

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM FÍSICA

Pedro Ravalha Lorenzoni

**MÉTODO DE BAIXO CUSTO PARA REUTILIZAÇÃO DE MÁSCARAS
N95 ATRAVÉS DE RECARGA ELETROSTÁTICA**

Santa Maria, RS

2023

Pedro Ravalha Lorenzoni

**MÉTODO DE BAIXO CUSTO PARA REUTILIZAÇÃO DE MÁSCARAS N95
ATRAVÉS DE RECARGA ELETROSTÁTICA**

Dissertação de mestrado apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Física, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Física.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Augusto de Lima Burgo

Santa Maria

2023

Pedro Ravalha Lorenzoni

**MÉTODO DE BAIXO CUSTO PARA REUTILIZAÇÃO DE MÁSCARAS N95
ATRAVÉS DE RECARGA ELETROSTÁTICA**

Defesa de mestrado apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Física, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Física**.

Aprovado em 28 de julho de 2023

Thiago Augusto de Lima Burgo, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Ricardo Barreto da Silva, Dr. (UFSM)

Carlos Alejandro Figueroa, Dr. (UCS)

Santa Maria, RS

2023

RESUMO

MÉTODO DE BAIXO CUSTO PARA REUTILIZAÇÃO DE MÁSCARAS N95 ATRAVÉS DE RECARGA ELETROSTÁTICA

AUTOR: Pedro Ravalha Lorenzoni

ORIENTADOR: Thiago Augusto de Lima Burgo

Devido à pandemia de Covid-19, uma doença causada pelo vírus Sars-CoV-2, o uso de máscaras de proteção pessoal aumentou drasticamente. A Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda o modelo PFF2, equivalente ao padrão norte-americano para respiradores N95. Ao contrário das máscaras de pano e cirúrgicas, cuja função principal é impedir que o ar expelido pela pessoa contaminada se espalhe, reduzindo assim as chances de propagação do vírus, as máscaras PFF2 são consideradas equipamentos de proteção individual (EPI) e filtram até 95% das partículas contaminantes. Uma das principais características dessa máscara é o tratamento eletrostático da segunda camada mais interna, onde é estabelecida uma diferença de potencial que funciona como uma barreira eletrostática, retendo as partículas que carregam o vírus. No entanto, essa proteção tem um tempo limitado, pois a máscara pode ficar úmida ou suja, reduzindo a barreira eletrostática e, conseqüentemente, a eficiência. Portanto, este trabalho busca aplicar métodos para re-eletrizar a máscara, devolvendo sua proteção eletrostática, a fim de prolongar sua vida útil e promover sua reutilização. Entre os métodos utilizados, destacam-se os seguintes: 1) Eletrificação por disparos feitos com uma pistola de neutralização estática (Zerostat); 2) Eletrificação por fricção, com nylon e politetrafluoroetileno (PTFE). Através do mapeamento eletrostático da máscara PFF2, utilizando o método Kelvin, e das medições da quantidade de carga, utilizando um copo de Faraday, observou-se que a barreira eletrostática pode ser restabelecida mesmo após a lavagem das máscaras, e a partir disso verificamos que sua eficiência ultrapassa o valor para máscaras novas.

Palavras-chave: COVID-19, eletrização, máscaras N95, mecanoquímica.

ABSTRACT

LOW-COST METHOD FOR N95 MASKS REUSE THROUGH ELECTROSTATIC RECHARGING RECHARGING

AUTHOR: Pedro Ravalha Lorenzoni
ADVISOR: Thiago Augusto de Lima Burgo

Due to the Covid-19 pandemic, a disease caused by the Sars-CoV-2 virus, the use of personal protective masks has increased dramatically. The World Health Organization (WHO) recommends the PFF2 model, equivalent to the North American N95 respirator standard. Unlike cloth and surgical masks, whose main function is to prevent the spread of exhaled air from an infected person, thus reducing the chances of virus transmission, PFF2 masks are considered personal protective equipment (PPE) and filter up to 95% of contaminating particles [1]. One of the main characteristics of this mask is the electrostatic treatment of the innermost second layer, where a potential difference is established, acting as an electrostatic barrier and trapping particles carrying the virus [2]. However, this protection is time-limited as the mask can become damp or dirty, reducing the electrostatic barrier and, consequently, its efficiency. Therefore, this study aims to apply methods to re-electrify the mask, restoring its electrostatic protection in order to prolong its lifespan and promote reusability. Among the methods used, the following are highlighted: 1) Electrification through discharges generated by a static neutralizing gun (Zerostat); 2) Electrification through friction with nylon and polytetrafluoroethylene (PTFE). Through electrostatic mapping of the PFF2 mask using the Kelvin method and measuring the charge quantity using a Faraday cup, it was observed that the electrostatic barrier can be restored even after mask washing, and based on this, it was found that its efficiency surpasses that of new masks.

Keywords: COVID-19, recharging, N95 masks, Mechanochemistry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Série triboelétrica	19
Figura 2 - Representação de um cristal de perovskita.	22
Figura 3 - Composição e disposição das camadas da máscara N95; Ilustração dos mecanismos de captura e partículas da máscara.	25
Figura 4 - Composição e disposição das camadas da máscara N95; Ilustração dos mecanismos de captura e partículas da máscara	27
Figura 5 – Representação esquemática de um eletrodo de Kelvin	34
Figura 6 – Representações esquemáticas de eletrodos capacitivos de vibração: a) perpendicular b) paralela.....	35
Figura 7 – Representação circuito de realimentação para eletrodo de Kelvin	38
Figura 8 - Ilustração do experimento de Faraday.....	40
Figura 9 - Ilustração de um copo de Faraday.....	41
Figura 10 – a) Captura de tela do software de medidas de eficiência; b) Captura de tela do cálculo de eficiência feito pelo software.....	44
Figura 11 - Configuração experimental para as medidas de eficiência	45
Figura 12 - Pistola ZeroStat®, Sigma-Aldrich.....	48
Figura 13 - Processo de desinfecção, secagem e regarga	49
Figura 14 - Setup para os mapeamentos eletrostáticos	51
Figura 15 - Setup para medidas de cargas elétricas	53
Figura 16 - Resultados de eficiência	55
Figura 17 - Resultados de eficiência vs dias	58
Figura 18 - Mapas de potencial eletrostáticos das amostras para as 4 camadas da máscara N95.....	61
Figura 19 - Medidas de carga líquida das amostras do filtro eletrostático, desinfetadas com etanol.....	62
Figura 20 - Medidas de carga líquida das amostras do filtro eletrostático, desinfetadas com água fervente.....	63
Figura 21 - Gráfico de dissipação do potencial eletrostático do filtro eletrostático. ...	64

Figura 22 - Gráfico de variação da eficiência com o tempo	64
Figura 23 - Medidas topográficas do filtro eletrostático; a) Máscara Nova; b) Desinfetada com Etanol; c) recarregada com Zerostat; d) utilizada por 1 semana. ...	67
Figura 24 - Gráfico com medidas de eficiência para máscaras desinfetadas com etanol e recarregadas	68
Figura 25 - Mapas de potencial eletrostático das amostras de 4 camadas das máscaras N95: Nova; desinfetada com etanol; triboeltrizada com Nylon; Triboeltrizada com PTFE; eletrizada com Zerostat.....	69
Figura 26 - Gráfico Radar comparativo entre os resultados do método de recarga com Zerostat e os modelos de máscaras mais vendidas no mercado; Cirurgica; N95 nova; Máscara de pano.....	70
Figura 27 - Recorte do Mapa do campus sede da UFSM, Santa Maria - RS.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados extraídos do gráfico 1: Medidas de eficiência.....	56
Tabela 2 - Resultados extraídos dos gráficos: Medidas da variação da eficiência e potencial eletrostático com o tempo	65
Tabela 3 - Resultados extraídos do gráfico: Medidas de eficiência.....	68
Tabela 4 - Valores de tempo de descarte utilizados no gráfico radar.....	71
Tabela 5 - Valores de eficiência utilizados no gráfico radar.	73
Tabela 6 - Análise de custo para o processo de desinfecção com etanol e recarga com Zerostat	74
Tabela 7 - Valores de eficiência para diferentes processos de reutilização de máscaras n95 baseados em desinfecção e recarga eletrostática.	75

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	14
2.1 GERAIS	14
2.2 ESPECÍFICOS	14
3 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	15
3.1 MECANOQUÍMICA	15
3.2 ELETROSTÁTICA.....	15
3.3 TRIBOELETRICIDADE	18
3.4 PIEZOELETRICIDADE	20
3.5 MÁSCARA DE PROTEÇÃO RESPIRATÓRIA.....	23
3.6 MELTBLOW PROCESS	29
3.7 MÉTODO DE KELVIN.....	32
3.7 COPO DE FARADAY.....	39
4 EXPERIMENTAL	43
4.1 METODOLOGIAS DE DESINFECÇÃO	46
4.2 METODOLOGIAS DE RECARGA	46
4.3 MEDIDAS ELETROSTÁTICAS.....	50
4.3.1 Mapeamento de potencial eletrostático	50
4.3.2 Medidas de dissipação	52
4.4 MEDIDAS DE CARGA COM COPO DE FARADAY	52
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5.1 MEDIDAS DE EFICIÊNCIA.....	54
5.2 MEDIDAS ELETROSTÁTICAS.....	59
5.3 ANÁLISE SUPERFICIAL (MEV)	66
5.4 RESULTADOS ELETROSTÁTICOS E DE EFICIÊNCIA PARA OS MÉTODOS DE TRIBOELETRIZAÇÃO	67

5.5 ANÁLISE DE QUALIDADE E CUSTO DO MÉTODO FINAL NA REUTILIZAÇÃO DAS MÁSCARAS N95	70
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
6.1 CONCLUSÃO	76
6.2 PERSPECTIVAS FUTURAS.....	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
APÊNDICE A – SOFTWARE PARA CÁLCULO DE EFICIÊNCIA DE FILTRAGEM	85

1 INTRODUÇÃO

As pandemias mudaram o curso da história humana até os dias de hoje, e não foi diferente recentemente com a pandemia do coronavírus, causada pela disseminação do vírus SARS-CoV-2, e tem sido considerada a maior ameaça global à saúde pública nos últimos 100 anos, desde a gripe espanhola (PEERI *et al.*, 2020). A pandemia afeta não apenas a saúde humana, mas também outras áreas da sociedade, principalmente a economia, devido às regulamentações de distanciamento e isolamento que culminaram na restrição das atividades comerciais e do setor de transporte (NICOLA *et al.*, 2020; PFEFFERBAUM; NORTH, 2020).

O COVID-19, assim como outras infecções respiratórias, pode ser transmitido por meio de gotículas de diferentes tamanhos: quando as gotículas têm mais de 5µm de diâmetro, elas são referidas como gotículas respiratórias (partículas grosseiras), e quando têm menos de 5µm de diâmetro, são referidas como núcleos de gotículas (partículas finas) (LIAO *et al.*, 2020; PRATHER; WANG; SCHOOLEY, 2020)]. A rota geral de propagação consiste em contato, fômites e transmissão por aerossol para as gotículas que são expelidas quando a pessoa infectada fala, tosse ou espirra (HUANG *et al.*, 2020). Os vírus contidos nessas gotículas, que às vezes podem ser consideradas um aerossol, podem permanecer viáveis e infecciosos por longos períodos, especialmente em ambientes com pouca circulação de ar (ANDERSON *et al.*, 2020; COWLING *et al.*, 2013). As partículas grosseiras, por serem mais pesadas, têm um alcance de propagação de aproximadamente 1 metro e se depositam rapidamente devido a efeitos gravitacionais, sendo responsáveis pela transmissão por contato e fômites (CHEN *et al.*, 2020; LIU *et al.*, 2020). As partículas finas que transportam vírus podem permanecer suspensas no ar por longos períodos, permitindo que a transmissão por aerossol alcance maiores distâncias (BHAT *et al.*, 2020; ZHANG, RENYI *et al.*, 2020).

Existem máscaras feitas de diferentes materiais e modelos, que influenciam diretamente a capacidade de filtragem. Entre as mais utilizadas pelo público em geral, as máscaras de pano têm a menor capacidade de filtragem, no entanto, ajudam a reter as gotículas expelidas pelo usuário, enquanto as máscaras cirúrgicas filtram 95% das partículas de aerossol, mesmo assim devem ser trocadas com frequência devido à rapidez com que as camadas de filtro se deterioram (OBERG; BROSSEAU, 2008). Já quanto às máscaras N95, relacionadas ao padrão europeu FFP2, onde o nome indica que o modelo filtra 95% das partículas com tamanho de 0,3 μm , e pode ser considerada um equipamento de proteção individual (EPI) (BUSCO *et al.*, 2020; DBOUK; DRIKAKIS, 2020; SU-VELEZ *et al.*, 2020), sendo assim consideradas, o modelo mais adequado para uso durante a pandemia de COVID-19, no entanto, é recomendado que cada unidade seja usada apenas uma vez, já que a máscara contaminada representa um risco de contágio para o usuário, além do fato de que o uso leva a uma diminuição na eficiência. Dito isso, a escassez desse produto já foi notada e a necessidade de desenvolver uma maneira de reutilizar essas máscaras se torna urgente.

As máscaras N95 são compostas por múltiplas camadas de polipropileno (PP) não tecido; as gotículas líquidas são bloqueadas pela superfície hidrofóbica do PP. Normalmente, o fluxo de ar que passa pela máscara é laminar, superando suavemente as fibras, de modo que as partículas sólidas são capturadas por interceptação ou quando desviam desse fluxo e colidem com o material. Para partículas maiores com alta velocidade e densidade, a inércia é a responsável pelo seu desvio, enquanto para partículas menores ($>2\mu\text{m}$), a difusão Browniana é a responsável (WARREN H FINLAY, 2001). sendo esses considerados mecanismos de captura mecânica. Além disso, uma camada da máscara é composta de PP não tecido eletrificado, que adiciona um mecanismo de captura eletrostática, sendo capaz de atrair partículas carregadas por meio de forças Coulombianas e partículas polares neutras por meio de forças elétricas que vêm da interação entre partículas polarizadas e gradientes de campo elétrico (HOSSAIN *et al.*, 2020).

A camada de polipropileno eletrificada é produzida pelo processo de fusão por sopro (MB), que é uma das tecnologias comerciais de não tecidos em que são obtidas fibras finas, tipicamente de 1 a 8 microns, em um único processo de fiação de fibras de polímero, desenho de ar e formação de teia (FENG, 2017). Durante o processo de fusão por sopro, o polímero é alimentado em um extrusor, onde é liquefeito e empurrado através do filtro até atingir a cabeça de fiação. Na cabeça de fiação, o material derretido é depositado, transformando-se em filamentos através do fluxo de ar quente em alta velocidade, formando não tecidos na forma de uma teia (KIM, HAN JOO *et al.*, 2017; NAYAK *et al.*, 2012). Os não tecidos fundidos por sopro geralmente têm diâmetros de fibra variando de 1 a 10 μm e o diâmetro médio é geralmente de 1 a 2 μm . O tecido fundido por sopro é conhecido por sua alta área superficial por unidade de peso e suas propriedades de alta barreira (KIM, HAN JOO *et al.*, 2017).

A proteção eletrostática das máscaras n95 diminui consideravelmente ao longo do tempo, pois a umidade e a manipulação para uso acabam descarregando a camada eletrificada, então alguns pesquisadores têm estudado maneiras de revitalizar o filtro eletrostático (PU *et al.*, 2018).. Na literatura, vemos alguns métodos bem-sucedidos. Com isso em mente, o objetivo deste trabalho é desenvolver um método de desinfecção e recarga da máscara que possa ser realizado com pouco investimento e tenha reprodutibilidade acessível em diferentes ambientes. Nossos resultados sugerem que a desinfecção com etanol, seguida da eletrificação com uma pistola Zerostat, cumpre o objetivo de restaurar a eficiência da máscara usada.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAIS

O objetivo principal desse trabalho consiste no desenvolvimento de um método eficiente, de fácil aplicação e baixo custo, para desinfecção e recarga de máscaras N95. Essa abordagem visa permitir o reuso seguro dessas máscaras, resultando em um aumento significativo de sua vida útil.

2.2 ESPECÍFICOS

1. Realizar testes laboratoriais para identificar e aperfeiçoar um método de desinfecção eficaz para as máscaras N95, levando em consideração as diretrizes de saúde e segurança.
2. Avaliar a eficiência do método desenvolvido em termos da capacidade de restaurar as propriedades de filtração das máscaras.
3. Investigar a relação entre a perda de eficiência da máscara ao longo do tempo e a dissipação de potencial eletrostático do filtro da máscara após o processo de recarga.
4. Desenvolver uma metodologia de aplicação do processo de recarga que possa ser realizada em algum espaço da UFSM, atendendo alunos, servidores e convidados.
5. Documentar e relatar os resultados obtidos, fornecendo informações relevantes para a comunidade científica, profissionais de saúde e reguladores de saúde pública.
6. Contribuir para a implementação de práticas sustentáveis na gestão de equipamentos de proteção individual, promovendo a reutilização segura das máscaras N95 e reduzindo o impacto ambiental associado ao descarte excessivo.

3 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

3.1 MECANOQUÍMICA

A palavra mecanoquímica é uma palavra composta formada pela junção de dois radicais, o prefixo “mecano” vem do grego "mekhanē" que significa máquina e remete a algo relacionado à mecanismos ou ação mecânica. Já o sufixo “química” tem origem no latim “chemia” que se refere ao termo alquimia também chamada de arte da transmutação, uma prática antiga que combinava misticismo com ciência, focada na descoberta do elixir da vida e na busca da pedra filosofal. Contudo, a partir do século XVII Robert Boyle negou vários pressupostos alquimistas e lançou os primeiros alicerces da ciência atualmente conhecida como química, juntamente com Avogadro e John Dalton (GALEMBECK; A. L. BURGO, 2017).

Ainda segundo a IUPAC o termo “mecanoquímico” é utilizado para descrever uma reação química induzida pela absorção direta de energia mecânica. Ou seja, reações químicas podem ser desencadeadas por forças mecânicas em sólidos porque, ao contrário de gases e líquidos, os sólidos suportam tensões de cisalhamento. O cisalhamento altera a simetria de uma molécula ou sólido e é, portanto, mais eficaz na estimulação de reações do que a simples compressão isotrópica. Essa quebra de simetria desestabiliza a estrutura eletrônica de ligação e torna o sólido propenso a reações químicas. Tais fenômenos mecanoquímicos são encontrados em uma variedade de processos, neste trabalho em específico são de interesse os fenômenos piezoelétricos e triboelétricos (GALEMBECK; A. L. BURGO, 2017).

3.2 ELETROSTÁTICA

O estudo da eletricidade estática, ou eletrostática como é mais conhecida, tem origem a mais de 2500 anos quando os primeiros fenômenos eletrostáticos foram

registrados por Tales de Mileto, ao observar que o atrito mecânico entre um fragmento de âmbar e um pedaço de pele de carneiro, este começou a atrair pequenos pedaços de palha (HOWARD, 1974). A partir daí, cada vez mais surgiram estudos na área, no século XVII o físico inglês William Gilbert publicou o livro "De Magnete", em que estudou a eletricidade em materiais como âmbar e magnetita. Ele cunhou o termo "eletricidade" (do grego "elektron", que significa âmbar) para descrever o fenômeno de atração entre esses materiais (WILLIAM GILBERT, 1600).

Mais adiante, por volta da segunda metade do século XVIII, o físico francês Charles-Augustin de Coulomb desenvolveu experimentos de atração e repulsão entre cargas elétricas. Esses estudos resultaram na formulação da conhecida Lei de Coulomb, que fornece uma descrição matemática do comportamento das cargas elétricas e permite cálculos precisos da força elétrica (CHARLES-AUGUSTIN DE COULOMB, 1785). No século XIX, o físico italiano Alessandro Volta inventou a pilha voltaica, que foi a primeira fonte de corrente contínua desenvolvida pela humanidade. Essa invenção permitiu a realização de experimentos mais complexos para o estudo da eletrostática (ALESSANDRO VOLTA, 1800). Ao longo dos séculos, esses fenômenos foram estudados e aprimorados, e seus resultados foram consolidados pelo matemático e físico escocês James Clerck Maxwell (J. CLERK MAXWELL, 1865).

Todos os conceitos fundamentais da eletrostática são bem estabelecidos e aplicados com sucesso em metais, no entanto, quando estão envolvidos isolantes nosso entendimento é rudimentar, e isto está diretamente relacionado com o desconhecimento sobre a natureza dos portadores de cargas em isolantes eletrizados (SCHEIN, 2007). Por consequência, existe, no meio científico, um debate acalorado em relação à identidade dos portadores de carga em fenômenos eletrostáticos. (BAILEY, 2001) discute diferentes pontos de vista de pesquisadores renomados no campo da eletrostática, revelando a falta de consenso sobre essa questão fundamental. Alguns pesquisadores defendem que os portadores de carga são

elétrons, enquanto outros argumentam que são íons.

Os materiais sólidos, sejam eles condutores, isolantes e semicondutores, são formados por uma estrutura cristalina. O cristal se comporta como um isolante se as bandas de energia permitidas estiverem completamente preenchidas ou vazias, pois nesse caso nenhum elétron pode se mover em um campo elétrico. O cristal se comporta como um metal se uma ou mais bandas estiverem parcialmente preenchidas, digamos entre 10% e 90% de preenchimento. O cristal é um semicondutor ou um semimetal se uma ou duas bandas estiverem ligeiramente preenchidas ou ligeiramente vazias (KITTEL; HOLCOMB, 1967).

Nos condutores e semicondutores os portadores de carga são elétrons ou “buracos” causados pela ausência destes. A eletrização por contato (triboeletrização), nesses materiais, é regulada pela função trabalho, onde os elétrons migram do material com menor para o material com maior função trabalho, até que os níveis de Fermi estejam equilibrados, apresentando mesmo valor de energia (GREASON, 2000). No entanto, em contraste com os metais, nos materiais dielétricos, o gap de energia entre a banda de valência e a banda de condução é significativamente maior. Além disso, a banda de valência está completamente preenchida, enquanto a banda de condução está completamente vazia. Essas características tornam difícil atribuir a presença de uma carga líquida em um dielétrico à ausência ou ao excesso de elétrons que tenham sido retirados ou inseridos no material (SHAW, 1917).

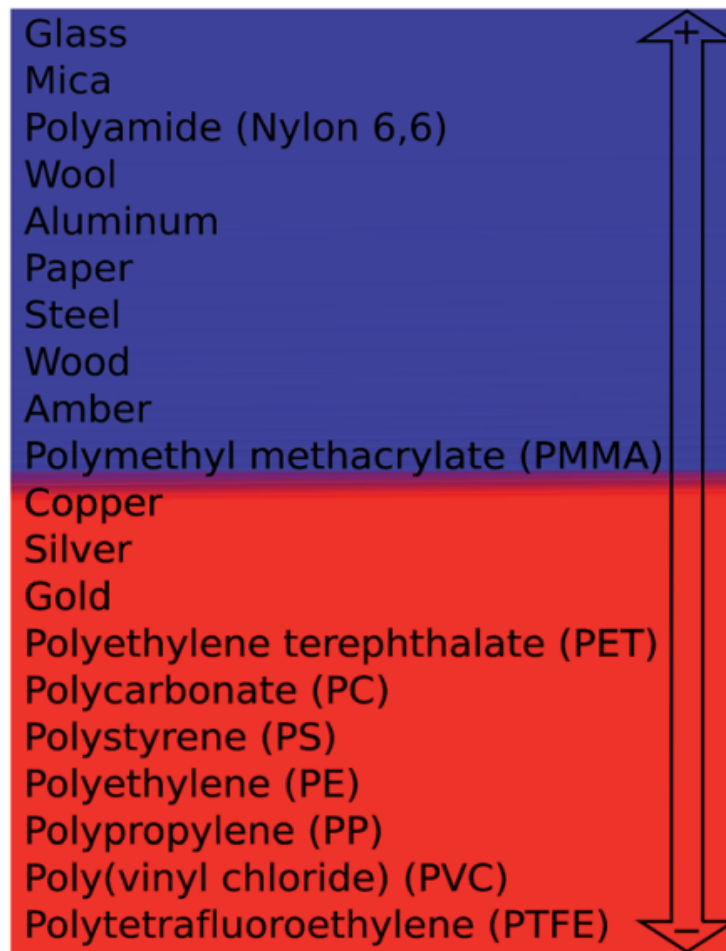
Em resumo, até o momento não existe consenso sobre quem seriam os portadores de carga nestes materiais, não tendo nenhum modelo satisfatório capaz de explicar a eletrização de isolantes. Com esse atual paradigma já estabelecido, e independentemente de os portadores de carga serem íons, elétrons ou ambos, sabemos que o atrito entre sólidos gera eletrização superficial em um processo conhecido como triboeletrização (BAILEY, 2001).

