias minimamente invasivas, observou-se que essa fumaça continha partículas ultrafinas, compostos químicos voláteis e agentes biológicos viáveis, configurando um importante risco ocupacional para os profissionais da saúde (Zhou *et al.*, 2023).

O MP atmosférico pode ser definido como um material sólido ou líquido ou a mistura das fases e de tamanho micrométrico (μm) que ficam suspensas no ar (Colbeck, 2008).

O MP exerce efeitos adversos sobre múltiplos sistemas orgânicos, ultrapassando o comprometimento respiratório e cardiovascular e alcançando repercussões no fígado, no trato gastrointestinal, no sistema imunológico, no desenvolvimento reprodutivo e até em processos neurológicos. Esses danos estão relacionados a mecanismos como estresse oxidativo, inflamação, apoptose, mutações genéticas e alterações epigenéticas, além de fenômenos mais recentes como piroptose e ferroptose (Li, *et al.*, 2022).

Mesmo em concentrações consideradas baixas, o MP representa ameaça significativa à saúde pública, reforçando a necessidade de estudos que elucidem suas vias de toxicidade em diferentes contextos de exposição. Tais achados subsidiam estratégias de prevenção, identificação de biomarcadores precoces e formulação de políticas ambientais que visem à redução efetiva da morbimortalidade associada à poluição atmosférica (Li, *et al.*, 2022).

Esses poluentes podem ser classificados conforme o seu diâmetro em MP10 (partículas com diâmetro aerodinâmico de 10 *mícrons* ou menores – chamadas de particulado grosso), MP 2,5 (partículas com diâmetro aerodinâmico de 2,5 *mícrons* ou menores chamado de particulado fino) e o MP abaixo de 0,1 μm (partículas com diâmetro aerodinâmico menores que 0,1 μm chamado de ultra-fino) que são as mais prejudiciais à saúde humana (Seinfeld; Pandis, 2012; Li, *et al.*, 2022).

Partículas maiores de 5 μm são depositadas na parede do nariz, faringe, traqueia e brônquios e as menores que 2,5 μm são depositadas nos bronquíolos e alvéolos (Zhou *et al.*, 2023). As partículas com diâmetro inferior a 0,1 μm são conhecidas como partículas ultrafinas ou nanopartículas. Essas partículas têm a capacidade de alcançar as regiões mais distantes da árvore brônquica dos pulmões e entrar na circulação sistêmica (Li *et al.*, 2016).

Dessa forma, o MP presente na fumaça cirúrgica pode atingir diretamente a zona de respiração, permitindo sua deposição desde as vias aéreas superiores até as regiões mais distais do pulmão. A inalação contínua desse aerossol está associada a efeitos adversos não apenas ao sistema respiratório, mas também aos sistemas circulatório e nervoso, em função da penetração sistêmica das partículas ultrafinas (Li *et al.*, 2016; Zhou *et al.*, 2023). A exposição ocupacional contínua a esse tipo de contaminante pode desenvolver estresse oxidativo, doença pulmonar obstrutiva crônica, câncer, insuficiência cardíaca, asma e doenças infecciosas (como hepatite B papilomavírus humano e COVID 19 (Zhou *et al.*, 2023).

Os sinais e sintomas apresentados devido a exposição a fumaça cirúrgica são: tosse, ardência de faringe, espirros, rinite, lesão de nasofaringe, sensação de corpo estranho na garganta, congestão nasal, inflamação das vias aéreas, lacrimejamento dos olhos, náuseas, vômitos, dor abdominal, fraqueza, câibra, dermatite, cefaleia, sonolência, tonturas, irritabilidade, desconforto (como mau cheiro na roupa) (Bieniek *et al.*, 2022).

Embora já exista o consenso sobre os potenciais perigos sobre a inalação dessa fumaça, permanece uma lacuna sobre a regulamentação institucional, ambientes de cirurgia ainda não adotam de forma sistemática medidas efetivas de controle da fumaça, o que representa um risco à saúde dos trabalhadores perioperatórios (Wagner *et al.*, 2024).

Os filtros são sistemas comumente utilizados na retenção de partículas. Seu princípio de funcionamento é simples: consiste na passagem de uma mistura gasosa que contém partículas através de um tecido ou fibra, de forma que o gás passa através dos poros e as partículas, em sua maioria, ficam retidas em sua superfície (Centers for Disease Control and Prevention, 2023). Não apenas os poluentes particulados, mas também fungos, bactérias e microrganismos presentes no ar podem ser retidos através do uso de filtros (Fundacentro, 2016).

Assim, é possível afirmar que para partículas mais finas ($\leq$ MP2,5) e ultrafinas ($\leq$ MP0,1) são recomendados meios filtrantes adequados, como nanofibras compostas de diâmetros em escala nanométrica. O método de eletrofiação é considerado bastante conveniente na produção de nanoestruturas (Goetz *et al.*, 2016).

4 REFERENCIAL METODOLÓGICO

Eletrofiação também conhecido como fiação eletrostática, tem sua base em estudos iniciais no século XVI por William Gilbert. Em 1934 que Anton Formhals realizou a primeira patente experimental da técnica de eletrofiação (Greiner; Wendorff, 2007 apud ALMEIDA *et al.*, 2020). Esta técnica é considerada de simples operacionalização e baixo custo (Fong; Chun; Reneker, 1999).

A eletrofiação tem se destacado como uma das principais rotas para a produção de nanofibras, devido à sua capacidade de gerar materiais com porosidade controlada e diâmetros em escala nanométrica. Essas características

conferem às fibras eletrofiadas excelente desempenho em aplicações que exigem alta eficiência de filtração, adsorção ou interação com agentes químicos e biológicos (Medeiros *et al*, 2022).

Nesse contexto, a pesquisa tem se concentrado na busca por novos materiais e combinações híbridas que aliem resistência mecânica, biodegradabilidade e alta eficiência de captura de partículas, consolidando a eletrofiação como uma tecnologia promissora para o desenvolvimento de filtros sustentáveis e de alta performance (Medeiros *et al*, 2022).

Consiste na aplicação de um campo elétrico sob uma gota de solução polimérica, o que provoca um estiramento e assim produzir fios de um dado material polimérico e a formação de fibras ultrafinas. É composto de uma fonte de alta tensão, uma seringa e agulha sem ponta e um coletor com aterramento. Conforme é modificada a tensão elétrica aplicada sobre este sistema, é formado um cone na ponta da agulha, chamado de cone de Taylor. A partir da formação deste cone, o jato de solução sofre um processo de instabilidade e alongamento, o que reduz o diâmetro da fibra formada. O solvente é evaporado no caminho e a fibra já seca se forma sobre o coletor (Fong; Chun; Reneker, 1999).

Diversos fatores interferem no processo de formação de nanofibras durante a eletrofiação. Dentre eles podemos mencionar: as propriedades da solução, como viscosidade, elasticidade, condutividade e tensão superficial que determina a estabilidade do jato e a morfologia das fibras. Além disso, há parâmetros operacionais diretamente relacionados ao equipamento, como pressão hidrostática no tubo capilar, potencial elétrico na ponta capilar e a distância entre a ponta e a tela de coleta e parâmetros ambientais, como temperatura da solução, umidade e velocidade do ar na câmara de eletrofiação (Pham; Sharma; Mikos, 2006).

A viscosidade é um fator determinante do tamanho e morfologia da fibra, quando se trata da fiação em fibras poliméricas (Pham; Sharma; Mikos, 2006). As condições ambientais do local, onde o sistema de eletrofiação é instalado podem influenciar nas características morfológicas das fibras produzidas. O aumento da temperatura do ambiente tende a diminuir a viscosidade da solução polimérica, e consequentemente, reduzir os diâmetros das fibras obtidas (Pham; Sharma; Mikos, 2006).

A distância entre a ponta da agulha e o coletor onde é colocado os substratos (filtros) controla dos diâmetros e morfologia das fibras. Observou-se que é

necessária uma distância mínima para permitir que as fibras tenham tempo suficiente para secar antes de chegar ao coletor (Pham; Sharma; Mikos, 2006).

Ao se utilizar a técnica de eletrofiação para produção de nanofibras poliméricas, é possível utilizar aditivos, com o objetivo de atribuir certas características o material produzido, a fim de aprimorar as características de adsorção da fibra (HABIBA et al., 2017), ou também atribuir ação biocida (Almeida *et al.*, 2020).

O Composto como de brometo de cetilpiridínio (do inglês cetylpyridinium bromide – *CPB*), faz parte do grupo de surfactantes quaternários de amônia. Eles são conhecidos por atribuir ação antibacteriana, antimicótica, antiprotozoária ou antiproliferativa a diversos materiais e são amplamente utilizados como agentes desinfetantes em produtos de tratamentos para a pele e bucal (Malek; Ramli, 2015).

O acetato de celulose (AC) é um polímero semissintético e biodegradável, derivado da celulose (Abu-Zurayk *et al.*, 2023). Possui baixo custo e fácil processamento, polímero de origem natural mais abundante e rapidamente renovável (Goetz *et al.*, 2016).

A formulação composta por acetato de celulose associado ao brometo de cetilpiridínio demonstrou condições ideais para a produção de nanofibras com diâmetro reduzido e distribuição uniforme. Em estudo, observou-se que a concentração de 21% p/v de AC e 0,5% p/v de *CPB*, aliada a parâmetros específicos do processo de eletrofiação, proporcionou a formação de fibras com diâmetros médios entre 0,2 e 0,3 μm , apresentando propriedades morfológicas e estruturais adequadas ao uso em filtros. Além disso, as nanofibras demonstraram alta estabilidade térmica, boa resistência mecânica e baixa solubilidade em água, atributos que reforçam seu potencial de aplicação como barreiras para proteção respiratória (Almeida *et al.*, 2020).

A efetividade da filtração do MP depende diretamente do tipo de filtro utilizado, de suas características estruturais e do mecanismo físico-químico envolvido no processo de adsorção (Bora et al., 2024)

O filtro do tipo *High Efficiency Particulate Arrestance (HEPA)* promove reduções consistentes nas concentrações de material particulado, variando, de modo geral, entre 70% e 80%, em partículas de diferentes tamanhos, especialmente MP_{2,5}, quando utilizado em intervenções científicas controladas e em aplicações de campo (Faustino *et al.*, 2025).

Os filtros *Ultra Low Penetration Air (ULPA)*, que apresentam eficiência de captura ainda mais elevada para partículas ultrafinas, os filtros de politetrafluoretileno (PTFE), esses filtros demonstraram capacidade de reduzir concentrações de MP e, em alguns casos, de diminuir o potencial oxidativo associado à exposição ao MP, indicando benefícios adicionais à saúde dos indivíduos expostos (Faustino *et al.*, 2025).

No contexto dos Equipamentos de Proteção Individual, respiradores e máscaras faciais com diferentes níveis de eficiência, incluindo máscaras cirúrgicas, respiradores N95/PFF2 e PFF3. Os respiradores do tipo N95/PFF2 demonstraram capacidade de filtrar pelo menos 95% das partículas aerodispersas de tamanho igual ou superior a 0,3 μm , enquanto os PFF3 apresentaram eficiência mínima de 99,95% para partículas maiores (Faustino *et al.*, 2025).

No entanto, a literatura aponta que a eficiência dos dispositivos N95/PFF2 e PFF3 depende fortemente do ajuste adequado à face do usuário e que, apesar da elevada capacidade de retenção de partículas, há limitações na adsorção de gases, vapores e compostos químicos voláteis (Faustino *et al.*, 2025).

De modo geral, o panorama apresentado evidencia que, embora existam filtros com elevada eficiência na retenção de material particulado, especialmente os filtros *HEPA* e *ULPA*, ainda há lacunas quanto à adaptação dessas tecnologias para uso em dispositivos de proteção respiratória individual que associem alta eficiência de filtração, capacidade de adsorção de compostos químicos, conforto, sustentabilidade e viabilidade para uso ocupacional prolongado (Faustino *et al.*, 2025).

Esses achados reforçam a necessidade do desenvolvimento de novos filtros e soluções tecnológicas que atendam de forma integrada às demandas da saúde ocupacional, particularmente no contexto da proteção respiratória de trabalhadores da saúde expostos a riscos químicos e biológicos (Faustino *et al.*, 2025).

Nesse contexto, a discussão sobre a efetividade dos filtros respiratórios deve ser articulada os princípios da biossustentabilidade, especialmente diante do uso crescente de EPI descartáveis nos serviços de saúde, a elevada geração de resíduos sólidos hospitalares decorrente do uso contínuo de máscaras e filtros de uso único, impõe desafios ambientais, sanitários e econômicos, evidenciando a necessidade de desenvolvimento de tecnologias que conciliem proteção à saúde humana e responsabilidade ambiental (Lyu *et al.*, 2024).

A biossustentabilidade aplicada à filtração respiratória envolve a utilização de materiais biodegradáveis ou de origem renovável, a redução do volume de resíduos, o aumento da vida útil dos dispositivos e a possibilidade de desinfecção e reutilização segura (Lyu *et al.*, 2024).

Essa abordagem está em consonância com a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, proposta pela Organização das Nações Unidas, particularmente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 3 (Saúde e Bem-Estar), 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico), 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura) e 12 (Consumo e Produção Responsáveis) (Organização das Nações Unidas, 2023).

Assim, o desenvolvimento de filtros biossustentáveis e de alta eficiência representa uma estratégia promissora para suprir as lacunas identificadas nos sistemas de filtração convencionais, atendendo de forma integrada às demandas da saúde ocupacional, da proteção ambiental e da inovação tecnológica no contexto da assistência à saúde (Lyu *et al.*, 2024).

Diante do exposto, para o desenvolvimento desta dissertação, tem-se a seguinte pergunta de pesquisa: É possível desenvolver filtro para proteção respiratória de trabalhadores da saúde expostos a riscos químicos e biológicos no ambiente de trabalho para ser utilizado na máscara *HeLP*?

5 OBJETIVOS

5.1 Objetivo Geral

Desenvolver um filtro sustentável para proteção respiratória de trabalhadores da saúde expostos a riscos químicos e biológicos no ambiente de trabalho.

Para tanto, os resultados dessa dissertação serão apresentados em dois artigos científicos intitulados:

1. Filtro SOSstentável de nanofibras para proteção respiratória de trabalhadores da saúde para máscara *HeLP*;
2. Filtro SOSstentável de nanofibras em *Spunbond-Meltblown-Spunbond* (SMS) para a máscara *HeLP*: Microscopia Eletrônica de Varredura

5 RESULTADOS

5.1 ESTUDO 1

Filtro SOSstentável de nanofibras para proteção respiratória de trabalhadores da saúde para máscara HeLP

5.1.2 RESUMO

Objetivo: Desenvolver filtro SOSstentável para proteção respiratória de trabalhadores expostos a riscos químicos e biológicos em locais de trabalho para ser utilizado na máscara HeLP. **Método:** Estudo metodológico. A máscara HeLP foi desenvolvida em pesquisa anterior para a utilização na proteção dos trabalhadores da saúde contra riscos químicos e biológicos, portanto, os filtros para a HeLP foram produzidos com nanofibras e substrato *Spunbond-Metblown-Spunbond* novo e o esterilizado com o intuito de reaproveitamento do material utilizado como invólucro para manutenção de materiais estéreis. Na produção das nanofibras empregou-se a técnica de eletrofiação com polímero acetato de celulose e surfactante catiônico brometo de cetilpiridínio como aditivo de ação biocida. As amostras de *Spunbond-Metblown-Spunbond* foram confeccionadas nos tamanhos próprios para a máscara HeLP com espessura de fiação de 10 e 20 minutos. **Resultados:** Foram produzidas 240 amostras de filtros, sendo 120 a partir do substrato *Spunbond-Metblown-Spunbond* novo e 120 esterilizado. O processo resultou em substratos recobertos por uma camada uniforme de nanofibras, visualmente homogêneos e de coloração levemente esbranquiçada, com características indicativas de uma deposição consistente e bem distribuída em toda superfície, tanto no *Spunbond-Metblown-Spunbond* novo quanto no esterilizado. **Conclusão:** O desenvolvimento de um filtro sustentável é possível pois as características da fiação no substrato novo foram semelhantes no substrato esterilizado, indicando a sua utilização como potencial meio filtrante para a máscara HeLP. A confirmação da eficácia do filtro SOSstentável e usabilidade está em desenvolvimento nas pesquisas futuras do Grupo de Estudos em Gestão do Cuidado, Editoração Científica e Saúde do Trabalhador.

Descritores: Dispositivos de Proteção Respiratória; Saúde dos trabalhadores; Nanofibras; Desenvolvimento sustentável.

