

UNIVERSIDADE DO VALE DO PARAÍBA
INSTITUTO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA E ASTRONOMIA

LETÍCIA PEREIRA DOS SANTOS FERREIRA BARBOSA DE SOUSA

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE NANOCELULOSE PARA
APLICAÇÕES EM FILTROS DE AR VISANDO APLICAÇÕES AEROESPACIAIS

DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF NANOCELLULOSE FOR AIR
FILTER APPLICATIONS AIMING AT AEROSPACE APPLICATIONS

São José dos Campos, SP.
2024

Letícia Pereira dos Santos Ferreira Barbosa de Sousa

Desenvolvimento e caracterização de nanocelulose para aplicações em filtros de ar visando aplicações aeroespaciais

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia da Universidade do Vale do Paraíba, como complementação dos créditos necessários para obtenção do grau de Mestre em Física e Astronomia.

Área de concentração: Física da Matéria Condensada.

Orientadora: Profa. Dra. Lucia Vieira

São José dos Campos, SP.
2024

TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

Ficha catalográfica

Sousa, Letícia Pereira dos Santos Ferreira Barbosa de
Desenvolvimento e caracterização de nanocelulose para
aplicações em filtros de ar visando aplicações aeroespaciais /
Letícia Pereira dos Santos Ferreira Barbosa de Sousa;
orientadora, Profa. Dra. Lucia Vieira. - São José dos Campos,
SP, 2024.

1 CD-ROM, 58 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade do Vale do
Paraíba, São José dos Campos. Programa de Pós-Graduação em Física
e Astronomia.

Inclui referências

1. Física e Astronomia. 2. Nanocelulose. 3. Plasma. 4. Álcool
de Polivinil. I. Vieira, Profa. Dra. Lucia, orient. II.
Universidade do Vale do Paraíba. Programa de Pós-Graduação em
Física e Astronomia. III. Título.

Eu, Letícia Pereira dos Santos Ferreira Barbosa de Sousa, autor(a) da obra
acima referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em
outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o
usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado
respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de
propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e
profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 29 de Abril de 2024.



Autor(a) da Obra

LETÍCIA PEREIRA DOS SANTOS F. B. DE SOUSA

**“FILTROS DE AR ELETROFIADOS COM ÁLCOOL POLIVINÍLICO E BIOCELULOSE
VISANDO APLICAÇÃO AEROSPACIAL.”**

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, do Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, pela seguinte banca examinadora:

Rita de C. M. S. Contini	<i>Rita de C. M. S. Contini</i>
Virginia K. de Oliveira	<i>Virginia K. de Oliveira</i>
Valdir Gil Pillat	<i>Valdir Gil Pillat</i>
Lucia Vieira	<i>Lucia Vieira</i>

Prof.^a Dr.^a Lúcia Vieira
Diretora do IP&D – Univap
São José dos Campos, 08 de março de 2024.

Dedico à Deus por sempre estar ao meu lado
me dando sabedoria nos momentos mais
difíceis desse trabalho e à minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar, por sua ajuda e força que tem me proporcionado ao longo do curso, onde nos momentos mais difíceis Ele me revestiu de forças e bom ânimo para chegar até aqui; e ter me sustentado com saúde física e mental para realização deste trabalho e por ter me capacitado com sabedoria nos momentos mais difíceis deste projeto.

Ao meu pai João e minha mãe Andréia, minha base desde o início da vida que sempre almejam o melhor para mim, me encorajando a sempre estudar e a evoluir intelectualmente.

Ao meu esposo Eliezer, pelo apoio e pela compreensão de eu estar a maior parte dos meus dias me dedicando a este estudo.

Ao meu irmão Lucas, pelas conversas sobre ciências e inspiração para que eu possa continuar nessa área e crescer cientificamente.

Aos meus avós, Cornélio e Izete que sempre estão presentes em minha vida e por serem meus momentos de aconchego, quando vou à casa deles.

À minha orientadora professora Dra Lucia Vieira, por ter me recebido tão bem no Laboratório Nanotecplasma, aceitando animadamente o projeto que eu trouxe desde o Trabalho de Conclusão de Curso e me encorajado para que eu desse continuidade no mestrado; agradeço o incentivo a evoluir, onde pude com a sua colaboração escrever artigos científicos.

À Dra Carolina e colega de laboratório pelo apoio e colaboração com revisões de textos nos meus trabalhos científicos.

À Universidade do Vale do Paraíba, por ser uma Universidade muito agradável de estudar, apesar das dificuldades ao longo do caminho, sou realizada e grata pelos 7 anos de estudo nesta instituição

À CAPES, que financiou o meu mestrado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001”.

“Mas os que esperam no Senhor renovarão as suas forças, subirão com asas como águias: correrão e não se cansarão; caminharão, e não se fatigarão.”