3.3 TRIBOELETRICIDADE

Em 1757, o físico sueco J.C. Wilcke realizou um estudo pioneiro que resultou na primeira lista de materiais ordenados empiricamente de acordo com sua capacidade de adquirir cargas positivas ou negativas após contato mecânico. Desde então, muitos outros cientistas também desenvolveram suas próprias séries de materiais com base nessa propriedade. Foi somente em 1917 que o termo "série triboelétrica" foi proposto por Shaw (SHAW, 1917). Embora essas tabelas empíricas pareçam simples, elas contêm contribuições importantes para o entendimento das propriedades e do comportamento das superfícies de sólidos, que têm intrigado os cientistas desde o início. A figura 1 apresenta uma adaptação de uma destas tabelas.

Existem teorias para explicar a ordem dos materiais, e uma delas se baseia na função trabalho, já citada anteriormente, onde o comportamento doador/receptor de elétrons determina o sinal da carga adquirida. Nas interfaces metal-metal ou metal-semicondutor, o fluxo de elétrons é equilibrado em um processo endotérmico. No entanto, em dielétricos, eventos semelhantes exigem alta energia de ativação (MCCARTY; WHITESIDES, 2008). Uma explicação para o comportamento de isolantes é baseada na natureza ácido-base de Brønsted, que depende do estado da superfície e sua composição (GOUVEIA *et al.*, 2012).

Figura 1 - Série triboelétrica



Fonte: Retirado de (GALEMBECK *et al.*, 2014)

Além da composição química, a deformação elástica e plástica, bem como forças mecânicas na interface, desempenha um papel importante no comportamento eletrostático dos materiais. Materiais moles ou superfícies com camadas fracamente ligadas são mais propensos à transferência de fragmentos para materiais mais duros, resultando em eletrização por transferência de massa (BURGO *et al.*, 2012). Mesmo materiais com a mesma composição química podem apresentar diferenças no padrão de triboeletrização. As séries triboelétricas, apesar da baixa reprodutibilidade dos experimentos de eletrização por contato, são consistentes em diferentes listas de materiais elaboradas por diferentes laboratórios. Essas listas são

surpreendentemente similares, com pequenas inconsistências, apesar das variações nos experimentos, protocolos e preparação dos materiais (CASTLE, 1997).

Por outro lado, Diaz e Félix-Navarro (DIAZ; FELIX-NAVARRO, 2004) construíram uma série semi empírica apenas com polímeros e foram capazes de relacionar, pelo menos parcialmente, os materiais com a estrutura química e algumas propriedades físico-químicas. De acordo com eles, polímeros que contêm nitrogênio desenvolvem cargas positivas, enquanto polímeros baseados em hidrocarbonetos adquirem quantidades insignificantes de carga, já polímeros halogenados se eletrizam extensamente com polaridade negativa. Eles também mostraram uma correlação razoável entre a carga adquirida e a constante de basicidade K_b . Além disso, eles concluíram que o mecanismo de transferência de íons é essencial para a eletrização de dois polímeros. A utilidade de séries triboelétricas advém da sua contribuição para predição da carga desenvolvida após o atrito ou contato entre sólidos em várias situações.

3.4 PIEZOELETRICIDADE

A primeira publicação científica que descreveu o fenômeno, posteriormente denominado piezoelectricidade, foi publicada em 1880. Pierre e Jacques Curie foram coautores desta publicação, enquanto conduziam uma série de experimentos em vários cristais. Durante esses experimentos, eles observaram que cristais como turmalina, quartzo, topázio, bastão de açúcar e sal de Rochelle desenvolviam cargas superficiais quando submetidos a estresse mecânico (DIAZ; FELIX-NAVARRO, 2004).

Na comunidade científica daquela época, essa observação foi considerada uma descoberta significativa, e o termo "piezoelectricidade" foi criado para descrever esse efeito. A palavra "piezo" deriva do grego e significa "pressionar". Portanto,

piezoeletricidade significa eletricidade gerada por meio de pressão - um nome que faz sentido logicamente. Essa terminologia ajudou a distinguir a piezoeletricidade de outros fenômenos relacionados que eram de interesse naquele momento, como eletricidade por contato.

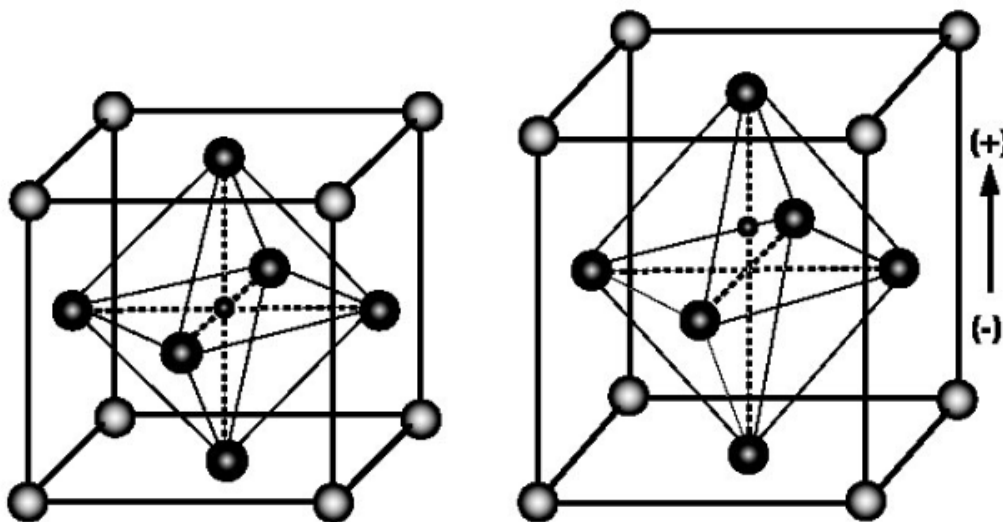
A descoberta do efeito piezoelétrico direto é atribuída aos irmãos Curie, porém eles não foram os responsáveis pela descoberta do efeito piezoelétrico reverso. Mais tarde LIPPMAN, 1881 previu matematicamente esse efeito com base nas leis fundamentais da termodinâmica. Apesar disso, os Curies são reconhecidos por terem confirmado experimentalmente o efeito reverso após o trabalho de Lippmann (CURIE; CURIE, 1880).

Uma das condições fundamentais para que um cristal exiba o efeito piezoelétrico é a ausência de um centro de simetria, uma vez que essa propriedade física é originada da anisotropia do cristal, isto é, da resposta não uniforme do material a estímulos externos em diferentes direções. Quando um material piezoelétrico é submetido a tensão, ocorre uma polarização elétrica ou uma mudança na polarização se o material já possuir uma polarização espontânea não nula (CADY, 1946).

Os cristais piezoelétricos foram amplamente utilizados em diversas aplicações, como transdutores de sonar e estabilizadores de frequência. Durante e após a Segunda Guerra Mundial, o desenvolvimento de materiais cerâmicos piezoelétricos revolucionou o campo, possibilitando a criação de dispositivos adaptados a diferentes necessidades, como sonares potentes e sistemas de ignição piezoelétrica. Esses avanços impulsionaram o progresso tecnológico e abriram portas para invenções como hidrofones sensíveis e cápsulas fonográficas cerâmicas. (CADY, 1946).

A ilustração da figura 2 mostra um cristal de perovskita (titânato de cálcio - CaTiO_3), que apresenta as características piezoelétricas e é composto por um pequeno íon metálico tetravalente colocado dentro de uma rede de íons metálicos divalentes maiores e O_2 .

Figura 2 - Representação de um cristal de perovskita.



Fonte: Adaptado de Cady (1946)

Essa estrutura possui uma carga líquida não nula em cada célula unitária do cristal. No entanto, devido ao íon de titânio estar ligeiramente deslocado do centro da célula unitária, uma polaridade elétrica se desenvolve, transformando efetivamente a célula unitária em um dipolo elétrico. Uma tensão mecânica aplicada ao cristal desloca ainda mais a posição do íon de titânio, alterando assim a intensidade da polarização do cristal. Isso é a fonte do efeito direto. Quando o cristal é submetido a um campo elétrico, isso também resulta em um deslocamento relativo na posição do íon de titânio, levando à distorção da célula unitária e tornando-a mais (ou menos) tetragonal. Isso é a fonte do efeito inverso (CADY, 1946).

Ainda, em um sentido mais amplo, a piezoelectricidade pode ser entendida como uma interação eletromecânica linear entre os estados mecânico e elétrico. Essa interação é descrita por uma relação linearmente proporcional definida como o coeficiente piezoeletrico d . Esse coeficiente é um tensor de terceira ordem que acopla

o tensor de primeira ordem (deslocamento ou campo elétrico) e o tensor de segunda ordem (tensão ou deformação).

3.5 MÁSCARA DE PROTEÇÃO RESPIRATÓRIA

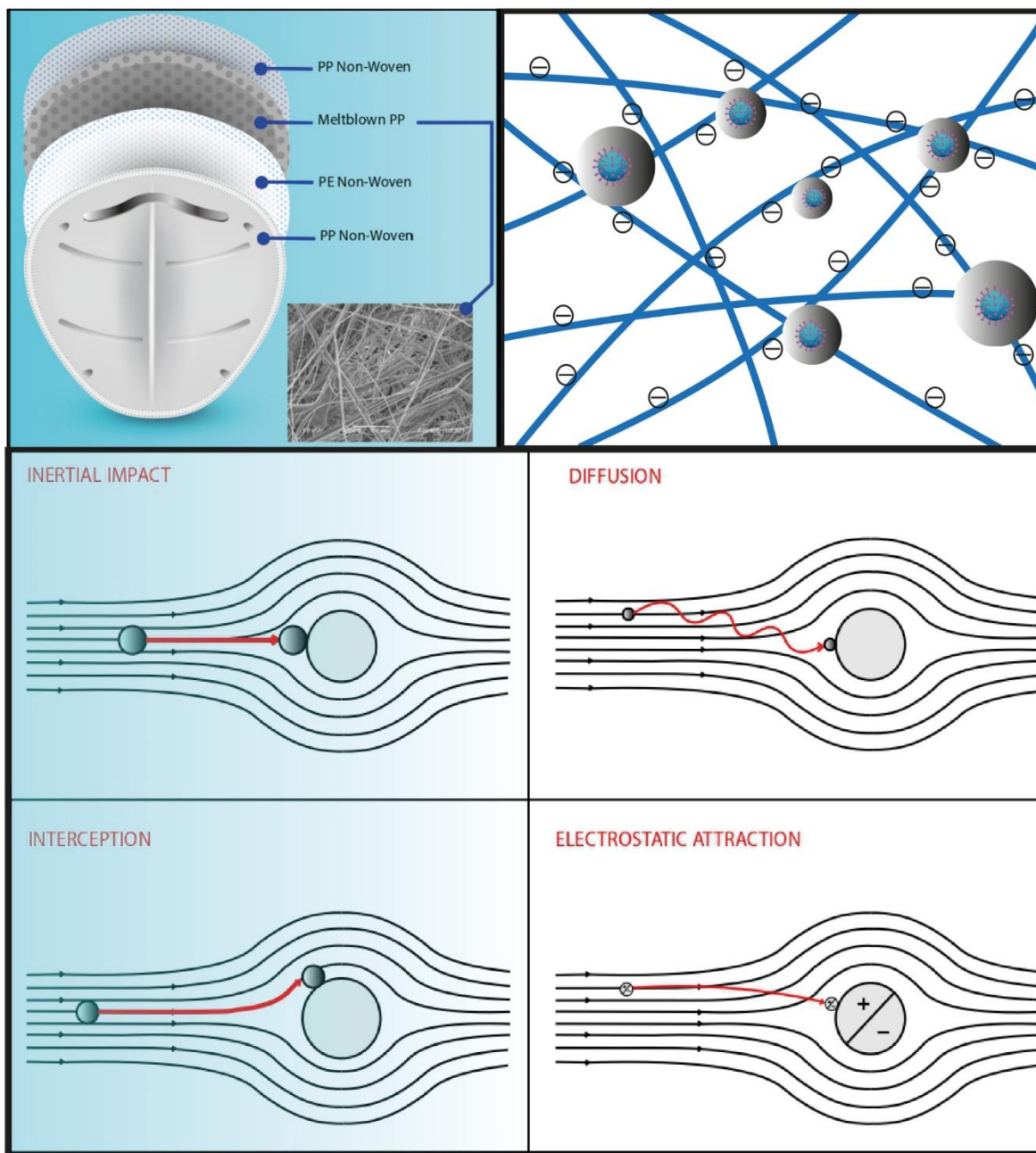
A via de transmissão geral para a COVID-19, assim como outras doenças respiratórias, incluindo influenza, Síndrome Respiratória Aguda Grave (SARS) e Síndrome Respiratória do Oriente Médio (MERS), consiste em transmissão por contato, transmissão por fômites e transmissão por aerossol. Todos esses modos de transmissão são considerados envolver gotículas de fluido respiratório contaminadas com o SARS-CoV-2, que são expelidas pela pessoa infectada sempre que realizam atividades relacionadas à respiração, como tossir, espirrar, falar, cantar ou até mesmo respirar. Os vírus presentes nas gotículas podem permanecer viáveis e infecciosos por períodos prolongados de tempo, resultando na propagação da infecção. As gotículas de fluido respiratório geralmente incluem partículas grossas ($>5 \mu\text{m}$) e partículas finas ($<5 \mu\text{m}$). Partículas grossas têm um alcance de transporte relativamente curto, aproximadamente 1 m, e se depositam rapidamente devido a efeitos gravitacionais, o que pode levar à transmissão por contato e fômites (BUSCO *et al.*, 2020)

No entanto, partículas finas contendo vírus podem potencialmente se tornar partículas aerossol suspensas e permanecer no ar por períodos prolongados, permitindo a transmissão do vírus por aerossol a longas distâncias ($>1 \text{ m}$), ou seja, transmissão por aerossol. Portanto, além de medidas como praticar consistentemente uma boa higiene e estabelecer o distanciamento social para evitar os dois primeiros caminhos, é também muito crucial prevenir a propagação do vírus por meio de aerossóis através de outras medidas de prevenção e controle de infecção, como o uso de máscaras, quarentena e isolamento. Nesse sentido, as máscaras faciais ou respiradores podem ser equipamentos eficazes e essenciais para proteger os

profissionais de saúde e membros do público em geral que podem estar expostos ao vírus. Em particular, os respiradores N95 são uma parte essencial do equipamento de proteção pessoal (EPP) usado pelos profissionais de saúde da linha de frente, pois atuam como uma barreira para a transmissão de gotículas contaminadas por patógenos expelidas por tosse, espirro, fala ou respiração de uma pessoa infectada (BUSCO *et al.*, 2020; OBERG; BROSSEAU, 2008)

A designação N95 indica que essas máscaras possuem uma eficiência de filtragem de 95% para partículas com tamanho de 0,3 μm . Devido à potencial contaminação e à rápida degradação da eficiência de filtragem com o uso, as máscaras N95 são projetadas para uso único. No entanto, a pandemia de COVID-19 resultou em uma escassez significativa dessas máscaras, levando à busca por métodos que permitam o uso múltiplo. A literatura científica tem apresentado várias propostas de procedimentos de descontaminação, como o uso de calor seco e úmido, exposição a vapor de peróxido de hidrogênio, ozônio, radiação UV ou álcool. Embora esses métodos possam desativar os vírus, é amplamente reconhecido que eles afetam negativamente a eficiência de filtragem e podem causar danos à integridade estrutural da máscara. Até o momento, houve menos ênfase na restauração da eficiência de filtragem de uma máscara após sua degradação (SU-VELEZ *et al.*, 2020).

Figura 3 - Composição e disposição das camadas da máscara N95; Ilustração dos mecanismos de captura e partículas da máscara.

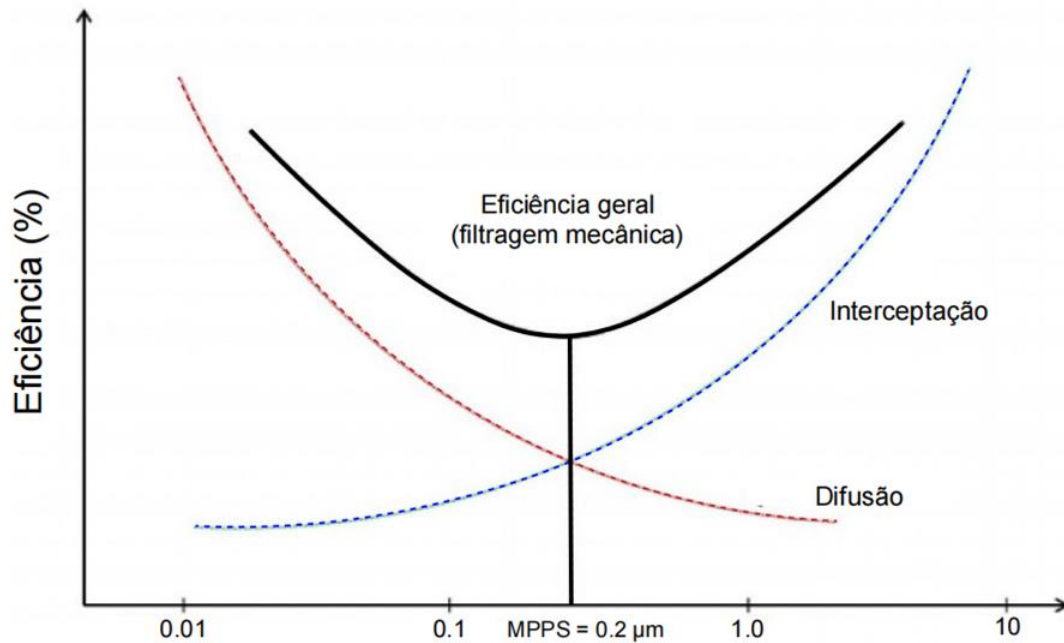


Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como em outros processos de filtração, as máscaras N95 interceptam partículas estrangeiras em diferentes camadas do material da máscara como ilustrado na figura 3. Uma partícula pode ser capturada de forma mecânica, caso encontre diretamente uma fibra da máscara em seu caminho, ou de forma eletrostática, caso o material da máscara possua a capacidade de atrair e aprisionar partículas (THAKUR; DAS; DAS, 2013). Quando uma partícula entra em contato com a superfície da fibra, forças adesivas, como a força de van der Waals, imobilizam a partícula na superfície da fibra, facilitando sua captura e retenção (KUMAR; BHATTACHARYA; GHOSH, 2013).

O fluxo através de uma máscara geralmente é considerado laminar, o que significa que ele normalmente se curva suavemente ao redor de um obstáculo (fibra). Se esse for o caso, a captura mecânica da partícula na superfície da fibra ocorre quando a partícula se desvia de sua trajetória na corrente de ar e entra em contato com o material da máscara. Isso pode ocorrer para partículas maiores, cuja inércia é grande o suficiente para causar esse desvio da trajetória, ou para partículas menores, cuja difusão browniana é forte o bastante (WARREN H FINLAY, 2001). Para filtros baseados em materiais fibrosos e que operam em velocidades de filtração semelhantes às encontradas na respiração humana, a eficiência mínima de filtração ocorre para partículas com tamanho de aproximadamente $0,3 \mu\text{m}$. Nessa escala, o mecanismo de filtração passa de um regime dominado pela difusão para um regime dominado pela inércia, como podemos ver no gráfico da figura 4 (LEE; LIU, 1980).

Figura 4 - Composição e disposição das camadas da máscara N95; Ilustração dos mecanismos de captura e partículas da máscara



Fonte: Adaptado de LEE; LIU, (1980)

Além da captura mecânica, os respiradores N95 utilizam um mecanismo eletrostático para atrair e interceptar partículas estrangeiras (carregadas ou não carregadas). Isso ocorre quando há campos elétricos significativos e gradientes de campo elétrico no material da máscara, o que pode ocorrer quando as fibras estão carregadas (FREDERICK, 1974). São essas interações eletrostáticas que elevam a eficiência de filtração das máscaras N95 para o nível de 95%. As fibras carregadas podem atrair tanto partículas inerentemente carregadas por forças coulombianas quanto partículas polares (como pequenas gotículas aquosas) por forças dielétricas resultantes da interação de objetos polarizados e gradientes de campo elétrico (SESSLER, 1980).

Nas máscaras N95 típicas, a filtração eletrostática é realizada por uma camada

filtrante de polipropileno não tecido eletrostaticamente eletrizado por um processo chamado “*meltblown*”, que será elucidado em detalhes mais adiante. A maioria dos poros nessa malha possuem uma escala de comprimento característica de cerca de 15 μm , e cerca de 90% de seu espaço é vazio. Essa é mantida no lugar entre duas ou mais camadas quase rígidas que fornecem suporte e são responsáveis pela filtragem mecânica. O polipropileno é um material dielétrico, que pode reter ou ainda possuir um momento dipolar microscópico líquido. O polipropileno puro é um polímero não polar com uma lacuna de banda de 8 eV. No entanto, a presença de defeitos em nível molecular, tanto químicos quanto físicos, permitem a formação de estados de energia localizados que podem aprisionar carga (SESSLER, 1980). Além disso, suas propriedades de polarização elétrica são frequentemente aprimoradas pela introdução de vários aditivos, como estearato de magnésio (ZHANG, HAIFENG *et al.*, 2018) ou BaTiO_3 (KILIC; SHIM; POURDEYHIMI, 2015) que são adicionados durante o processo produção do dos filtros de polipropileno para aumentar o desempenho do eletreto.

É importante ressaltar que a intensidade da carga na camada de filtro é um dos parâmetros mais importantes que afetam a eficiência de filtração da máscara ou respirador. Tanto a intensidade da carga quanto a força da atração eletrostática dependem das propriedades dielétricas do material das fibras. Além disso, se a carga na camada de filtro for reduzida, o desempenho de filtração diminuirá drasticamente. O diâmetro da fibra também afeta a eficiência de filtração, e fibras com diâmetros pequenos resultam em áreas de superfície específicas maiores, o que, por sua vez, significa que os vazios dentro da matriz de fibras são menores. Isso aumenta o desempenho de filtração. No entanto, a permeabilidade ao ar fica comprometida (DENG *et al.*, 2022; VAN TURNHOUT; ADAMSE; HOENEVELD, 1980).

Adicionalmente, é importante destacar que a maioria dos métodos atualmente descritos na literatura para reutilização de máscaras N95 resulta na remoção completa das cargas presentes na camada de filtragem, levando à perda da

capacidade de filtração eletrostática. Embora alguns estudos tenham proposto métodos para recarregar essa camada eletrostática, é importante salientar que tais abordagens geralmente são dispendiosas ou não viáveis em grande escala, o que cria uma lacuna que precisa ser preenchida. Portanto, é crucial o desenvolvimento de um método eficiente, de baixo custo e escalonável para desinfecção e recarga das máscaras N95, a fim de superar esses desafios e garantir a manutenção de sua capacidade de filtração eletrostática.