ABSTRACT

Objective: To develop a sustainable SOS filter for respiratory protection for workers exposed to chemical and biological hazards in the workplace, to be used in the HeLP mask. **Method:** Methodological study. The filters for use in the previously developed HeLP mask were produced with nanofibers, using new and sterilized *Spunbond-Metblown-Spunbond* nonwovens as substrates. The sterilized *Spunbond-Metblown-Spunbond* was introduced into the filter sample to reuse the material previously used as a casing for maintaining sterile materials. The nanofibers were produced by electrospinning with cellulose acetate polymer and cetylpyridinium bromide, a cationic surfactant, as a biocidal additive. The *Spunbond-Metblown-Spunbond* samples were made in sizes S, M, and L (suitable for the HeLP mask), and for the desired thickness, spinning was performed in two times: 10 and 20 minutes. For characterization, fiber diameter measurements were taken to compare the results at different spinning times

and on the new Spunbond-Metblown-Spunbond and sterilized Spunbond-Metblown-Spunbond substrates. **Results:** 240 filter samples were produced, 120 from the new Spunbond-Metblown-Spunbond substrate and 120 from the sterilized Spunbond-Metblown-Spunbond. The process resulted in substrates coated with a uniform layer of nanofibers, visually homogeneous and slightly whitish in color, indicative of consistent and well-distributed deposition across the entire surface. There was no pearl formation, making the spinning more reliable. **Conclusion:** The results of this study demonstrate the feasibility of developing a sustainable filter produced by electrospinning cellulose acetate nanofibers with cationic surfactant, presenting a potential filter medium for the HeLP mask. The technical feasibility of producing nanoscale fibers on new and reused substrates suggests the material's ability to offer protection against chemical and biological hazards for healthcare professionals. Confirmation of its efficacy and usability is currently under scientific development by the Study Group on Care Management, Scientific Publishing, and Worker's Health.

Descriptors: Respiratory Protective Devices; Health, Occupational; Nanofibers; Sustainable Development.

5.1.3 INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS) e a Organização Internacional do Trabalho (OIT) a exposição a perigos no ambiente de trabalho é responsável por um elevado número de doenças ocupacionais (Organização Mundial Da Saúde; Organização Internacional do Trabalho, 2025).

Durante as atividades laborais é importante reconhecer os riscos ocupacionais, fatores específicos do ambiente e nas condições de trabalho, bem como as características individuais como: o local onde o trabalho é realizado e o tempo de exposição ocupacional aos riscos (Fundacentro, 2023).

Os riscos ocupacionais do ambiente hospitalar de trabalho são muitos, mas o mais conhecido pelos trabalhadores e gestores hospitalares são os riscos biológicos, que incluem o contato com fluidos como sangue e secreções, microrganismos como vírus e bactérias, como o manuseio de materiais perfurocortantes que geram o risco de acidentes de trabalho (Bagheri *et al.*, 2024).

No ambiente do Centro Cirúrgico (CC), os trabalhadores da saúde estão expostos não apenas aos riscos biológicos, mas também aos riscos químicos decorrentes da inalação de Material Particulado (MP), presente na fumaça cirúrgica gerada pela eletrocirurgia (Li *et al.*, 2022), aparelho utilizado em procedimentos cirúrgicos, com funções de hemostasia e dissecação tecidual, diminuindo o tempo do

procedimento cirúrgico e facilitando a visualização do campo operatório (Meretsky *et al.*, 2024).

Esse equipamento, quando em contato com a pele humana, causa a explosão da membrana celular do tecido envolvido devido à alta temperatura (Meretsky *et al.*, 2024), apresentando como consequência a liberação da fumaça cirúrgica no ambiente de trabalho, composta por 95% de água ou vapor e 5% de detritos celulares na forma de MP (Zhou *et al.*, 2023).

O MP é considerado um dos poluentes mais nocivos à saúde humana, formado por uma mistura de pequenas partículas e gotículas de tamanho microscópico suspensas no ar. A exposição contínua a esse contaminante ao longo da jornada de trabalho, configura um risco ocupacional significativo para os trabalhadores da saúde, que estão constantemente expostos a esse risco ocupacional, aumentando a probabilidade do desenvolvimento de doenças (Ulmer, 2008; Zhou *et al.*, 2023).

Uma forma de proteção para minimizar a exposição ocupacional a agentes biológicos e químicos é o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPI), que funcionam como barreira física entre o trabalhador e o agente nocivo à saúde (Chakr; Sav, 2024).

As máscaras cirúrgicas são as mais utilizadas no ambiente hospitalar, incluindo o CC. Porém, este tipo de máscara não protege contra partículas menores que $4\ \mu\text{m}$ (Szczepańska *et al.* 2023). As máscaras recomendadas para a exposição a fumaça cirúrgica são as do tipo PFF2/N95 consideradas de alta filtração, mas não protegem contra os riscos químicos, pois elas filtram partículas maiores que $0,3\ \mu\text{m}$ (National Institute of Occupational Safety and Health, 1996) e os compostos químicos presentes na fumaça cirúrgica apresentam MP com diâmetro predominante entre $0,007$ a $0,42\ \mu\text{m}$, representando um importante risco ocupacional para os trabalhadores expostos à fumaça cirúrgica (Limchantra *et al.*, 2019).

Os filtros do tipo *High Efficiency Particulate Arrestance (HEPA)* são os mais amplamente avaliados, demonstrando reduções significativas nas concentrações de MP em diferentes cenários, com resultados variando, de modo geral, entre 70% e 80%. Outros filtros, como os do tipo *Ultra Low Penetration Air (ULPA)*, filtros de politetrafluoretileno (PTFE), filtros eletrostáticos e sistemas portáteis de purificação do ar, também apresentaram capacidade de redução de partículas finas, incluindo MP_{2,5}, bem como diminuição do potencial oxidativo associado à exposição ao MP. Contudo, embora esses sistemas se mostrem eficazes em

ambientes controlados ou estacionários, sua aplicação direta em dispositivos de proteção respiratória individual apresenta limitações, especialmente no que se refere à adsorção de gases, vapores e compostos químicos voláteis, indicando a necessidade de soluções específicas para uso ocupacional individual (Faustino *et al.*, 2026).

Diante dos riscos respiratórios presentes na fumaça cirúrgica e a falta de um EPI eficaz para proteção a esses riscos, encontrou-se uma lacuna científica e foi desenvolvida uma inovação tecnológica: a máscara *HeLP* para ser ergonômica, sustentável e eficaz. A *HeLP* é produzida em impressora 3D, com resina flexível, maleável, passiva de desinfecção, com adaptação em diferentes tamanhos de faces, oferecendo conforto aos trabalhadores e vedação adequada (Leachi; Ribeiro, 2023).

Para a conclusão da inovação que é *HeLP* é necessário que seja desenvolvido um filtro de proteção ocupacional, que adsorva partículas químicas e biológicas, para ser testado e utilizado na *HeLP*.

Portanto com esse estudo, em consonância com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável propostos pelo Organização das Nações Unidas (Organização das Nações Unidas, 2023) pretende-se responder a seguinte pergunta de pesquisa: É possível desenvolver um filtro para proteção respiratória de trabalhadores expostos a riscos químicos e biológicos em locais de trabalho para ser utilizado na máscara *HeLP*?

Para responder a essa pergunta, apresenta-se o seguinte objetivo de pesquisa: Desenvolver filtro *SOStentável* para proteção respiratória de trabalhadores expostos a riscos químicos e biológicos em locais de trabalho para ser utilizado na máscara *HeLP*.

5.1.4 MATERIAL E MÉTODO

Trata-se de uma pesquisa do tipo metodológica denominada como estudo de proposição, desenvolvimento e validação de instrumentos, métodos ou tecnologias voltadas ao aprimoramento da prática profissional. Esse tipo de investigação busca garantir rigor científico à criação de produtos inovadores, assegurando validade de conteúdo, clareza estrutural e aplicabilidade prática no contexto da enfermagem (Salbego *et al.*, 2023).

Para o desenvolvimento do filtro, foi necessário o trabalho multidisciplinar, pois é um processo complexo, demandando a visão de diferentes áreas de conhecimento: enfermeiros que usam o material na prática ocupacional, químicos com *expertise* em desenvolvimento de nanofibras e pesquisadores.

O estudo ocorreu no período de abril a outubro do ano de 2025 no Laboratório de Análises em Poluição do Ar (LAPAR) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Londrina contando a participação de professoras doutoras e alunas do Grupo de Estudos em Gestão do Cuidado, Editoração Científica e Saúde do Trabalhador (GeeST) da Universidade Estadual de Londrina (UEL) e professoras doutoras da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

As etapas do desenvolvimento do filtro para a máscara *HeLP* foram alinhadas com as ferramentas do Processo de Desenvolvimento de Produtos (Rozenfeld *et al.*, 2006), conforme figura 1, a qual tem conexão com o mercado, identificando-se a necessidade para propor soluções. Assim, o processo divide-se em três macros fases: o pré-desenvolvimento, o desenvolvimento e o pós-desenvolvimento.

Figura 1 – Modelo unificado do Processo de Desenvolvimento de Produtos. São Paulo. Brasil, 2006.



Fonte: Rozenfeld *et al.* (2006).

A fase de pré-desenvolvimento compreende o planejamento inicial do produto, permitindo o mapeamento detalhado do andamento do projeto e

assegurando o direcionamento estratégico por meio da definição de objetivos, requisitos e escopo, com a participação dos envolvidos no processo (Rozenfeld *et al.*, 2006). Nesta fase foi realizado um planejamento de trabalho, incluindo a elaboração de um cronograma detalhado das etapas do estudo, a realização de pesquisas em bases de dados científicas e a definição de uma lista de requisitos técnicos e funcionais necessários para a construção do projeto do filtro para a máscara *HeLP*, com foco na proteção respiratória frente à exposição à fumaça cirúrgica.

A fase de desenvolvimento, por sua vez, utiliza as informações obtidas na etapa anterior para transformá-las em especificações técnicas e operacionais, viabilizando a produção do protótipo (Rozenfeld *et al.*, 2006).

Para o desenvolvimento do filtro, fez-se necessário um trabalho multidisciplinar, considerando a complexidade do processo e a integração de diferentes áreas do conhecimento. Os pesquisadores da área da enfermagem foram responsáveis pela execução do processo de eletrofiação e pela produção dos filtros, a partir da aplicação prática dos parâmetros previamente definidos engenharia química em estudo patentado (Almeida *et al.*, 2020).

A participação da área da química ocorreu de forma colaborativa e consultiva, por meio da orientação técnica quanto à formulação da solução polimérica e aos fundamentos do processo de eletrofiação. Essa interação interdisciplinar possibilitou o desenvolvimento de um filtro tecnicamente viável, alinhado às necessidades da saúde ocupacional e às características específicas do ambiente cirúrgico.

Foram selecionados como substrato para a fiação da nanofibra o *Spunbond-Metblown-Spunbond (SMS)* novo e o *SMS* esterilizado. O *SMS* novo serviu de controle para comparação da manutenção da estrutura do substrato após a fiação e o *SMS* esterilizado, utilizado como invólucro de materiais esterilizados para serem usados nas cirurgias, foi escolhido por se tratar de um material que após a abertura dos pacotes esterilizados, os quais servem de invólucro de proteção, não são reaproveitados, sendo descartados e aumentam o *hall* de resíduos hospitalares, portanto, a busca por alternativas sustentáveis.

O *SMS* é um envoltório de polipropileno utilizado como embalagem para esterilização de materiais, sua estrutura de fibras permite a passagem do ar e do ar e do agente esterilizante, ao mesmo tempo impede a entrada de microrganismos (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004).

Após o uso, o SMS, é normalmente descartado, gerando resíduo que impactam o meio ambiente. A busca por alternativas que promovam seu reaproveitamento está alinhada aos princípios de sustentabilidade e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas (ONU), incentivando práticas que reduzam o desperdício e ampliem a vida útil dos recursos na área da saúde (Organização das Nações Unidas, 2025).

Em estudos prévios conduzidos pelo GeeST, o SMS demonstrou potencial como substrato devido às suas propriedades estruturais e de barreira, que favorecem a deposição e fixação de fibras eletrofiadas (Faustino *et al.*;2024).

Para garantir uniformidade no processo, foram confeccionados moldes nos tamanhos correspondentes aos filtros para que se encaixassem de forma correta na máscara *HeLP* e, como apresentado na figura 2, em seguida, armazenados pronto para eletrofiação.

Para a eletrofiação utilizamos o polímero acetato de celulose (AC) ($30.000 \text{ g mol}^{-1}$); o surfactante catiônico foi Brometo de Cetilpiridínio Hidratado (CPB) (98%), ambos produzidos pela Sigma-Aldrich. Os solventes foram ácido acético, produzido por Synth, e água ultrapura (Almeida *et al.*, 2020).

Figura 2 – Filtro de *Spunbond-Metblown-Spunbond* acoplado à máscara *HeLP*. Paraná. Brasil, 2025.



Fonte: Própria autoria.

O desenvolvimento de meios filtrantes pela técnica de eletrofiação tem se mostrado uma alternativa viável e promissora na retenção de nanopartículas (Zhou *et al.*, 2022). Esta técnica amplamente empregada na produção de nanofibras, possibilita a obtenção de materiais aplicáveis para filtração e adsorção de poluentes atmosféricos (Zhou *et al.*, 2022).

A eletrofiação é considerada uma técnica simples e de fácil operação (Zhou *et al.*, 2022). Essencialmente, envolve a aplicação de um campo elétrico em uma gota de solução polimérica, forçando o estiramento e a produção de fios do material polimérico desejado. Consiste em uma fonte de alta tensão, uma solução polimérica injetada por uma e um coletor com aterramento. A variação da tensão elétrica no sistema forma um cone na ponta da agulha, conhecido como cone de Taylor (Fong; Chun; Reneker, 1999).

A partir deste cone, o jato de solução passa por um processo de instabilidade e alongamento e sofre um fenômeno de chicoteamento, resultando na redução do diâmetro da fibra formada. O solvente evapora durante o caminho, e a fibra seca se forma sobre o coletor (Bhardwaj; Kandu, 2010; Bonakdar; Rodrigues, 2024). Para o desenvolvimento dessas fibras é possível adicionar polímeros e aditivos as mesmas, o que confere características específicas as fibras, aumentando sua funcionalidade (Medeiros *et al.*, 2022).

Com base na formulação previamente validada, este estudo utilizou a mesma quantidade de solução polimérica, composta por 21% de AC e 0,5% de cloreto de CPB, com o objetivo de garantir comparabilidade dos resultados e reprodutibilidade da técnica (Almeida *et al.* 2020).

O AC é um polímero semissintético e biodegradável (Abu-Zurayk *et al.*, 2023), sua fonte natural é a celulose, encontrado em maior abundância na natureza (Goetz *et al.*, 2016). A incorporação de surfactantes à soluções poliméricas, promove maior estabilidade estrutural a esses materiais resistência térmica e mecânica, redução de diâmetro das fibras e minimiza a formação de *beads*/pérolas (Zheng *et al.*, 2014) e ação antisséptica (National Library of Medicine, 2004; Almeida, *et al.*, 2021).

Para o cálculo da quantidade de CPB – 0,5% (m/v), usando o volume de 100 mL como o volume final da solução, tem-se $0,5\% (m/v) = 0,5g/100\text{ mL}$.

Se: $0,5g \rightarrow 100\text{ mL}$ $x \rightarrow 50\text{ mL}$

Realizando a multiplicação cruzada, temos:

$$100x = 25/100 = 0,25g$$

Para o cálculo da quantidade de AC a 21%. Usando o volume de 100 mL como o volume final da solução, teremos:

$$\text{Se } 21g \rightarrow 100 \text{ mL } x \rightarrow 50 \text{ mL}$$

Realizando a multiplicação cruzada, temos:

$$100x = 1050/100 = 10,5g$$

Após a realização dos cálculos, para produção da solução foi realizado pesagem na balança analítica. Primeiro foi colocado o béquer na balança e acrescentado o AC até atingir a massa calculada. Após adicionado a massa de *CPB* até obter a massa calculada.

Para obter a solução é necessário o uso dos solventes. Nesse caso, os solventes serão compostos pela mistura de água ultrapura e ácido acético na proporção de 1:3 água/ácido acético, ou seja: 1 parte de água para 3 partes de ácido em volume. Com o volume final de solução de 100 mL, a divisão será:

$$100 \text{ mL} = \text{em partes iguais}$$

$$100 \text{ mL} = 25 \text{ mL}$$

Assim, o volume de água ultrapura foi estabelecido em 25 mL e o de ácido acético em 75 mL. Para iniciar o processo, utilizou-se EPI: jaleco e luvas. Após o cálculo dos volumes de cada solvente, foi utilizado uma proveta graduada para medir as soluções até o volume calculado. Em seguida, os solventes foram adicionados no béquer adicionando primeiro ácido e depois a água. Em preparação de solvente, sempre introduza o ácido na água, caso contrário causará uma reação exotérmica com possíveis acidentes (Helmenstine, 2025).

Adicionado o resíduo e *CPB* e o AC pesado, procede-se a mistura com a ajuda de um bastão de vidro. Para garantir a homogeneidade da solução, realizou-se a solubilização usando um agitador magnético com aquecimento menor a 50°C até a obtenção completa uniformidade da mistura.

A solução polimérica preparada foi acondicionada na seringa de 10 ml, no entanto, é possível empregar seringas de outros volumes, a depender da capacidade do equipamento que será realizado a eletrofiação. Em seguida, acoplou-se uma agulha de ponta reta à seringa.

Antes de iniciar o processo, a sala foi mantida a uma temperatura controlada de 23 °C, o aumento da temperatura resulta na diminuição do diâmetro da fibra (Keirouz et al., 2023). Evitou-se o procedimento em dias chuvosos, devido à alta

umidade do ar. Para a eletrofiação com o polímero de AC é necessário que a umidade relativa do ar permaneça acima de 70% (Hardick; Stevens; Bracewell. 2010). Com a umidade, o solvente evapora rapidamente, encurtando o caminho do jato e resultando em fibras mais grossas (Keirouz et al., 2023).