“Isaías 40:31”

RESUMO

Este estudo contém a descrição do desenvolvimento e da caracterização de filtros de ar eletrofiados, utilizando uma combinação de álcool polivinílico (PVA) e nanocelulose, com ênfase em sua aplicação em ambientes aeroespaciais. A combinação do PVA com a nanocelulose eletrofiados promete materiais com propriedades aprimoradas, aproveitando as características únicas da nanocelulose e a versatilidade do PVA. A nanocelulose foi obtida a partir do subproduto do processo de fermentação da bebida kombucha, oferecendo uma fonte de material de baixo custo. Para garantir a pureza do material, foram implementados métodos de esterilização eficazes e ambientalmente amigáveis, como o uso de plasma não-térmico e ultrassom de alta potência. O estudo investigou a influência de técnicas inovadoras de purificação, incluindo o plasma *gliding arc* e técnica consolidada como o ultrassom de alta potência, na remoção de bactérias e resíduos fermentativos. Os resultados indicaram que o ultrassom foi a técnica mais eficaz, sendo selecionado para experimentos futuros, já o plasma propiciou a formação de um subproduto. As nanofibras tratadas com ultrassom foram então adicionadas à solução de PVA e Ácido Cítrico (AC) para eletrofiação de não tecidos e caracterizadas via microscopia eletrônica de varredura para verificar a morfologia. O tratamento por ultrassom provou ser superior, eliminando efetivamente as bactérias enquanto preserva a estrutura das fibras de celulose, deixando apenas as fibras de celulose visíveis. Os espectros de ressonância magnética nuclear (RMN) dos núcleos de ^{13}C revelaram uma nova banda ativa atribuída ao tratamento com plasma, sugerindo a presença de um novo radical identificado como $\text{C}_2\text{H}_2\text{-Y}$, potencialmente originário de compostos de nitrogênio ou oxigênio no ambiente de plasma atmosférico. A Microscopia Confocal de Fluorescência e a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) confirmaram a erradicação eficaz das bactérias com ambos os métodos.

Palavras-chave: Filtros; PVA; Nanocelulose; Eletrofiação; ultrassom; plasma; *gliding arc*.

ABSTRACT

This study presents the development and characterization of electrospun air filters, using a combination of polyvinyl alcohol (PVA) and nanocellulose, with emphasis on its application in aerospace environments. The combination of PVA with electrospun nanocellulose promises materials with enhanced properties, leveraging the unique characteristics of nanocellulose and the versatility of PVA. Nanocellulose was obtained from the by-product of the kombucha fermentation process, offering a source of low-cost material. To ensure the purity of the material, effective and environmentally friendly sterilization methods were implemented, such as the use of non-thermal plasma and high-power ultrasound. The study investigated the influence of innovative purification techniques, including the gliding arc plasma and established technique such as high-power ultrasound, on the removal of bacteria and fermentative residues. The results indicated that ultrasound was the most effective technique, being selected for future experiments, while plasma provided a by-product formation. Ultrasound-treated nanofibers were then added to the PVA/AC Citric acid solution for electrospinning of nonwovens and characterized via scanning electron microscopy to verify the morphology. Ultrasound treatment proved to be superior, effectively eliminating bacteria while preserving the structure of cellulose fibers, leaving only cellulose fibers visible. Nuclear magnetic resonance (NMR) spectra of ^{13}C nuclei revealed a new active band attributed to plasma treatment, suggesting the presence of a new radical identified as $\text{C}_2\text{H}_2\text{-Y}$, potentially originating from nitrogen or oxygen compounds in the atmospheric plasma environment. Confocal Fluorescence Microscopy and Scanning Electron Microscopy (SEM) confirmed the effective eradication of bacteria with both methods.