3.6 MELTBLOW PROCESS

Tecidos não tecidos são uma ampla variedade de materiais fibrosos formados através da formação direta de uma rede de fibras, em vez de fiação e tecelagem de fios. A rede de fibras é então unida por meio de entrelaçamento físico, tecnologias de ligação térmica ou química (ELLISON *et al.*, 2007). O processo de fusão (MB) é uma das tecnologias não tecidas comerciais em que fibras finas (tipicamente de 1 a 8 microns) são obtidas em um único processo de filamento de polímero fundido, resfriamento/desenho do ar e formação da rede (FENG, 2017). Durante o processo de fusão, o polímero é alimentado em um extrusor, onde o polímero é derretido e empurrado para a frente pelo extrusor através do filtro e, finalmente, atinge a cabeça de fiação. Na cabeça de fiação, o material fundido é transformado em filamentos por ar quente de alta velocidade e forma não tecidos no formador de rede (KIM, HAN JOO *et al.*, 2017; NAYAK *et al.*, 2012). Os não tecidos produzidos por fusão geralmente têm diâmetros de fibras variando de 1 a 10 μm e o diâmetro médio geralmente é de 1 a 2 μm (CHEN *et al.*, 2020). A fusão tem alta eficiência de produção em comparação com outras técnicas de formação de fibras finas. Pode ser várias ordens de magnitude mais produtiva do que a eletrofiação, por exemplo. O tecido fundido é conhecido por sua alta área de superfície por unidade de peso e altas propriedades de barreira (KIM, HAN JOO *et al.*, 2017; MENG, 2017). Para melhorar a eficiência de filtração, é sempre

desejável reduzir ainda mais os diâmetros das fibras, mas existe um limite tecnológico para a velocidade e volume de ar que podem ser aplicados ao processo, pois os requisitos de energia e design de equipamento se tornam economicamente inviáveis (DUTTON, 2008; WANG; YAO; PAN, 2009)

No interesse comercial dos não tecidos fundidos ultrafinos, muitas técnicas têm sido tentadas para produzir fibras mais finas. Em 2009, um grupo usou ondas ultrassônicas na fusão e o diâmetro das redes fundidas de PET/PA6 bicomponentes preparadas foi reduzido de 3,62 para 2,11 μm (WANG; YAO; PAN, 2009). Em 2013, novas configurações de matriz e condições de processo foram exploradas para reduzir o tamanho das fibras para a faixa de 300-500 nm (HASSAN *et al.*, 2013). Além disso, alguns novos métodos técnicos têm sido desenvolvidos nos últimos anos para melhorar o desempenho e o valor de aplicação das fibras fundidas (MAJCHRZYCKA *et al.*, 2017; XIAO; SONG; CHEN, 2014; XIE *et al.*, 2018). Nesse trabalho foi explorada a ideia de adicionar um campo elétrico estático ao processo de fusão. Ao fazer isso, nos referenciamos à eletrofiação, que é um método simples de produção de nanofibras sob força eletrostática. No entanto, ela tem sido amplamente limitada ao uso de eletrofiação por solução, pois a eletrofiação de polímeros fundidos é dificultada pela viscosidade muito alta do polímero fundido (LI *et al.*, 2014; R.-J. DENG'S *et al.*, 2010). Se pudéssemos combinar os benefícios das duas técnicas de forma a mitigar suas deficiências, poderíamos obter uma rede fibrosa com diâmetros de fibras mais finas e alta taxa de produção.

Já foram realizados estudos semelhantes nessa área. A ideia de combinar a fusão e a eletrofiação foi proposta pela primeira vez por MOOSMAYER *et al.*, 1990. O conceito foi posteriormente incorporado a uma técnica chamada "*eletroblowing*", na qual um polímero fundido carregado é extrudado por meio de um filatório para formar nanofibras sob a ação combinada de um fluxo de ar quente de alta velocidade e campo elétrico (CHU *et al.*, 2010). O processo extrude fluido polimérico eletricamente carregado por meio de um filatório, que é acoplado a um fluxo de ar que segue na

mesma direção que a linha de extrusão. Juntos, o fluxo de ar e as forças eletrostáticas atuam na linha de extrusão e fibras finas são obtidas (LUO *et al.*, 2012). Em 2009, uma máquina multissegmentar de fusão e eletrofiação foi desenvolvida por WATANABE *et al.*, 2009. A máquina pode usar a força do sopro de ar e a força eletrostática sinergicamente para preparar nanofibras. Eles conseguiram preparar fibras isostáticas de polipropileno não tecidas por essa máquina. Em 2013, fibras de polipropileno foram preparadas por um dispositivo de eletrofiação fundida sem agulhas para limpeza de derramamento de óleo marinho (LI *et al.*, 2014)

Em KIM *et al.*, 2017 prepararam nanofibras usando a técnica de eletrofiação fundida e estudaram em detalhes os efeitos da velocidade do ar e da temperatura do ar sobre o diâmetro das fibras. Em 2017, (MENG, 2017) conduziram uma simulação numérica do campo eletrostático da eletrofiação e do campo de fluxo de ar da fusão e discutiram a combinação de força eletrostática e força de sopro de ar. Eles concluíram que a combinação da força eletrostática estática e da força de estiramento do ar pode ser uma boa solução para produzir nanofibras a partir de um fundido de alta viscosidade. A maioria dos estudos existentes toma a eletrofiação como ponto de partida e o principal impulsionador para obter fibras finas. Ao fazer isso, as perspectivas comerciais dessas técnicas nunca foram realmente verificadas, pois a produtividade sempre foi muito baixa.

Nos últimos anos, com cada vez mais atenção voltada para o ambiente de vida e a saúde humana, a tecnologia e os produtos de filtração de ar têm sido uma grande área de aplicação de têxteis técnicos (KIM, KITAI *et al.*, 2009). Para um material de filtro convencional, as partículas são capturadas por peneiramento, impacto inercial e difusão (UPPAL *et al.*, 2013) dependendo do tamanho das partículas a serem removidas. A probabilidade de deposição de partículas em microfibras é muito maior em diâmetros de fibras menores e com áreas de superfície maiores (MISSLITZ; KREGER; SCHMIDT, 2013; WEISS *et al.*, 2016). Além disso, partículas menores tendem a ser retidas por meio do mecanismo de difusão e têm uma maior chance de

serem adsorvidas nas superfícies carregadas das fibras (ZHANG, HAIFENG *et al.*, 2018).

O método mais comumente usado para melhorar a eficiência de filtragem de estruturas fibrosas é o processo de descarga de eletreto estático, no qual as partículas leves e pequenas são atraídas pelas fibras carregadas pela corona. Diferente do processo de descarga de eletreto estático, que tem baixa voltagem, pequena distância de ação e tempo de operação curto, o processo de fusão assistida por eletrostática explora uma voltagem mais alta, maior distância de ação e tempo de operação mais longo. Além disso, o processo de descarga de eletreto estático funciona apenas em fibras não tecidas solidificadas, enquanto o campo eletrostático do método atual atua tanto nas fibras fundidas quanto nas solidificadas, proporcionando um estiramento adicional às fibras carregadas durante o processo de atenuação das fibras. A eficiência de filtragem dos meios filtrantes não tecidos obtidos pela fusão assistida por eletrostática mostrou-se muito melhorada sob a ação combinada dos dois aspectos acima. (XIAO *et al.*, 2015; XIE XIAOJUN; HUANG XIANG; DI YUHUI., 2005; ZHANG, HAIFENG *et al.*, 2018).

3.7 MÉTODO DE KELVIN

O método de Kelvin, também conhecido como método do capacitor de vibração, é uma técnica comumente utilizada para medir o potencial eletrostático de uma superfície, não sendo necessário o contato entre a amostra a ser medida e o eletrodo, sendo essa uma das principais razões que nos fez optar pelo uso do mesmo. O princípio de operação de um eletrodo capacitivo básico é simples e conhecido desde 1898, quando foi proposto por Lord Kelvin (NORAS, 2002).

Para isto utiliza-se um sistema que é configurado como um capacitor de placas paralelas com um pequeno espaçamento entre as mesmas (NONNENMACHER;

O'BOYLE; WICKRAMASINGHE, 1991)

$$\Delta V = \frac{Q}{C} \text{ (Equação 1)}$$

onde ΔV é a ddp entre as placas, Q é a carga elétrica acumulada no capacitor e C a capacitância estabelecida entre o eletrodo e a superfície de teste (NORAS, 2002).

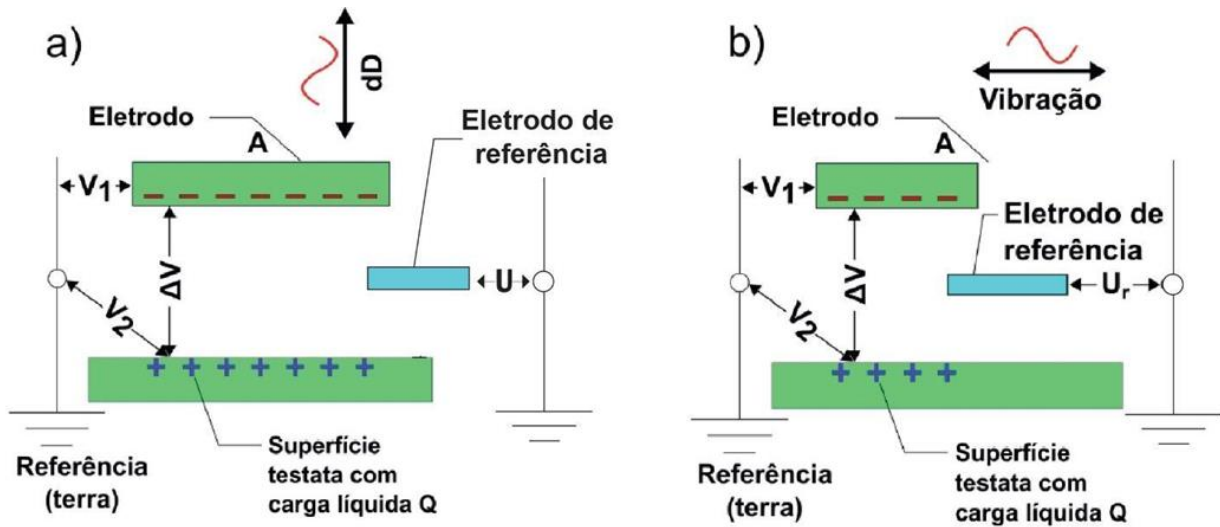
A capacitância pode ser calculada a partir de geometria do capacitor e da natureza do meio entre as placas. Para o capacitor de placas paralelas, assumindo que o campo elétrico entre os eletrodos do capacitor é homogêneo e uniforme, ao se aplicar uma tensão (V) sobre o dispositivo, a quantidade de carga (Q) armazenada será diretamente proporcional à tensão. Desta forma, podemos expressar a capacitância através da equação:

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 A}{D} \text{ (Equação 2)}$$

onde o ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo, cujo valor é de $8,85 \times 10^{-12}$ F/m, o ϵ é definido como permissividade elétrica do meio entre as placas, A é a área superficial e D a distância entre as superfícies.

A ilustração da figura 5 mostra o esquema de funcionamento do mecanismo de aplicação do método de Kelvin onde V_1 é a diferença de potencial entre o eletrodo e a referência (terra) e V_2 é a diferença de potencial entre a superfície examinada e a referência (terra). Desta forma, V é a diferença de potencial entre as duas placas paralelas ($|V_1 - V_2|$). Sendo assim, se o eletrodo estiver aterrado V_2 será zero e $V = V_1$. Dessa maneira conhecendo-se V_1 e a geometria do sistema podemos obter V_2 .

Figura 6 – Representações esquemáticas de eletrodos capacitivos de vibração: a) perpendicular b) paralela



Fonte: Adaptado de NORAS (2002).

Voltando para analisar a imagem 5, nota-se, que qualquer mudança na distância entre os eletrodos durante um intervalo de tempo infinitesimal dt ocorre somente se uma certa quantidade de carga dQ for retirada ou entregue ao eletrodo, de maneira que ΔV permaneça constante.

Partindo da definição de corrente elétrica $i = \frac{dQ}{dt}$, e sabendo que dQ e dt são respectivamente a variação infinitesimal de carga e tempo, é possível determinar o fluxo de carga entre eletrodo e superfície, de forma que

$$i(t) = V\epsilon\epsilon_0 A \frac{d}{dt}(D(t)^{-1}) \quad (\text{Equação 4})$$

A expressão para a Lei de Hooke, representada por:

$$\vec{F} = ma = -k\vec{r} \quad (\text{Equação 5})$$

e pode ser reescrita de forma integral em relação à posição dependente do tempo,

resultando em uma equação diferencial de segunda ordem:

$$m \frac{\partial^2 \vec{r}(t)}{\partial t^2} + k\vec{r}(t) = 0 \text{ (Equação 6)}$$

A partir disso, considerando que a posição r depende exclusivamente do tempo, podemos expressá-la como $r(t) = T(t)$, onde T é uma autofunção de $r(t)$. Portanto, podemos formular uma equação de autovalores na tentativa de encontrar uma solução para $r(t)$.

A equação característica desse problema assume a forma:

$$m \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \omega^2 T = 0 \text{ (Equação 7)}$$

Dentre as possíveis soluções dessa equação, escolhe-se aquela que contém funções periódicas de forma conveniente. Assim, no plano real e sem considerar uma onda defasada, a parte de \vec{r} com dependência temporal possui a solução:

$$r(t) = \alpha \cos(\omega t) + \beta \sin(\omega t) \text{ (Equação 8)}$$

(ARFKEN *et al.*) já a parte invariante no tempo tem uma solução trivial, em que $\vec{r} = \vec{r}_0$, ou seja:

$$r_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \text{ (Equação 9)}$$

Dessa forma, podemos obter uma expressão resolvida para o deslocamento inicial e para o deslocamento temporal, de modo que $r = r_0 + r(t)$.

Agora, ao substituir as equações 8 e 9, obtemos:

$$r = r_0 + \alpha \cos(\omega t) + \beta \sin(\omega t) \text{ (Equação 10)}$$

Considerando que no instante de tempo $t = 0$ s não há deslocamento vertical ou horizontal, podemos reescrever a equação 10 de forma mais fluida:

$$r = y_0 + \beta \sin(\omega t) \text{ (Equação 11)}$$

Para determinar o coeficiente β , podemos isolar o termo oscilatório e encontrar as expressões para seus valores máximos e mínimos.

Quando o argumento da função seno é igual a $m\pi$, onde $m = 0, 1, 2, \dots, n$, o resultado é 0 e $y = y_0$, o que indica a posição média de oscilação. Por outro lado, quando o argumento é igual a $m\pi$, para $m = 1/2, 3/2, 5/2, \dots, n$, a função atinge seus valores máximos e mínimos, resultando em $|y - y_0| = |\beta|$.

Conseqüentemente, podemos afirmar que β corresponde à metade da amplitude de oscilação. Portanto, a amplitude total de oscilação, denotada por y_{osc} , é igual a 2β e também pode ser representada como a amplitude eficaz de uma onda (RMS - root mean square, em inglês).

$$\mu_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \mu_i^2}, \text{ assim (Equação 12)}$$

$$y_{RMS} = \sqrt{(2\beta)^2} \text{ (Equação 13)}$$

$$y_{RMS} = 2\beta \text{ (Equação 14)}$$

Ao reunir todas as informações discutidas, podemos obter uma expressão que determina a posição de um eletrodo capacitivo de vibração na direção perpendicular:

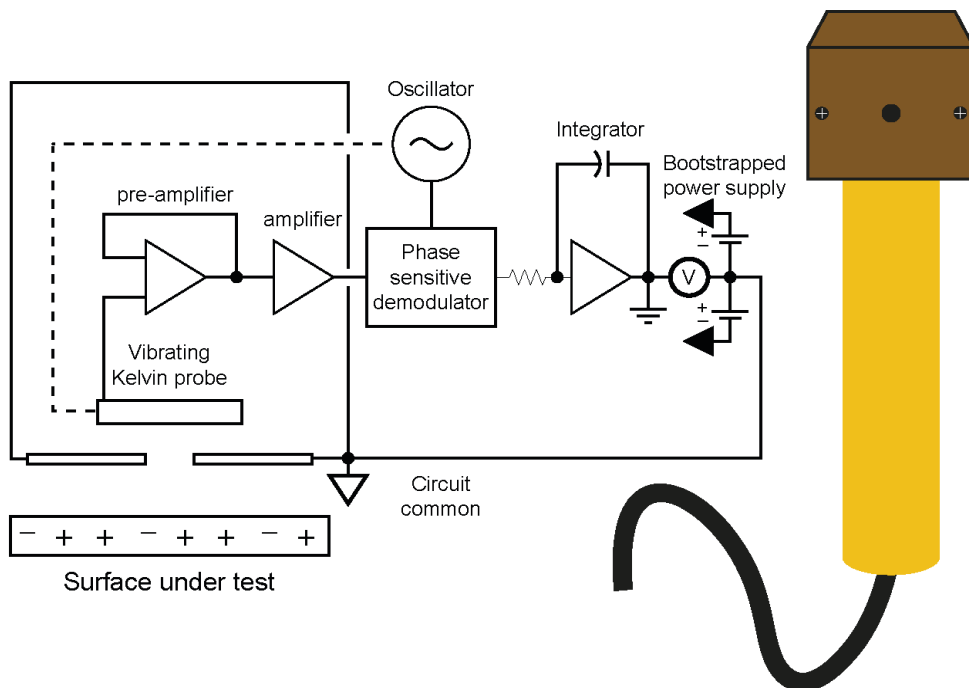
$$D = D_0 + D_{RMS} \sin(\omega t) \text{ (Equação 15)}$$

Ao substituir esse resultado na equação 5, temos:

$$i(t) = \Delta V \epsilon \epsilon_0 A \frac{D_{RMS} \omega \cos(\omega t)}{(D_0 + D_{RMS} \sin \omega t)^2} \text{ (Equação 16)}$$

Os métodos de vibração empregam uma técnica de medição de potencial ou carga superficial conhecida como método da nulidade (NORAS, 2002). Esse método envolve a aplicação de uma tensão V_1 ao eletrodo, que pode ser ajustada para obter um valor desejado da diferença de potencial (ΔV). Quando $V_1 = V_2$ $\Delta V = 0$ V. Assim, não há fluxo de carga no eletrodo. Com base nessas informações e analisando a equação 11, podemos observar que sempre que $i = 0$ A durante o movimento do eletrodo, o potencial do eletrodo será igual ao potencial da superfície carregada.

Figura 7 – Representação circuito de realimentação para eletrodo de Kelvin



Fonte: Adaptado de LORENZETT (2021).

A figura acima mostra um típico circuito de realimentação usado para acionar o eletrodo de Kelvin, o circuito recebe sinal da corrente que é demodulado e usado para acionar a tensão de polarização de compensação que é aplicada ao eletrodo vibratório, dessa maneira, a diferença de potencial entre os eletrodos é anulada e o potencial da superfície pode ser encontrado lendo-se o valor do potencial de compensação.

A técnica de medição de cargas ou potenciais superficiais utilizando o método de Kelvin apresenta várias vantagens. Em primeiro lugar, o método é não invasivo, o que significa que não há contato físico com a superfície testada, preservando assim o seu estado original. Além disso, devido à compensação da diferença de potencial, o campo elétrico entre o conjunto do eletrodo e a superfície é anulado. Isso é especialmente importante, pois garante que a presença do instrumento de medição não perturbe a distribuição de carga superficial existente, mantendo a integridade da amostra e evitando interferências externas indesejadas.

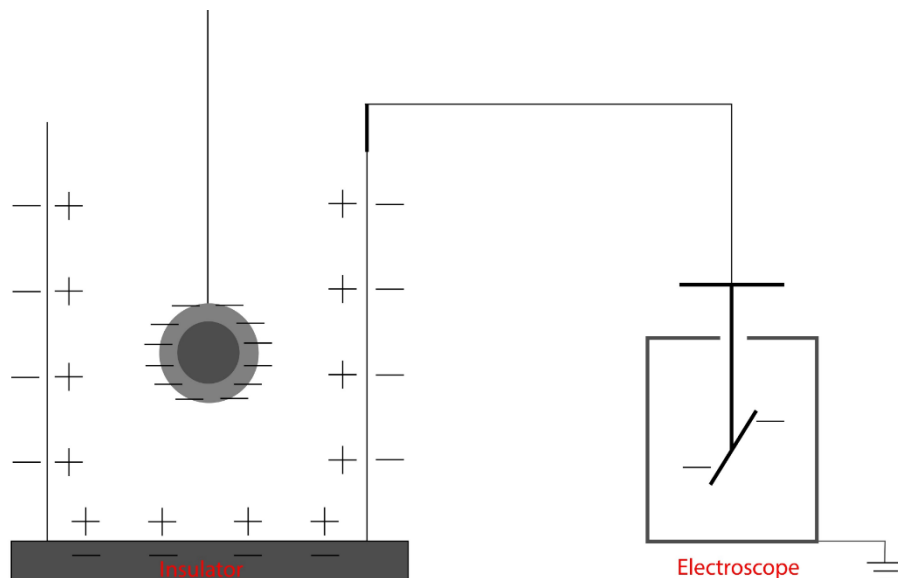
Ainda, segundo LORENZETT *et al.*, 2021 a distância de operação do eletrodo de Kelvin, com máxima precisão, vai de 2 a 15mm da amostra.

3.7 COPO DE FARADAY

Uma gaiola de Faraday é um invólucro condutor elétrico sem furos. Quando uma gaiola de Faraday de metal, inicialmente descarregada é conectada eletricamente ao solo, qualquer carga colocada dentro dela cria uma carga de imagem de sinal oposto, que se distribui na superfície interna do condutor de forma que o campo elétrico dentro da gaiola de metal permaneça zero. Na ausência de carga dentro da gaiola de Faraday, mesmo que a gaiola de Faraday seja colocada dentro de uma região de campo elétrico, não haverá campo elétrico no interior. A gaiola de Faraday age como um escudo eletrostático para qualquer campo elétrico externo.

Como mostra a imagem 8, uma gaiola de Faraday pode ser usada para medir carga líquida de um objeto, basta estar conectada a um eletroscópio. O físico Michael Faraday foi o inventor e o primeiro cientista que utilizou uma gaiola dessas para medir carga, no seu experimento intitulado "*Faraday 's ice pail experiment*" realizado no ano de 1843.

Figura 8 - Ilustração do experimento de Faraday



Fonte: Elaborado pelo autor.

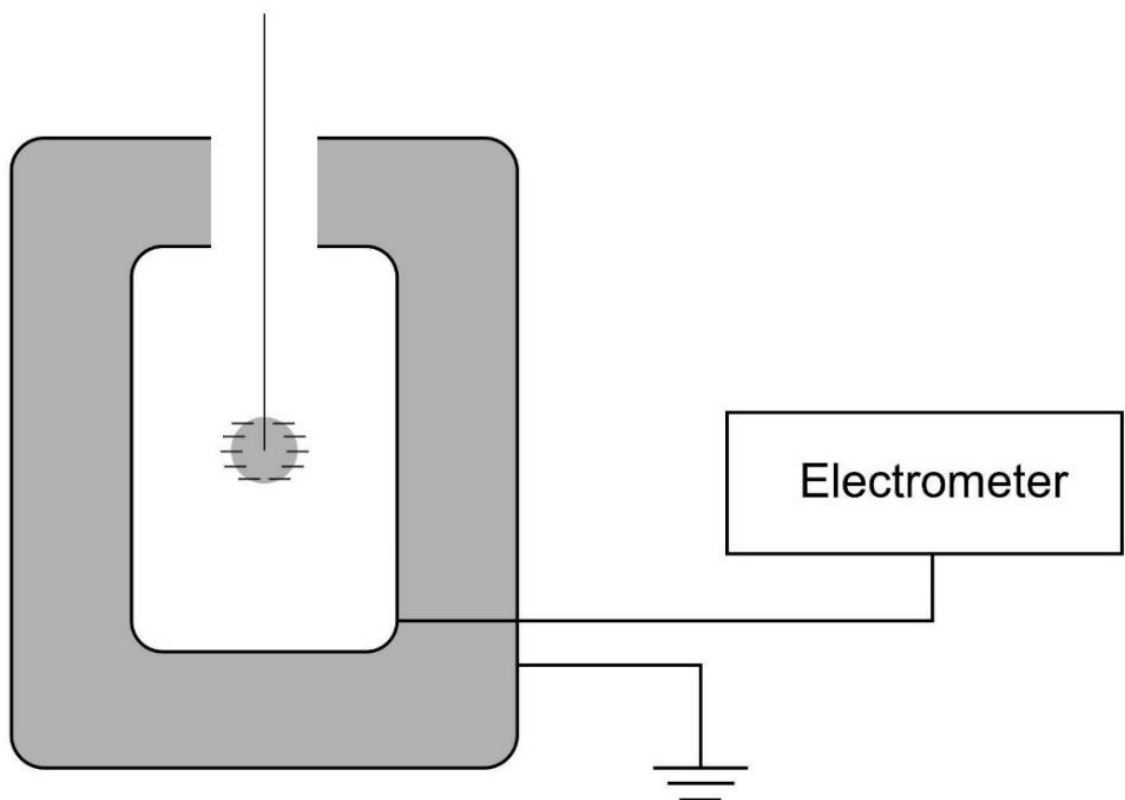
O experimento do balde de gelo pode ser descrito da seguinte forma: Faraday pegou um balde de gelo de metal vazio e neutro (gaiola de Faraday) que estava eletricamente isolado, mas conectado a um eletroscópio descarregado.