Após, a seringa acoplada à agulha foi instalada na bomba de infusão, responsável por liberar volume de solução em um fluxo controlado. Posteriormente, conectou-se o cabo à extremidade da agulha e posicionou-se a ponta da agulha alinhada ao centro do coletor recoberto com folha de alumínio contendo os substratos com o lado fixados com fita crepe, mantendo uma distância de 10 cm. Os substratos foram dispostos de modo que a face interna (avesso) permanecesse aderida ao coletor, enquanto a face externa que é um pouco mais rugosa foi exposta ao processo de eletrofiação.

A formulação do processo por eletrofiação sob condições previamente otimizadas foram: vazão de 0,7 mL/h, voltagem de 18 kV. As nanofibras foram depositadas diretamente sobre substrato de não tecido (TNT) com gramatura de 60 g/m², utilizando volumes de solução de 0,13 mL e 0,15 mL, o que resultou em camadas delgadas e homogêneas, para manter a respirabilidade do material, a velocidade de rotação do coletor foi mantida entre 60 e 70 RPM. Assim, como no estudo de referência, a aplicação desses parâmetros permitiu a obtenção de nanofibras com atividade biocida comprovada e eficiência de filtração de partículas de NaCl (7 a 300 nm) entre 63% e 77% (Almeida *et al.* 2020).

Assim, as nanofibras foram gradualmente produzidas e depositadas sobre o substrato aparecendo em coloração esbranquiçada. Para obter espessura desejada, realizados a fiação em 2 tempos: 10 a 11 minutos e 20 a 21 minutos (Almeida *et al.* 2020).

Inicialmente, foi realizada a eletrofiação de uma amostra de SMS novo fiado de 20 a 21 minutos e de uma amostra de SMS esterilizado de 10 a 11 minutos. Para análise do material eletrofiado verificou-se o tempo de deposição adotado por meio da uniformidade e a homogeneidade da cobertura sobre o substrato, verificadas na análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) posterior.

Em cada rodada do processo de eletrofiação, foram produzidas seis amostras. Inicialmente, fiou-se as amostras de SMS novo, que foram identificadas considerando o tamanho da máscara *HeLP* (Pequeno (P), Médio (M) e Grande (G)) e a codificação utilizada foi “I” para tempo de 20 a 21 min e “II” para tempo de 10 a 11

minutos. Já as amostras de SMS esterilizado, com o lote E241203F, gramatura 60g, foram identificadas conforme o mesmo critério de tamanho e receberam a codificação “III” para 20 a 21 min e “III” para 10 a 11 minutos. As amostras foram acondicionadas no dessecador para iniciar o processo de secagem, contendo sílica gel, a fim de absorver a umidade (Tétreult; Bégin, 2018) conforme ilustrado na imagem 3, permanecendo por 48 horas.

Posteriormente os filtros foram armazenados em embalagens do tipo *ziplock* devidamente identificadas com a data de produção tamanhos e a condição do substrato (*SMS* novo e *SMS* esterilizado).

Figura 3 – Amostras de *Spunbond-Metblown-Spunbond* acondicionadas em dessecador contendo sílica gel para remoção da umidade. Paraná, Brasil, 2025.

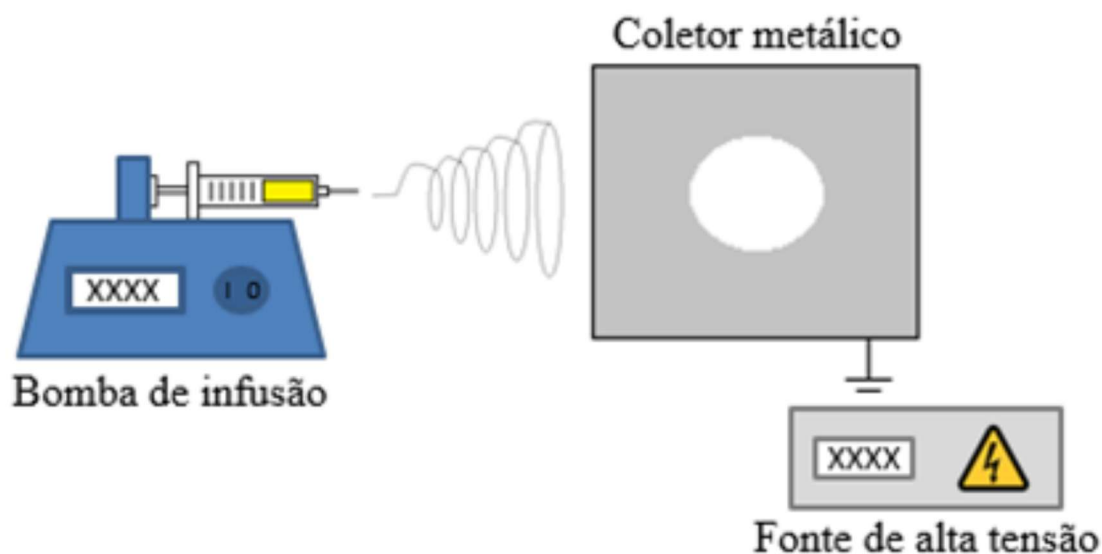


Fonte: Própria autora.

Na figura 4 apresenta-se um esquema do processo de eletrofiação e seus componentes e seus componentes.

A fase de pós-desenvolvimento, por sua vez, refere-se ao acompanhamento do produto após sua implementação, possibilitando a identificação de necessidades, limitações e oportunidades de aprimoramento contínuo (Rozenfeld *et al.*, 2006). No presente estudo, esta etapa não foi contemplada, uma vez que o filtro em desenvolvimento necessita de outras fases que serão realizadas nas pesquisas subsequentes.

Figura 4: Esquema do processo de eletrofiação e seus componentes. Paraná, Brasil, 2025



Fonte: Adaptado de MEDEIROS et al., 2022.

5.1.5 RESULTADOS

Foram produzidas, por meio da técnica de eletrofiação, um total de 240 amostras, sendo 120 provenientes de SMS novo e 120 de SMS esterilizado, ambos eletrofiados com solução polimérica de acetato de celulose e CPB. Esse quantitativo foi estabelecido considerando o planejamento de etapas subsequentes da pesquisa, que envolvem avaliações com os trabalhadores da saúde, uma vez que o número de participantes a serem incluídos nessas fases determina diretamente a quantidade de filtros necessários para a realização dos testes previstos.

O processo resultou em substratos recobertos por uma camada uniforme de nanofibras, visualmente homogêneos e de coloração levemente esbranquiçada, características indicativas de uma deposição consistente e bem distribuída em toda superfície. As amostras produzidas, foram acondicionadas e prontas para a etapa subsequente da pesquisa, que consiste na caracterização microestrutural por meio de Microscopia de Varredura Eletrônica (MEV), realizada na próxima etapa a qual este projeto faz parte.

A fiação das nanofibras sobre os substratos de SMS novo e SMS esterilizado foi conduzida sob condições controladas e sob esses parâmetros, foram produzidas amostras com dois tempos de deposição distintos: SMS esterilizado entre

10 a 11 minutos e SMS novo 20 a 21 minutos, permitindo avaliar a influência do tempo na cobertura das nanofibras. As amostras obtidas apresentaram formação uniforme das fibras sobre os substratos, sem falhas aparentes e com boa aderência entre as camadas eletrofiadas e o SMS.

5.1.6 DISCUSSÃO

No ambiente de CC, o uso de máscaras cirúrgicas padrão é prática comum. Essas máscaras apresentaram eficiência de filtração de aproximadamente 100 % para partículas com diâmetro superior a 4 μm . Isso evidencia sua alta eficácia na contenção de gotículas (Szczepańska *et al.*, 2023),

A máscara N95/PFF2 é classificada como de alta eficiência para a filtração de partículas com diâmetro igual ou superior a 0,3 μm (NIOSH, 1996). No entanto, sua capacidade de proteção não se estende de forma efetiva aos compostos presentes na fumaça cirúrgica, uma vez que essa contém partículas químicas e biológicas predominantemente na faixa de 0,07 μm a 0,42 μm (Limchantra *et al.*, 2019; Association of periOperative Registered Nurses, 2021). Primeiramente, a eficácia real depende diretamente da vedação adequada ao rosto do usuário, uma vez que falhas no ajuste permitem a passagem de partículas pelas bordas da máscara, reduzindo significativamente sua performance (Meretsky *et al.*, 2024). Além disso, a fumaça cirúrgica contém partículas químicas e biológicas predominantemente em faixas de tamanho inferiores a 0,3 μm (Limchantra *et al.*, 2019; Association of periOperative Registered Nurses, 2021) o que possibilita que parte desses contaminantes ultrapasse o material filtrante mesmo em respiradores de alto desempenho.

Dessa forma, a máscara *HeLP* foi desenvolvida com design anatômico adaptável a diferentes formatos faciais, disponível nos tamanhos (P, M e G), o que melhora substancialmente o encaixe e a vedação, minimizando a passagem de partículas pelas bordas. Além disso, sua estrutura considera conforto ergonômico, sustentabilidade e potencial para desinfecção, qualidades que a tornam uma proposta promissora como EPI de proteção respiratória contra a fumaça cirúrgica (Leachi; Ribeiro, 2023). O diferencial é que a máscara foi projetada para permitir sua desinfecção e reutilização, demandando apenas a substituição do filtro, o que amplia sua vida útil, reduz resíduos e reforça seu caráter sustentável.

O filtro de *SMS* como substrato foi fundamentada em um estudo que avaliou sua capacidade de filtração, evidenciando desempenho satisfatório na retenção de gotículas. No mesmo estudo, confirmou-se a sua eficácia como barreira protetora respiratória quando existe a exposição a agentes biológicos (Faustino *et al.*, 2024). Dessa forma, ao ser submetido ao processo de eletrofiação com o AC e *CPB*, o *SMS* passará a integrar a máscara *HeLP*, atuando como o componente fundamental para proteção respiratória, contra riscos biológicos e químicos.

O *SMS* é composto por 3 camadas. A primeira camada, chamada *spunbond*, é produzida a partir de fibras curtas que são depositadas sobre uma superfície quente. A segunda camada, chamada, *meltblown*, é produzida a partir de fibras fundidas que são separadas por um bico fino. A terceira camada, também chamada *spunbond*, é produzida da mesma maneira que a primeira camada (Grigg *et al.*, 2021). Apresenta meio filtrante denso, cujas fibras e poros possuem espessura de 1 a 5 μm (Faustino *et al.*, 2024).

A aplicação da técnica de eletrofiação com solução polimérica de acetato de celulose e adição de surfactante *CPB* permite recobrir e preencher os espaços existentes entre essas fibras resultando no estreitamento e, assim, aumentando a eficiência de filtração (Almeida *et al.*, 2020).

Estudos apontam o AC como um polímero adequado para eletrofiação, por possibilitar a formação eficiente de nanofibras contínuas, homogêneas e livres de defeitos morfológicos (Elaissaqui *et al.*, 2024). A adição de surfactantes às soluções poliméricas, promove maior estabilidade estrutural (Zheng *et al.*, 2014).

O uso do surfactante catiônico *CPB*, tem se mostrado uma estratégia eficaz na modificação de soluções poliméricas para eletrofiação. Em sistemas de AC, a incorporação do *CPB* promove redução do diâmetro das fibras, diminuição da formação de *beads* e maior estabilidade estrutural, resultando em nanofibras homogêneas e contínuas (Almeida *et al.*, 2020). Além disso, a presença do *CPB* confere atividade antimicrobiana. Esses resultados reforçam que o AC com a adição do *CPB* apresenta não apenas potencial em filtração de partículas, mas também aplicação em materiais de proteção respiratória com propriedades antissépticas e multifuncionais (Almeida *et al.*, 2020)

A formulação de AC associada ao *CPB* foi adotada neste estudo em consonância com de um estudo que evidenciou condições ideais para a obtenção de

nanofibras, com pequeno diâmetro e distribuição de tamanho homogênea, neste estudo, verificou-se que a concentração de 21% p/v de AC e 0,5% p/v de CPB, associada a parâmetros específicos de eletrofiação, resultou em fibras com diâmetros médios entre 0,2 e 0,3 μm , com propriedades morfológicas e estruturais favoráveis à aplicação como filtros, além disso as nanofibras apresentaram elevada estabilidade térmica, resistência mecânica e baixa solubilidade em água, características que reforçam sua aplicabilidade em barreiras de proteção respiratória (Almeida *et al.*, 2020).

Dessa forma, a escolha dessa formulação foi fundamentada em evidências que demonstram seu potencial para o desenvolvimento de materiais filtrantes de alta eficiência, especialmente frente à necessidade de proteção contra partículas em suspensão no ar e contaminantes de origem química e biológica.

A obtenção de nanofibras por meio da eletrofiação é influenciada por diversos parâmetros. Entre eles, destacam-se as propriedades da solução, como viscosidade; variáveis controladas, como pressão hidrostática no tubo capilar, potencial elétrico na ponta capilar e a distância entre a ponta e o coletor; e parâmetros ambientais, como temperatura da solução, umidade e velocidade do ar na câmara de eletrofiação (Pham; Sharma; Mikos, 2006).

A viscosidade da solução, diretamente influenciada pela concentração polimerérica, exerce papel decisivo no diâmetro e na morfologia das fibras obtidas por eletrofiação. Aumentar a viscosidade pela concentração do polímero produz fibras uniformes, minimizando *beads* e junções os quais podem comprometer a resistência física e o desempenho mecânico das nanofibras (Al-Abduljabbar; Farooq, 2022).

A presença de *beads* nas nanofibras eletrofiadas, quando frequente, pode enfraquecer a malha ao reduzir as interações entre fibras e comprometer a integridade estrutural (Tarus *et al.*, 2016). Por outro lado, quando presentes em quantidades moderadas, esses defeitos podem aumentar a rugosidade superficial, o que potencialmente melhora aspectos como propriedades hidrofóbicas da estrutura (Tarus *et al.*, 2016).

O controle da tensão elétrica e da distância ponta-coletor é fundamental na eletrofiação. A tensão elétrica aplicada à solução está relacionada à formação do cone de Taylor, um campo elétrico excessivo compromete sua estabilidade. Enquanto a distância inadequada pode impedir a evaporação completa

do solvente, resultando em fibras com morfologia irregular ou mais espessas (Bonakdar; Rodrigue, 2024).

Os parâmetros ambientais como temperatura, umidade e fluxo de ar, influenciam significativamente as características morfológicas das fibras. O aumento da temperatura reduz a viscosidade da solução, favorecendo a obtenção de fibras de menor diâmetro (Geng; Kwon; Jang, 2005). Considerando essa influência, neste estudo foram adotados cuidados rigorosos no controle das condições ambientais durante o processo de eletrofiação, a fim de assegurar a qualidade das nanofibras obtidas.

Foram adotados dois tempos de fiação distintos (10–11 min e 20–21 min), com o objetivo de comparar a deposição de camadas mais finas e mais espessas de nanofibras sobre o SMS novo e esterilizado. Volumes e tempos maiores aumentam a densidade da camada de fibras, elevando a eficiência de retenção, porém com acréscimo da queda de pressão, o que pode comprometer o conforto respiratório (Almeida *et al.*, 2023).

Assim, o tempo de fiação representa um parâmetro estratégico para o ajuste da espessura e da densidade da camada de nanofibras, permitindo equilibrar eficiência de filtração e respirabilidade. Testes futuros deverão avaliar comparativamente qual dos dois tempos de deposição se mostra mais viável para o uso contínuo em condições reais, alinhando desempenho técnico, conforto e segurança ocupacional.

A variação nesses parâmetros é fundamental para determinar a viabilidade final do material como meio filtrante, validando o impacto do tempo de eletrofiação no desempenho geral do filtro e respirabilidade do usuário.

A utilização do SMS como substrato apresenta vantagens relevantes, uma vez que esse material é amplamente empregado em barreiras com proteção de microorganismos (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004).

Além disso, o emprego de SMS reutilizado, obtido de processos de reaproveitamento, reforça uma abordagem sustentável da pesquisa, reduzindo a geração de resíduos e ampliando o ciclo de vida útil do material. Essa abordagem está em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), especialmente no que se refere ao consumo e produção responsáveis (ODS 12) e à promoção de saúde e bem-estar (ODS 3), ao propor alternativas inovadoras e ambientalmente responsáveis para a proteção

respiratória de trabalhadores da saúde (Organização das Nações Unidas, 2025).

Uma limitação do presente estudo refere-se à ausência de testes junto aos protótipos da máscara *HeLP* específicos de eficiência de filtração, respirabilidade e saturação do filtro. Contudo, essa etapa, está prevista na sequência da pesquisa que continuará sendo conduzida pelo GeeST.

A realização desses testes permitirá não apenas confirmar o desempenho técnico do dispositivo, mas também sua aplicabilidade prática e viabilidade de uso contínuo em ambientes cirúrgicos. Assim, o desenvolvimento da máscara *HeLP* representa um avanço promissor no campo da proteção ocupacional, oferecendo uma alternativa inovadora e potencialmente eficaz a riscos biológicos e químicos presentes na fumaça cirúrgica.

5.1.7 CONCLUSÃO

Os resultados preliminares deste estudo demonstram que o filtro desenvolvido a partir da eletrofiação de nanofibras biodegradáveis de AC com surfactante catiônico *CPB* sobre substrato *SMS* apresenta potencial promissor como meio filtrante sustentável a serem incorporados à máscara *HeLP*. A técnica demonstrou viabilidade e reprodutibilidade, favorecendo a obtenção de nanofibras com características adequadas para compor um meio filtrante eficaz contra riscos biológicos e químicos.