Keywords: Filters; PVA; Nanocellulose; Electrospinning; Ultrasound; plasma; *gliding arc*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ligações de hidrogênio inter e intramoleculares da celulose bacteriana.	20
Figura 2 - Produção de microfibrilas de celulose por meio da bactéria <i>Acetobacter xylinum</i> .	20
Figura 3 - Metabolismo do kombucha e interações microbianas.	22
Figura 4 – Representação esquemática do plasma Gliding Arc	26
Figura 5 - (a) Propagação de ondas de ultrassom. (b) Ilustração de cavitação estável e transitória. (c) O mecanismo de cavitação acústica induzida por ondas ultrassônicas. (d) Fenômenos resultantes da oscilação acústica das ondas ultrassônicas e seus efeitos na extração da nanocelulose.	27
Figura 6 - Etapas do processo de eletrofiação	28
Figura 7 - Esquema de eletrofiação. (i) bomba de seringa para deslocamento da solução; (ii) agulha; (iii) fonte de energia de alta tensão, em kV e (iv) coletor aterrado	29
Figura 8 - Sistema de Ventilação da Aeronave (a). Manutenção de um filtro HEPA em aeronave da Emirates (b).	31
Figura 9 - Partes de um filtro com tecnologia HEPA	33
Figura 10 – Fluxograma experimental.	34
Figura 11 - Processo de obtenção da bebida kombucha.	36
Figura 12 - Segmentos de celulose bacteriana. Amostra de controle (A1); amostra tratada via plasma (A2) e amostra tratada via ultrassom (A3).	36
Figura 13 - Reator de plasma gliding arc com uma pluma de plasma tratando segmento de celulose bacteriana.	37
Figura 14 - (a) Segmentos de celulose bacteriana foram alocados em um béquer com 0,150 L de água destilada e (b) em banho de gelo para evitar superaquecimento.	38
Figura 15 - Fluxograma de preparação das soluções para eletrofiação	41
Figura 16 - Espectros de celulose bacteriana (CB) amostra CB-A1 como controle. Na linha verde está a amostra CB-A2 após o tratamento com plasma, na linha vermelha está a amostra CB-A3 após o tratamento com ultrassom de ponteira 30%.	45
Figura 17 - Espectros de RMN da Amostra A1 de Celulose Bacteriana (CB) como amostra de controle. Na linha verde está a Amostra A2-CB após tratamento com plasma e na linha vermelha está a Amostra A3-CB após tratamento	47
Figura 18 - Imagens das colunas 1 e 2 obtidas por MEV e imagens da coluna 3 obtidas por microscopia confocal de fluorescência. Amostra A1 Linha 1 CB pura. Amostra A2 Linha 2 CB tratada com plasma por 10 minutos. Amostra A3 CB tratada com sonda de ultrassom 30% de amplitude de frequência por 15 minutos.	49
Figura 19 - (a) A micrografia da celulose bacteriana exposta ao plasma seguindo a Figura 19 (b) de uma entidade bacteriana intacta envolvida no tecido de celulose.	50
Figura 20 - (a) nanofibras de PVA/AC eletrofiados. (b) Nanofibras de PVA/AC/NC eletrofiados. (c) Nanofibras de filtro HEPA.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificações das nanopartículas (KLABUNDE, 1980).....	19
Tabela 2 - Materiais e proporções para preparo de kombucha.....	35
Tabela 3 - Amostras, Tratamentos e Caracterizações.....	38
Tabela 4 - Análise dos grupos funcionais da CB segundo seus respectivos espectros vibracionais com base em Stuart, B., (2004).....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CB – Celulose Bacteriana

CNF – Nanofibrilas de celulose

ECS - Sistemas de Circulação de Ar

FEG - Pistola de Emissão de Campo

FTIR - Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier

HEPA - *High Efficiency Particulate Arrestance*

MC - Microscopia Confocal

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

NaOH – Hidróxido de Sódio

NC – Nanocelulose

PVA – Álcool Polivinílico

RMN – Ressonância Magnética Nuclear

SCOPY – Symbiotic Culture Of Bacterias and Yeasts (Cultura Simbiótica de Bactérias e Leveduras)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo geral	17
2.2	Objetivos específicos	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	Nanotecnologia	18
3.2	Celulose Bacteriana	19
3.2.2	Métodos de Purificação de Celulose Bacteriana	23
3.3	Tecnologia De Plasma	24
3.3.1	Gliding Arc	25
3.4	Ultrassom de alta potência	26
3.5	Eletrofiação	28
3.5.1	Eletrofiação de polivinil álcool com Nanocelulose	30
3.6	Sistema de ventilação da aeronave	30
4	METODOLOGIA	33
4.1	Fluxograma experimental da produção e caracterização da CB	34
4.2	Meio de cultivo de celulose bacteriana	35
4.2.1	Fermentação do Kombucha	35
4.3	Tratamento da celulose bacteriana via plasma não-térmico	37
4.4	Produção de nanocelulose por ultrassom de ponteira de alta potência	37
4.5	Caracterizações das amostras	38
4.5.1	Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)	39
4.5.2	Análises de microscopia confocal	39
4.5.3	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microscopia Eletrônica de Varredura por Efeito de Campo (FEG)	39
4.5.4	Ressonância Magnética Nuclear (RMN) ¹³C	40
4.6	Fluxograma experimental de preparação das soluções para eletrofiação	40
4.7	Preparação de Solução PVA/AC	41
4.8	Preparação de Solução PVA/AC/NC	41
4.9	Eletrofiação de Solução PVA/AC/NC	42
4.10	Caracterizações	42
4.10.1	Microscopia Eletrônica de Varredura	42
5	Resultados e Discussões	43
5.1	Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)	43
5.2	Espectros de ressonância magnética nuclear (RMN) de ¹³C	46

5.3	Morfologia e ensaio de células vivas/mortas.....	48
5.4	Morfologia das nanofibras de PVA/AC/NC eletrofiadas	50
6	CONCLUSÃO	53
	REFERÊNCIAS.....	53

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, existe uma crescente inquietação sobre a segurança e a qualidade do ar em espaços controlados e na reintrodução de ar. Segundo a International Civil Aviation Organization (Nações Unidas, 2023), os produtores de aeronaves contemporâneas sugerem aumentar ao máximo o fluxo de ar na cabine e desaconselham operar aeronaves sem o uso de sistemas de ar-condicionado ou sem uma fonte externa da Unidade Ar Pré-Condicionado (PCA) devido à ausência de filtragem.