Em seguida, ele suspendeu uma esfera de metal carregada por um fio de seda longo dentro do balde de gelo de metal eletricamente isolado (gaiola de Faraday). Isso fez com que a agulha do eletroscópio se desviasse, como mostrado na Figura 8. A esfera de metal carregada com carga $-q$ induziu uma carga de sinal oposto, mas de magnitude total igual, na superfície interna do balde de gelo de metal, $+q$, causando

uma carga total do mesmo sinal e de magnitude igual, $-q$, na superfície externa do balde de gelo e no eletroscópio, assumindo que inicialmente não havia carga presente. O grau de desvio da agulha era independente da posição da esfera carregada dentro da gaiola de Faraday. Quando a esfera de metal foi retirada do balde, sem tocar no balde, a agulha do eletroscópio voltou à sua posição original de carga zero.

Para nossas medidas de carga, utilizamos um equipamento chamado copo de Faraday, construído com base no que foi descrito acima, porém mais rebuscado, para medidas de carga com precisão alta. Este consiste em um arranjo experimental utilizado para medir carga líquida em dielétricos, como ilustra a figura 9

Figura 9 - Ilustração de um copo de Faraday



Fonte: Elaborado pelo autor.

O copo de Faraday consiste em dois cilindros metálicos dispostos concêntricamente e isolados entre si por látex. O cilindro externo é aterrado e serve como proteção eletrostática contra interferência externa. O cilindro interno funciona como a gaiola de Faraday exemplificada anteriormente, quando um objeto carregado é colocado dentro dele o mesmo induz cargas de sentido contrário em suas paredes internas, essas por sua vez são medidas por um eletrômetro conectado ao cilindro interno, fazendo com que a carga líquida da amostra seja registrada no painel do eletrômetro digital.

4 EXPERIMENTAL

Para a realização das medidas de eficiência de filtragem das máscaras, desenvolvemos, em laboratório, uma configuração (do inglês *setup*) experimental que faz a contagem do número de partículas que conseguem vencer a barreira filtrante das máscaras utilizando equipamentos disponíveis em nosso laboratório. A imagem 11 ilustra o *setup* de medida e apresenta fotos dos equipamentos utilizados para a montagem de tal.

Inicialmente, utilizamos um sensor de qualidade do ar PMS 7003 para realizar a contagem de partículas, uma vez que não tínhamos acesso a um sensor de partículas comercial devido às restrições comerciais durante a pandemia. A fim de simular o rosto humano, optamos por utilizar uma cabeça de manequim conectada por tubos de poliuretano termoplástico (TPU) ao sensor de partículas. Esse, por sua vez, estava conectado a uma bomba de vácuo com o mesmo tipo de tubo, formando assim um sistema que simula a inspiração de ar do ser humano.

Para estabelecer um fluxo de ar constante que passasse pelo sistema de medição, utilizamos uma bomba de vácuo com um fluxo máximo de 30 l/min, que é definido como a média de vazão da respiração humana. Além disso, empregamos um sensor para assegurar que o fluxo de ar estivesse de acordo com a norma de teste ABNT para máscaras do tipo PFF2, que é o padrão americano equivalente as máscaras N95 que utilizamos, ambas têm sua principal definição pela eficiência mínima de 95% de filtragem para partículas do ambiente.

A eficiência de filtragem (n) foi calculada com base na proporção de partículas com 0,3 μm por unidade de tempo que passaram pelo sensor, tanto com a proteção da máscara ($N_{máscara}$) quanto sem ela ($N_{ambiente}$). Utilizamos a seguinte equação para determinar o valor de n :

$$n = \left(1 - \frac{N_{máscara}}{N_{ambiente}}\right) * 100$$

A figura 11 apresenta a configuração utilizada nos experimentos de eficiência, juntamente com as imagens dos equipamentos empregados. Em nosso laboratório, desenvolvemos um código para Arduino que realiza a leitura dos dados coletados pelo sensor e envia para o computador, onde um software, escrito em Python, desenvolvido no nosso laboratório gera um gráfico da contagem de partículas. Para calcular a eficiência, o software compara os valores de fluxo de partículas. A imagem a seguir exibe a interface do nosso software durante as medidas descritas acima. O código fonte do software está disponível no apêndice 1.

Figura 10 – a) Captura de tela do software de medidas de eficiência; b) Captura de tela do cálculo de eficiência feito pelo software

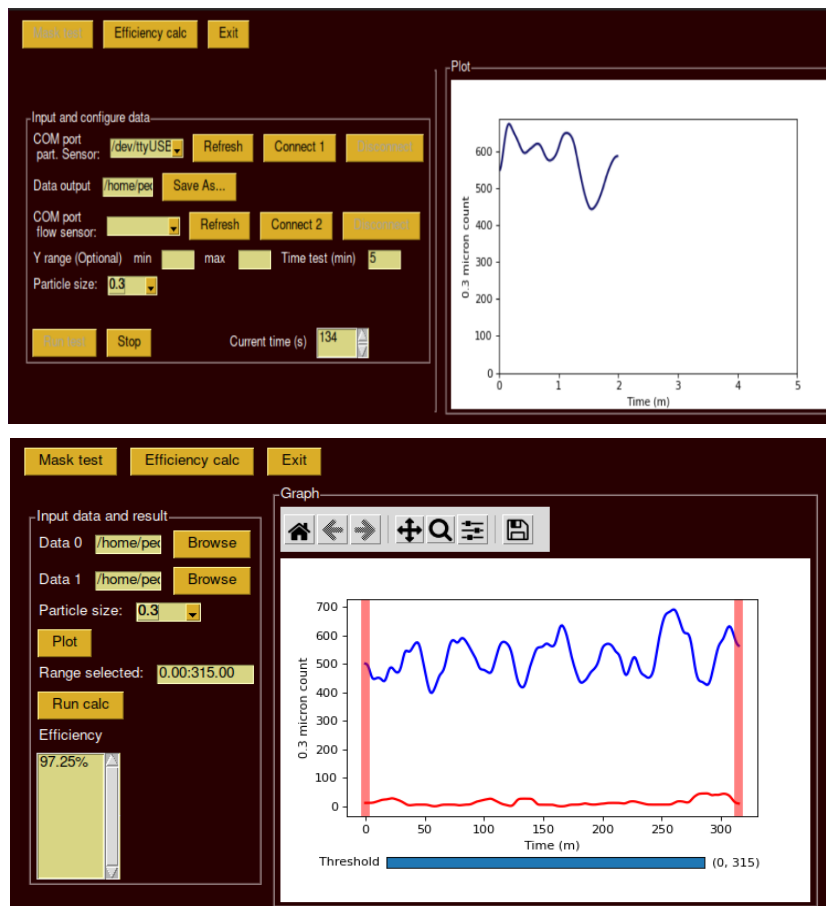
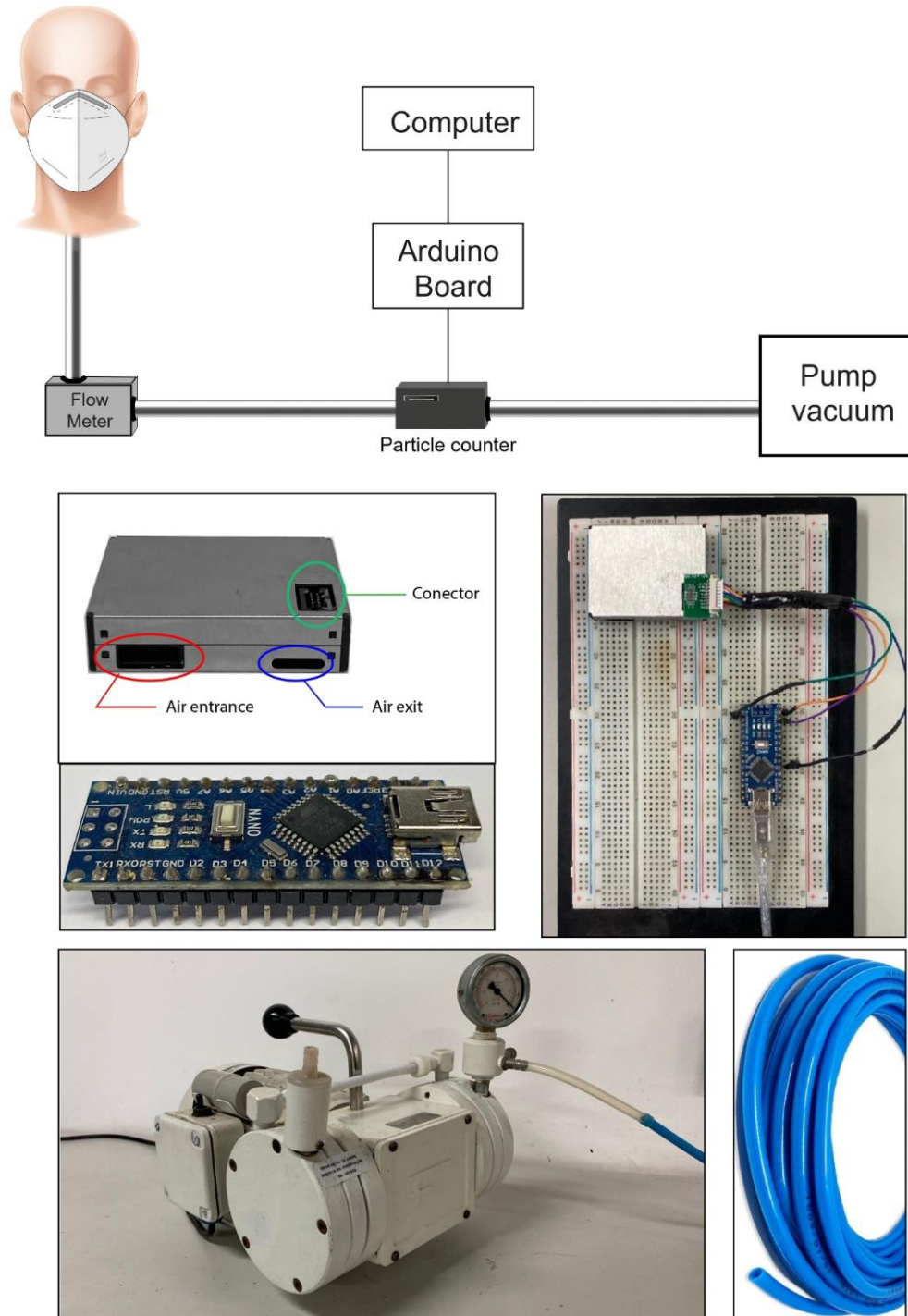


Figura 11 - Configuração experimental para as medidas de eficiência



Fonte: Elaborado pelo autor.

É importante mencionar que a máscara utilizada não se encaixava perfeitamente na cabeça do manequim, o que resultava em fluxos de ar gerados pelas laterais. Para mitigar esse problema e garantir resultados reprodutíveis, decidimos selar as bordas da máscara com fita adesiva.

4.1 METODOLOGIAS DE DESINFECÇÃO

A reutilização das máscaras N95 requer inicialmente a descontaminação das mesmas, para que os vírus e bactérias acumulados em suas camadas não infectem os usuários ao reutilizarem as mesmas. Seleccionamos dois métodos que vêm sendo muito aplicados na literatura e podem ser realizados por qualquer pessoa, sem necessidade de equipamentos especiais. O primeiro, e mais eficiente, segundo a literatura, e corroborado por experimentos preliminares realizados em nosso laboratório, é a desinfecção por etanol 90% que elimina 99% das bactérias e vírus. O segundo, que também é bastante eficaz, é feito com água fervendo, que retira entre 95% e 99% dos agentes microbianos.

O processo de desinfecção, para os dois métodos consiste em: imersão em etanol a 99% por 5 minutos; banho em água fervente por 10 minutos. Posteriormente, as máscaras foram estendidas em um varal metálico aterrado, impedindo que cargas sejam induzidas na superfície de suas camadas, que por sua vez está dentro de uma caixa de acrílico que isola o sistema do ambiente externo. O processo de secagem leva, em média, 30 minutos para as máscara lavados com água fervente e 10 minutos para mascara lavada com etanol.

4.2 METODOLOGIAS DE RECARGA

O nosso principal método de eletrização das máscaras N95 consiste em descargas realizadas com o dispositivo piezoelétrico ilustrado na figura 12 (Zerostat®, Aldrich). Ao pressionar o gatilho da pistola, o cristal piezoelétrico é comprimido, gerando uma diferença de potencial que é transferida através de uma agulha,

presente na ponta da Zerostat, ionizando o ar positivamente. Ao soltar o gatilho, é gerada uma diferença de potencial oposta, resultando na ionização do ar com cargas negativas.

Estudos de descarga corona e espectrometria de massas, concluíram que os portadores de carga mais comuns responsáveis pela eletrização da atmosfera são íons do tipo $H(H_2O)_n^+$ com n variando no máximo até 8. Portanto, são íons dessa natureza que são adsorvidos pelas camadas da máscara acarretando em acúmulo de carga, que por sua vez gera um potencial eletrostático característico em cada camada, tornando-as muito semelhantes a um eletreto.

Para realizar a eletrização, as máscaras foram posicionadas em um suporte de alumínio aterrado, conforme apresentado na figura 13. O dispositivo piezoelétrico foi mantido a uma distância de 10 cm e inclinação de 12 graus acima de cada peça. Na parte interior da máscara, que vai em contato com o rosto, foram realizados 10 disparos negativos, 5 do lado direito e 5 do lado esquerdo, então a máscara foi virada e outros 10 disparos, positivos dessa vez, foram feitos seguindo o mesmo procedimento anterior.

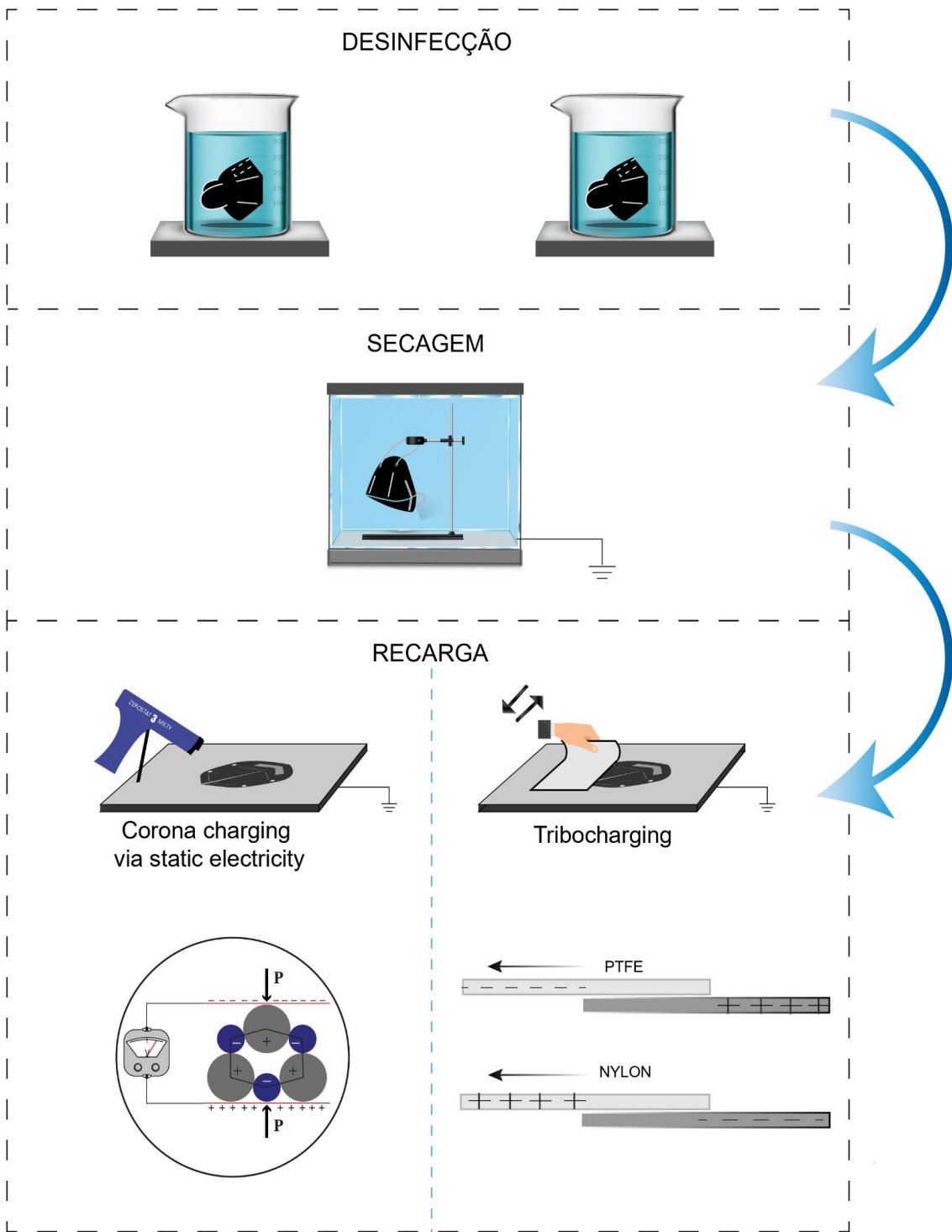
Figura 12 - Pistola ZeroStat®, Sigma-Aldrich.



Em adição a esse método, aplicamos também processos de triboeletrização nas máscaras. Foram usadas placas de PTFE e NYLON para recarga por atrito. Esses materiais foram escolhidos pois sabemos, a partir da literatura, que o atrito dos mesmos com o polipropileno gera cargas positivas e negativas na amostra, respectivamente.

Para eletrização por atrito, a máscara foi posicionada em cima de uma base de alumínio aterrada, que impede transferência de cargas não oriundas da triboeletrização, na sequência, utilizando-se luvas antiestáticas com o mesmo propósito do aterramento da base, uma amostra quadrada de PTFE de 5cm de aresta é atritada com face exterior da máscara em 5 ciclos fricção para frente e para trás, o mesmo processo é realizado no lado interno da máscara. Com uma amostra de Nylon do mesmo tamanho foi aplicada exatamente a mesma metodologia já descrita para o PTFE. Essas técnicas estão ilustradas na figura 13.

Figura 13 - Processo de desinfecção, secagem e recarga



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 MEDIDAS ELETROSTÁTICAS

As medidas eletrostáticas de potencial e carga foram feitas em amostras das máscaras N95, essa necessidade surgiu pois os equipamentos utilizados não comportam a máscara em sua totalidade, no entanto as características eletrostáticas e físicas das camadas não foram afetadas. Para confecção das amostras, cada uma das quatro camadas foi separada, utilizando-se luvas, pinças e mantas anti estáticas, após foram recordados os quadrados de 3cm de aresta. Cada máscara tirada da embalagem deu origem a 12 amostras, 3 para cada camada, tornando possível realização de triplicatas das medidas.

4.3.1 Mapeamento de potencial eletrostático

O sistema utilizado para a determinação do potencial eletrostático das amostras é composto por um eletrodo de Kelvin, com faixa de detecção de -1000 V a 1000 V. Esse eletrodo é integrado a um sistema mecânico capaz de movimentar-se em duas dimensões (eixos x e y), conforme ilustrado na figura 14, e sua operação é controlada por um software desenvolvido internamente pelo nosso Grupo de pesquisa. Para o registro do potencial, empregamos um voltímetro digital que transmite os dados para um software responsável por armazená-los no computador

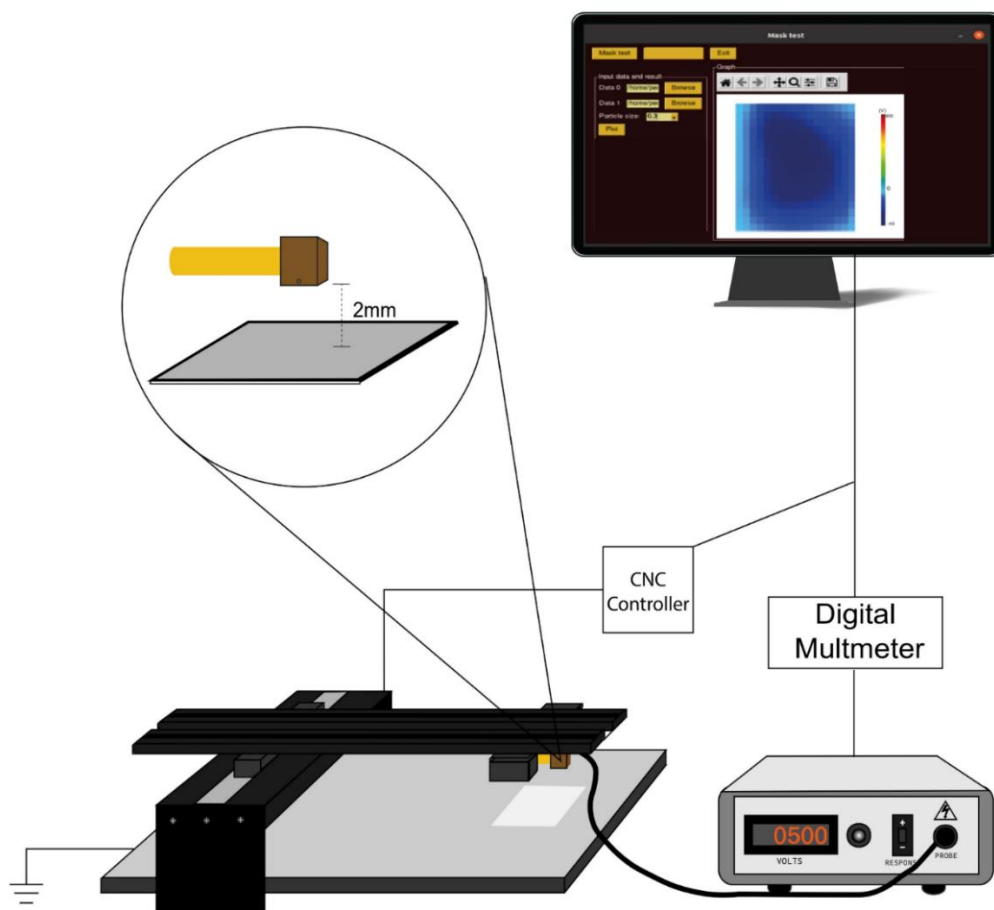
As amostras a serem medidas foram colocadas em cima de uma placa metálica aterrada, posicionada a uma distância de 2 mm abaixo do eletrodo. Todo esse sistema é montado dentro de uma caixa de alumínio também aterrada, que serve como blindagem eletrostática para realização do procedimento sem interferências externas. Registramos os valores de potencial eletrostático em diferentes posições do eletrodo. Repetimos esse processo para todas as amostras a serem analisadas.

Com os dados registrados, transferimos as informações para o software responsável pela criação dos mapas de potencial. Utilizando os valores para

diferentes posições do eletrodo de Kelvin, construímos mapas de potencial eletrostático para cada amostra. Esses mapas permitiram a análise da distribuição espacial do potencial nas amostras

A resolução espacial das medidas foi de aproximadamente 1,5 milímetros, o que possibilitou a construção de mapas de potencial com 400 pontos distintas plotadas para cada amostra das camadas da máscara.