A continuidade da pesquisa conduzida pelo GeeST, por meio de testes de eficiência de filtração e testes com trabalhadores voluntários, permitirá consolidar a eficácia do filtro para a máscara *HELP* e avançar com uma oferta inovadora para a proteção dos profissionais de saúde expostos à fumaça cirúrgica.

5.1.8 REFERÊNCIAS

ABU-ZURAYK, R; ALNAIRAT, N; KHALAF, A; IBRAHIN, A. A. I.; HALAWEH, G. Cellulose Acetate Membranes: Fouling Types and Antifouling Strategies—A Brief Review. *Processes*, v. 11, n. 2, art. 489, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr11020489>. Acesso em: 12 ago. 2025.

AL-ABDULJABBAR, A.; FAROOQ, I. Electrospun Polymer Nanofibers: Processing, Properties, and Applications. *Polymers*, Basel, v. 15, n. 1, art. 65, p. 1-22, 2022. DOI:

10.3390/polym15010065. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym15010065>. Acesso em: 1 set. 2025.

ALMEIDA, D. S.; DUARTE, E. H.; HASHIMOTO, E. M.; TURBIANE, F. R. B.; MUNIZ, E. C.; SOUZA, P. R.; MARTINS, L. D. Development and characterization of electrospun cellulose acetate nanofibers modified by cationic surfactant. *Polymer Testing*, [s. l.], v. 81, p. 106206, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106206>. Acesso em: 26 abr. 2025.

ALMEIDA, D. S.; MARTINS, L. D.; MUNIZ, E. C.; RUDKE, A. P.; SQUIZZATO, R.; BEAL, A.; SOUZA, P. R.; BONFIM, D. P. F.; AGUIAR, M. L.; GIMENES, M.L. Biodegradable CA/CPB electrospun nanofibers for efficient retention of airborne nanoparticles. *Process Safety and Environmental Protection*, [s. l.], v. 144, p. 177-185, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.07.024>. Acesso em: 26 ago. 2025.

ALMEIDA, D. S.; SCACCHETTI, F. A. P.; SANTOS, R.; AGUIAR, M. L.; BEAL, A.; RUDKE, A. P.; SANTANA, M. H. S.; LISBOA, A. M. Va.; BEZERRA, F. M.; MARTINS, L. D. Evaluation of biocidal properties of biodegradable nanofiber filters and their use in face masks. *Environmental Technology*, [s. l.], v. 44, n. 5, p. 686–694, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1982020>. Acesso em: 22 ago. 2025.

AORN. Management of surgical smoke. [s. l.]: AORN, [Internet]. 2021. Disponível em: <https://www.aorn.org/guidelines-resources/tool-kits/management-of-surgical-smoke/tool-kit>. Acesso em: 2 jun. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15052: artigos de não tecido de uso odonto-médico-hospitalar – máscaras cirúrgicas – requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, [Internet] 2004. Disponível em: ABNT Catálogo. Acesso em: 26 ago. 2025.

BAGHERI, M.; TORABIZADEH, C.; DOREH, M. A.; YASEE, A. Assessment of operating room nurses' exposure to biological hazards: development and psychometric evaluation of a scale. *BMC Nurs* 23, 878 (2024). Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12912-024-02560-1>. Acesso em: 31 ago. 2025.

BHARDWAJ, N.; KUNDU, S. C. Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique. *Biotechnology Advances*, v. 28, n. 3, p. 325–347, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.01.004>. Acesso em: 01 set. 2025.

BONAKDAR, M. A.; RODRIGUE, D. Electrospinning: Processes, Structures, and Materials. *Processes*, v. 4, n. 1, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/macromol4010004>. Acesso 01 set. 2025.

CHAKR, N.; SAV, A. The role of personal protective equipment (PPE) in reducing firefighter exposure to chemical hazards: A systematic review. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, v. 21, n. 11, p. 831–841, nov. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15459624.2024.2400237>. Acesso em: 12 ago. 2025.

ELAISSAOUI, I.; SAYEB, S.; OUNIFI, I.; FERHI, M.; HORCHANI-NAIFER, K.; ENNIGROU, D. J. Preparation and characterization of acetate cellulose electrospun nanofibers membrane: Potential application on wastewater treatment. *Heliyon*, v. 10, e32552, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32552>. Acesso 01 set. 2025.

FAUSTINO, F.; LEACHI, H. F. L.; ROCHA, A. F.; RIBEIRO, R. P. Spunbond-Meltblown-Spunbond ou Tecido-Não-Tecido para proteção respiratória de trabalhadores da saúde. *Revista SOBECC*, São Paulo, v. 29, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/Z1414-4425202429952>. Acesso em: 8 nov. 2024.

FAUSTINO, F.; LEACHleachi, H. F. L.; ROCHA, A. F.; SILVA, A. P.; SILVA, R. M.; RIBEIRO, R. P. Effectiveness of particulate matter filtration: systematic review and meta-analysis. *Rev Bras Enferm*. 2025;76(0):00-00. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0034-7167-> Acesso em: 11 jan. 2026.

FONG, H.; CHUN, I.; RENEKER, D. H. Beaded nanofibers formed during electrospinning. *Polymer*, v. 40, n. 16, p. 4585–4592, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(99\)00068-3](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(99)00068-3). Acesso em: 10 out. 2025.

FUNDACENTRO. Agentes químicos: avaliação de risco ocupacional. (manual ou documento técnico) [Internet]. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/fundacentro/pt-br/centrais-de-conteudo/cursos-e-eventos/pdfs_cursos_eventos/AgentesQuimicos.pdf.

GENG, X.; KWON, O.; JANG, J. Electrospinning of chitosan dissolved in concentrated acetic acid solution. *Biomaterials*, v. 26, n. 27, p. 5427–5432, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.01.066>. Acesso em: 01 set. 2025.

GOETZ L. A.; JALVO, B.; ROSAL R.; MATHEW A. P. Superhydrophilic anti-fouling electrospun cellulose acetate membranes coated with chitin nanocrystals for water filtration. *J Membr Sci*. 2016; 510:238–48. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2016.02.069>. Acesso em: 01 set. 2025.

GRIGG, S. E.; ZAMPIRON, A.; AKBARIDOUST, F.; CHANDRAN, D.; HOLMES, N. E.; JOHNSON, P. D. R.; MARUSIC, I.; JONES, D.; LESS, S. Are surgical masks manufactured from sterilization wrapsafe? *Infect Dis Health*. 2021;26(2):104-9. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.idh.2020.11.001>. Acesso em: 11 jun 2025.

HARDICK, O.; STEVENS, B.; BRACEWELL, D. Nanofiber fabrication in a temperature and humidity controlled environment for improved fibre consistency. *Nature Precedings*, 4524.1, [Internet]. 2010. Disponível em: <https://rdcu.be/eDrqk>. Acesso em: 12 ago. 2025.

HELMENSTINE, A. M. How to Mix Acid and Water Safely. ThoughtCo, atualizado em 9 jun. 2025. Disponível em: Como misturar ácido e água com segurança. Disponível em: <https://www.thoughtco.com/do-you-add-acid-to-water-608152>. Acesso em: 12 ago. 2025.

KEIROUZ, A.; WANG, Z.; REDDY, V. S.; NAGY, Z. K.; VASS, P.; BUZGO, M.; RAMAKRISHNA, S.; RADACSI, N. The History of Electrospinning: Past, Present, and Future Developments. *Advanced Materials Technologies*, v. 8, n. 11, p. 1–34, 2023.

LEACHI, H. F. L.; RIBEIRO, R. P. HeLP: Development of occupational protection mask against surgical smoke. *Rev Bras Enferm*, Brasília, v. 76, supl. 4, e20220647, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0034-7167-2022-0647>. Acesso em: 8 jun. 2024.

LI, C.; CHOU, Y.; PAI, J.; CHEN, C.; et al. Investigating surgical smoke in otolaryngology operating rooms. *Scientific Reports*, v. 12, art. 1719, fev. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05701-1>. Acesso em: 01 set. 2025.

LIMCHANTRA, I. V.; FONG, Y.; MELSTROM, K A. Surgical Smoke Exposure in Operating Room Personnel: A review. *JAMA Surg*, v. 154, n. 10, p. 960–967, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1001/jamasurg.2019.2515>. Acesso em: 8 jun. 2024.

MEDEIROS, G. B.; LIMA, F. A.; ALMEIDA, D. S.; GUERRA, V. G.; AGUIAR, M. L. Modification and Functionalization of Fibers Formed by Electrospinning: A Review. *Membranes*, v. 12, n. 9, p. 861, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/membranes12090861>. Acesso em: 6 out. 2025.

MERETSKY, C. R.; MAHMOODI, A.; KNECHT, Erik M. K.; POPOVICH, J.; SCHIUMA, A. T. The impact of electrocautery smoke on surgical staff and the efficacy of normal surgical masks versus N95 masks. *Cureus*, v. 16, n. 4, e58106, 12 abr. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.7759/cureus.58106>. Acesso em: 12 ago. 2025.

National Institute Of Occupational Safety and Health (NIOSH). Control of Smoke from Laser/Electric Surgical Procedures. CDC, NIOSH Pub [internet]. 1996; 96–128. Disponível em: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/hazardcontrol/hc11.html>. Acesso em: 12 ago. 2025.

National Library of Medicine (US), National Center for Biotechnology Information. PubChem Compound Summary for CID 8816, Cetylpyridinium bromide [Internet]. 2004. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Cetylpyridinium-Bromide>. Acesso em: 27 ago. 2025.

Organização Mundial da Saúde (OMS), Organização Internacional do Trabalho (OIT). Total WHO/ILO Joint Estimates of the Work-related Burden of Disease and Injury, 2000–2016 [Internet]. 2024 Disponível em: <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/total-who-ilo-joint-estimates-of-the-work-related-burden-of-disease-and-injury--2000-2016/>. Acesso em: 10 ago. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. 2023. Disponível em: <https://sdgs.un.org/goals>. Acesso em: 12 ago. 2025.

PHAM, Q. P.; SHARMA, U.; MIKOS, A. G. Electrospinning of Polymeric Nanofibers for Tissue Engineering Applications: A Review. *Tissue Engineering*, 12(5):1197-211, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1089/ten.2006.12.1197>. Acesso em: 01 set. 2025.

ROZENFELD, Henrique. *Gestão de desenvolvimento de produtos: uma referência para a melhoria do processo*. São Paulo: Saraiva, 2006.

SALBEGO, C.; NIETSCH, E. A.; GRECO, P. B. T.; GIRARDON-PERLINI, N. M. O.; COGO, S.B.; RAMOS, T. K.; ANTUNES, A. P. Elaboração e validade do instrumento para avaliação de modelos metodológicos voltados ao desenvolvimento de tecnologias. *Revista Brasileira de Enfermagem*, Brasília, v. 76, supl. 4, e20230046, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0034-7167-2023-0046pt>. Acesso em: 4 ago. 2025.

SCHMITT, J.; WANG, J. A critical review on the role of leakages in the facemask protection against SARS-CoV-2 infection with consideration of vaccination and virus variants. *Indoor Air*. 32 (10): e13127, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ina.13127>. Acesso em: 01 set. 2025.

SHOU, D.; YE, L.; FAN, J. Gas transport properties of electrospun polymer nanofibers. *Polymer*, v. 55, n. 14, p. 3149–3155, 2014.

SZCZEPANSKA, A.; HARRISON, J.; SACCENTE-KENNEDY, B.; ARCHER, J.; WATSON, N. A.; ORTON, C. M.; BROWNE, W. J.; EPSTEIN, R.; CALDER, J. D.; SHAH, P. L.; COSTELLO, D.; BZDEK, B. R.; REID, J. P. The filtration efficiency of surgical masks for expiratory aerosol and droplets generated by vocal exercises. *Aerosol Science and Technology*, v. 58, n. 1, p. 39–53, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02786826.2023.2267689>. Acesso em: 01 set. 2025.

TARUS, B.; FADEL, N.; AL-OUFY, A.; EL-MESSIRY, M. Effect of polymer concentration on the morphology and mechanical characteristics of electrospun cellulose acetate and poly (vinyl chloride) nanofiber mats. *Alexandria Engineering Journal*, v. 55, n. 3, p. 2975–2984, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2016.04.025>. Acesso em: 21 ago. 2025.

TÉTREULT, J.; BÉGIN, P. *Silica gel: passive control of relative humidity*. Ottawa: Canadian Conservation Institute, Technical Bulletin No. 33, [Internet]. 2018. Disponível em: <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/conservation-preservation-publications/technical-bulletins/silica-gel-relative-humidity.html> . Acesso em: 11 ago. 2025

ULMER, B. C. The hazards of surgical smoke. *AORN Journal*, v. 87, n. 4, p. 721–734, fev. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aorn.2007.10.012>. Acesso em: 11 jun. 2025.

ZHENG, J.; ZHUANG, M.; YU, Z.; ZHENG, G.; ZHAO, Y.; WANG, H.; SUN, D. The effect of surfactants on the diameter and morphology of electrospun ultrafine nanofiber. *Journal of Nanomaterials*, v. 2014, n. 1, p 1-9, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2014/689298>. Acesso em: 21 ago. 2025.

ZHOU, Y.; WANG, C.; ZHOU, M.; LI., CHEN, D.; LIAN, A.; MA, Y. Surgical smoke: a hidden killer in the operating room. *Asian Journal of Surgery*, v. 46, p. 3447-3454, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.asjsur.2023.03.066>. Acesso em: 28 nov. 2024.

ZHOU, Y; LIU, Y.; ZHANG, M.; FENG, Z.; YU, D.; WANG, K. Electrospun Nanofiber Membranes for Air Filtration: A Review. *Nanomaterials*, v. 12, n. 7, art. 1077, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nano12071077>. Acesso em: 01 set. 2025.

5.2 ESTUDO 2

Filtro SOStentável de nanofibras em *Spunbond-Meltblown-Spunbond* para a máscara *HeLP*: Microscopia Eletrônica de Varredura

5.2.2 RESUMO

Objetivo: Analisar a retenção de poluentes químicos e biológicos presentes na fumaça cirúrgica no filtro SOStentável por meio de Microscopia de Varredura Eletrônica. **Método:** Estudo analítico, realizado no período de abril a maio do ano de 2025. O material analisado foi o filtro SOStentável desenvolvido com o substrato *Spunbond-Meltblown-Spunbond* novo e o esterilizado, eletrofiados com solução de acetato de celulose e brometo de cetilpiridínio e como solventes o ácido acético e água ultrapura. Foi realizada a medição das nanofibras resultantes da fiação sobre o *Spunbond-Meltblown-Spunbond* novo e esterilizado por meio do uso de Microscopia Eletrônica de Varredura. **Resultados:** Os ensaios iniciais demonstraram viabilidade na associação do *Spunbond-Meltblown-Spunbond* novo e esterilizado às nanofibras produzidas pela técnica de eletrofiação. As imagens obtidas evidenciaram que a deposição de nanofibras não compromete a estrutura microfísica, mantém integridade morfológica, boa cobertura das fibras eletrofiadas e baixa formação de pérolas, indicando estabilidade do processo de eletrofiação, sem prejuízo à estrutura do material. Não foram observadas diferenças na morfologia entre os substratos de *Spunbond-Meltblown-Spunbond* novo e o esterilizado, sugerindo a viabilidade do reaproveitamento do material para uso de barreiras filtrantes. Na análise morfométrica em 300 fibras presentes nos substratos fiados revelou que o *Spunbond-Meltblown-Spunbond* novo apresentou diâmetro médio de $0,084 \pm 0,096 \mu\text{m}$, enquanto o *Spunbond-Meltblown-Spunbond* esterilizado apresentou $0,046 \pm 0,042 \mu\text{m}$. **Conclusão:** Os resultados demonstraram que o filtro desenvolvido no substrato *Spunbond-Meltblown-Spunbond* novo e esterilizado apresenta potencial promissor como meio filtrante sustentável para utilização na máscara *HeLP* viabilizando a reutilização do *Spunbond-Meltblown-Spunbond* para a retenção dos poluentes químicos presentes em ambientes laborais de saúde.

Descritores: Riscos químicos; Saúde dos trabalhadores; Centro Cirúrgico; Nanofibras; Filtros de Ar; Desenvolvimento sustentável.

ABSTRACT

Objective: To analyze, using Scanning Electron Microscopy, the new Spunbond-Meltblown-Spunbond filter material and sterilized Spunbond-Meltblown-Spunbond based on cellulose acetate and cationic surfactant for the retention of chemical and biological pollutants present in healthcare workplaces. **Method:** This is a descriptive, analytical study conducted using a Scanning Electron Microscopy from April to May 2025. The analyzed material was new and sterilized Spunbond-Meltblown-Spunbond, electrospun with a cellulose acetate and cetylpyridinium bromide solution and acetic acid and ultrapure water as solvents. Measurements of the nanofibers resulting from spinning on new and sterilized Spunbond-Meltblown-Spunbond were also performed. **Results:** Initial tests demonstrated the feasibility of combining new and sterilized Spunbond-Meltblown-Spunbond with nanofibers produced by the electrospinning technique. Images obtained by Scanning Electron Microscopy showed that the deposition of nanofibers does not compromise the microphysical structure of the sample, maintaining its morphological integrity, with good coverage of the electrospun fibers on the substrate surface, with low pearl formation, indicating jet stability during the electrospinning process. No differences in morphology were observed between the new and sterilized Spunbond-Meltblown-Spunbond substrates, suggesting the feasibility of reusing the material for use as filter barriers. Morphometric analysis of 300 fibers present in the spun substrates revealed that new Spunbond-Meltblown-Spunbond had an average diameter of $0.084 \pm 0.096 \mu\text{m}$, while sterilized SMS had $0.046 \pm 0.042 \mu\text{m}$, indicating a reduction in fiber diameter after sterilization. **Conclusion:** Preliminary results demonstrate that the filter developed from the electrospinning of biodegradable cellulose acetate nanofibers with cationic surfactant on new or sterilized Spunbond-Meltblown-Spunbond substrate has promising potential as a sustainable filter medium for use in the HeLP mask, enabling the reuse of Spunbond-Meltblown-Spunbond without damaging the material's structure. The size of the fibers resulting from electrospinning suggests adequate sizes for the retention of chemical pollutants present in healthcare workplaces.