Os sistemas de filtragem eficientes em sistemas de ventilação e ar-condicionado são essenciais para melhorar a qualidade do ar interno, eliminando poluentes, microrganismos e gases (Wu *et al.*, 2022). Contudo, gotículas pequenas (inferiores a 20 μm) são predominantes, referidas como aerossóis e são as principais responsáveis pela propagação de vírus, uma vez que partículas maiores são influenciadas pela gravidade e se depositam rapidamente no chão (Wang *et al.*, 2020a).

O fluxo de ar na cabine da aeronave geralmente se move do teto ao chão em um movimento circular, saindo por aberturas no piso próximas à fileira de assentos de onde se origina. Em aviões mais recentes e maiores, a renovação completa do ar da cabine ocorre a cada 2 a 3 minutos (Boeing, 2023).

Pesquisadores têm analisado a eficiência dos sistemas de climatização em veículos para economizar energia e reduzir emissões. Estudos mostraram a importância do fluxo de ar dentro dos veículos, especialmente em relação à transmissão de doenças. Kale *et al.*, (2007) observaram o fluxo de ar em ônibus com janelas abertas, enquanto outros estudos focaram na qualidade do ar interno e na concentração de CO_2 . Shehadi, (2018) e colaboradores investigaram o fluxo de ar em aeronaves para reduzir a contaminação. Durante pandemias, como a COVID-19, a qualidade do ar em veículos torna-se ainda mais crucial. Filtros *High Efficiency Particulate Arrestance* (HEPA) e luz Ultravioleta (UV) podem melhorar a qualidade do ar, mas os filtros precisam ser trocados regularmente.

O *design* tradicional de aviões não levou em consideração a transmissão de doenças infecciosas pelo ar. As últimas duas décadas nos mostraram que essa transmissão ocorre ocasionalmente. A indústria de fabricação de aviões não pode continuar ignorando o problema. Durante a pandemia da COVID-19, alguns fabricantes e principais executivos de companhias aéreas divulgaram informações enganosas. Por exemplo, afirmaram que, como os aviões

comerciais usavam filtros HEPA, as cabines eram muito limpas. É verdade que os filtros HEPA podem filtrar a maioria dos vírus, mas estudos de revisão de literatura de Wang *et al.*, (2021), constataram infecção por meio de transferência de passageiro para passageiro dentro de uma cabine, antes que o ar fosse filtrado pelo sistema de controle ambiental. Uma possível alternativa para esse problema é a utilização de fibras nanométricas produzidas através do processo de eletrofiação.

As fibras nanométricas produzidas através da eletrofiação são altamente eficientes na filtração devido aos seus diâmetros extremamente finos, vasta área de superfície por grama e presença de poros de tamanho reduzido (Jaeger, 1998). Adicionalmente, sua elevada porosidade resulta em uma menor resistência ao fluxo de ar durante a filtragem de contaminantes. Com essas propriedades, é possível eliminar partículas menores que um micron ou gases prejudiciais. Filtros de ar baseados em nanofibras são versáteis e podem ser empregados em áreas como a indústria de semicondutores, ambientes controlados, sistemas de coleta de poeira, produção de energia e equipamentos de alta precisão (Gibson, 1998); Jaeger, (1998); Shin *et al.*, 2001). Dentre as fibras nanométricas produzidas através do processo de eletrofiação as fibras à base de álcool polivinílico (PVA) possuem ótimas propriedades, como alta transmissão óptica, solubilidade em água, natureza térmica estável e não corrosiva, que o torna possível para diversas aplicações como farmacêuticas e biomédicas (Marin; Rojas; Ciro, 2014; Gaaz *et al.*, 2015).

A eletrofiação deste polímero tem chamado atenção devido à eficácia que possui na fabricação e a vasta aplicação das nanofibras que são utilizadas como agentes antimicrobianos e para a filtração de líquidos e gases. Devido à alta hidrofiliabilidade do PVA, se torna um desafio para filtração de líquidos e gases úmidos, logo para sanar este problema, é inserido ácido cítrico na composição como agente reticulante, sendo atóxico, de baixo custo e trazendo melhorias nas propriedades mecânicas (De Oliveira; Aguiar; Guerra, 2021). Outro polímero natural e renovável que pode melhorar as propriedades mecânicas e de filtração é a celulose.

As nanofibrilas de celulose (CNF) são fibras de origem renovável com dimensões na escala nano e micro. Devido à sua alta área superficial, elas podem melhorar as propriedades mecânicas de compósitos. Medeiros *et al.*, (2008), perceberam que as propriedades mecânicas aumentaram cerca de 240% de nanocompósitos de PVA com CNF, com 7% em peso de CNF. Segundo Zhang *et al.*, (2021a) utilizaram em seu estudo o PVA/CNF para produzir nanofibras,

por ser um composto polimérico atóxico livre de resíduos de solventes orgânicos, biodegradáveis e solúveis em água, além de as CNF melhorarem desempenho de filtragem.