Figura 14 - Setup para os mapeamentos eletrostáticos



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2 Medidas de dissipação

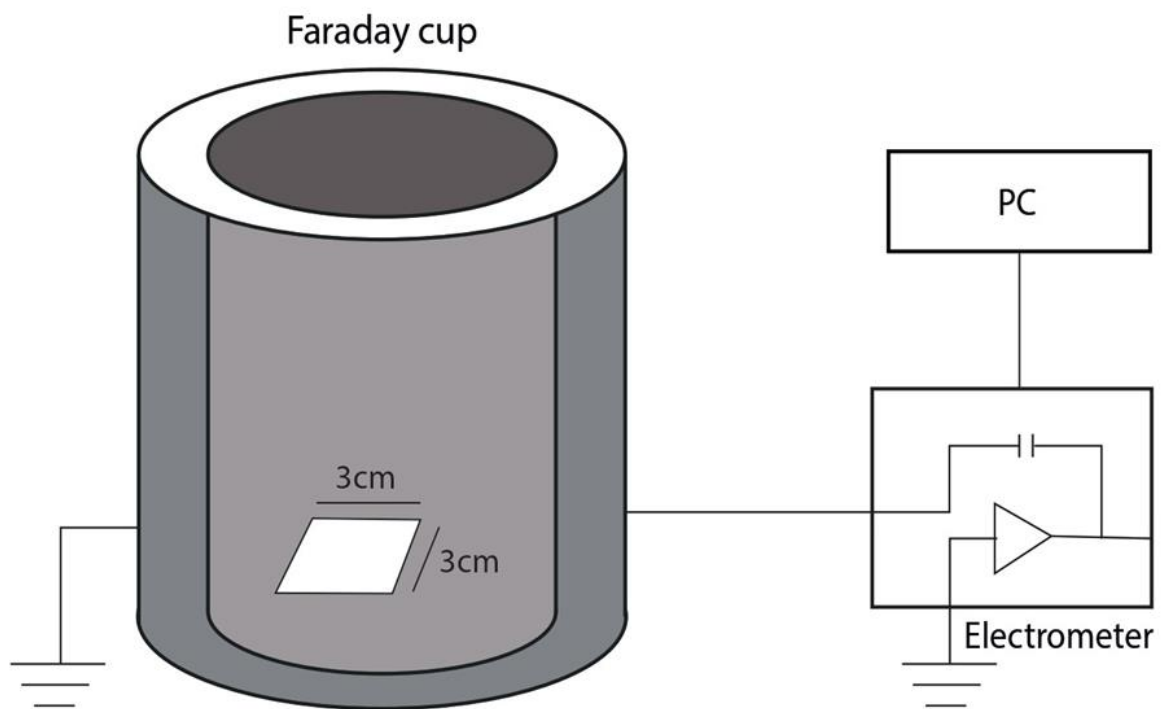
Para realizar as medidas de dissipação de carga nas amostras da camada eletrizada, de polipropileno não tecido, das máscaras N95, implementamos um sistema semelhante ao previamente descrito. No referido sistema, as amostras foram posicionadas sobre uma placa de alumínio aterrada, enquanto o eletrodo de Kelvin foi fixado a uma distância constante de 2 mm acima das amostras. Os dados referentes à dissipação de carga foram coletados por meio de um voltímetro e registrados em um computador para posterior análise. Essa configuração experimental proporcionou uma avaliação da capacidade de dissipação eletrostática das amostras, tais informações são de extrema relevância para a compreensão do desempenho de filtragem eletrostática nas máscaras

4.4 MEDIDAS DE CARGA COM COPO DE FARADAY

As medidas de carga líquida das amostras foram feitas utilizando um copo de faraday construído em nosso laboratório, e com funcionamento semelhante ao descrito na seção anterior, como pode ser visto na ilustração da figura 15.

O nosso copo de Faraday é composto por um cilindro de alumínio com aproximadamente 14 cm de diâmetro por 20 cm de altura, fixado concentricamente dentro deste, outro cilindro de alumínio com 10 cm de diâmetro e 14cm de altura, ambos estão separados por placas flexíveis de látex que preenchem todo espaço vazio, isolando eletricamente um do outro. O cilindro externo tem um conector onde um fio terra é conectado como proteção eletrostática contra interferências externas. As amostras são colocadas em suspensão dentro do copo de faraday, o que faz com que o cilindro interno induza cargas, de sinal oposto às da amostra, nas suas paredes internas. O eletrômetro conectado ao cilindro interno mede então a carga líquida da amostra, que é registrado no computador para plotagem dos gráficos posteriormente.

Figura 15 - Setup para medidas de cargas elétricas



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 MEDIDAS DE EFICIÊNCIA

Utilizando o *setup* descrito na figura 11 foram realizadas as medidas da eficiência de filtragem das máscaras para doenças respiratórias, como a covid-19, que nos termos da ABNT significa a porcentagem de proteção contra os aerossóis, que são partículas muito pequenas, da ordem de 3 nanômetros. Inicialmente foi avaliada a eficiência da máscara N95 nova, com o intuito de aferir se o *setup* era confiável e nos daria os valores nominais de eficiência das mesmas.

Subsequentemente foram realizadas as medidas de eficiência para as máscaras desinfetadas, seguindo os protocolos estabelecidos na seção 4.2 com etanol e água fervente. Da mesma forma, foram medidas as eficiências das máscaras eletrizadas seguindo o método de recarga utilizando a zerostat. Dessa maneira podemos comparar os resultados atingidos após a aplicação do nosso método de recarga, com os valores de eficiência de uma máscara nova.

Os resultados obtidos são mostrados no gráfico de barras e na tabela apresentados abaixo. A barra amarela representa o valor de eficiência da máscara nova, em seguida temos os valores de eficiência, em laranja para a máscara desinfetada com água e em azul para desinfecção com etanol, ambas sem recarga do filtro eletrostático. As últimas duas barras representam os valores de eficiência para máscaras recarregadas com a Zerostat e que passaram pelos processos de desinfecção com água e etanol respectivamente. Analisando o gráfico e a tabela construída a partir de seus dados, notamos que as máscaras perdem aproximadamente de 15% a 16% de eficiência após a desinfecção, o que torna maior a chance de contágio caso uma pessoa a use nessas condições. Contudo, após a recarga a eficiência é não só retomada, como existe um pequeno aumento na porcentagem de partículas barradas, levando a eficiência a valores próximos de 97% quando é realizada a desinfecção com etanol seguida da recarga com a pistola

piezoelétrica.

Esses resultados são a primeira indicação de que o processo de restauração eletrostática do filtro via descarga corona, proveniente do cristal piezoelétrico presente na zerostat, funciona de maneira satisfatória e que cumpre os requisitos da ABNT para as máscaras N95.

Figura 16 - Resultados de eficiência

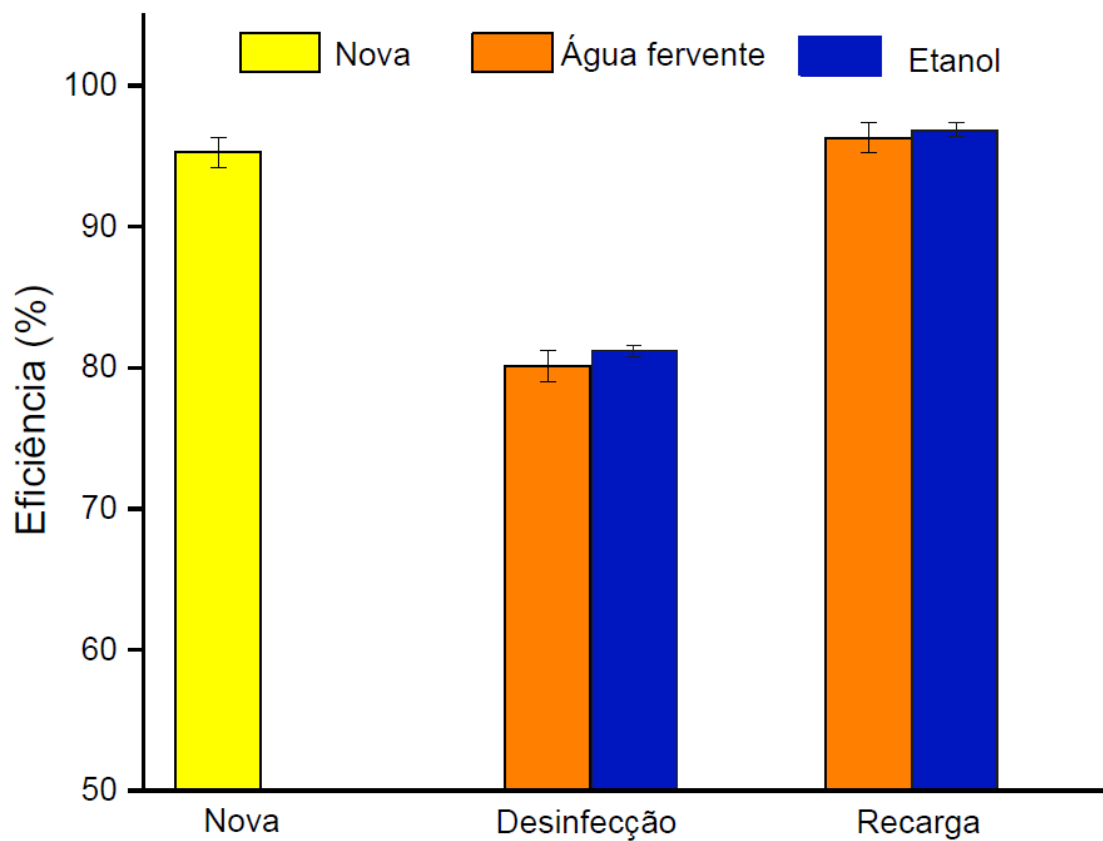


Tabela 1 - Resultados extraídos do gráfico 1: Medidas de eficiência.

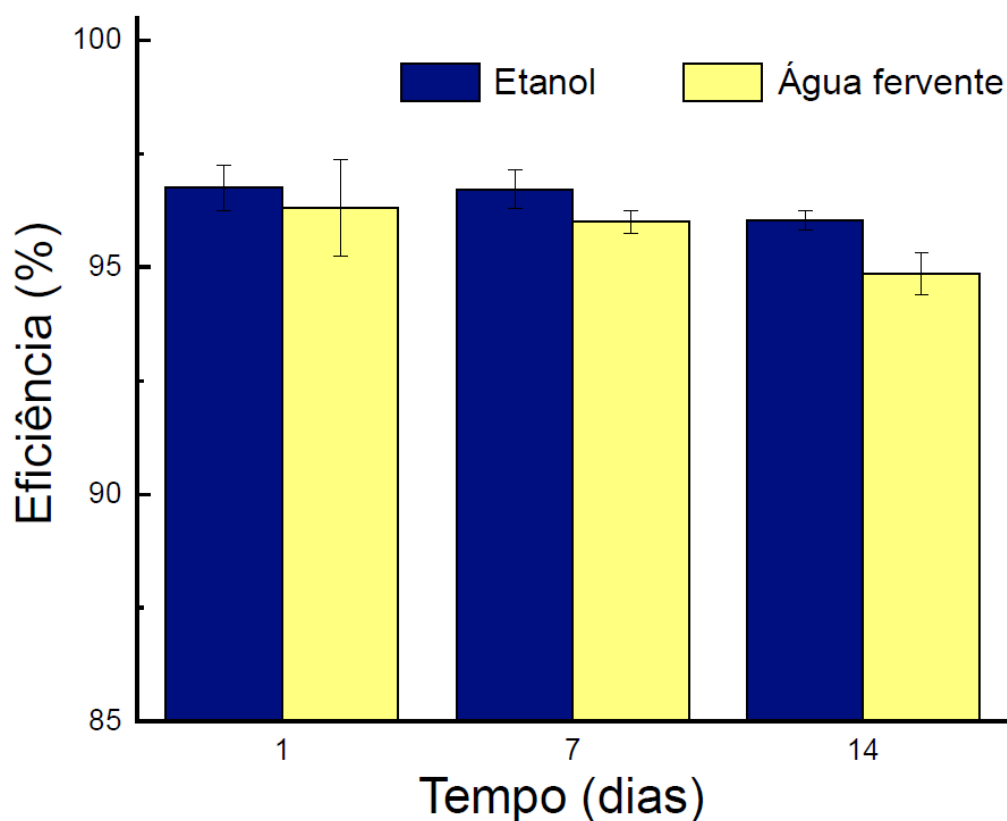
Máscara	Eficiência (%)	Desvio padrão
Nova	95.35	0.10
Etanol	81.10	0.39
Água fervendo	80.13	1.10
Zerostat (etanol)	96.76	0.50
Zerostat (Água)	95.31	1.06

A partir dos primeiros resultados percebemos que, tanto a desinfecção com etanol quanto com água fervente, apresentaram resultados de eficiência muito satisfatórios após a recarga. Tendo isso em vista e a fim de analisar o comportamento dos valores de eficiência em períodos de tempo mais longos, realizamos os processos de lavagem com água e etanol e eletrização com a Zerostat, e fizemos as medidas de eficiência a cada 7 dias, durante esse período as máscaras ficaram em exposição a atmosfera pendurada em um varal aterrado dentro de um ambiente controlado no nosso laboratório. Vale ressaltar que para simular a exposição natural que a máscara teria ao ambiente não utilizamos nenhum controlador de umidade visto que em uma semana a umidade irá variar de qualquer maneira, tornando o experimento mais realista possível.

O gráfico da figura 17 apresenta os valores dessas eficiências para máscaras desinfectadas e recarregadas com a Zerostat. Conseguimos perceber com certa facilidade que a eficiência vai diminuindo com o tempo, como já era esperado, devido ao contato com o meio. Contudo, ao analisarmos com cuidado os dados conseguimos perceber que para as máscaras desinfectadas com etanol apesar da diminuição gradativa da eficiência, após 14 dias os valores não ficaram de 96%. Já para as máscaras lavadas com água fervente esses valores diminuíram mais rapidamente, chegando a ficar um pouco abaixo dos 95% no 14º dia após a recarga.

Esses resultados apresentam conformidade com os discutidos anteriormente, onde por mais que pequena a diferença, os valores de eficiência para as máscaras que passaram pela desinfecção com água fervendo, são sempre menores quando comparados às máscaras desinfectadas com etanol. Para além, esses resultados nos indicam que mesmo após 14 dias o filtro eletrostático das máscaras ainda está funcionando com alta eficiência. Os baixos valores de desvio padrão das medidas apresentadas até aqui, mostram que elas são confiáveis e reproduzíveis se necessário.

Figura 17 - Resultados de eficiência vs dias



Os resultados apresentados até aqui demonstram que os valores de eficiência são melhores para as máscaras que passaram pelo processo de desinfecção com etanol. Essa diferença se torna mais evidente quando analisamos esse último gráfico, tendo em vista que 14 dias após a recarga, a eficiência para as máscaras que passaram pelo processo de desinfecção com água fervendo apresentam uma diferença negativa de 2% em relação ao etanol, evidentemente essa discrepância não é tão significativa em um escopo geral, contudo o valor atingido após o 14 dia é menor que o valor mínimo de 95% estipulado pela ABNT.

5.2 MEDIDAS ELETROSTÁTICAS

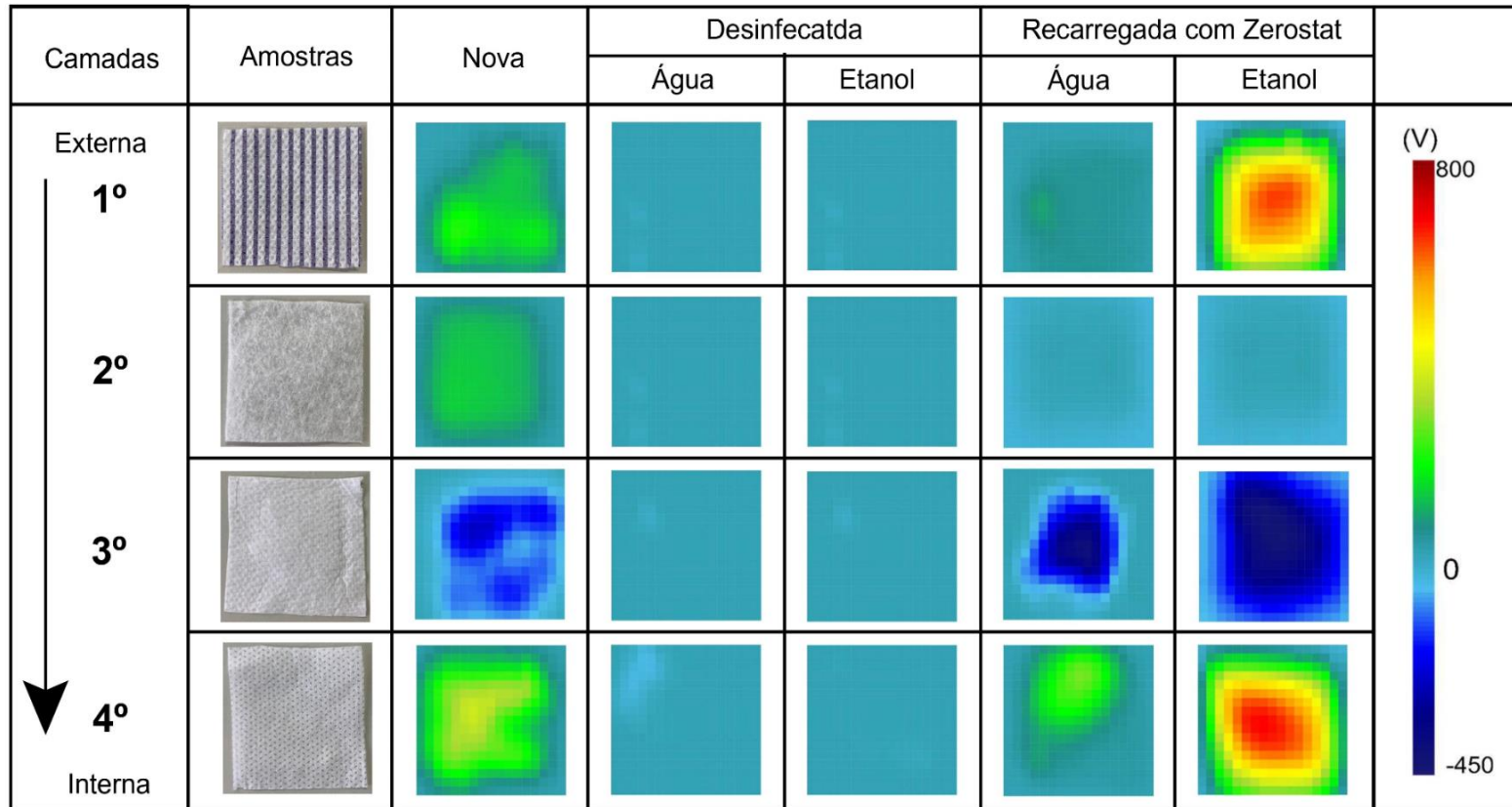
Os mapas de potencial eletrostático foram feitos a partir da metodologia descrita na seção 4.3, cada tipo de máscara teve todas suas camadas varridas pelo eletrodo de Kelvin resultando nas imagens compiladas na figura 18. Ao observarmos esses resultados, fica evidente que as camadas adjacentes ao filtro eletrostático (3ª camada) também se eletrizam de forma estática em suas superfícies. Isso já era esperado, uma vez que os processos de triboeletrização são desencadeados na interface de contato entre as camadas, resultando em um gradiente de potencial entre elas. Esse fenômeno acaba se tornando um aliado importante na captura das partículas contaminantes.

Além disso, podemos notar claramente que tanto o processo de desinfecção com etanol quanto com água fervente, além de eliminar os agentes contaminantes, também eliminam completamente o perfil eletrostático das máscaras, fazendo com que todas as camadas fiquem descarregadas. Ao compararmos esses resultados com os valores de eficiência previamente apresentados, podemos perceber a relação direta entre a perda de eficiência nas máscaras descontaminadas e a anulação do potencial eletrostático em suas camadas. Isso evidencia a necessidade da aplicação de um processo de eletrização posterior à desinfecção.

Após a utilização do Zerostat para a eletrização, notamos uma recuperação dos potenciais eletrostáticos, principalmente para as máscaras lavadas com etanol. As máscaras lavadas com água também apresentam uma recuperação em sua camada eletrostática, porém com uma efetividade menor em comparação ao etanol. No entanto, mesmo assim, quando comparamos com a eficiência, percebemos que essa retomada de potencial é suficiente para restaurar a capacidade de filtragem eletrostática para ambos os métodos. No entanto, a diferença na aderência das cargas em máscaras recarregadas que passaram por diferentes tipos de desinfecção pode explicar a maior perda de eficiência observada na desinfecção com água, conforme mostrado no gráfico da figura 17.

Além da análise da distribuição de cargas na superfície mostrada pelos mapas, também podemos observar a intensidade do potencial, representada pela barra de cores à direita da imagem 18. Nesse momento, é importante direcionarmos nosso foco especialmente para a 3ª camada, que sabemos ser responsável pelo barramento eletrostático. Ambos os mapas das máscaras recarregadas apresentam uma intensidade de potencial maior do que a máscara nova, o que está de acordo com a literatura e com o que já foi mencionado no texto, indicando que a intensidade desses potenciais está diretamente relacionada à capacidade de filtragem. Essas considerações reforçam cada vez mais a eficácia do método proposto aqui.

Figura 18 - Mapas de potencial eletrostáticos das amostras para as 4 camadas da máscara N95.



As medições de carga sustentam os resultados previamente discutidos, embora seja importante mencionar a sensibilidade dos equipamentos e a conhecida dificuldade em realizar medidas de carga líquida em dielétricos, o que pode ter afetado as medições e resultou em valores elevados de desvio padrão. No entanto, os gráficos apresentados na figura 19 corroboram com os resultados anteriores, uma vez que os valores de carga, em especial o sinal da carga líquida no filtro da máscara recarregada, se assemelham aos da máscara nova.

Figura 19 - Medidas de carga líquida das amostras do filtro eletrostático, desinfetadas com etanol

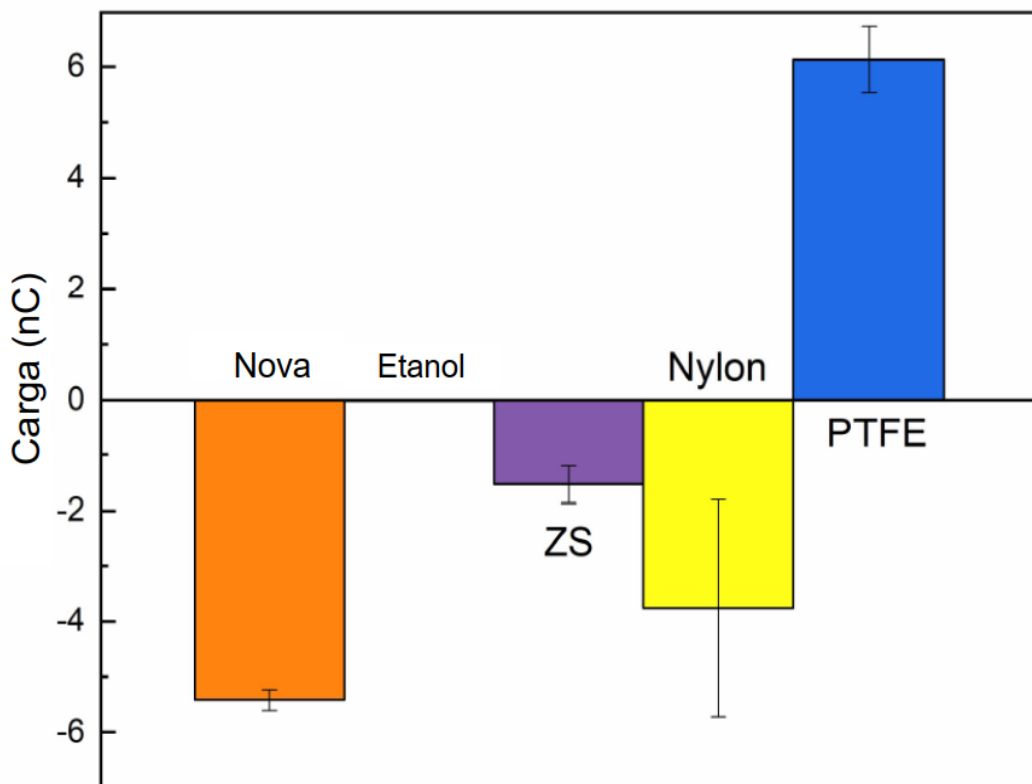
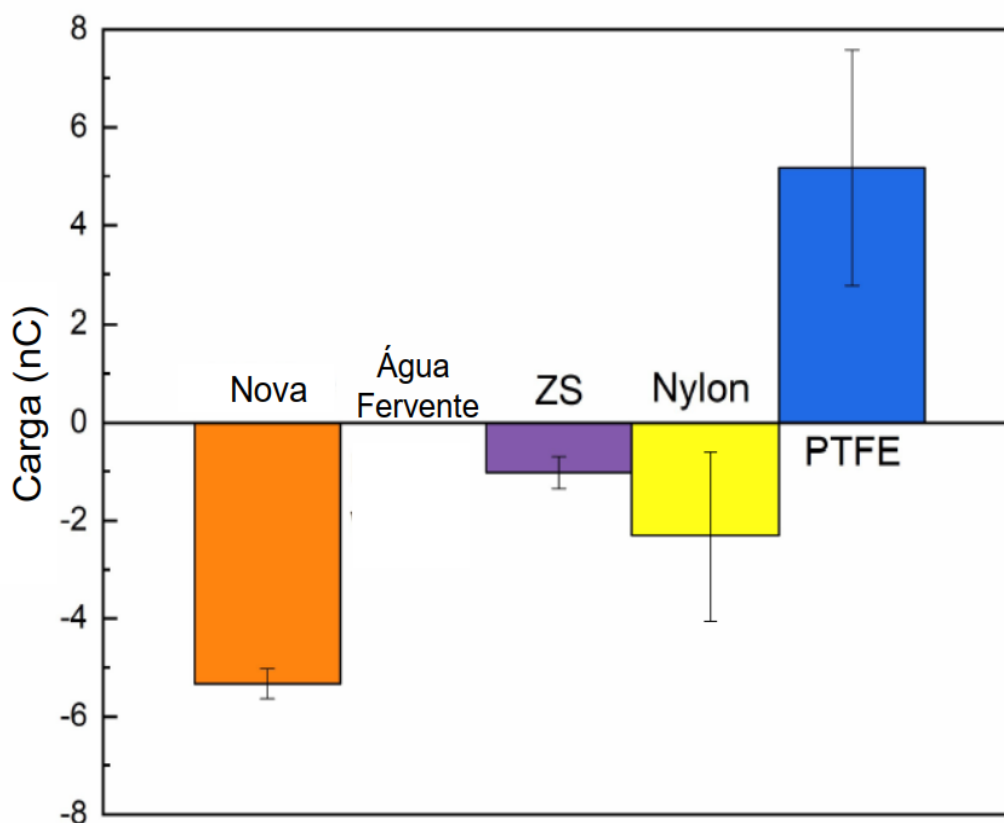


Figura 20 - Medidas de carga líquida das amostras do filtro eletrostático, desinfetadas com água fervente



O gráfico 21 representa a evolução do potencial eletrostático do filtro eletrostático da máscara N95 após passar por desinfecção com etanol e recarga com Zerostat. Para fins de análise, estabelecemos o potencial atingido imediatamente após a eletrização como referência, atribuindo-lhe o valor de 100%. A partir desse ponto, parametrizamos os valores obtidos em relação a esse valor de referência, visando analisar o quanto de carga é dissipada com a exposição prolongada à atmosfera ambiente. Já o gráfico 22 apresenta o comportamento da eficiência da máscara recarregada ao longo do tempo quando exposta ao meio ambiente, estando sujeita à mesma dissipação de carga. Nesse caso, buscamos observar como a eficiência da máscara se mantém ou varia ao longo do tempo, levando em consideração a dissipação do potencial eletrostático.