Descriptors: Chemical Risks; Health, Occupational; Surgicenters; Nanofibers; Air Filters; Sustainable Development.

5.2.3 INTRODUÇÃO

Os riscos químicos estão presentes nos ambientes de trabalho, sendo inevitáveis em determinados contextos laborais (Fundacentro, 2024), sendo classificado como riscos decorrentes da presença, manuseio ou exposição a substâncias químicas que podem causar danos à saúde dos trabalhadores (Fundacentro, 2023). Esses agentes podem estar no ambiente de trabalho sob diferentes formas físicas, como: compostos ou produtos que possam penetrar no organismo do trabalhador pela via respiratória, nas formas de poeiras, fumos, gases, neblinas, névoas ou vapores (Fundacentro, 2023).

Na área de saúde, especialmente no Centro Cirúrgico (CC), os trabalhadores enfrentam diariamente os riscos químicos inerentes às atividades desenvolvidas. Entre eles tem-se a inalação de Material Particulado (MP) presente na fumaça gerada pela eletrocirurgia (Leachi; Ribeiro, 2023). Os fumos correspondem a partículas sólidas formadas pela condensação ou oxidação de vapores, representando um importante agente químico ocupacional (Fundacentro, 2023).

O eletrocautério é um aparelho utilizado em procedimentos cirúrgicos e tem como principais funções a coagulação e a dissecação dos tecidos, acelerando o tempo do procedimento cirúrgico com diminuição de sangramento, porém, o seu uso produz a chamada fumaça cirúrgica (Casey; Mcnamara, 2023) que é formada quando o equipamento em contato com a pele humana, causa a explosão da membrana celular do tecido, devido à alta temperatura (Koninckx *et al.*, 2024).

Essa explosão da membrana celular tem como consequência a liberação de fumaça cirúrgica no ambiente de trabalho, composta por 95% de água ou vapor e 5% de detritos celulares na forma de MP. Esses detritos são subprodutos biológicos que se misturam a compostos químicos usados em cirurgias, tornando-se tóxicos aos trabalhadores de saúde expostos a esse risco ocupacional durante todo o seu tempo laboral (Ulmer, 2008; Zhou *et al.*, 2023).

Este poluente químico está entre os mais prejudiciais à vida e à saúde humana, sendo composto por mistura de pequenas partículas e gotículas suspensas no ar de tamanho microscópico, devido à sua ampla variedade de constituintes e à facilidade com que são inalados (Filho, 2025).

Esses constituintes microscópios consistem em uma mistura complexa de partículas sólidas ou líquidas, incluindo partículas inertes, células ativas, patógenos como vírus, bactérias e fungos, além de substâncias orgânicas e compostos químicos diversos (Zhou *et al.*, 2023; Medeiros *et al.*, 2022).

E ainda destacam-se os sulfatos, nitratos, amônia, cloreto de sódio e o carbono negro (*black carbon*), além de gases tóxicos e compostos orgânicos voláteis, como o monóxido de carbono, tolueno, xileno, etilbenzeno, acetato de butila, acrilonitrila, 1,2-dicloroetano, fenol, cloro, cianeto e cianeto de hidrogênio, Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPA) como naftaleno, e resíduos de fármacos utilizados em procedimentos hospitalares, a exemplo do sevoflurano, um anestésico amplamente empregado em CC (Zhou *et al.*, 2023; Medeiros *et al.*, 2022).

Uma das medidas eficazes para a segurança dos trabalhadores expostos à fumaça cirúrgica é o uso do Equipamento de Proteção Respiratória (EPR) que tem como objetivo proteger os trabalhadores da inalação de substâncias perigosas e evitar a exposição a ambientes com deficiência de oxigênio (Fundacentro, 2016).

A máscara cirúrgica é o Equipamento de Proteção Individual (EPI) mais comumente utilizado em ambientes cirúrgicos e outros ambientes hospitalares, porém ela não fornece proteção contra partículas transportadas pelo ar (aerossóis) de forma eficiente, assim como não impedem a inalação dos gases tóxicos e componentes químicos (Zhou *et al.*, 2023).

Entre as recomendações internacionais para a proteção dos trabalhadores está o uso do EPI, ventilação local e exaustão no CC, bem como a aspiração da fumaça cirúrgica no local da sua produção. Os EPI recomendados na exposição da fumaça cirúrgica são: máscaras do tipo N95 e óculos de proteção (*National Institute of Occupational Safety and Health*, 1996; *National Institute for Occupational Safety and Health*, 2018). Embora a máscara N95 seja considerada de alta filtração, ela não protege contra os riscos químicos (Limchantra *et al.*, 2019; *Association of periOperative Registered Nurses*, 1996).

Diante dos riscos químicos respiratórios presentes em ambientes hospitalares, foi desenvolvido a *HeLP*, uma máscara ergonômica e sustentável para proteção respiratória de trabalhadores da saúde (Leachi; Ribeiro, 2023).

No entanto, após o desenvolvimento da *HeLP* (Leachi; Ribeiro, 2023), para garantir proteção ocupacional respiratória para os trabalhadores da saúde foi necessário o desenvolvimento de um filtro para promoção da adsorção e filtração de componentes químicos e biológicos com o substrato *Spunbond-Meltblown-Spunbond* (SMS), para ser utilizado na máscara *HeLP*, o filtro chamado SOSstentável.

O filtro SOSstentável é assim chamado pois para a deposição das nanofibras foi utilizado o substrato *SMS* esterilizado, que é uma não-tecido utilizado em centros de materiais e esterilização como embalagem de proteção para materiais esterilizados utilizados na assistência aos pacientes, e portanto, reutilizado apresenta consonância com os Objetivos para Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 da OMS (Organização das Nações Unidas, 2023).

Portanto com esse estudo, pretende-se responder a seguinte pergunta de pesquisa: O filtro SOSstável é capaz de reter poluentes químicos e biológicos presentes na fumaça cirúrgica?

Para responder a essa pergunta, apresenta-se o seguinte objetivo: Analisar a retenção de poluentes químicos e biológicos presentes na fumaça cirúrgica no filtro SOSstável por meio de Microscopia de Varredura Eletrônica.

5.2.4 MATERIAL E MÉTODO

Trata se de um estudo analítico e descritivo. A pesquisa analítica avalia associações com fins de julgamento sobre as relações de causa e efeito. O intuito é explorar em profundidade a relação entre a exposição a um fator antecedente e a ocorrência (ou não) de um efeito (Polit; Beck, 2011; Pereira, 2000). As pesquisas descritivas objetivam detalhar as características de uma determinada população ou fenômeno (Gil, 2010). Assim, no estudo analítico-descritivo, busca-se descrever as relações entre as variáveis presentes no estudo (Polit; Beck, 2011).

Os experimentos foram realizados no período de abril a maio do ano de 2025 no Laboratório Multiusuário da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, campus Londrina com a participação de três professoras doutoras e mestranda e doutoranda do Grupo de Estudos em Gestão do Cuidado, Editoração Científica e Saúde do Trabalhador (GeeST) da Universidade Estadual de Londrina (UEL) e dois professores e técnicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

O material utilizado como substrato foi o *SMS* fornecido por um hospital no norte do Paraná, tanto em sua versão nova quanto na versão esterilizada, utilizada como embalagem para esterilizar material de uso na assistência a pacientes internados na instituição.

Para fins de comparação das eletrofiações da nanofibra no substrato, foi necessário o uso de *SMS* novo e estéril, para possíveis avaliações de mudanças estruturais, além da pega da eletrofiação no substrato.

Sobre o substrato utilizado na fiação, foi aplicada uma camada de nanofibras por meio da técnica de eletrofiação no *SMS* novo e no esterilizado. No processo de eletrofiação, a solução é acondicionada numa seringa, acoplada a uma bomba de infusão, com a finalidade de liberar o volume da solução de forma

controlável. Sob a ação de um campo eletrostático elevado na superfície da gota na ponta da seringa, a mesma se alonga e torna-se cônica num formato conhecido como cone de Taylor. Quando o campo elétrico atinge um valor crítico em que a força repulsiva elétrica excede a força de tensão superficial da gota, ocorre a ejeção de um jato carregado de solução em direção ao coletor, iniciando a formação de nanofibras (Doshi; Reneker, 1995).

A solução polimérica foi preparada utilizando solução de Acetato de Celulose (AC) a 21% (m/v) e Brometo de Cetilpiridínio (CPB) a 0,5% (m/v) (Almeida, 2021). Utilizou-se como solventes o ácido acético e água ultrapura na proporção de 75:25).

O processo de eletrofiação no SMS novo e esterilizado foi conduzido sob condições controladas de tensão, distância de coleta e vazão, com o objetivo de garantir a formação uniforme de nanofibras sobre o substrato (Gadakh, 2024). A distância entre a agulha e o coletor foi fixada em 10 cm; a velocidade de rotação do coletor foi mantida entre 60 e 70 RPM e a fonte de alta tensão ajustada para 18 kV, garantindo estabilidade no jato e uniformidade na deposição das fibras e o fluxo de infusão foi fixado em 0,7 mL/h (Almeida *et al.* 2020).

Nas condições mencionadas, foram produzidas as amostras de meio filtrantes pela cobertura de nanofibras sobre o substrato de SMS durante o tempo de 10 a 11 minutos e 20 a 21 minutos. Para este processo, foi utilizado um conjunto de equipamentos próprios para eletrofiação, desenvolvidos pela empresa H Sensor. Após retirados do coletor, os filtros preparados foram acondicionados por 48 horas em um dissecador contendo sílica, com o objetivo de remover vestígios dos solventes (Almeida *et al.*, 2020).

O filtro desenvolvido possui a ação biocida, pois em estudo anterior, essa tecnologia já foi desenvolvida durante a fiação, pois na produção de nanofibras poliméricas por meio da técnica de eletrofiação, é possível utilizar aditivos, com o objetivo de atribuir aprimoramento as características de adsorção da fibra. (Almeida *et al.*, 2020).

Para a caracterização microestrutural das amostras, foi realizada a técnica de MEV em microscópio Tescan (modelo Vega). Para a análise dos substratos SMS, as amostras foram recortadas no tamanho de no máximo 9 mm², abrangendo duas condições: SMS novo e o SMS esterilizado, ou seja, após ter passado pelo processo de esterilização.

A MEV é um instrumento analítico, altamente versátil e amplamente empregado na caracterização microestrutural de materiais sólidos. Apesar da complexidade dos mecanismos para a formação da imagem, os resultados obtidos são de fácil análise e interpretação (Askeland, 2008). A elevada profundidade de foco (imagem com aparência tridimensional) e a possibilidade de combinar a análise microestrutural com a microanálise química são fatores que em muito, contribuem para o amplo uso desta técnica (Askeland; Phule, 2008).

As amostras foram identificadas, após foram fixadas em *stubs* de alumínio utilizando fita condutiva de carbono sendo submetidas a um recobrimento por 5 minutos de carbono. Esse procedimento melhorara a condutividade superficial minimizando distorções e garantindo estabilidade durante a análise e assegurando imagens de alta qualidade em MEV (Moura; Ramos; Santos, 2021). A Figura 4 apresenta o acondicionamento das amostras no Microscópio de Varredura para a MEV para posterior análise.

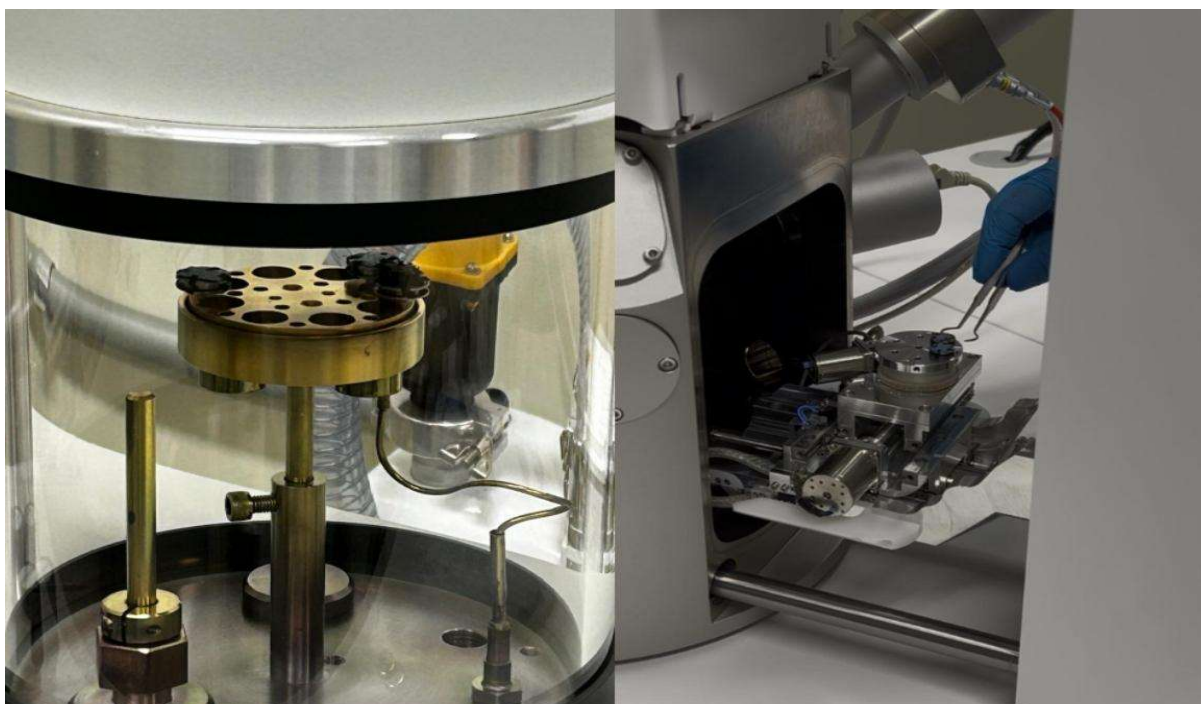
Dessa forma foi possível realizar a análise da distribuição das fibras e o tamanho das nanofibras presentes nos materiais selecionados confeccionados de SMS, para esta análise por MEV.

Para determinação dos diâmetros presentes entre as nanofibras fiadas nos substratos de SMS novo e SMS esterilizado, foram realizadas micrografias em diferentes aproximações nas amostras produzidas nos dois diferentes tempos de fiação (10 a 11 minutos e 20 a 21 minutos). O SMS novo foi fiado no tempo entre 20 a 21 minutos e o SMS esterilizado entre 10 a 11 minutos. A adoção dos tempos distintos de eletrofiação fundamenta-se em evidências de que o tempo de deposição influencia diretamente a espessura e densidade das fibras (Almeida *et al.* 2020). Além disso, a literatura aponta que as características do substrato, incluindo sua estrutura, porosidade e condição prévia de processamento, exercem influência sobre a morfologia, distribuição e ancoragem das nanofibras eletrofiadas (Medeiros et al., 2022).

A análise estatística dos diâmetros das nanofibras foi realizada com auxílio de um modelo de Linguagem de Grande Porte (LLM – do inglês *Large Language Model*), especificamente o ChatGPT (OpenAI, versão GPT-4o), versão paga, com auxílio de uma das pesquisadoras, com *expertise* em Inteligência Artificial para a formulação do *Prompt*.

Modelos de linguagem de grande porte têm sido investigados como ferramentas auxiliares para análises estatísticas descritivas e inferenciais, incluindo cálculo de média, desvio-padrão e valores de p , apresentando desempenho satisfatório quando utilizados de forma supervisionada e com delineamento metodológico bem definido (Ruta *et al.*, 2025; Ordak, 2023).

Figura 1 – Preparo de material para o recobrimento com carbono e análise de Microscopia Eletrônica de Varredura. Paraná. Brasil, 2025.



Fonte: Autoria própria.

As micrografias obtidas por MEV foram submetidas ao modelo por meio de um *prompt* detalhado, no qual foi solicitado o cálculo do diâmetro médio e do desvio padrão a partir de 300 medidas de fibras para cada condição experimental (SMS novo e SMS esterilizado).

O *LLM* foi empregado como ferramenta computacional de suporte para mensuração e tratamento dos dados, mantendo-se inalterados os procedimentos de aquisição das imagens e o delineamento experimental. A análise foi realizada pelo modelo com linguagem *Python*, utilizando as bibliotecas *OpenCV*, *SciPy*, *scikit-image* e *NumPy*, que permitem o processamento de imagens de MEV e a extração automática de medidas morfométricas das fibras.

5.2.5 RESULTADOS

A fiação da nanofibra e a análise de MEV foi realizada em uma amostra de SMS novo e uma amostra de SMS esterilizado. Os experimentos demonstraram viabilidade na associação do SMS às nanofibras produzidas pela técnica de eletrofiação. As imagens obtidas pela técnica de MEV evidenciaram que a deposição de nanofibras não compromete a estrutura microfísica das amostras, mantendo sua integridade morfológica.