Existem alguns meios para se obter nanofibras de celulose, como através de plantas, algodão, frutas e por bactérias. Neste trabalho foi obtido as nanofibras de celulose através de uma *Symbiotic Culture of Bacteria and Yeast* (SCOBY) elemento proveniente da fermentação da bebida milenar fermentada, o kombucha, tendo como resíduo final um material atrativo e natural. No entanto, é necessário purificação deste biomaterial. Aqui neste presente estudo foi utilizado a tecnologia de *plasma gliding arc* e ultrassonicação de alta potência para purificação da membrana celulósica de maneira verde com dispensação de produtos químicos tóxicos e poluentes.

Assim, existe uma lacuna de pesquisa em relação à purificação de celulose através de plasma de arco deslizante não térmico e ultrassom, especialmente no contexto de extração de nanofibras sem pedaços bacterianos. Neste estudo, apresentamos a aplicação da tecnologia de plasma de arco deslizante não térmico e sonicação em membranas de celulose bacteriana do Kombuchá, com o objetivo de investigar a eficiência na remoção de bactérias e resíduos de fermentação. Esta abordagem contrasta com os métodos alcalinos, que foram amplamente explorados em estudos anteriores sobre purificação de celulose bacteriana, utilizando técnicas de caracterização como a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), Análise de Viabilidade *Live/Dead* e Ressonância Magnética Nuclear (RMN) com posterior eletrofiação deste biomaterial com PVA e Ácido Cítrico (AC), avaliando através do MEV a espessura das fibras eletrofiadas.

Esta pesquisa introduz estratégias inovadoras e ecológicas de purificação para a celulose bacteriana, oferecendo alternativas à abordagem convencional baseada em NaOH e potencialmente avançando suas aplicações nos domínios biomédico e de embalagens, considerando o complexo entrelaçamento de bactérias dentro das estruturas de celulose.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é eletrofiar nanofibras de álcool polivinílico com e sem nanocelulose, visando estudo de aplicação para filtro de ar.

2.2 Objetivos específicos

- 1) Produzir celulose bacteriana através do subproduto de kombucha;
- 2) Tratar celulose bacteriana com plasma não-térmico e ultrassom de ponteira;
- 3) Produzir nanocelulose assistida por ultrassom de ponteira de alta potência;
- 4) Caracterizar a celulose bacteriana após tratamento a plasma e ultrassom via:
 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para verificar a morfologia;
 - Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) para verificar os componentes moleculares;
 - Análise de Viabilidade *Live/Dead* para verificar bactérias vivas e mortas
 - Ressonância Magnética Nuclear (RMN).
- 5) Preparar soluções para eletrofição: 2,5g de PVA + 0,125g de ácido cítrico; 2,5g PVA + 0,125g de ácido cítrico + 6,25g de NC.
- 6) Caracterizar os não tecidos eletrofiados via:
 - MEV para verificar a morfologia das nanofibras.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, será apresentada uma breve explicação sobre o processo de produção da celulose em escala nanométrica destacando a celulose bacteriana como uma alternativa, abordando métodos de purificação, extração e eletrofiação visando aplicação de filtros de ar.

3.1 Nanotecnologia

Materiais tecnológicos possuem propriedades físicas e químicas singulares que possibilitam a investigação para favorecer a sociedade (Bhushan, 2015; Hulla; Sahu; Hayes, 2015). No entanto, as propriedades da matéria em nanoescala são distintas em relação às escalas maiores. Quando se trata de dimensões nano, mudança extrema na propriedade acontece. Logo, a nanotecnologia abre os horizontes para descoberta de novos materiais a partir do final do século XX, oferecendo o progresso de nano sistemas e nanomateriais inovadores, oferecendo novos rumos na ciência e tecnologia.

A nanotecnologia pode ser aplicada na saúde com a produção de medicamentos (Carvalho, 2022; Dimer *et al.*, 2013), aplicação em catálise (Ferreira; Rangel, 2009) e na medicina, sendo essa a que mais se destacou e desenvolveu ao longo dos anos (Cancino; Marangoni; Zucolotto, 2014).

Em um artigo publicado por Michael Faraday, em 1857, apresenta a primeira descrição acerca das propriedades ópticas de partículas metálicas nanométricas (Faraday, 1857). James Clark Maxwell propôs diversos conceitos de distinção em “nanotecnologia” para indicar camadas finas e moleculares (Aithal; Ravindra, 2011).

Em 1914, Richard Adolf Zsigmondy realizou um experimento com ultramicroscopia de campo escuro que permite a visualização de partículas menores que foi possível visualizar partículas menores que o comprimento de onda da luz monocromática. Logo, foi possível visualizar partículas de 100 nm, sendo o primeiro a introduzir a palavra “nanopartículas” (Zsigmondy, 1926).

A classificação de nanopartículas é levada em consideração somente o seu tamanho, que é estipulado à 100 nm em qualquer orientação (Rossetti; Brus, 1986). As nanopartículas são classificadas conforme os critérios da Tabela 1.

Tabela 1 - Classificações das nanopartículas (Klabunde, 1980).

Origem	Natural
	Antropogênico
Tamanho	1-10 nm
	10-100 nm
	Acima de 100 nm
Composição Química	Substâncias inorgânicas
	Substâncias orgânicas
	Elementos do reino vivo

Fonte: Zsigmondy (1926).