Figura 21 - Gráfico de dissipação do potencial eletrostático do filtro eletrostático.

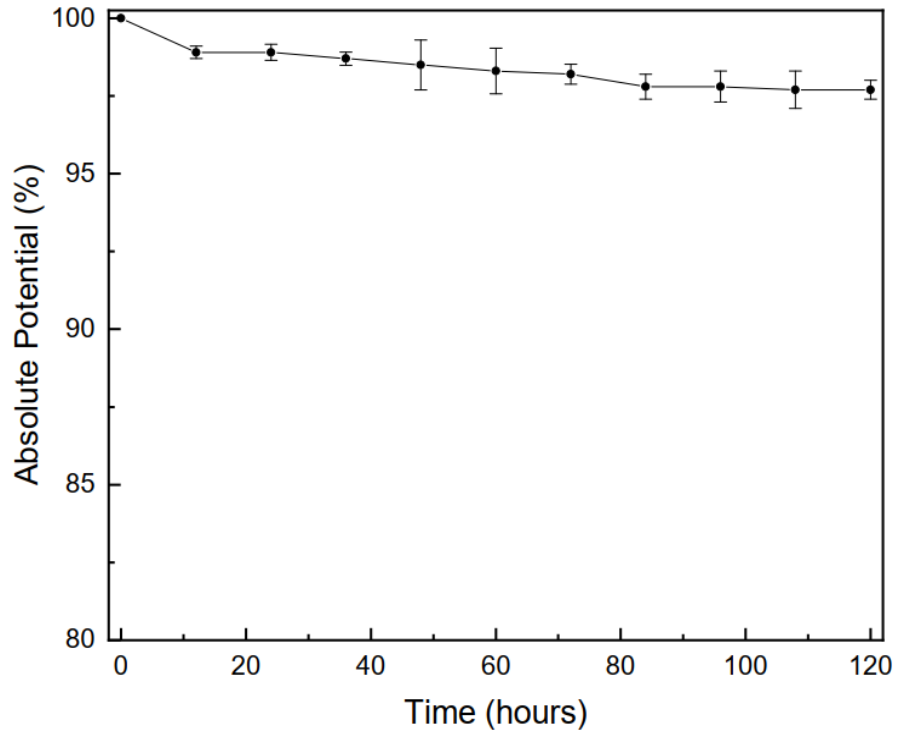


Figura 22 - Gráfico de variação da eficiência com o tempo

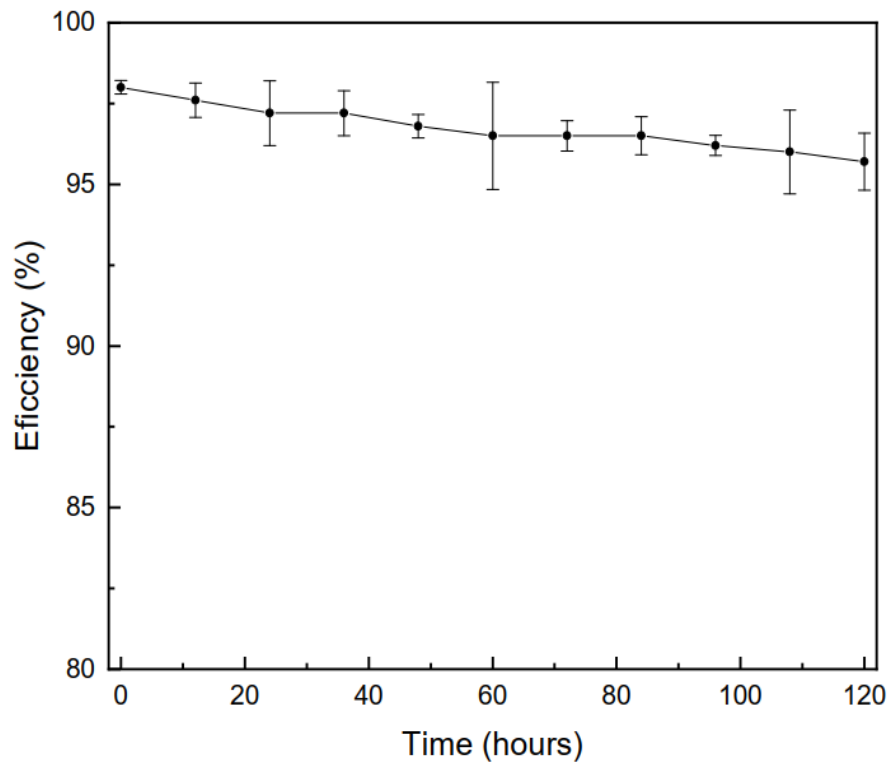


Tabela 2 - Resultados extraídos dos gráficos: Medidas da variação da eficiência e potencial eletrostático com o tempo

Tempo (h)	Potencial absoluto (%)	Desvio padrão	Eficiência (%)	Desvio padrão
0	100	0.00	98.0	0.21
12	98.9	0.20	97.7	0.53
24	98.9	0.26	97.2	1.00
36	98.7	0.21	97.2	0.70
48	98.5	0.80	96.8	0.36
60	98.3	0.73	96.5	1.66
72	98.2	0.32	96.5	0.47
84	97.8	0.40	96.5	0.59
96	97.8	0.50	96.2	0.31
108	97.7	0.60	96.0	1.30
120	97.7	0.30	95.7	0.88

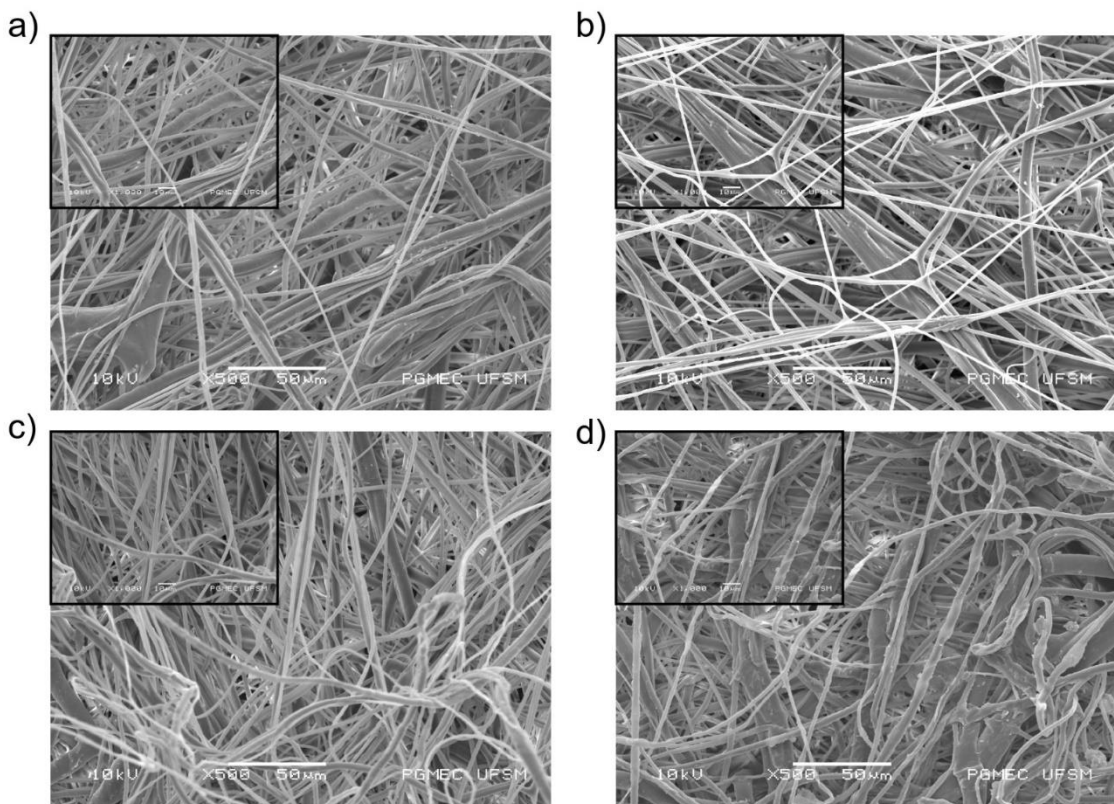
Tanto as medidas de eficiência quanto de potencial eletrostático foram feitas a cada 12 horas, no total de 11 medidas cada. O potencial variou de 100% do valor inicial, logo após recarga, à 97.7% no final das 120 horas, a tabela apresenta os valores medidos a cada 12 horas. Por outro lado, a eficiência variou de 98% a 95.7% no mesmo intervalo de tempo. Tanto potencial quanto eficiência diminuem em torno de 2% a 3% os seus valores iniciais, evidenciando que a variação da eficiência da máscara com o tempo, está diretamente relacionada com a dissipação de carga do filtro eletrostático.

5.3 ANÁLISE SUPERFICIAL (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica poderosa usada para visualizar a superfície de materiais com alta resolução. No contexto da discussão sobre desinfecção e recarga de máscaras, a MEV pode ser usada para examinar as fibras das máscaras antes e depois do processo de desinfecção e recarga. Na figura 23 estão agrupadas as imagens da 3ª camada das amostras (filtro eletrostático), geradas pelo MEV para máscara nova, desinfetada com etanol, recarregada com Zerostat e usada por uma semana, respectivamente. Com base nesses resultados, se for observado que o processo de desinfecção e recarga não afeta a morfologia das fibras nem sua distribuição, isso sugere que o método é eficaz em revitalizar as máscaras. Isso significa que as fibras da máscara não sofrem alterações significativas em sua estrutura ou organização após o processo de desinfecção e recarga.

Essa informação é importante porque a manutenção da morfologia e distribuição adequadas das fibras é fundamental para garantir a eficácia da máscara na filtragem de partículas e na proteção contra a transmissão de patógenos. Se a morfologia das fibras fosse alterada ou sua distribuição fosse afetada negativamente, isso poderia comprometer a capacidade da máscara de funcionar adequadamente. Portanto, a evidência fornecida pelas imagens de MEV, indicando que o processo de desinfecção e recarga não afeta a morfologia das fibras nem sua distribuição, apoia a conclusão de que esse método é bem-sucedido em revitalizar as máscaras

Figura 23 - Medidas topográficas do filtro eletrostático; a) Máscara Nova; b) Desinfetada com Etanol; c) recarregada com Zerostat; d) utilizada por 1 semana.



5.4 RESULTADOS ELETROSTÁTICOS E DE EFICIÊNCIA PARA OS MÉTODOS DE TRIBOELETRIZAÇÃO

Tendo em vista o objetivo de prorrogar a vida útil das máscaras, ao mesmo tempo mantendo-as dentro das normas estabelecidas de eficiência, optamos por testar a eletrização por atrito, descrita na seção 4.2, nas máscaras desinfetadas com etanol para avaliar se esse método também é viável de aplicação. Os valores de eficiência são mostrados no gráfico de barras, a tabela 3 apresenta os dados numéricos usados para construção do gráfico.

Figura 24 - Gráfico com medidas de eficiência para máscaras desinfetadas com etanol e recarregadas

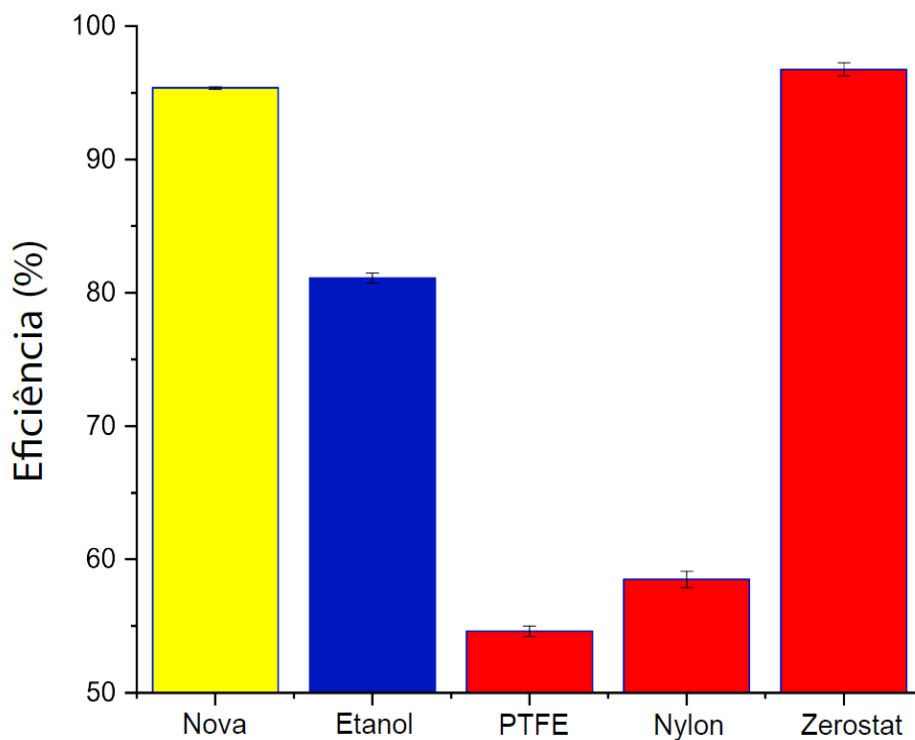
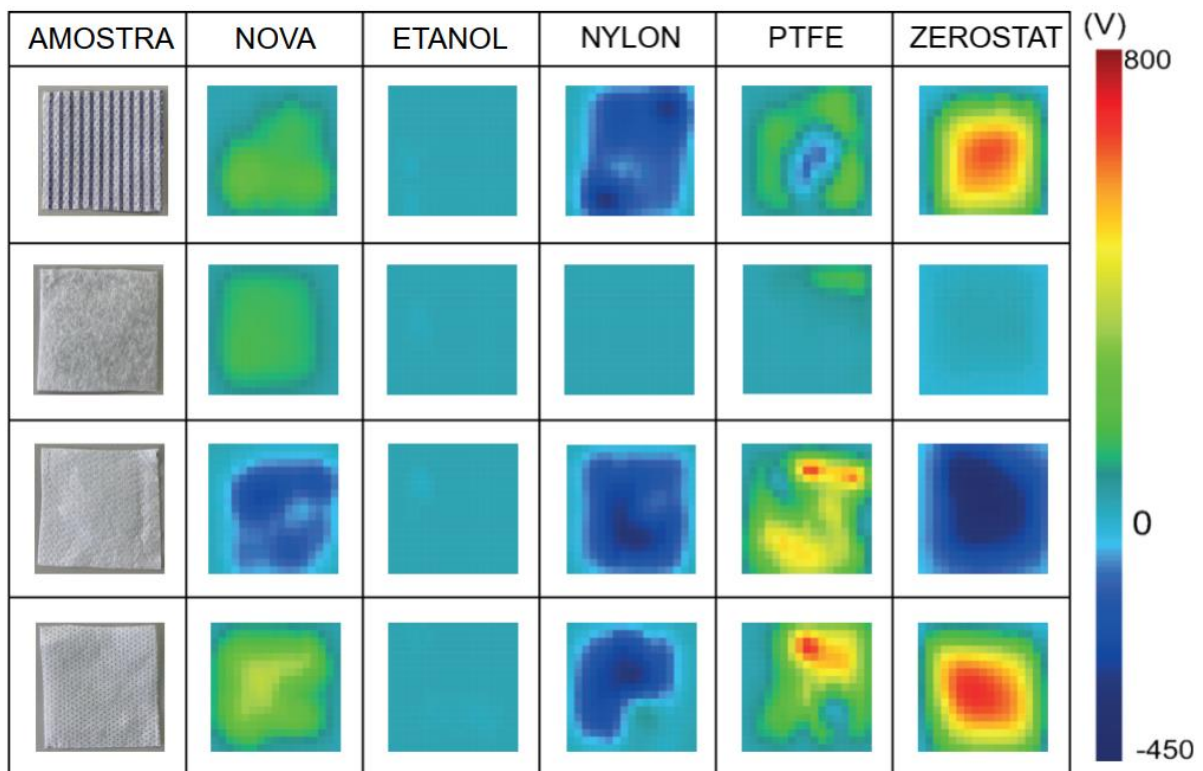


Tabela 3 - Resultados extraídos do gráfico: Medidas de eficiência

Máscara	Eficiência (%)	Desvio padrão
Nova	95.35	0.10
Etanol	81.10	0.39
PTFE	54,6	0.40
Nylon	58.50	0.60
Zerostat	96.76	0.50

As máscaras descontaminadas com etanol e recarregadas por atrito com o PTFE e nylon exibiram eficiências inferiores em comparação com as máscaras totalmente descarregadas (BURGO; GALEMBECK, 2016), sugerindo que a filtragem mecânica das camadas foi comprometida durante o processo de atrito. Os mapas de potencial eletrostático apresentados na figura 25 reforçam que a perda de eficiência não está relacionada à camada eletrostática em si, uma vez que o mapa claramente demonstra a restauração dessa camada. No entanto, ao analisarmos todas as camadas, notamos a ausência de um gradiente de potencial entre o filtro e as camadas adjacentes, o que pode resultar na captura de menos partículas carregadas. É importante destacar que uma parte significativa da capacidade de filtragem eletrostática é proveniente desses gradientes.

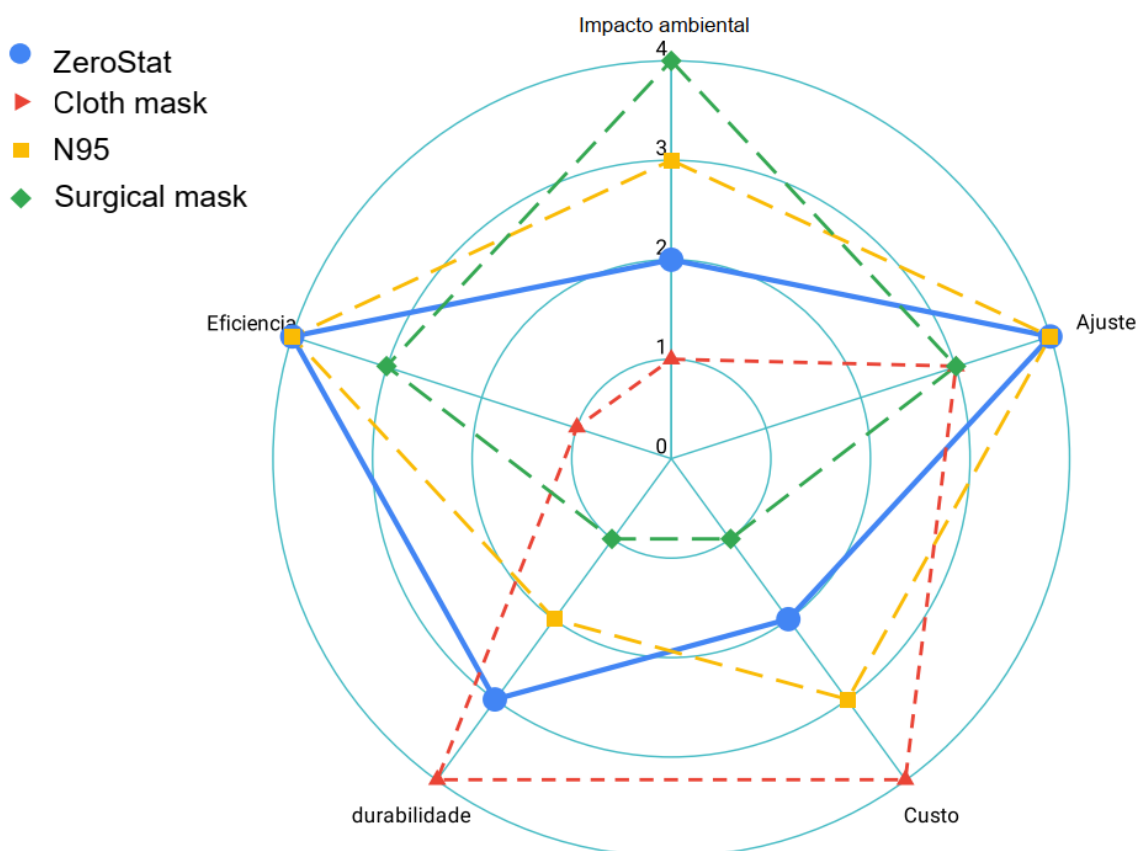
Figura 25 - Mapas de potencial eletrostático das amostras de 4 camadas das máscaras N95: Nova; desinfetada com etanol; triboeltrizada com Nylon; Triboeltrizada com PTFE; eletrizada com Zerostat



5.5 ANÁLISE DE QUALIDADE E CUSTO DO MÉTODO FINAL NA REUTILIZAÇÃO DAS MÁSCARAS N95

Além de devolver a eficiência para as máscaras descontaminadas, devemos analisar outros aspectos que são decisivos para determinar a qualidade geral do método e se ele pode trazer real impacto na solução dos problemas de escassez e alto descarte de máscaras. O gráfico radar presente na figura 26 compara o método de recarga com a zerostat às máscaras mais utilizadas disponíveis no mercado. Nele são analisados a eficiência de filtragem, o ajuste ao rosto, o custo de compra, a durabilidade e o impacto ambiental dos diferentes tipos. Os dados compilados neste gráfico nos ajudam a fazer uma análise geral da qualidade do nosso método e qual o impacto de sua aplicação,

Figura 26 - Gráfico Radar comparativo entre os resultados do método de recarga com Zerostat e os modelos de máscaras mais vendidas no mercado; Cirurgica; N95 nova; Máscara de pano.