A análise da MEV revelou também uma boa cobertura das fibras eletrofiadas sobre a superfície dos substratos de SMS novo e SMS esterilizado, com baixa formação de pérolas, o que indica estabilidade do jato durante o processo de eletrofiação (Pham; Sharma; Mikos, 2006). Além disso, não foram observadas diferenças na morfologia entre os substratos de SMS novo e o SMS esterilizado sugerindo a viabilidade do reaproveitamento do material para uso de barreiras filtrantes (Jung; Kim, 2020).

As Figuras 2 e 3 apresentam as eletromicrografias, onde é possível observar a estrutura entrelaçada com distribuição aleatória das nanofibras por meio de MEV nas amostras analisadas de SMS novo e do SMS esterilizado. As análises foram realizadas com ampliações progressiva de 1.000 a 3.000 x, 10.000 x e 15.000x.

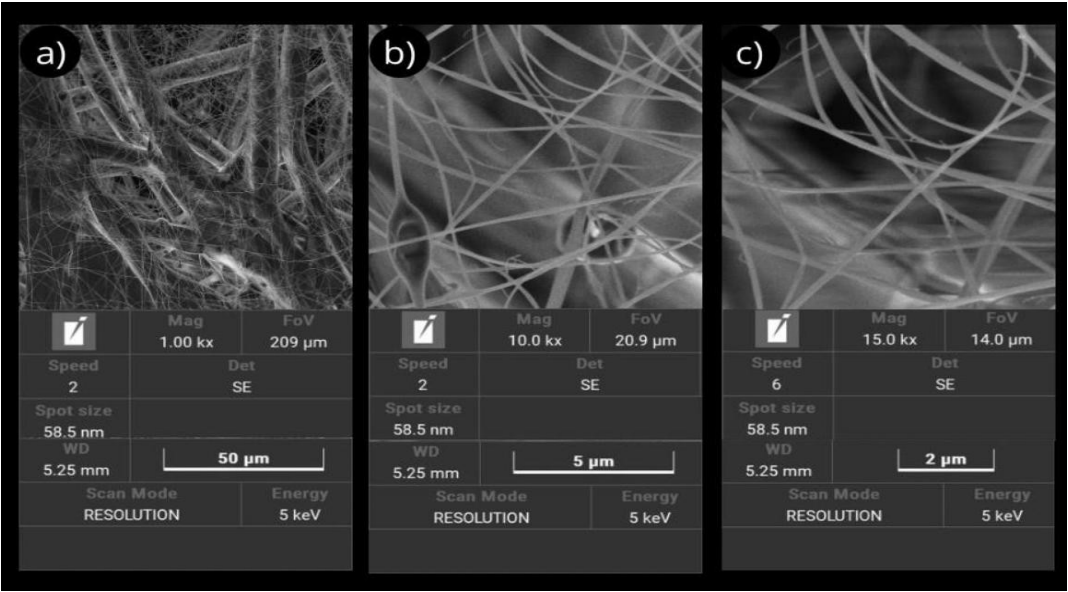
A análise morfométrica realizada em 300 fibras presentes nos substratos fiados evidenciou diferenças significativas entre o SMS novo e o SMS esterilizado. No SMS novo, a média do diâmetro das fibras foi de aproximadamente $0,084 \mu m$, com desvio padrão de $0,096 \mu m$ e no SMS esterilizado, observou-se um diâmetro médio em torno de $0,046 \mu m$, com desvio padrão de $0,042 \mu m$.

Os resultados obtidos neste estudo indicam que a associação do substrato SMS, em ambas as abordagens testadas (novo e esterilizado), com nanofibras produzidas por eletrofiação é tecnicamente viável, sem comprometer a estrutura microfísica do material. A cobertura uniforme das nanofibras e a baixa incidência de *beads*/pérolas observadas nas imagens de MEV demonstram que os parâmetros adotados no processo foram adequados, favorecendo a estabilidade do jato eletrofiado e a adesão eficiente das fibras ao substrato.

A Figura 4 mostra a faixa de diâmetros médios por tipo de substrato. A análise dos histogramas de diâmetro obtidos por MEV evidenciou diferenças entre os substratos de SMS novo e SMS esterilizado após o processo de eletrofiação com AC e CPB. As fibras depositadas sobre o SMS novo apresentaram maior dispersão

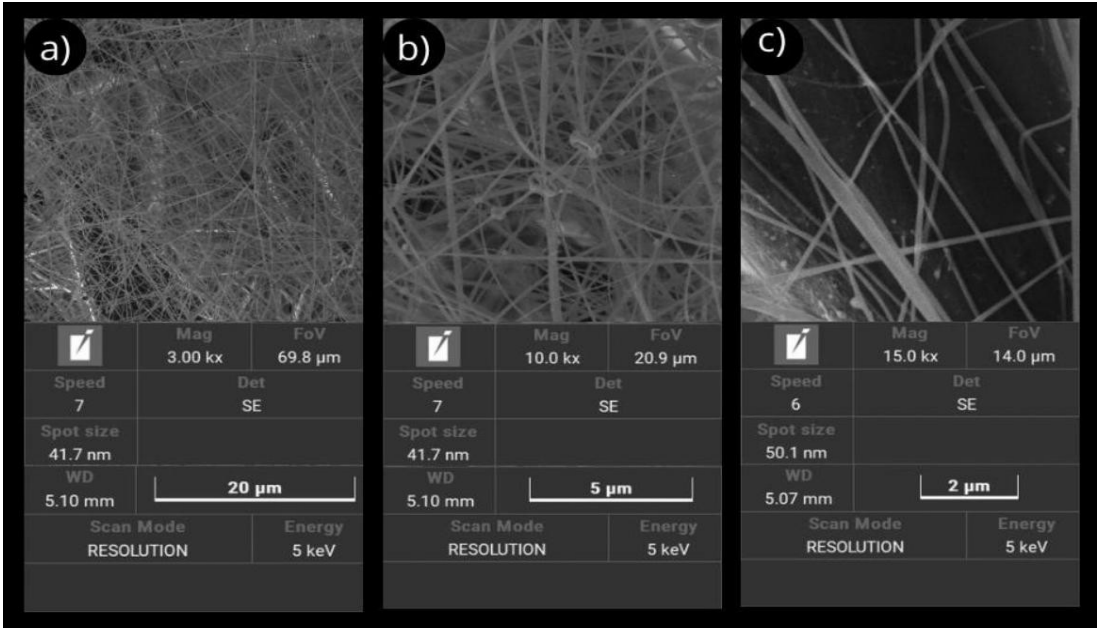
de valores, com diâmetros variando de abaixo de $0,10\ \mu\text{m}$ até superiores a $0,25\ \mu\text{m}$, indicando heterogeneidade na formação da malha. Já as fibras obtidas sobre o SMS usado mostraram distribuição mais estreita e simétrica, concentrada predominantemente em diâmetros inferiores a $0,10\ \mu\text{m}$, caracterizando maior uniformidade no processo de deposição.

Figura 2 – Microscopia Eletrônica de Varredura do substrato *Spunbond- Meltblown-Spunbond* novo. Brasil, 2025.



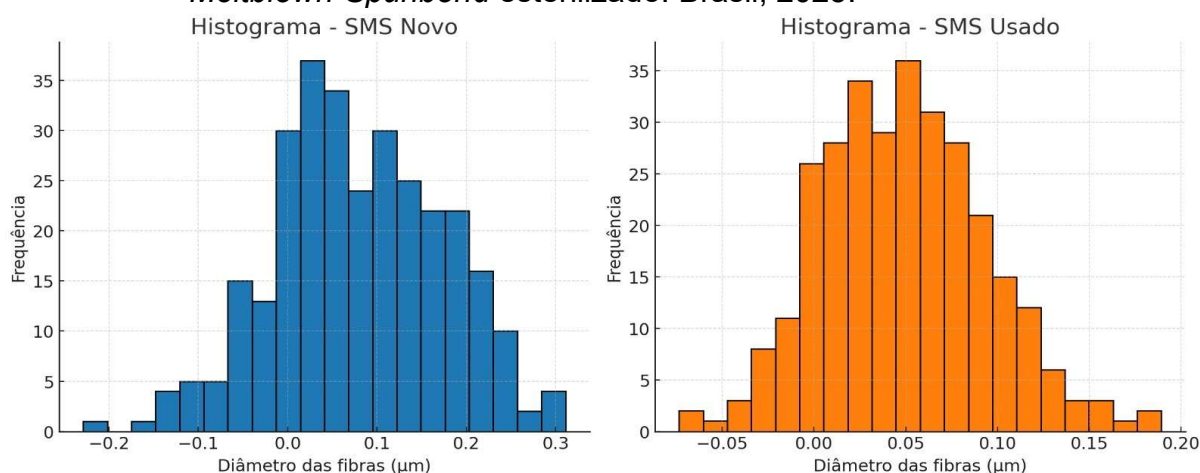
Fonte: Autoria própria.

Figura 3 – Microscopia Eletrônica de Varredura do substrato *Spunbond- Meltblown-Spunbond* esterilizado. Brasil, 2025.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4 – Histograma da distribuição dos diâmetros das nanofibras produzidas sobre substrato de *Spunbond- Meltblown-Spunbond* novo e *Spunbond- Meltblown-Spunbond* esterilizado. Brasil, 2025.



Fonte: ChatGPT 4.0

5.2.6 DISCUSSÃO

Os resultados da MEV evidenciaram cobertura uniforme das nanofibras e a baixa incidência de *beads*/pérolas no substrato SMS. As *beads*/pérolas são estruturas esféricas ou alongadas que se formam ao longo das nanofibras durante a eletrofiação, geralmente associadas a baixa viscosidade da solução, alta condutividade elétrica ou desequilíbrios no campo elétrico. Tais estruturas, com morfologia semelhante a contas, podem interferir nas propriedades finais do material, como porosidade e capacidade de adsorção (Fong, 1999; Mercante *et al.*, 2023).

A formação de *beads*/pérolas pode ocorrer devido a concentração do polímero na solução, o tipo de solvente utilizado e a tensão superficial da solução (Fong; Chun; Reneker, 1999).

A ocorrência de *beads*/pérolas em nanofibras eletrofiadas, quando excessiva, tende a fragilizar a rede fibrosa e comprometer a integridade estrutural (Tarus *et al.*, 2016). Contudo, em proporções limitadas, esses pontos de imperfeição podem contribuir para o aumento da rugosidade superficial, favorecendo características como hidrofobicidade do material (Tarus *et al.*, 2016).

A eletrofiação é uma técnica promissora para a funcionalização de materiais têxteis com vistas à filtração de partículas ultrafinas, destacando-a como uma técnica eficaz na produção de nanofibras com aplicações em filtração de

partículas ultrafinas, devido à elevada área superficial e à porosidade ajustável das membranas (Mercante *et al.*, 2023).

O SMS como substrato para a eletrofiação é composto por três camadas de fibras sendo que a camada central é a principal responsável pela filtração. A primeira e a terceira camadas, denominadas *Spunbond*, são formadas por fibras curtas depositadas sobre uma superfície aquecida. Já a camada intermediária, a *Meltblown*, é composta por fibras fundidas, extrusadas por bicos finos, que formam uma estrutura mais densa e eficiente para retenção de partículas (Grigg *et al.*, 2021). Ao esterilizar o SMS, essas fibras formam uma matriz que evita a penetração de microrganismos na camada interna do envoltório de esterilização, protegendo o material esterilizado envolto pelo SMS, contra contaminação (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004).

O SMS pode apresentar variação no tamanho das fibras e poros, que podem variar entre 1 e 5 μm (Faustino *et al.*, 2024). Os fungos, bactérias e vírus são patógenos encontrados no ambiente de cuidado à saúde com as dimensões celulares: Os fungos são maiores que as bactérias (medem de 1 a 5 μm) que, por sua vez, são maiores que os vírus (medem 0,02 e 0,25 μm) e podem ser transportados por gotículas respiratórias expelidas por tosse ou espirro e pela fumaça cirúrgica (Karim, 2020). De acordo com essas dimensões o SMS funciona como barreira contra riscos biológicos (Faustino *et al.*, 2024).

Os compostos químicos presentes na fumaça cirúrgica apresentam MP com diâmetro variando entre 0,01 e 6 μm , o que possibilita que parte dessas partículas ultrapassem as barreiras da máscara N95 (*National Institute for Occupational Safety and Health*, 2021). Além disso, outro estudo identificou a presença de partículas químicas com diâmetro entre 0,007 e 0,42 μm , o que representa um importante risco ocupacional para os trabalhadores expostos à fumaça cirúrgica (Limchantra *et al.*, 2019).

Os poluentes particulados podem ser classificados conforme o diâmetro aerodinâmico em MP10 ($\leq 10 \mu m$, particulado grosso) essas chegam na parte superior do sistema respiratório (Limchantra *et al.*, 2019), partículas menores que 2,5 μm são depositadas nos bronquíolos e alvéolos (Zhou *et al.*, 2023), partículas com diâmetro inferior a 1 μm são conhecidas como partículas ultrafinas ou nanopartículas e possuem a capacidade de alcançar as regiões mais distantes da árvore brônquica dos pulmões podendo atingir a circulação sistêmica, quando inalados (Filho, 2023).

Assim, os trabalhadores expostos a esse tipo de MP, estão sujeitos ao desenvolvimento de doenças arteriais coronarianas, insuficiência cardíaca, asma e doença pulmonar obstrutiva crônica e câncer (Limchantra *et al.*, 2019).

Além disso, a inalação de MP presente na fumaça cirúrgica, pode causar sinais e sintomas como: tosse, ardência de faringe, espirros, rinite, lesão de nasofaringe, sensação de corpo estranho na garganta, congestão nasal, inflamação das vias aéreas, lacrimejamento dos olhos, náuseas, vômitos, dor abdominal, fraqueza, cãibra, dermatite, cefaleia, sonolência, tonturas, irritabilidade e ainda, desconforto devido mau cheiro presente na roupa utilizada durante a exposição, bem como nos cabelos dos expostos, causando efeitos adversos nos sistemas circulatório, respiratório e pulmonar (Bieniek *et al.*, 2022).

Para a proteção dos trabalhadores expostos a riscos químicos, a máscara N95/PFF2 é a indicada pois é considerada de alta filtração para partículas maiores que $0,3 \mu m$ (National Institute for Occupational Safety and Health, 1996) porém, os tamanhos das partículas encontradas na fumaça cirúrgica são menores e medem em média de $0,007$ à $0,42 \mu m$ configurando um risco ocupacional (Limchantra *et al.*, 2019; AORN, 2021).

Diante desse cenário as evidências indicam que partículas dessa magnitude podem atravessar os filtros das máscaras N95/PFF2 (Limchantra *et al.*, 2019; Association of periOperative Registered Nurses, 2021) e as máscaras cirúrgicas, a qual são as mais utilizadas por trabalhadores do CC também não garantem proteção adequada contra os riscos químicos presentes na fumaça cirúrgica (Karim, 2020).

Neste contexto foram realizados filtros com substrato de SMS novo e SMS esterilizado, foram desenvolvidos filtros com a solução polimérica utilizada em estudo de referência, composto por 21% de AC e 0,5% de cloreto de CPB (Almeida *et al.*, 2021). A formulação foi processada por eletrofiação sob condições previamente otimizadas: vazão de $0,7 \text{ mL/h}$, voltagem de 18 kV e distância de 10 cm entre a agulha e o coletor.

As nanofibras foram depositadas diretamente sobre substrato de não-tecido (TNT) com gramatura de 60 g/m^2 , utilizando volumes de solução de $0,13 \text{ mL}$ e $0,15 \text{ mL}$, o que resultou em camadas delgadas e homogêneas, mantendo a respirabilidade do material. Assim como no estudo de referência, a aplicação desses parâmetros permitiu a obtenção de nanofibras com atividade biocida comprovada e

eficiência de filtração de partículas de NaCl (7 a 300 nm) entre 63% e 77% (Almeida *et al.*, 2021).

Na produção de nanofibras poliméricas por meio da técnica de eletrofiação, é possível utilizar aditivos, com o objetivo de atribuir aprimoramento as características de adsorção da fibra, atribuir ação biocida (Almeida *et al.*, 2020) e reduzir os espaços interfibrilares, favorecendo a retenção de partículas químicas.

O AC é um polímero, de fonte natural biodegradável, sua fonte natural é a celulose (Goetz *et al.*, 2016). A adição de CPB às soluções poliméricas, contribui para a estabilidade estrutural, resistência térmica e mecânica, além de favorecer a redução do diâmetro das nanofibras e a formação de *beads*/pérolas (Zheng *et al.*, 2014) e pode conferir propriedades antissépticas às nanofibras (National Library of Medicine, 2004; 22 Almeida *et al.*, 2021), o que foi confirmado em estudo realizado e base para este estudo de desenvolvimento de filtro (Almeida *et al.*, 2021).

E em relação ao diâmetro médio das fibras eletrofiadas variou de acordo com o tipo de substrato (*SMS* novo e *SMS* esterilizado) e com o tempo de eletrofiação (10 e 20 minutos). O *SMS* esterilizado apresentou fibras com menor diâmetro médio (0,046 μm) e menor desvio padrão (0,042 μm), indicando maior uniformidade e regularidade na formação da malha fibrosa. Essas alterações promovem melhor ancoragem e estiramento do jato eletrofiado, favorecendo a formação de fibras mais finas e homogêneas.