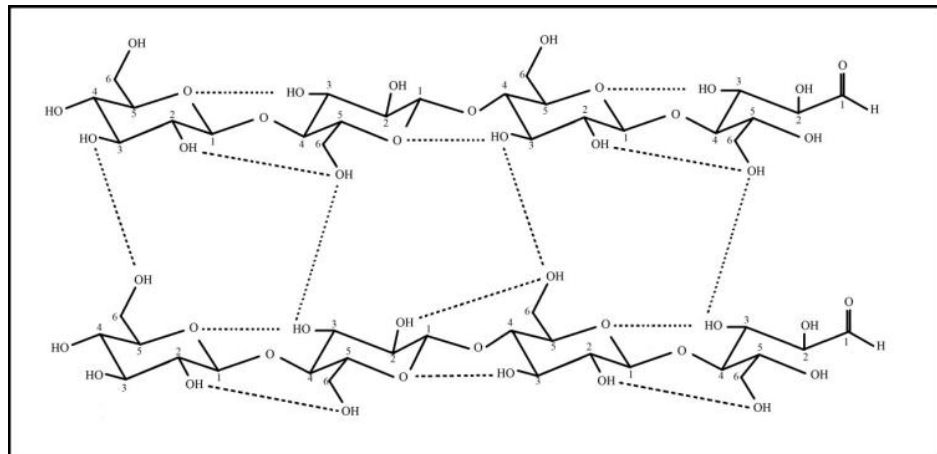
3.2 Celulose Bacteriana

A busca por materiais completamente naturais é incessante para uma economia mais sustentável e verde. No entanto, a celulose está entre esse tipo de material, sendo uma das biomassas biodegradáveis mais fartas no planeta. Celulose é um polissacarídeo constituído por uma cadeia linear de β -1,4 unidades de d-glicose ligadas, podendo ser produzida por plantas e até bactérias (Abeer; Mohd Amin; Martin, 2014; Thomas *et al.*, 2018).

Além da celulose ser oriunda de plantas como bambu, algodão e madeira, a celulose também é capaz de ser sintetizada por algumas bactérias como *Acetobacter*, *Gluconobacter*, *Komagataeibacter*, *Rhizobium*, *Agrobacterium* e *Sarcina*, sendo referida como celulose bacteriana (CB) (Lupaşcu *et al.*, 2022).

A celulose bacteriana (CB) possui uma estrutura química análoga à estrutura da celulose vegetal, mas destituída de lignina, pectina e hemicelulose, substâncias encontradas na estrutura da parede celular vegetal (Margarita *et al.*, 2016). Logo, as distinções estruturais entre CB e celulose vegetal pode ser observado em virtude do arranjo estrutural das fibras de CB que lhes certifica propriedades mecânicas, ausência de contaminantes e alta cristalinidade (Portela *et al.*, 2019). A CB tem uma estrutura de ligações inter e intra-hidrogênio, que segura as cadeias $\beta \rightarrow 4$ cadeias glucanas, com fórmula molecular $(C_6H_{10}O_5)_n$, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Ligações de hidrogênio inter e intramoleculares da celulose bacteriana.

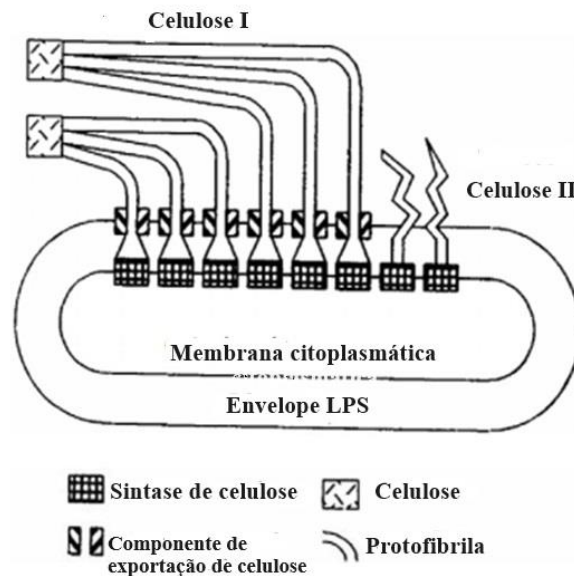


Fonte: Esa; Tasirin; Rahman, (2014).

A *Acetobacter xylinum* fabrica celulose do tipo I que é um polímero com modelo de fita e celulose tipo II que é um polímero estável termodinamicamente, retratado na Figura 2. As fitas de celulose são formadas através da rede celular das bactérias por meio da excreção de protofibrilas da cadeia de glicose, formando uma malha em forma de teia. A celulose gerada possui em abundância grupos hidroxilas que esclarece a sua hidrofilicidade, biodegradabilidade e habilidade de transformação química (Esa; Tasirin; Rahman, 2014). Além disso, por ser desprovida de lignina e hemicelulose, a CB exibe uma pureza, grau de polimerização, cristalinidade, resistência mecânica, capacidade de retenção de água, estabilidade química e biológica superior à celulose vegetal (Cottet *et al.*, 2020).