Um melhor ajuste da máscara ao rosto é importante porque impede a passagem de ar em possíveis espaços que não sejam cobertos corretamente, levando a reduções significativas de até 60% na eficácia (DENG *et al.*, 2022). Já o custo de compra é relacionado ao valor pago por unidade, a durabilidade é definida pelo tempo de uso seguro, indicado para cada modelo, e o impacto ambiental é estipulado de acordo com a necessidade de descarte das máscaras.

A durabilidade de cada modelo é baseada no tempo que cada tipo de máscara pode ser utilizado sem perda significativa de eficiência. As máscaras de pano desempenham melhor nesse quesito visto que podem ser lavadas e reutilizadas sem perda de eficiência, já as máscaras cirúrgicas têm o menor tempo de vida útil já que devem ser descartadas após um único uso. As máscaras N95 novas devem ser descartadas após 7 dias de uso em média, já as máscaras N95 sujeitas a passarem pelo nosso processo de reutilização terão, pelo menos, 14 dias de eficiência garantida, como os resultados já mostraram anteriormente, com isso utilizamos a seguinte tabela para definir os valores de durabilidade do gráfico.

Tabela 4 - Valores de tempo de descarte utilizados no gráfico radar.

Tempo para descarte (t)	Valor	Tipo de máscara
t >30 dias	4	Pano
10 dias < t < 30 dias	3	Zerostat
1 dia < < 10 dias	2	N95 Nova
t < 1dia	1	Cirúrgica

Relacionado diretamente a durabilidade da máscara, está sua capacidade de impactar o meio ambiente, através do seu descarte. Contudo agora levaremos em conta também casos em que é feito um revezamento de máscaras, como é indicado, por exemplo, para os modelos N95, onde o usuário deve ter mais de uma máscara para intercalar os dias de uso, deixando-as estendidas quando não estiver usando.

As máscaras cirúrgicas são as que têm maior impacto ambiental pois são utilizadas em grande quantidade, principalmente em hospitais, tem baixo custo de compra e duram poucas horas, acarretando em uma grande quantidade de lixo descartado. Logo depois temos os modelos N95 de fábrica que duram em média 7 dias antes de serem descartadas, e como são utilizadas em grande número por profissionais da saúde geram uma quantidade relevante de lixo. As máscaras N95 que passam pelo nosso processo de rejuvenescimento tendem a produzir menos lixo, visto que cada unidade pode ser desinfetada e recarregada pelo menos uma vez, além de manter eficiência acima de 95% por pelo menos 14 dias. Já as máscaras de pano são as menos descartadas devido a sua grande durabilidade e possibilidade de lavagem e reuso, além de não serem utilizadas em ambientes hospitalares fazendo com que seu descarte seja menos impactante.

Uma análise mais direta desse resultado nos mostra que se todas as máscaras N95 compradas pudessem passar pelo nosso processo de reutilização, o descarte das mesmas cairia pelo menos para metade do montante atual.

A tabela abaixo apresenta as faixas de eficiência que julgamos interessantes para a comparação pretendida com o gráfico da figura 26.

Tabela 5 - Valores de eficiência utilizados no gráfico radar.

Eficiência	Valor	Tipo de máscara
e > 95%	4	N95 Nova
		Zerostat
85% < e < 95%	3	Cirúrgica
75% < e < 85%	2	-
e < 75%	1	Pano

O ajuste das máscaras é avaliado na literatura como, *good fit* sendo o melhor ajuste possível, onde há o mínimo de espaços não cobertos pela máscara em contato com o rosto, que é o caso do modelo N95, *general fit* para máscara cirúrgicas e de pano que não são tão bem ajustadas como as citadas anteriormente, mas ao mesmo tempo se bem utilizadas podem evitar a entrada de ar pelas laterais. (DENG *et al.*, 2022). Sendo assim definimos como 4 *good fit* e 3 *general fit*.

Para o custo unitário de cada máscara definimos apenas uma ordem crescente de preço. Fizemos um levantamento da média dos preços disponíveis no comércio para cada modelo analisado aqui. Os valores comerciais estipulados para as máscaras de pano variam de 2 a 10 reais por unidade, para os modelos N95 esse valor fica na faixa de 1 real, as máscaras cirúrgicas são vendidas normalmente em pacotes com 50 e tem um valor médio de 50 centavos. Já o custo para as nossas máscaras rejuvenescidas foi considerado como o preço médio por unidade de máscara N95 mais o valor gasto, aproximadamente, para desinfecção e recarga

seguindo nosso protocolo.

Um litro de etanol para desinfecção custou 10 reais e pode ser utilizado em média para 50 máscaras, dessa maneira o custo de desinfecção unitário é 20 centavos. A pistola Zerostat custa, em média, 750 reais e pode ser disparada 50.000 vezes, como cada disparo consiste em um ciclo de pressão e relaxamento do cristal e utilizamos 10 disparos para cada máscara, chegamos a um valor gasto de 15 centavos por unidade. Com isso o valor final para aplicação do nosso método, a nível laboratorial, é de 35 centavos por unidade.

Tabela 6 - Análise de custo para o processo de desinfecção com etanol e recarga com Zerostat

PRODUTO	VALOR	NÚMERO DE CICLOS	VALOR POR MÁSCARA
Etanol 1L	10 Reais	50	0.20 Reais
Zerostat	750 Reais	50.00	0.15 Reais
Valor final por máscara		0.35 Reais	

Esse resultado nos mostra que por um valor menor que o de uma máscara cirúrgica, conseguimos estender, em pelos menos 2 vezes, a vida útil de uma máscara N95, que proporciona mais que 95% de eficiência e tem um ajuste ao rosto melhor quando comparado às outras.

Utilizamos a tabela a seguir para comparar nossos resultados com outros métodos de reutilização de máscaras N95 descritos na literatura. Nosso foco foi nas comparações com abordagens semelhantes à nossa, que se baseiam exclusivamente

em procedimentos de desinfecção e reuso de máscaras comerciais. Não incluímos, por exemplo, métodos que envolvem a modificação do material da máscara. Os dados de eficiência obtidos, juntamente com suas respectivas referências, estão apresentados na tabela abaixo.

Tabela 7 - Valores de eficiência para diferentes processos de reutilização de máscaras n95 baseados em desinfecção e recarga eletrostática.

Método	Eficiência	Referência
Fonte DC 20 KV (Água)	86% ± 1%	(HOSSAIN et al., 2020)
Fonte DC 20 KV (Etanol)	96% ± 1%	(HOSSAIN et al., 2020)
Van de graaf	94% ± 4%	(SUGIHARA, 2021)
Zerostat (Água)	96% ± 1%	Este trabalho
Zerostat (Etanol)	97% ± 1%	Este trabalho

O primeiro estudo é muito semelhante ao nosso, uma vez que utilizaram os mesmos processos de desinfecção. No entanto, eles recarregaram as máscaras colocando-as entre dois eletrodos conectados aos polos de uma fonte de corrente contínua de 20.000 Volts. Para atingir os valores apresentados, eles realizaram um carregamento de 60 minutos nas máscaras. Podemos observar que eles obtiveram

um desempenho superior nas máscaras desinfetadas com etanol, conseguindo recuperar uma eficiência de pelo menos 95%. Já as máscaras submetidas ao processo de lavagem com água fervente alcançaram um valor significativamente menor. Os dados comparativos apresentados até aqui indicam fortemente que é economicamente viável a aplicação em larga escala da metodologia empregada

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÃO

Em conclusão, o nosso trabalho representa um avanço significativo no combate às doenças respiratórias, especialmente a Covid-19, ao apresentar um método eficiente e acessível para a reutilização de máscaras N95. Ao desinfetar e recarregar essas máscaras, conseguimos restaurar sua eficiência para níveis superiores a 95%, ampliando sua vida útil e reduzindo a necessidade de descarte e compra frequente.

Uma das principais vantagens do nosso método é a sua aplicabilidade em grande escala. Tendo em vista o fácil acesso aos equipamentos necessários e a possibilidade de ser realizado por qualquer pessoa, se torna possível implementar essa abordagem em diversas comunidades e estabelecimentos de saúde. Além disso, o custo para recarregar uma máscara segundo nosso método, atualmente está estimado em 35 centavos em nível de laboratório, valor que tende a diminuir consideravelmente quando aplicado em larga escala, tornando-o ainda mais acessível. Ao compararmos o método de recarga com a Zerostat, a outros estudos existentes na literatura, fica evidente o seu melhor custo-benefício. A baixa quantidade de gastos em equipamentos e a facilidade de aplicação destacam-se como pontos fortes, aliados à eficiência final das máscaras rejuvenescidas, que ultrapassam 95%.

No contexto de uma sociedade cada vez mais afetada por doenças respiratórias, a importância de encontrar soluções práticas e sustentáveis para combater a disseminação de vírus é crucial. O nosso trabalho oferece uma abordagem promissora, com a capacidade de contribuir para a redução da escassez de máscaras N95 e para a diminuição do impacto ambiental causado pelo descarte excessivo desses itens de proteção. Dessa forma, a nossa pesquisa representa um avanço

significativo no campo da saúde pública, fornecendo uma solução eficiente, acessível e sustentável para a reutilização de máscaras de proteção facial. Por fim, esperamos que essa abordagem seja adotada em larga escala, ajudando a proteger a saúde da população e a enfrentar os desafios trazidos pelas doenças respiratórias, incluindo a Covid-19.

6.2 PERSPECTIVAS FUTURAS

Nos últimos 20 anos, algumas doenças respiratórias que exigiram o uso de máscaras N95 incluem:

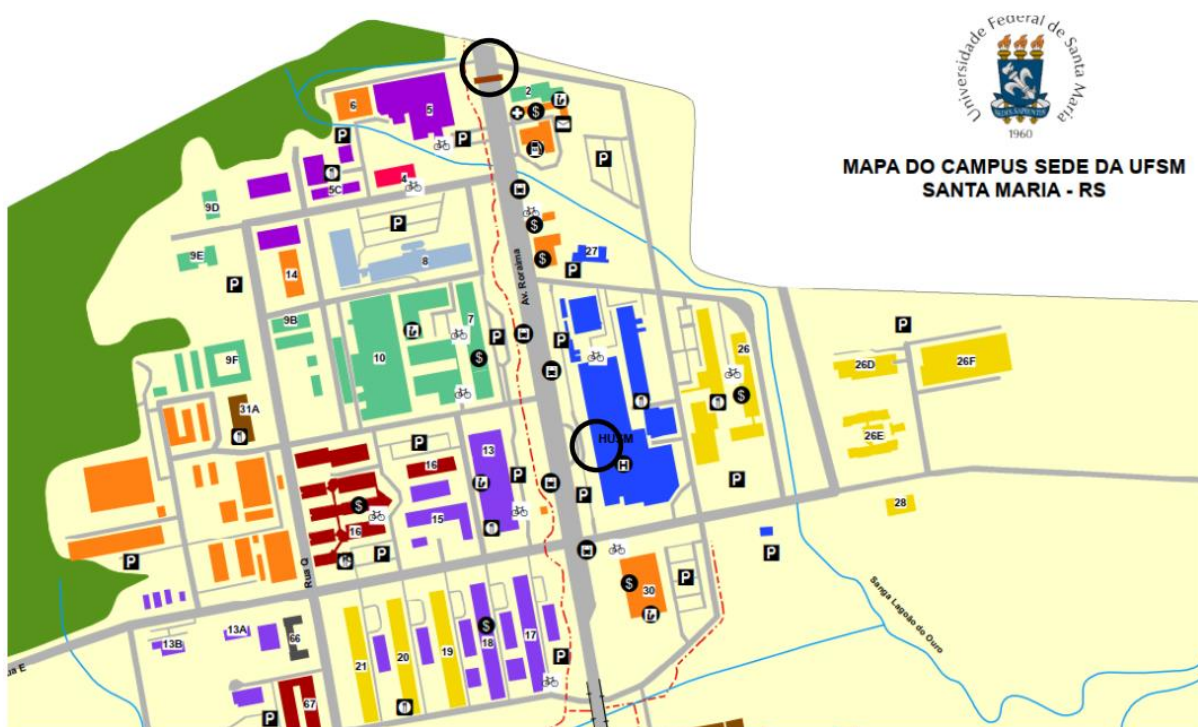
1. Síndrome Respiratória Aguda Grave (SARS): O surto de SARS ocorreu entre 2002 e 2003, principalmente na China, Hong Kong, Taiwan e Cingapura. A doença foi causada por um coronavírus (SARS-CoV) e exigiu o uso de máscaras N95 para proteção adequada.
2. Influenza A H1N1: O vírus da gripe H1N1, também conhecido como gripe suína, surgiu em 2009 e se espalhou rapidamente em todo o mundo. Muitos países recomendaram o uso de máscaras N95 como medida de precaução para prevenir a disseminação do vírus.
3. Epidemia de gripe aviária: A gripe aviária causada pelo vírus H5N1 começou a se espalhar entre as aves em 2003. Embora não tenha se tornado uma pandemia entre humanos, em alguns casos, houve transmissão do vírus para humanos, resultando em casos graves. Nessas situações, as máscaras N95 foram recomendadas para profissionais de saúde e pessoas em áreas afetadas.
4. Síndrome Respiratória do Oriente Médio (MERS): O coronavírus causador da MERS (MERS-CoV) foi identificado pela primeira vez em 2012 na Arábia Saudita. Embora a transmissão humana tenha sido limitada, as máscaras N95 foram recomendadas para profissionais de saúde e pessoas em áreas onde ocorreram surtos.
5. COVID-19: A pandemia de COVID-19 começou no final de 2019 e continua afetando o mundo até os dias atuais. O vírus SARS-CoV-2 é altamente contagioso e se espalha

principalmente através de gotículas respiratórias. O uso de máscaras N95 tem sido recomendado para profissionais de saúde e para o público em geral.

É essencial notar que as diretrizes sobre o uso de máscaras podem mudar ao longo do tempo e depender das características específicas de cada doença respiratória. Isso significa que a necessidade de usar máscaras N95 em larga escala no Brasil e no mundo pode retornar sem aviso prévio. Esse cenário traz de volta a preocupação com a escassez e o descarte excessivo de máscaras, e soluções economicamente viáveis são bem-vindas. Nesse sentido, nossa metodologia para reutilização das máscaras é uma solução adequada em muitos casos.

Uma maneira prática de implementar essa solução em nossa comunidade é criar um posto de recarga para máscaras na UFSM. Na figura 27, destacamos dois possíveis locais para instalar esses postos no mapa da UFSM. Fica registrada essa proposta aqui e, se necessário, poderá ser reavaliada no futuro.

Figura 27 - Recorte do Mapa do campus sede da UFSM, Santa Maria - RS



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALESSANDRO VOLTA. Lettera del Sig. Alessandro Volta... sopra l'elettricità. 1800.
- ANDERSON, Elizabeth L. *et al.* Consideration of the Aerosol Transmission for COVID-19 and Public Health. *Risk Analysis*, v. 40, n. 5, p. 902–907, maio 2020.
- ARFKEN, George B *et al.* *MATHEMATICAL METHODS FOR PHYSICISTS SIXTH EDITION*. . [S.l: s.n.], [S.d.].
- BAILEY, Adrian G. The charging of insulator surfaces. *Journal of Electrostatics*, v. 51–52, p. 82–90, maio 2001.
- BAUMGÄRTNER, H.; LIESS, H. D. Micro Kelvin probe for local work-function measurements. *Review of Scientific Instruments*, v. 59, n. 5, p. 802–805, 1 maio 1988.
- BHAT, Tariq A. *et al.* An Animal Model of Inhaled Vitamin E Acetate and EVALI-like Lung Injury. *New England Journal of Medicine*, v. 382, n. 12, p. 1175–1177, 19 mar. 2020.
- BURGO, Thiago A. L. *et al.* Triboelectricity: Macroscopic Charge Patterns Formed by Self-Arraying Ions on Polymer Surfaces. *Langmuir*, v. 28, n. 19, p. 7407–7416, 15 maio 2012.
- BURGO, Thiago A.L.; GALEMBECK, Fernando. Electrified water: Liquid, vapor and aerosol. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 27, n. 2, p. 229–238, 2016.
- BUSCO, Giacomo *et al.* Sneezing and asymptomatic virus transmission. *Physics of Fluids*, v. 32, n. 7, p. 073309, 1 jul. 2020.
- CADY, W. G. *Piezoelectricity: An introduction to the theory and applications of electromechanical phenomena in crystals*. . 1. ed. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1946. v. 1.
- CASTLE, G.S.P. Contact charging between insulators. *Journal of Electrostatics*, v. 40–41, p. 13–20, jun. 1997.
- CHARLES-AUGUSTIN DE COULOMB. Première Note sur l'Électricité et le Magnétisme. 1785.
- CHEN, Wenzhao *et al.* Short-range airborne route dominates exposure of respiratory infection during close contact. *Building and Environment*, v. 176, p. 106859, jun. 2020.
- CHU, B. *et al.* *Electro-Blowing Technology for Fabrication of Fibrous Articles and its Applications of Hyaluronan*. . USA: [s.n.], 2010
- COWLING, Benjamin J. *et al.* Aerosol transmission is an important mode of influenza

A virus spread. *Nature Communications*, v. 4, n. 1, p. 1935, 4 jun. 2013.

CURIE, Jacques; CURIE, Pierre. Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées. *Bulletin de la Société minéralogique de France*, v. 3, n. 4, p. 90–93, 1880.

DBOUK, Talib; DRIKAKIS, Dimitris. On coughing and airborne droplet transmission to humans. *Physics of Fluids*, v. 32, n. 5, p. 053310, 1 maio 2020.

DENG, Wei *et al.* *Masks for COVID-19. Advanced Science*. [S.l.]: John Wiley and Sons Inc. , 1 jan. 2022

DIAZ, A.F.; FELIX-NAVARRO, R.M. A semi-quantitative tribo-electric series for polymeric materials: the influence of chemical structure and properties. *Journal of Electrostatics*, v. 62, n. 4, p. 277–290, nov. 2004.

DUTTON, Kathryn C. *Overview and Analysis of the Meltblown Process and Parameters. Article Designation: Scholarly JTATM*. [S.l.: s.n.], 2008. Disponível em: <<http://web.utk.edu/~tandec/>>.

ELLISON, Christopher J. *et al.* Melt blown nanofibers: Fiber diameter distributions and onset of fiber breakup. *Polymer*, v. 48, n. 11, p. 3306–3316, maio 2007.

FENG, Jianyong. Preparation and properties of poly(lactic acid) fiber melt blown non-woven disordered mats. *Materials Letters*, v. 189, p. 180–183, fev. 2017.

FREDERICK, Edward R. Some Effects of Electrostatic Charges In Fabric Filtration. *Journal of the Air Pollution Control Association*, v. 24, n. 12, p. 1164–1168, dez. 1974.

GALEMBECK, Fernando *et al.* Friction, tribochemistry and triboelectricity: recent progress and perspectives. *RSC Adv.*, v. 4, n. 109, p. 64280–64298, 2014.

GALEMBECK, Fernando; A. L. BURGO, Thiago. *Chemical Electrostatics*. Cham: Springer International Publishing, 2017.

GOUVEIA, Rubia F. *et al.* Acid–Base Site Detection and Mapping on Solid Surfaces by Kelvin Force Microscopy (KFM). *Analytical Chemistry*, v. 84, n. 23, p. 10191–10198, 4 dez. 2012.

GREASON, William D. Investigation of a test methodology for triboelectrification. *Journal of Electrostatics*, v. 49, n. 3–4, p. 245–256, ago. 2000.

HASSAN, Mohammad Abouelreesh *et al.* Fabrication of nanofiber meltblown membranes and their filtration properties. *Journal of Membrane Science*, v. 427, p. 336–344, jan. 2013.

HOSSAIN, Emroj *et al.* Recharging and rejuvenation of decontaminated N95 masks. *Physics of Fluids*, v. 32, n. 9, p. 093304, 1 set. 2020.

- HOWARD, Jack B. *Electrostatics and its application*, A. D. Moore (Ed.), Wiley, New York (1973). 481 pages. \$24.95. *AIChE Journal*, v. 20, n. 2, p. 413–413, mar. 1974.
- HUANG, Haiyue *et al.* COVID-19: A Call for Physical Scientists and Engineers. *ACS Nano*, v. 14, n. 4, p. 3747–3754, 28 abr. 2020.
- J. CLERK MAXWELL. A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. 155, p. 459–512, 1865.
- KILIC, Ali; SHIM, Eunyoung; POURDEYHIMI, Behnam. Electrostatic Capture Efficiency Enhancement of Polypropylene Electret Filters with Barium Titanate. *Aerosol Science and Technology*, v. 49, n. 8, p. 666–673, 3 ago. 2015.
- KIM, Han Joo *et al.* Fabrication and characterization of silver nanoparticle-incorporated bilayer electrospun–melt-blown micro/nanofibrous membrane. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, v. 66, n. 10, p. 514–520, 3 jul. 2017.
- KIM, Kitai *et al.* Performance modification of a melt-blown filter medium via an additional nano-web layer prepared by electrospinning. *Fibers and Polymers*, v. 10, n. 1, p. 60–64, 8 fev. 2009.
- KITTEL, Charles; HOLCOMB, Donald F. *Introduction to Solid State Physics*. *American Journal of Physics*, v. 35, n. 6, p. 547–548, jun. 1967.
- KUMAR, Deepak; BHATTACHARYA, S.; GHOSH, Shankar. Weak adhesion at the mesoscale: particles at an interface. *Soft Matter*, v. 9, n. 29, p. 6618, 2013.
- LEE, K. W.; LIU, B. Y. H. On the Minimum Efficiency and the Most Penetrating Particle Size for Fibrous Filters. *Journal of the Air Pollution Control Association*, v. 30, n. 4, p. 377–381, abr. 1980.
- LI, Haoyi *et al.* Polypropylene fibers fabricated via a needleless melt-electrospinning device for marine oil-spill cleanup. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 131, n. 7, p. n/a-n/a, 5 abr. 2014.
- LIAO, Lei *et al.* Can N95 Respirators Be Reused after Disinfection? How Many Times? *ACS Nano*, v. 14, n. 5, p. 6348–6356, 26 maio 2020.
- LIPPMAN, G. Principe de conservation de lelectricite. *Annales de Chimie et de Physique*. *Annales de Chimie et de Physique*, v. 24, p. 145–178, 1881.
- LIU, Jiaye *et al.* Community Transmission of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2, Shenzhen, China, 2020. *Emerging Infectious Diseases*, v. 26, n. 6, jun. 2020.
- LORENZETT, Ezequiel *et al.* Flexoelectric characterization of dielectrics under tensile, compressive, and flexural loads by non-contact Kelvin probe measurements. *Journal of Applied Physics*, v. 129, n. 20, p. 204502, 28 maio 2021.

LUO, C. J. *et al.* Electrospinning versus fibre production methods: from specifics to technological convergence. *Chemical Society Reviews*, v. 41, n. 13, p. 4708, 2012.

MAJCHRZYCKA, Katarzyna *et al.* Influence of Low-Temperature Plasma Treatment on The Liquid Filtration Efficiency of Melt-Blown PP Nonwovens in The Conditions of Simulated Use of Respiratory Protective Equipment. *Chemical and Process Engineering*, v. 38, n. 2, p. 195–207, 27 jun. 2017.

MCCARTY, Logan S.; WHITESIDES, George M. Electrostatic Charging Due to Separation of Ions at Interfaces: Contact Electrification of Ionic Electrets. *Angewandte Chemie International Edition*, v. 47, n. 12, p. 2188–2207, 7 mar. 2008.

MENG, Kai. Investigation on compound field of electrospinning and melt blowing for producing nanofibers. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, v. 27, n. 2, p. 282–286, 6 fev. 2017.

MISSLITZ, Holger; KREGGER, Klaus; SCHMIDT, Hans-Werner. Supramolecular Nanofiber Webs in Nonwoven Scaffolds as Potential Filter Media. *Small*, v. 9, n. 12, p. 2053–2058, 24 jun. 2013.

MOOSMAYER, P *et al.* *Apparatus for Electrically Charging Meltblown Webs*. . USA: U.S. Patent. , 1990

NAYAK, Rajkishore *et al.* Fabrication and Characterisation of Nanofibres by Meltblowing and Melt Electrospinning. *Advanced Materials Research*, v. 472–475, p. 1294–1299, fev. 2012.