A Figura 4 ilustra a diferença entre os histogramas de distribuição de diâmetro obtidos para cada substrato. O *SMS* novo apresentou maior dispersão de valores, com diâmetros variando de $<0,10 \mu m$ até $>0,25 \mu m$, evidenciando heterogeneidade na formação da malha. O *SMS* esterilizado apresentou distribuição mais estreita e simétrica, predominantemente inferior a $0,10 \mu m$, refletindo um processo de deposição mais controlado e uniforme.

Esses achados reforçam a importância da condição do substrato no desempenho do processo de eletrofiação, indicando que o *SMS* esterilizado favorece a formação de fibras mais regulares e contínuas, o que pode aumentar a área superficial específica e melhorar o potencial de filtração e adsorção dos filtros desenvolvidos.

Estudos a respeito de materiais utilizados como meios filtrantes indicam que pequenos diâmetros de fibra são úteis para melhorar o desempenho da filtração de ar, especialmente partículas em escala nanométrica (Shou; Ye; Fan,

2014). O não-alinhamento das fibras também é uma característica desejável para os filtros de ar, como obtido nas nanofibras AC/CPB (Almeida *et al.*, 2020). Sua estrutura densa e contínua favorece retenção de partículas ultrafinas e a ação biocida ampliando a eficácia (Mendonça *et al.*, 2023)

A morfologia preservada do SMS esterilizado, comparável à do SMS novo, sugere que o substrato mantém suas propriedades estruturais mesmo após a esterilização, o que aponta para uma alternativa sustentável e economicamente viável no desenvolvimento de dispositivos de proteção respiratória.

Essa possibilidade é relevante tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) ao propor estratégias de reaproveitamento de materiais e redução de resíduos hospitalares (Organização das Nações Unidas, 2023). Apesar dos resultados promissores observados na caracterização microestrutural do filtro SOSstentável, algumas limitações devem ser consideradas na interpretação dos achados. A investigação concentrou-se na caracterização microestrutural das nanofibras eletrofiadas sobre substrato SMS, por meio da MEV, não contemplando ensaios funcionais diretos, como eficiência de filtração, resistência respiratória ou permeabilidade ao ar, os quais serão abordados em estudos subsequentes. No entanto esta etapa está em conduzi-dosçi pelo GeeST.

E ainda, como avanço no conhecimento e inovação tecnológica, as ações desenvolvidas demonstram potencial para o avanço tecnológico e científico na proteção dos trabalhadores da saúde, por meio do desenvolvimento deste filtro que será incorporado na máscara *HeLP*, desenvolvida para oferecer proteção eficaz contra partículas químicas, biológicas e gases presentes na fumaça cirúrgica.

5.2.7 CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo demonstram que o filtro desenvolvido a partir da eletrofiação de nanofibras biodegradáveis de AC com surfactante catiônico CPB sobre substrato SMS apresenta potencial promissor como meio filtrante sustentável para utilização na máscara *HeLP*.

A compatibilidade entre o substrato e as nanofibras, bem como a preservação da integridade morfológica após o processo de esterilização, indicam a viabilidade de reutilização do SMS esterilizado sem prejuízo à estrutura do material.

Esses achados reforçam a aplicabilidade do sistema filtrante tanto em substratos novos quanto usados, contribuindo para o desenvolvimento de EPI sustentáveis e eficazes na mitigação de riscos químicos e biológicos em ambientes de saúde.

Testes futuros voltados à avaliação da eficiência de filtração, conforto e usabilidade em condições reais de uso serão essenciais para validar o desempenho funcional do dispositivo e consolidar sua contribuição à segurança ocupacional.

O GeeST avança de forma significativa na construção de soluções voltadas à proteção dos trabalhadores da saúde e para validar a eficácia do filtro desenvolvido, serão realizados testes conforme os requisitos normativos de desempenho, contemplando análises de resistência à vibração, eficiência de filtração e respirabilidade. Esses ensaios permitirão avaliar não apenas o desempenho técnico, mas também sua ergonomia e viabilidade de uso contínuo pelos profissionais de saúde.

5.2.8 REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 14990-7:2004. Sistemas e materiais de embalagem para esterilização de produtos para saúde — Parte 7: Envelope e tubular para esterilização por óxido de etileno. Rio de Janeiro: ABNT, [Internet]. 2004. Disponível em: https://pt.scribd.com/document/714880061/ABNT-NBR-14990-7-2004-pdf?utm_source. Acesso em: 26 abr. 2025.

ALMEIDA, D. S.; DUARTE, E. H.; HASHIMOTO, E. M.; TURBIANE, F. R. B.; MUNIZ, E. C.; SOUZA, P. R.; MARTINS, L. D. Development and characterization of electrospun cellulose acetate nanofibers modified by cationic surfactant. *Polymer Testing*, [s. l.], v. 81, p. 106206, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106206>. Acesso em: 26 abr. 2025.

ALMEIDA, D. S.; MARTINS, L. D.; MUNIZ, E. C.; RUDKE, A. P.; SQUIZZATO, R.; BEAL, A.; SOUZA, P. R.; BONFIM, D. P. F.; AGUIAR, M. L.; GIMENES, M. L. Biodegradable CA/CPB electrospun nanofibers for efficient retention of airborne nanoparticles. *Process Safety and Environmental Protection*, [s. l.], v. 144, p. 177-185, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.07.024>. Acesso em: 26 ago. 2025.

ALMEIDA, D. S.; SCACCHETTI, F. A. P.; SANTOS, R.; AGUIAR, M. L.; BEAL, A.; RUDKE, A. P.; SANTANA, M. H. S.; LISBOA, A. M. Va.; BEZERRA, F. M.; MARTINS, L. D. Evaluation of biocidal properties of biodegradable nanofiber filters and their use in face masks. *Environmental Technology*, [s. l.], v. 44, n. 5, p. 686–694, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1982020>. Acesso em: 22 ago. 2025.

ASKELAND, D. R.; PHULE, P. P. Ciência e engenharia dos materiais. São Paulo: Cengage, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 15052*: artigos de não tecido de uso odonto-médico-hospitalar – máscaras cirúrgicas – requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, [Internet]. 2004. Disponível em: ABNT Catálogo. Acesso em: 26 ago. 2025.

ASSOCIATION OF PERIOPERATIVE REGISTERED NURSES (AORN). Guideline for surgical smoke safety. In: ASSOCIATION OF PERIOPERATIVE REGISTERED NURSES (AORN). Guidelines for perioperative practice. Denver, CO: AORN, [Internet]. 2018. Disponível em: 15912_I-17_SurgSmokeSafety_10-7-16.indd. Acesso em: 15 out. 2025.

BIENIEK, A. A.; LEACHI, H. F. L.; CARDOSO, B. C. L.; CAMPOS, M. D.; ROCHA, A. F.; RIBEIRO, R. P. Risco ocupacional: sinais e sintomas relacionados à exposição à fumaça cirúrgica. *Revista SOBECC*, São Paulo, v. 27, n. 3, p. 850, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/Z1414-4425202227850>. Acesso em: 10 dez. 2024.

BRASIL. Ministério da Saúde. Saúde do Trabalhador — Ministério da Saúde. Portal Gov.br. [Internet]. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/composicao/svsa/saude-do-trabalhador>. Acesso em: 15 out. 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 1.823, de 23 de agosto de 2012. Institui a Política Nacional de Saúde do Trabalhador e da Trabalhadora. Brasília, DF, [Internet]. 2012. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2012/prt1823_23_08_2012.html?utm_source. Acesso em: 15 out. 2025.

BAGHERI, M.; TORABIZADEH, C.; DOREH, M. A.; YASEE, A. Assessment of operating room nurses' exposure to biological hazards: development and psychometric evaluation of a scale. *BMC Nurs* 23, 878 (2024). <https://doi.org/10.1186/s12912-024-02560-1>. Acesso em: 31 ago. 2025.

CASEY, V. J.; MCNAMARA L. M. Instrumental in Surgery: Review on Energy-based Surgical Cutting Devices and Surgical Smoke. *Ann. Surg* 278, e457–e465 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1097/sla.0000000000005816>. Acesso em: 8 nov. 2024.

CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION (CDC); NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH (NIOSH). Respirator Selection Guide for the Healthcare Industry. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, 2024. (NIOSH Publication No. 2025-102). Disponível em: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2025-102/pdfs/2025-102.pdf>. Acesso em: 11 out. 2025.

DOSHI, J.; RENEKER, D. H. Processo de eletrofiação e aplicações de fibras eletrofiadas. *Journal of Electrostatics*, Amsterdam, v. 35, n. 2–3, p. 151–160, 1995.

Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0304-3886\(95\)00041-8](https://doi.org/10.1016/0304-3886(95)00041-8). Acesso em: 13 jan. 2026

FAUSTINO, F.; LEACHI, H. F. L.; ROCHA, A. F.; RIBEIRO, R. P. Spunbond-Meltblown-Spunbond ou Tecido-Não-Tecido para proteção respiratória de trabalhadores da saúde. *Revista SOBECC*, São Paulo, v. 29, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/Z1414-4425202429952>. Acesso em: 8 nov. 2024.

FAUSTINO, F.; LEACHleachi, H. F. L.; ROCHA, A. F.; SILVA. A. P.; SILVA, R. M.; RIBEIRO, R. P. Effectiveness of particulate matter filtration: systematic review and meta-analysis. *Rev Bras Enferm*. 2025;76(0):00-00. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1590/0034-7167-> Acesso em: 11 jan. 2026.

FILHO, P. A. T. Asma brônquica: asma e poluição atmosférica. [Internet]. 2025. Disponível em: <https://www.asma-bronquica.com.br/PDF/poluicao.pdf>. Acesso em: 11 out. 2025.

FONG, H.; CHUN, I.; RENEKER, D. H. Beaded nanofibers formed during electrospinning. *Polymer*, v. 40, n. 16, p. 4585–4592, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(99\)00068-3](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(99)00068-3). Acesso em: 10 out. 2005.

FUNDACENTRO. Agentes químicos: avaliação de risco ocupacional. (manual ou documento técnico) [Internet]. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/fundacentro/pt-br/centrais-de-conteudo/cursos-e-eventos/pdfs_cursos_eventos/AgentesQuimicos.pdf.

FUNDACENTRO. Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho. [Internet]. 2024. Disponível em: Riscos químicos, biológicos, físicos e tecnologias emergentes — FUNDACENTRO. Acesso em: 8 jan. 2025.

GADAKH, A.; KULKARNI, A. Electrospinning and nanofibre applications: fundamentals and recent status. *Materials Open Research*, vol. 2, n. 10, jan. 2024. DOI: 10.12688/materialsopenres.17568.2. Disponível em: <https://materialsopenresearch.org/articles/2-10>. Acesso em: 11 jun 2025.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010. 200 p.

GRIGG, S. E.; ZAMPIRON, A.; AKBARIDOUST, F.; CHANDRAN, D.; HOLMES N. E.; JOHNSON, P. D. R.; MARUSIC, I.; JONES, D.; LESS, S.. Are surgical masks manufactured from sterilization wrapsafe? *Infect Dis Health*. 2021;26(2):104-9 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.idh.2020.11.001>. Acesso em: 11 jun 2025.

GOETZ L. A.; JALVO, B.; ROSAL R.; MATHEW A. P. Superhydrophilic anti-fouling electrospun cellulose acetate membranes coated with chitin nanocrystals for water filtration. *J Membr Sci*. 2016; 510:238–48. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2016.02.069>. Acesso em: 01 set. 2025.

GUO, Y.; WANG, X.; SHEN, Y.; DONG, K.; SHEN, L.; ALZALAB, A. A. A. Research progress, models and simulation of electrospinning technology: a review. *Journal of*

Materials Science, v. 57, n. 1, p. 58–104, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06575-w>. Acesso em: 12 jan. 2026.

JUNG, S.; KIM, J. Advanced design of fiber-based particulate filters. *Polymers*, v. 12, n. 10, p. 1-23, 2020. Disponível em: Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym12081714>. Acesso em: 9 out. 2025.

KARIM, N.; AFROJ, S.; LLOYD, K.; OATEN, L. C.; ANDREEVA, D. V.; CARR, C.; FARMERY, A. D.; KIM, I.; NOVOSELOV, K. S. Sustainable Personal Protective Clothing for Healthcare Applications: A Review. *ACS Nano*, [S.l.], v. 14, n. 9, p. 12313–12340, 2020. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsnano.0c05537>. Acesso em: 2 jul. 2024.

KEIROUZ, A.; WANG, Z.; REDDY, V. S.; NAGY, Z. K.; VASS, P.; BUZGO, M.; RAMAKRISHNA, S.; RADACSI, N. The History of Electrospinning: Past, Present, and Future Developments. *Advanced Materials Technologies*, v. 8, n. 11, p. 1–34, 2023.

KONINCKX, P.R.; Ussia A.; AMRO, B.; PRANTNER, M.; KECKSTEIN, J.; KECKSTEIN, S.; ADAMYAN, L.; WATTIEZ, A.; ROMEO, A. Electrosurgery: heating, sparking and electrical arcs. *Facts Views Vis Obgyn*, 2024, 16 (3): 281-290, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.52054/FVVO.16.3.026>. Acesso em: 31 ago. 2025.

LEACHI, H. F. L.; RIBEIRO, R. P. HeLP: Development of occupational protection mask against surgical smoke. *Rev Bras Enferm*, Brasília, v. 76, supl. 4, e20220647, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0034-7167-2022-0647>. Acesso em: 8 jun. 2024.

LOUZA, L. *O que são riscos ocupacionais?* SST Online, [Internet]. 2019. Disponível em: https://www.sstonline.com.br/o-que-sao-riscos-ocupacionais/?utm_source. Acesso em: 15 out. 2025.

LI, C.; CHOU, Y.; PAI, J.; CHEN, C.; et al. Investigating surgical smoke in otolaryngology operating rooms. *Scientific Reports*, v. 12, art. 1719, fev. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05701-1>. Acesso em: 01 set. 2025.

LIMCHANTRA, I. V.; FONG, Y.; MELSTROM, K A. Surgical Smoke Exposure in Operating Room Personnel: A review. *JAMA Surg*, v. 154, n. 10, p. 960–967, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1001/jamasurg.2019.2515>. Acesso em: 8 jun. 2024.

MEDEIROS, G. B.; LIMA, F. A.; ALMEIDA, D. S.; GUERRA, V. G.; AGUIAR, M. L. Modification and Functionalization of Fibers Formed by Electrospinning: A Review. *Membranes*, v. 12, n. 9, p. 861, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/membranes12090861>. Acesso em: 6 out. 2025.

MENDONÇA, L. N. M.; LEACHI, H. F. L.; BIENIEK A. A.; RIBEIRO R. P.. Máscara N95: percepções dos trabalhadores do centro cirúrgico. *Rev Baiana Enferm*. 2023;37:e47820. Disponível em: <https://doi.org/10.18471/rbe.v37.47820>. Acesso em: 10 dez. 2024.

MERCANTE, L. A.; CORRÊA, D. S. (Orgs.). Eletrofiação e nanofibras: fundamentos e aplicações. Ponta Grossa, PR: Atena, 2023. 532 p. ISBN 978-65-258-2152-8. Disponível em: <https://doi.org/10.22533/at.ed.528231312>. Acesso em: 30 jun. 2025.

MOURA, C. W. N.; RAMOS, G. J. P.; SANTOS, M. F. S. Protocolo de preparação de amostras de desmídias (Desmidiaceae, Zygnematophyceae) para estudos morfológicos por meio de microscopia eletrônica de varredura. *Hoehnea*, Botucatu, v. 48, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2236-8906-134/2020>. Acesso em 12 jan. 2026.

National Library of Medicine (US), National Center for Biotechnology Information. PubChem Compound Summary for CID 8816, Cetylpyridinium bromide [Internet]. 2004. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Cetylpyridinium-Bromide>. Acesso em: 27 ago. 2025.

NIOSH (National Institute Of Occupational Safety and Health). Control of Smoke from Laser/Electric Surgical Procedures. CDC, NIOSH Pub [internet]. 1996; 96–128. Disponível em: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/hazardcontrol/hc11.html>. Acesso em: 27 ago. 2025.

NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health). About National Institute for Occupational Safety and Health, [Internet]. 2024. Disponível em: Instituto Nacional de Segurança e Saúde Ocupacional | NIOSH | CDC. Acesso em: 07 jan. 2025

ORDAK, M. ChatGPT's skills in statistical analysis using the example of medical data: validity of responses and recommendations for future practice. *Healthcare*, Basel, v. 11, n. 18, p. 2554, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/healthcare11182554>. Acesso em: 12 jan. 2026.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. [Internet]. 2023. Disponível em: <https://sdgs.un.org/goals>. Acesso em: 12 ago. 2025.

PHAM, Q. P.; SHARMA, U.; MIKOS, A. G. Electrospinning of Polymeric Nanofibers for Tissue Engineering Applications: A Review. *Tissue Engineering*, 12(5):1197-211, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1089/ten.2006.12.1197>. Acesso em: 01 set. 2025.

PEREIRA, M. G. Epidemiologia: teoria e prática. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2000. 620 p.

POLIT, D. F.; BECK, C. T. Fundamentos de pesquisa em enfermagem: avaliação de evidências para a prática de enfermagem. 7. ed. Porto Alegre: Artmed, 2011. 670p.