Estudos revelam diferentes metodologias de produção de CB, correlacionando métodos de cultura e fermentação e elaborações de meios de plantas de biorreatores. Sistemas recentes de produção de CB é utilizar meios de cultura com resíduos doces, com álcoois e ácidos orgânicos, em concentrações <0,5%, para impulsionar síntese de celulose (Campano *et al.*, 2016; Gullo *et al.*, 2017).

Figura 2 - Produção de microfibrilas de celulose por meio da bactéria *Acetobacter xylinum*.

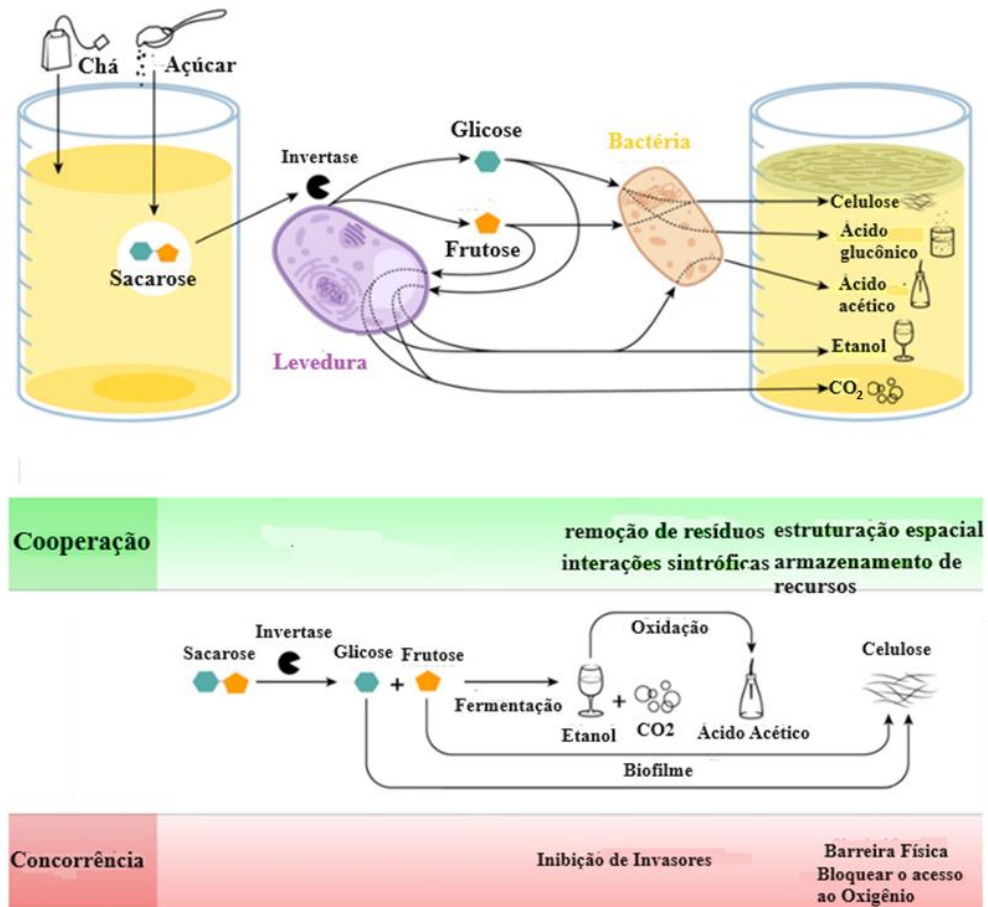


Fonte: adaptado de Chawla *et al.*, (2009).

Outrossim, tem sido exposto que a combinação de bactérias do ácido acético com leveduras intensifica a fabricação de celulose, devido ao metabolismo microbiano sinérgico. As leveduras geram invertase que cede monossacarídeos para meios livres a qualquer micróbio como fonte de carbono. Portanto, as bactérias metabolizam aceleradamente os açúcares liberados e acontece uma redução de monômeros no meio, que por conseguinte amplia a periodicidade de leveduras que produz invertase. Conjuntamente, as bactérias fazem ácidos orgânicos e o filme na superfície para proteger o meio de contaminações. Ademais, a levedura produz o etanol o que irá estimular o mecanismo de celulose-sintase bacteriana para fabricação do filme de celulose (May *et al.*, 2019).

Conforme descrito na Figura 3, a fermentação de kombucha é uma excelente possibilidade para sintetização de celulose bacteriana em razão à interação da SCOBY (Ramírez Tapias *et al.*, 2020).

Figura 3 - Metabolismo do kombucha e interações microbianas.



Fonte: adaptado de May *et al.*, (2019).

Kombucha é uma bebida fermentada com origem asiática, logo, ganhou fama por motivo de ser benéfica à saúde por seus efeitos terapêuticos, tal como antimicrobianos, antioxidantes, anticarcinogênicos, antidiabéticos, entre outros benefícios (Chakravorty *et al.*, 2016).

A bebida é produzida através da fermentação do chá tipo *camellia sinensis*, que abrange os chás preto, branco e verde, com sacarose e uma cultura simbiótica de bactérias e leveduras (SCOBY) que também é conhecido como fungo do chá ou mãe kombucha (Coelho *et al.*, 2020).