NICOLA, Maria *et al.* The socio-economic implications of the coronavirus pandemic (COVID-19): A review. *International Journal of Surgery*, v. 78, p. 185–193, jun. 2020.

NONNENMACHER, M.; O'BOYLE, M. P.; WICKRAMASINGHE, H. K. Kelvin probe force microscopy. *Applied Physics Letters*, v. 58, n. 25, p. 2921–2923, 24 jun. 1991.

NORAS, Maciej A. *Non-contact surface charge/voltage measurements Capacitive probe-principle of operation*. . [S.l: s.n.], 2002. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/237405977>>.

OBBERG, Tara; BROSSEAU, Lisa M. Surgical mask filter and fit performance. *American Journal of Infection Control*, v. 36, n. 4, p. 276–282, maio 2008.

PEERI, Noah C *et al.* The SARS, MERS and novel coronavirus (COVID-19) epidemics, the newest and biggest global health threats: what lessons have we learned? *International Journal of Epidemiology*, v. 49, n. 3, p. 717–726, 1 jun. 2020.

PFEFFERBAUM, Betty; NORTH, Carol S. Mental Health and the Covid-19 Pandemic. *New England Journal of Medicine*, v. 383, n. 6, p. 510–512, 6 ago. 2020.

PRATHER, Kimberly A.; WANG, Chia C.; SCHOOLEY, Robert T. Reducing transmission of SARS-CoV-2. *Science*, v. 368, n. 6498, p. 1422–1424, 26 jun. 2020.

PU, Yi *et al.* Preparation of Polypropylene Micro and Nanofibers by Electrostatic-Assisted Melt Blown and Their Application. *Polymers*, v. 10, n. 9, p. 959, 29 ago. 2018.

R.-J. DENG'S *et al.* Investigation on producing micro-nano fibers by melt electrospinning. *Materials Science & Technology*, p. 425–433, 2010.

SCHEIN, L. B. Recent Progress and Continuing Puzzles in Electrostatics. *Science*, v. 316, n. 5831, p. 1572–1573, 15 jun. 2007.

SESSLER, G. M. Physical principles of electrets. [S.l.: s.n.], 1980. p. 13–80.

SHAW, P.E. Experiments on tribo-electricity. I.—The tribo-electric series. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, v. 94, n. 656, p. 16–33, 5 nov. 1917.

SU-VELEZ, Brooke M. *et al.* Decontamination Methods for Reuse of Filtering Facepiece Respirators. *JAMA Otolaryngology–Head & Neck Surgery*, v. 146, n. 8, p. 734, 1 ago. 2020.

THAKUR, Rashmi; DAS, Dipayan; DAS, Apurba. Electret Air Filters. *Separation & Purification Reviews*, v. 42, n. 2, p. 87–129, jan. 2013.

UPPAL, Rohit *et al.* Meltblown nanofiber media for enhanced quality factor. *Fibers and Polymers*, v. 14, n. 4, p. 660–668, 2 abr. 2013.

VAN TURNHOUT, J.; ADAMSE, J.W.C.; HOENEVELD, W.J. Electret filters for high-efficiency air cleaning. *Journal of Electrostatics*, v. 8, n. 4, p. 369–379, abr. 1980.

WANG, Xiaobin; YAO, Jinbo; PAN, Xianmiao. Fiber Splitting of Bicomponent Meltblown Nonwovens by Ultrasonic Wave. *International Journal of Chemistry*, v. 1, n. 2, 20 jul. 2009.

WARREN H FINLAY. *The Mechanics of Inhaled Pharmaceutical Aerosols*. [S.l.: s.n.], 2001. v. 1.

WATANABE, K.; *et al.* Development of melt blown electrospinning apparatus of isotactic polypropylene. *NSTI-Nanotech*, v. 1, p. 826–829, 2009.

WEISS, Daniel *et al.* Tailoring Supramolecular Nanofibers for Air Filtration Applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, v. 8, n. 23, p. 14885–14892, 15 jun. 2016.

WILLIAM GILBERT. *De Magnete*. London: Peter Short, 1600.

XIAO, Huiming *et al.* Study on correlation of filtration performance and charge behavior and crystalline structure for melt-blown polypropylene electret fabrics. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 132, n. 47, p. n/a-n/a, 15 dez. 2015.

XIAO, Huiming; SONG, Yeping; CHEN, Gangjin. Correlation between charge decay

and solvent effect for melt-blown polypropylene electret filter fabrics. *Journal of Electrostatics*, v. 72, n. 4, p. 311–314, ago. 2014.

XIE, Sheng *et al.* Turbulent air flow field in slot-die melt blowing for manufacturing microfibrinous nonwoven materials. *Journal of Materials Science*, v. 53, n. 9, p. 6991–7003, 16 maio 2018.

XIE XIAOJUN; HUANG XIANG; DI YUHUI. Preliminary Study on Electrostatic Electret Method of Electret Air Filter Material. *Clean and Air Conditioning Technology*, p. 41–44, 2005.

ZHANG, Haifeng *et al.* Design of electret polypropylene melt blown air filtration material containing nucleating agent for effective PM2.5 capture. *RSC Advances*, v. 8, n. 15, p. 7932–7941, 2018.

ZHANG, Renyi *et al.* Identifying airborne transmission as the dominant route for the spread of COVID-19. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 117, n. 26, p. 14857–14863, 30 jun. 2020.

ZISMAN, W. A. A NEW METHOD OF MEASURING CONTACT POTENTIAL DIFFERENCES IN METALS. *Review of Scientific Instruments*, v. 3, n. 7, p. 367–370, 1 jul. 1932.

APÊNDICE A – SOFTWARE PARA CÁLCULO DE EFICIÊNCIA DE FILTRAGEM

```
#!/usr/bin/env python
# # -*- coding: UTF-8 -*-
import matplotlib
matplotlib.use('Agg')
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import serial
import os
import PySimpleGUI as sg
import sys
import glob
import re
import socket
from astropy.convolution.kernels import Gaussian2DKernel
import scipy.ndimage as sp
import time
from sklearn import preprocessing
import pandas as pd
from matplotlib.widgets import RangeSlider
from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg,
NavigationToolbar2Tk

#=====Serial
port=====#
def serial_ports():

    if sys.platform.startswith('win'):
        ports = ['COM%s' % (i + 1) for i in range(256)]
    elif sys.platform.startswith('linux') or
sys.platform.startswith('cygwin'):
        # this excludes your current terminal "/dev/tty"
        ports = glob.glob('/dev/tty[A-Za-z]*')
    elif sys.platform.startswith('darwin'):
        ports = glob.glob('/dev/tty.*')
    else:
        raise EnvironmentError('Unsupported platform')

    result = []
    for port in ports:
        try:
            s = serial.Serial(port)
            s.close()
            result.append(port)
        except (OSError, serial.SerialException):
            pass
    return result

com = serial_ports()
```

```

#=====
=====#

def moving_average(a, n=2) :
    #ret = np.cumsum(a, dtype=float)
    #ret[n:] = ret[n:] - ret[:-n]
    #av = ret[n - 1:] / n

    #av_ax0 = np.expand_dims(a, axis=1)
    av_int = sp.filters.gaussian_filter(a, sigma = n, order = 0)

    av_int = np.asarray(av_int)
    #av_int = a
    return av_int

"""-----
-----"""
def write_read(x,arduino):
    time.sleep(3)
    arduino.write(bytes(x, 'utf-8'))
"""=====
====="""

#=====make
figure=====#

def flow_fig(time,flow):

    av_flow = flow

    plt.figure(figsize=(6,5), dpi=60)

    tmax = max(flow)

    plt.ylim([0, 50])

    plt.plot(time,av_flow,linestyle='-',linewidth = 2,color = 'red')

    plt.xlabel('Time (s)')
    plt.ylabel('Flow (L/min)')

    return plt.gcf()

#=====Draw
Efficiency=====#
def draw_figure_w_toolbar(canvas, fig, canvas_toolbar):
    if canvas.children:
        for child in canvas.wininfo_children():
            child.destroy()
    if canvas_toolbar.children:
        for child in canvas_toolbar.wininfo_children():
            child.destroy()
    figure_canvas_agg = FigureCanvasTkAgg(fig, master=canvas)
    figure_canvas_agg.draw()
    toolbar = Toolbar(figure_canvas_agg, canvas_toolbar)

```

```

    toolbar.update()
    figure_canvas_agg.get_tk_widget().pack(side='right', fill='both',
expand=1)

def line_select_callback(eclick, erelease):
    x1, y1 = eclick.xdata, eclick.ydata
    x2, y2 = erelease.xdata, erelease.ydata

    rect = plt.Rectangle( (min(x1,x2),min(y1,y2)), np.abs(x1-x2),
np.abs(y1-y2) )
    print(rect)
    ax.add_patch(rect)
    fig.canvas.draw()

class Toolbar(NavigationToolbar2Tk):
    def __init__(self, *args, **kwargs):
        super(Toolbar, self).__init__(*args, **kwargs)
#=====
=====

def fig_eff(x0,y0,x1,y1,particle):

    #plt.figure(figsize=(6,4), dpi=80)
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 5))
    plt.subplots_adjust(bottom=0.25)

    plt.xlabel('Time (m)')
    plt.ylabel(particle+' micron count')

    ax.plot(x0,moving_average(y0),linestyle='-',linewidth = 2,
antialiased=True,color = 'blue',label='Ref data')
    ax.plot(x1,moving_average(y1),linestyle='-',linewidth = 2,
antialiased=True,color = 'red',label='Data 1')

    slider_ax = plt.axes([0.20, 0.1, 0.60, 0.03])
    slider = RangeSlider(slider_ax, "Threshold", np.asarray(x0).min(),
np.asarray(x0).max())

    # Create the Vertical lines on the histogram
    lower_limit_line = ax.axvline(slider.val[0], color='k')
    upper_limit_line = ax.axvline(slider.val[1], color='k')

def update(val):
    # The val passed to a callback by the RangeSlider will

    lower_limit_line.set_xdata([val[0], val[0]])
    upper_limit_line.set_xdata([val[1], val[1]])

    # Redraw the figure to ensure it updates
    fig.canvas.draw_idle()

    return

```

```

    slider.on_changed(update)

    print(str(slider.val[0]))

    #plt.show()

    return plt.gcf()

def
fig_maker(timed,pm03,min_range_y,max_range_y,tmin,tmax,t_init,particle_
size):

    av_pm = moving_average(pm03)

    plt.figure(figsize=(5.7,3.8), dpi=80)

    plt.xlabel('Time (m)')
    plt.ylabel(particle_size+' micron count')

    plt.xlim([0, tmax])
    plt.ylim([0, max_range_y])

    plt.tick_params(axis='x', which='minor', top=False)
    plt.tick_params(axis='y', which='minor', right=False)
    plt.tick_params(axis='x', which='major', top=False)
    plt.tick_params(axis='y', which='major', right=False)

    plt.plot(timed,av_pm,linestyle='-',linewidth =
2,antialiased=True,color = 'midnightblue')

    return plt.gcf()

#====Draw
fig=====#
def draw_figure(canvas, figure, loc=(0, 0)):
    figure_canvas_agg = FigureCanvasTkAgg(figure, canvas)
    figure_canvas_agg.draw()
    figure_canvas_agg.get_tk_widget().pack(side='top', fill='both',
expand=1)

    return figure_canvas_agg

def delete_fig_agg(fig_agg):
    fig_agg.get_tk_widget().forget()

#====set graph
=====#
#7 : 0.3 micron counts
#8 : 0.5 micron counts
#9 :1.0 micron counts
#10: 2.5 micron counts
#11: 5 micron counts
#12: 10 micron counts

```



```

particles = ['0.3','0.5','1.0','2.5','5.0','10']
checkboxes = [[sg.Checkbox('CB {}'.format(i))] for i in range(1)]

sg.theme('Dark Brown 2')

layout1 = [[
sg.Frame('Input and configure data',[[sg.Text('COM port \n part.
Sensor:'), sg.InputCombo(com,size=(10, 1),enable_events=False),
    sg.Button("Refresh"),sg.Button('Connect
1'),sg.Button('Disconnect',disabled=True)],
    [sg.Text('Data output', size =(10, 1)), sg.Input(size=(8,1)),
sg.FileSaveAs()],
    [sg.Text('COM port\n flow sensor:'), sg.InputCombo(com,size=(10,
1),enable_events=False),
    sg.Button("Refresh"),sg.Button('Connect
2'),sg.Button('Disconnect',disabled=True)],
    [sg.Text('Y range (Optional)', size =(15, 1)),sg.Text('min',size
=(3, 1)), sg.InputText(key=4,size =(5, 1)),
    sg.Text('max',size =(4, 1)), sg.InputText(key=5,size =(5, 1)),
    sg.Text('Time test (min)',size =(13,1)),sg.InputText(key=6,size =
(5,1))],
    [sg.Text('Particle size:'), sg.InputCombo(particles,size=(6,
1),enable_events=False)],
    [sg.Text()], [sg.Button("Run test",disabled=False),
sg.Button('Stop'),
    sg.Text('
Current time
(s)'),sg.Output(key='current_time',size=(6,1))],
    ],sg.Frame('Flow count',[[sg.Canvas(size=(300,300),
key='canvas0')]]),
    sg.Frame('Plot',[[sg.Canvas(size=(390,300), key='canvas')]]))]

layout2 = [[
sg.Frame('Input data and result',
    [[sg.Text('Data 0'),sg.Input(size=(8,1),key='eff0'),
sg.FileBrowse()],
    [sg.Text('Data 1'),sg.Input(size=(8,1),key='eff1'),
sg.FileBrowse()],
    [sg.Text('Particle size:'), sg.InputCombo(particles,size=(6,
1),enable_events=False,key='particle1')],
    [sg.Button("Plot")],
    [sg.Text('Range selected:'),sg.Input(size=(12,1),key='-RANGE-')],
    [sg.Button("Run calc")],
    [sg.Text('Efficiency')],
    [sg.Output(size=(8,8),key='eff_out')]]),
sg.Frame('Graph',
    [[sg.Canvas(key='controls_cv')], [sg.Canvas(size=(300,300),
key='canvas1')]])]
]

layout = [[sg.Button('Mask test',disabled=True), sg.Button('Efficiency
calc'),sg.Button('Exit')],
    [sg.Column(layout1, key='-COLMASK-'), sg.Column(layout2,
visible=False, key='-COLEFF-')
]]

```

```

window = sg.Window('Mask test', layout,finalize=True)

while True:
    event, values = window.read()
    print(event, values)

    #window['eff_out'].update('')

    if event == 'Plot':

        data0 = values['eff0']
        data1 = values['eff1']
        particles1 = values['particle1']
        window['eff_out'].update('')
        if data0 != '' and data1 != '' and particles1 != '':

            if particles1 == '0.3':
                column = 0
            elif particles1 == '0.5':
                column = 0
            elif particles1 == '1.0':
                column = 0
            elif particles1 == '2.5':
                column = 0
            elif particles1 == '5.0':
                column = 0
            elif particles1 == '10':
                column = 0

            xaxis0 = []
            yaxis0 = []
            xaxis1 = []
            yaxis1 = []

            df0 = pd.read_csv(data0, header=None, usecols=[column])

            df1 = pd.read_csv(data1, header=None, usecols=[column])

            xaxis0 = np.arange(0, len(df0))
            #xaxis0 = np.asarray(xaxis0)
            yaxis0 = df0[column]
            yaxis0 = np.asarray(yaxis0)

            xaxis1 = np.arange(0, len(df1))
            #xaxis1 = np.asarray(xaxis1)
            yaxis1 = df1[column]
            yaxis1 = np.asarray(yaxis1)

#=====Test
range=====#
        fig, ax = plt.subplots(figsize=(6,4), dpi=80)
        plt.subplots_adjust(bottom=0.25)

```

```

plt.xlabel('Time (m)')
plt.ylabel('particles1+ micron count')

ax.plot(xaxis0,moving_average(yaxis0),linestyle='-',
,linewidth = 2,
        antialiased=True,color = 'blue',label='Ref data')
ax.plot(xaxis1,moving_average(yaxis1),linestyle='-',
,linewidth = 2,
        antialiased=True,color = 'red',label='Data 1')

slider_ax = plt.axes([0.20, 0.1, 0.60, 0.03])

slider = RangeSlider(slider_ax, "Threshold",
np.asarray(xaxis0).min(), np.asarray(xaxis0).max())

# Create the Vertical lines on the histogram
lower_limit_line = ax.axvline(slider.val[0],
color='r',linewidth=7.0,alpha=0.5)
upper_limit_line = ax.axvline(slider.val[1],
color='r',linewidth=7.0,alpha=0.5)

def update(val):
# The val passed to a callback by the RangeSlider will

    lower_limit_line.set_xdata([val[0], val[0]])
    upper_limit_line.set_xdata([val[1], val[1]])

    # Redraw the figure to ensure it updates
    xrange_min = "{:.2f}".format(val[0])
    xrange_max = "{:.2f}".format(val[1])

    window['-RANGE-
'].update(str(xrange_min)+"-"+str(xrange_max))

    fig.canvas.draw_idle()

#return

slider.on_changed(update)

draw_figure_w_toolbar(window['canvas1'].TKCanvas, fig,
window['controls_cv'].TKCanvas)
window['eff_out'].update('')

text_time = values['-RANGE-']

if event == 'Run calc':
    window['eff_out'].update('')
    if text_time != '':

        arr_time = text_time.split(":")

        time_eff0 = float(arr_time[0])
        time_eff1 = float(arr_time[1])

```

```

sum_y0 = 0
sum_y1 = 0

av_y0 = 0
av_y1 = 0

efficiency = 0

#eff_p = open('efficiency.txt','w+')

cnt0 = 0
cnt1 = 0

for cnt_time0,(xtest0,ytest0) in
enumerate(zip(xaxis0,yaxis0)):
    if xtest0 >= time_eff0 and xtest0 < time_eff1:
        sum_y0 = sum_y0 + ytest0
        cnt0 += 1

    for cnt_time1,(xtest1,ytest1) in
enumerate(zip(xaxis1,yaxis1)):
        if xtest1 >= time_eff0 and xtest1 < time_eff1:
            sum_y1 = sum_y1 + ytest1
            cnt1 += 1

av_y0 = sum_y0 / cnt0
av_y1 = sum_y1 / cnt1

efficiency = (1-(av_y1/av_y0))*100

#eff_p.write(str(efficiency))

window['eff_out'].update(str("{:.2f}".format(efficiency))+"%")

if event in 'MASKEFF':
    window[f'-COL{layout}-'].update(visible=True)
    layout = event

if event == 'Mask test':
    window['Efficiency calc'].update(disabled=False)
    window[f'-COLEFF-'].update(visible=False)
    window[f'-COLMASK-'].update(visible=True)

if event == 'Efficiency calc':
    window['Mask test'].update(disabled=False)
    window[f'-COLMASK-'].update(visible=False)
    window[f'-COLEFF-'].update(visible=True)
    window['eff_out'].update('')

if event in (None, 'Exit'):
    break

if event == 'Refresh':

```

```

        window.FindElement(2).Update(values=serial_ports())

if event == "Connect 2":

    port = values[2]

    window['Connect'].update(disabled=True)
    window['Disconnect'].update(disabled=False)

    arduino = serial.Serial(port=port, baudrate=9600)
    time.sleep(2)
    window.write_event_value('-THREAD-', '')

    time_flow = []
    flow = []

    for i in range(2000):
        window.write_event_value('-THREAD-', '')
        event, values = window.read()

        if event == 'Disconnect':
            window['Connect'].update(disabled=False)
            delete_fig_agg(fig_agg)
            plt.cla()
            window.Refresh()
            break

        else:
            window.write_event_value('-THREAD-', '')

            time_flow.append(i)

            data_arduino = arduino.readline()

            write_flow = float(data_arduino.decode())

            flow.append(write_flow)

            fig_flow = flow_fig(time_flow, flow)

            fig_agg = draw_figure(window['canvas0'].TKCanvas,
fig_flow)

            window.Refresh()

            delete_fig_agg(fig_agg)

            plt.cla()

            time.sleep(1)

            window.Refresh()

if event == "Connect 1":

    port0 = values[0]

```

```

if event == "Run test":
    window['Stop'].update(disabled=False)

    if(values[0]!='' and values[1]!='' and values[3]!='' and
values[6]!=''):
        window['Run test'].update(disabled=True)
        window['Stop'].update(disabled=False)

        if event == 'Stop':
            window['Run test'].update(disabled=False)
            window['Stop'].update(disabled=True)
            break

    if values[4]=='' and values[5]=='':
        colorbar_custom = False
    else:
        colorbar_custom = True

    port0 = str(values[0])
    output = str(values[1])
    port = str(values[2])
    particle_size = str(values[3])
    time_in = int(values[6])

    if port != '':
        arduino = serial.Serial(port=port, baudrate=9600)

    if particle_size == '0.3':
        column = 0
    elif particle_size == '0.5':
        column = 1
    elif particle_size == '1.0':
        column = 2
    elif particle_size == '2.5':
        column = 3
    elif particle_size == '5.0':
        column = 4
    elif particle_size == '10':
        column = 5

    out_s = ''
    point = False
    for num_c in output:
        out_s += num_c
        if num_c == '.':
            point = True
            break

    str_out = ''

    if point == True:
        for cnt, str_read_out in enumerate(out_s):
            if cnt < len(out_s)-1:

```

```

        str_out += str_read_out
    else:
        str_out = out_s

#=====Read
part=====#
    datas=[]
    nop=15 #number of points for averaging/Filtering
    start_time=time.time() #starting system time
    timed=[]; #time data
    pm03=[];
    time_count = []
    time_flow = []
    flow = []

    curr_t = 0
    #port0 = '/dev/ttyUSB0'

    PMS_Sensor = serial.Serial(port=port0, baudrate=115200)
    d2=[]

    for k in range(0,(60*time_in)+16): #set how long you want
to receive data
        window.write_event_value('-THREAD-', '')
        event, values = window.read()

        if event == 'Stop':
            break
            window['Run test'].update(disabled=False)
            window['Stop'].update(disabled=True)

            window.write_event_value('-THREAD-', '')
            event, values = window.read()

        read_PMS = PMS_Sensor.readline()

        data = float(read_PMS.decode())

        #print(data)

        #d1 = data.split()

        #d2.append(data)
        d2=[]

        #for i in range(len(d1)):
        d2.append(data)

        d2=np.array(d2)
        d2=d2.reshape(1,-1)

        if(k==0):
            datas=np.array(d2)
        else:

```

```

        datas= np.append(datas,d2,axis=0)
    if(k<nop):
        print('Initialising')
    elif(k==nop):
        print('ready')
    elif(k>nop):

#=====Plot mask
test=====#
        timed.append(datas[k,0])

        k_cnt = ((k-15)/60)

        time_count.append(k_cnt)

        #pm03.append(np.mean(datas[k-nop:k,column]))
        pm03.append(np.mean(datas[k-nop:k,0]))

        if colorbar_custom == False:
            if min(pm03) == 0:
                min_range_y = 0
            else:
                min_range_y = int(min(pm03))
            if max(pm03) == 0:
                max_range_y = 0
            else:
                max_range_y = int(max(pm03))

        elif colorbar_custom == True:
            min_range_y = int(values[4])
            max_range_y = int(values[5])

        tmin = 0
        tmax = time_in

        t_init = timed[0]

        fig =
fig_maker(time_count,pm03,min_range_y,max_range_y,tmin,tmax,t_init,part
icle_size)

        fig_agg = draw_figure(window['canvas'].TKCanvas,
fig)

#=====Plot
flow=====#
        if port != '':

            time_flow.append(k)

            data_arduino = arduino.readline()

            write_flow = float(data_arduino.decode())

            flow.append(write_flow)

```



```

        fig_flow = flow_fig(time_flow, flow)

        fig_agg2 =
draw_figure(window['canvas0'].TKCanvas, fig_flow)

#=====
=====#

        window.Refresh()

        delete_fig_agg(fig_agg)

        if port != '':
            delete_fig_agg(fig_agg2)

        plt.cla()

        k += 1

        curr_t += 1

        window['current_time'].update(str(curr_t))

        window['Run test'].update(disabled=False)

        np.savetxt(str_out+".csv", datas) #export raw data to
external file

fig_maker(time_count, pm03, min_range_y, max_range_y, tmin, tmax, t_init, part
icle_size)

        plt.savefig(output+".svg")

        plt.cla()

        os.system("clear")

```