RUTA, M. R.; GAIDICI, T.; IRWIN, C.; LIFSHITZ, J. ChatGPT for univariate statistics: validation of AI-assisted data analysis in healthcare research. *Journal of Medical Internet Research*, [s.l.], v. 27, e63550, 07 fev. 2025. DOI: 10.2196/63550. Acesso em: 12 jan. 2026.

SHOU, D.; YE, L.; FAN, J. Gas transport properties of electrospun polymer nanofibers. *Polymer*, v. 55, n. 14, p. 3149–3155, 2014.

SULTANA, N.; ZAINAL, A. Cellulose acetate electrospun nanofibrous membrane: fabrication, characterization, drug loading and antibacterial properties. *Bulletin of Materials Science*, v. 39, 2016, p. 337–343. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2019.122147>. Acesso em: 21 ago. 2025.

TARUS, B.; FADEL, N.; AL-OUFY, A.; EL-MESSIRY, M. Effect of polymer concentration on the morphology and mechanical characteristics of electrospun cellulose acetate and poly (vinyl chloride) nanofiber mats. *Alexandria Engineering Journal*, v. 55, n. 3, p. 2975–2984, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2016.04.025>. Acesso em: 21 ago. 2025.

ULMER, B. C. The hazards of surgical smoke. *AORN Journal*, v. 87, n. 4, p. 721–734, fev. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aorn.2007.10.012>. Acesso em: 11 jun. 2025.

VINH, N. D.; KIM H. Electrospinning fabrication and performance evaluation of polyacrylonitrile nanofiber for air filter applications. *Appl. Sci.* 2016;6:235, 1–10. DOI: <https://doi.org/10.3390/app6090235>. Acesso em: 21 ago. 2025.

WANG, X.; YU, G.; ZHANG, J.; YU, M.; RAMAKRISHNA, S.; LONG, Yun-Ze. Conductive polymer ultrafine fibers via electrospinning: Preparation, physical properties and applications, *Progress in Materials Science*. Vol 115, p. 100704, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100704>. Acesso em: 21 ago. 2025.

WU, H.; YAN, Y.; FENG, J.; ZHANG, J.; DENG, S.; CAI, X.; HUANG, L.; XIE, X.; SHI, Q.; TAN, S. Cetylpyridinium bromide/montmorillonite-graphene oxide composite with good antibacterial activity. *Biomedical Materials*, v. 15, n. 5, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-605x/ab8440>. Acesso em: 28 nov. 2024.

ZHENG, J.; ZHUANG, M.; YU, Z.; ZHENG, G.; ZHAO, Y.; WANG, H.; SUN, D. The effect of surfactants on the diameter and morphology of electrospun ultrafine nanofiber. *Journal of Nanomaterials*, v. 2014, n. 1, p 1-9, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2014/689298>. Acesso em: 21 ago. 2025.

ZHOU, Y.; WANG, C.; ZHOU, M.; LI., CHEN, D.; LIAN, A.; MA, Y. Surgical smoke: a hidden killer in the operating room. *Asian Journal of Surgery*, v. 46, p. 3447-3454, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.asjsur.2023.03.066>. Acesso em: 28 nov. 2024.

7 CONCLUSÕES / CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos ao longo desta dissertação demonstram o potencial inovador e sustentável do filtro desenvolvido por meio da eletrofiação de

nanofibras biodegradáveis de AC associadas ao surfactante catiônico CPB, depositadas sobre substrato de SMS novo e esterilizado, para aplicação na máscara *HeLP*.

A técnica de eletrofiação mostrou-se viável e reprodutível, possibilitando a formação de nanofibras com morfologia uniforme, diâmetro reduzido e boa aderência ao substrato, características essenciais para um meio filtrante de alta eficiência. As análises morfométricas evidenciaram que o SMS esterilizado proporcionou fibras mais finas e homogêneas, favorecendo a melhor performance de filtração respiratória e indicando a viabilidade da reutilização do substrato sem comprometimento estrutural.

Os achados deste trabalho reforçam o potencial do uso de materiais biodegradáveis e reprocessáveis na fabricação de EPI, promovendo avanços significativos em sustentabilidade, biossegurança e saúde ocupacional. Além disso, a aplicação do filtro na máscara *HeLP* representa uma solução tecnológica voltada à proteção de trabalhadores da saúde expostos à fumaça cirúrgica e a outros agentes químicos e biológicos.

A continuidade das pesquisas conduzidas pelo GeeST incluirá ensaios complementares de eficiência de filtração, respirabilidade e conforto, a fim de consolidar a eficácia e o desempenho funcional do filtro acoplado a máscara *HeLP*.

Conclui-se, portanto, que o desenvolvimento deste dispositivo representa um avanço significativo na engenharia de materiais aplicados à proteção respiratória, contribuindo não apenas para a segurança e o bem-estar dos trabalhadores da saúde, mas também para o fortalecimento de práticas sustentáveis e inovadoras no campo da Enfermagem e Saúde do Trabalhador.

Este estudo evidencia a necessidade da inclusão de disciplinas sobre a Saúde do Trabalhador da Saúde nas várias esferas de aprendizado: graduação e pós-graduação, incluindo as residências da área da saúde, contribuindo dessa forma para o conhecimento e autocuidado dos trabalhadores expostos a riscos ocupacionais nas suas atividades laborais.

REFERÊNCIAS

- ABU-ZURAYK, R.; ALNAIRAT, N.; KHALAF, A.; IBRAHIM, A. A.; HALAWEH, G. Cellulose acetate membranes: fouling types and antifouling strategies—A brief review. *Processes*, v. 11, n. 2, art. 489, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr11020489>. Acesso em: 12 ago. 2025.
- ALMEIDA, D. S.; DUARTE, E. H.; HASHIMOTO, E. M.; TURBIANE, F. R. B.; MUNIZ, E. C.; SOUZA, P. R.; MARTINS, L. D. Development and characterization of electrospun cellulose acetate nanofibers modified by cationic surfactant. *Polymer Testing*, [s. l.], v. 81, p. 106206, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106206>. Acesso em: 26 abr. 2025.
- ALMEIDA, D. S.; MARTINS, L. D.; MUNIZ, E. C.; RUDKE, A. P.; SQUIZZATO, R.; BEAL, A.; SOUZA, P. R.; BONFIM, D. P. F.; AGUIAR, M. L.; GIMENES, M.L. Biodegradable CA/CPB electrospun nanofibers for efficient retention of airborne nanoparticles. *Process Safety and Environmental Protection*, [s. l.], v. 144, p. 177-185, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.07.024>. Acesso em: 26 ago. 2025.
- BARBEY, C.; BONVALLOT, N.; CLERC, F. Health outcomes related to multiple exposures in occupational settings: A review. *Safety and Health at Work*, Amsterdam, v. 15, p. 382-395, out. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2024.10.004>. Acesso em: 5 out. 2025.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Departamento de Saúde Ambiental, do Trabalhador e Vigilância das Emergências em Saúde Pública. Política Nacional de Saúde do Trabalhador e da Trabalhadora. Brasília: Ministério da Saúde, [Internet]. 2012. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/composicao/svsa/saude-do-trabalhador/politica-nacional-de-saude-do-trabalhador-e-da-trabalhadora>. Acesso em: 5 out. 2025.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Ministério da Saúde atualiza lista de doenças relacionadas ao trabalho após 24 anos. Portal Gov.br, Brasília, 27 nov. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/noticias/2023/novembro/ministerio-da-saude-atualiza-lista-de-doencas-relacionadas-ao-trabalho-apos-24-anos>. Acesso em: 10 mai. 2025.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 1.999, de 27 de novembro de 2023. Dispõe sobre Lista de Doenças Relacionadas ao Trabalho (LDRT). Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 226, p. 99, 2023. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-1.999-de-27-de-novembro-de-2023-526629116>. Acesso em: 10 mai. 2025.
- BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora NR-01: Disposições Gerais e Gerenciamento de Riscos Ocupacionais. Brasília, DF: MTE, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/normas-regulamentadora/normas-regulamentadoras-vigentes/nr-1>. Acesso em: 17 fev. 2025.

BIENIEK, A. A.; LEACHI, H. F. L.; CARDOSO, B. C. L.; CAMPOS, M. D.; ROCHA, A. F.; RIBEIRO, R. P. Risco ocupacional: sinais e sintomas relacionados à exposição à fumaça cirúrgica. *Revista SOBECC*, São Paulo, v. 27, n. 3, p. 850, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/Z1414-4425202227850>. Acesso em: 10 dez. 2024.

BORA, P.; BHUYAN, C.; LAKSHMI, D.S.; HAZARIKA, S.; TANCZYK M.; SRIMATH, S. T. G. Recent Advances in Membrane-Based Air Filtration Technologies for Ambient Particulate Matter Separation. *Polímeros (Basel)*. 9 de dezembro de 2025; 17(24):3265. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/polym17243265> . Acesso em: 12 jan. 2026.

CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION (CDC). Filtering Facepiece Respirators. Atlanta: CDC, [Internet]. 2025. Disponível em: <https://www.cdc.gov/niosh/ppe/respirators/ffr.html>. Acesso em: 6 out. 2025.

COLBECK, I. Environmental chemistry of aerosols. 1. ed. Oxford: Wiley-Blackwell, 2008. DOI/ISBN: 9781405139199. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781444305388>. Acesso em: 6 out. 2025.

DALMOLIN, G. L.; POSSEBON, M. R.; LANES, T. C.; SCHUTZ, T. C.; MUNHOZ, T. C.; ANDOLHE, R. Occupational stress and burnout syndrome among health workers. *Revista Recien - Revista Científica de Enfermagem*, v. 12, n. 37, p. 67–77, 2022. DOI: <https://doi.org/10.24276/rrecien2022.12.37.67-77>. Acesso em: 13 jan. 2026

FILHO, P. A. T. Asma brônquica: asma e poluição atmosférica. [Internet]. 2025. Disponível em: <https://www.asmabronquica.com.br/PDF/poluicao.pdf>. Acesso em: 11 out. 2025.

FONG, H.; CHUN, I.; RENEKER, D. H. Beaded nanofibers formed during electrospinning. *Polymer*, v. 40, n. 16, p. 4585–4592, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(99\)00068-3](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(99)00068-3). Acesso em: 10 out. 2005.

FUNDACENTRO. Riscos químicos e biológicos no ambiente de trabalho. São Paulo: Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/fundacentro/pt-br>. Acesso em: 7 jan. 2026.

GREINER, A.; WENDORFF, J. H. Electrospinning: A fascinating method for the preparation of ultrathin fibers. *Angewandte Chemie - International Edition*, v. 46, n. 30, p. 5670–5703, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/anie.200604646>. Acesso em: 11 jun 2025.

GOETZ L. A.; JALVO, B.; ROSAL R.; MATHEW A. P. Superhydrophilic anti-fouling electrospun cellulose acetate membranes coated with chitin nanocrystals for water filtration. *J Membr Sci*. 2016; 510:238–48. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2016.02.069>. Acesso em: 01 set. 2025.

GREGÓRIO, D. S. Riscos ocupacionais: uma revisão da literatura. *ID on Line Revista de Psicologia*, Jaboatão dos Guararapes, v. 11, n. 34, p. 401-413, fev. 2017.

Disponível em: <https://doi.org/10.14295/online.v11i34.697>. Acesso em: 15 out. 2025.

HABIBA, U.; AFIFI, A. M.; SALLEH, A.; ANG, A. C. Chitosan/(polyvinyl alcohol)/zeolite electrospun composite nanofibrous membrane for adsorption of Cr^{6+} , Fe^{3+} and Ni^{2+} . *Journal of Hazardous Materials*, v. 322, p. 182–194, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.06.028>. Acesso em: 7 out. 2025.

INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION. Improving health in the workplace: ILO's framework for action. Genebra: ILO, s.d. [Internet]. 2014. Disponível em: <https://www.ilo.org/publications/improving-health-workplace-ilos-framework-action>. Disponível em: International Labour Organization. Acesso em: 15 out. 2025.

WILLIAMS, K. Guidelines in practice: surgical smoke safety. *AORN Journal*, v. 116, n. 2, p. 145-159, Aug. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/aorn.13745>. Acesso em: 15 out. 2025.

LEACHI, H. F. L.; RIBEIRO, R. P. HeLP: Development of occupational protection mask against surgical smoke. *Rev Bras Enferm*, Brasília, v. 76, supl. 4, e20220647, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0034-7167-2022-0647>. Acesso em: 8 jun. 2024.

LESO, V.; SOTTANI, C.; SANTOCONTO, C.; RUSSO, F.; GRIGNANI, E.; IAVICOLI, I. Exposure to antineoplastic drugs in occupational settings: an updated review of biological monitoring data. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Basel, v. 19, n. 6, p. 3737, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph19063737>. Acesso em: 13 jan. 2026

LI, N.; GEORAS, S.; ALEXIS, N.; FRITZ, P.; XIA, T.; WILLIAMS, M. A.; HORNER, E.; NEL, A. A work group report on ultrafine particles (American Academy of allergy, asthma e immunology). Why ambient ultrafine and engineered nanoparticles should receive special attention for possible adverse health outcomes in human subjects. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, St. Louis, v. 138, n. 2, p. 386–396, ago. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaci.2016.02.023>. Acesso em: 6 out. 2025.

LI, T.; YU, Y.; SUM, Z.; DUAN, J. A comprehensive understanding of ambient particulate matter and its components on the adverse health effects based from epidemiological and laboratory evidence. *Particle and Fibre Toxicology*, v. 19, n. 1, p. 67, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12989-022-00507-5>. Acesso em: 28 set. 2025.

LIMCHANTRA, I. V.; FONG, Y.; MELSTROM, K A. Surgical Smoke Exposure in Operating Room Personnel: A review. *JAMA Surg*, v. 154, n. 10, p. 960–967, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1001/jamasurg.2019.2515>. Acesso em: 8 jun. 2024.

LYU, L.; BAGCHI, M.; MARKOGLOU, N.; NA, C. Innovations and development of sustainable personal protective equipment. *Environmental Systems Research* [s.l.], v. 13, n. 22, 2024. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11189323/>. Acesso em: 7 jan. 2026.

MEDEIROS, G. B.; LIMA, F. A.; ALMEIDA, D. S.; GUERRA, V. G.; AGUIAR, M. L. Modification and Functionalization of Fibers Formed by Electrospinning: A Review. *Membranes*, v. 12, n. 9, p. 861, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/membranes12090861>. Acesso em: 6 out. 2025.

MALEK, N. A. N. N.; RAMLI, N. I. Characterization and antibacterial activity of cetylpyridinium bromide (CPB) immobilized on kaolinite with different CPB loadings. *Applied Clay Science*, Amsterdam, v. 109–110, p. 8–14, jun. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.03.007>. Acesso em: 07 out. 2025.

PHAM, Q. P.; SHARMA, U.; MIKOS, A. G. Electrospinning of Polymeric Nanofibers for Tissue Engineering Applications: A Review. *Tissue Engineering*, 12(5):1197-211, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1089/ten.2006.12.1197>. Acesso em: 01 set. 2025.

SALONEN, H.; SALTHAMMER, T.; CASTAGNOLI, E.; TÄUBEL, M.; MORAWSKA, L. Cleaning products: Their chemistry, effects on indoor air quality, and implications for human health. *Environment International*, Amsterdam, v. 190, p. 108836, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108836>. Acesso em: 13 jan. 2026

SANTOS JÚNIOR, C. J.; ALMEIDA, I. M.; FISCHER, F. M. Public policies for occupational safety and health in Brazil. *Ciência & Saúde Coletiva*, Rio de Janeiro, v. 30, supl. 1, e14452023, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1413-812320242911.14452023>. Acesso em: 7 jan. 2026.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, [Internet] 2006. Disponível em: <https://download.e-bookshelf.de/download/0000/7532/93/L-G-0000753293-0002366430.pdf>. Acesso em: 6 out. 2025.

ULMER, B. C. The hazards of surgical smoke. *AORN Journal*, v. 87, n. 4, p. 721–734, fev. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aorn.2007.10.012>. Acesso em: 11 jun. 2025.

WAGNER, D.; PEARCEY, S.; HUDGINS, C. J.; ULMER, B. C. Surgical smoke knowledge and practices before and after onset of COVID-19: A national survey of OR personnel. *Perioperative Care and Operating Room Management*, v. 35, p. 100411, jun. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pcorn.2024.100411>. Acesso em: 7 out. 2025.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. Occupational health. [Internet]. 2025. Disponível em: <https://www.who.int/health-topics/occupational-health>. Acesso em: 15 out. 2025.

YIM, W.; CHENG, D.; PATEL, S. H.; KOU, R.; MENG, Y. S.; JOKERST, J. V. KN95 and N95 respirators retain filtration efficiency despite a loss of dipole charge during decontamination. *ACS Applied Materials & Interfaces*, Washington, v. 12, n. 49, p. 54473-54480, dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsami.0c17333>. Acesso em: 6 out. 2025.

ZHOU, Y.; LIU, Y.; ZHANG, M.; FENG, Z.; YU, D.; WANG, K. Electrospun Nanofiber Membranes for Air Filtration: A Review. *Nanomaterials*, v. 12, n. 7, art. 1077, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nano12071077>. Acesso em: 01 set. 2025.

ZHOU, Y.; WANG, C.; ZHOU, M.; LI.,; CHEN, D.; LIAN, A.; MA, Y. Surgical smoke: a hidden killer in the operating room. *Asian Journal of Surgery*, v. 46, p. 3447-3454, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.asjsur.2023.03.066>. Acesso em: 28 nov. 2024.