Espécies procarióticas são encontradas na kombucha, pertencentes às bactérias do ácido acético, responsáveis por produzir celulose (*Acetobacter xylium*, *Acetobacter xylinoides*, *Komagataeibacter xylinus*, *Acetobacter aceti* e *Acetobacter pasteurianus*) e leveduras (*Saccharomyces*, *Sacharomyces*, *Brettanomyces*, *Zygosaccharomyces* e *Pichia*) (Marsh *et al.*, 2014). A bebida também é rica em polifenóis, açúcares, vitaminas, ácidos orgânicos e

etanol. A fermentação da kombucha se dá pelo consumo da sacarose, principal fonte de carbono pelas bactérias; a fonte de nitrogênio é o extrato de chá e a presença do oxigênio faz com que o SCOBY produza ácidos orgânicos, dióxido de carbono e um biofilme celulósico que flutua na superfície do líquido (Jayabalan *et al.*, 2014). O biofilme fica mais compacto ao longo do tempo de fermentação, semelhante a panquecas. O papel da película formada é preservar o SCOBY contra contaminante externos (May *et al.*, 2019).

O biofilme resultante, é considerado um resíduo, logo é muitas das vezes descartado. Todavia, devido ao material de interesse que esse subproduto é composto, ele serve de fonte celulósica para contribuição de novos materiais, com aplicação na indústria têxtil, biomedicina, nanocompósitos e embalagens de alimentos (Azeredo *et al.*, 2019). Ademais, alguns compostos fitoquímicos presentes como carotenoides, alcaloides, esteroides, taninos, flavonoides e antocianinos pode fornecer propriedades antioxidante e antimicrobiana como biomaterial (Hasheminya *et al.*, 2019).

3.2.2 Métodos de Purificação de Celulose Bacteriana

O biofilme de celulose bacteriana (SCOBY) possui uma estrutura porosa 3D, logo a etapa de purificação é de muita importância para remover resíduos fermentativos, açúcares e ácidos nucleicos. A purificação do biofilme fará com que o material fique mais apropriado para futuras aplicações, o que é muito importante.

O método tradicionalmente usado para purificar membranas de celulose bacteriana é o uso de soluções alcalinas, como o hidróxido de sódio (NaOH) em diferentes concentrações (Sederavičiūtė; Bekampienė; Domskienė, 2019). De 0,5% (Andrade *et al.*, 2011; Sousa *et al.*, 2021), 1% (Dima *et al.*, 2017), de 2% (Vidotto; Ribeiro; Tischer, 2018) e concentrações mais elevadas.

Apesar de ser um método de purificação tradicionalmente utilizado, tem o problema de geração de resíduos químicos, o que não é interessante para uma proposta verde de purificação. O que pode ser explorado para a purificação da celulose bacteriana é a tecnologia de plasma não-térmico. Cubas *et al.*, (2022), abordaram um método de purificação de celulose bacteriana utilizando plasma por tempos de exposição de 10-30 min e descobriram que com tempo de 15 min já não se observava células bacteriana na área interna da membrana, o que mostra o benefício que o plasma pode trazer em relação a eliminação quase completa de bactérias, e ainda, otimizando no tempo de purificação.

Há alguns estudos relatando a utilização do plasma em celulose bacteriana, mas apenas com o objetivo de modificar a sua superfície, precedendo ainda com métodos alcalinos de purificação.

Żywicka *et al.*, (2023) funcionalizou membrana de celulose bacteriana com uso de técnica de plasma usando argônio, para melhorar propriedades antibacterianas de polímeros, pois estudo relatou que LPP-Ar melhoram tecidos de poliéster e tem atividade melhorada contra bactérias Gram-positivas (como a *S. Aureus*) e Gram-negativas (como a *E. Coli*) (Senthilkumar; Karthik, 2016). Bhanthumnavin *et al.*, (2016) testou o plasma de oxigênio para modificação de superfície de celulose bacteriana, visando aplicação para filtração. Os resultados foram positivos na redução do tamanho de poros da membrana de celulose.

3.3 Tecnologia De Plasma

A utilização da tecnologia de plasma para purificação de celulose bacteriana pode ser interessante. A palavra plasma denota um gás ionizado e quase neutro. As descargas plasmáticas são compostas principalmente por fótons, íons e elétrons livres, tal como átomos que estão em um estado fundamental ou excitados com uma carga geral neutra líquida. Estas descargas desempenham um papel crucial em muitas aplicações tecnológicas essenciais no processamento. O sistema de ionização concebe a esses gases a capacidade de transformarem condutores de eletricidade, visto que abastecido de energia conforme tipo, vazão, frequência e pressão apropriados ao processo (Pankaj *et al.*, 2014). O plasma com espécies excitadas, pode levar à emissão de luz, permitindo com que as espécies excitadas possam interagir com outras, fazendo com que o plasma se torne um coquetel químico fortemente reativo e enigmático, no qual é de relevância para diversas aplicações (Bogaerts *et al.*, 2002).

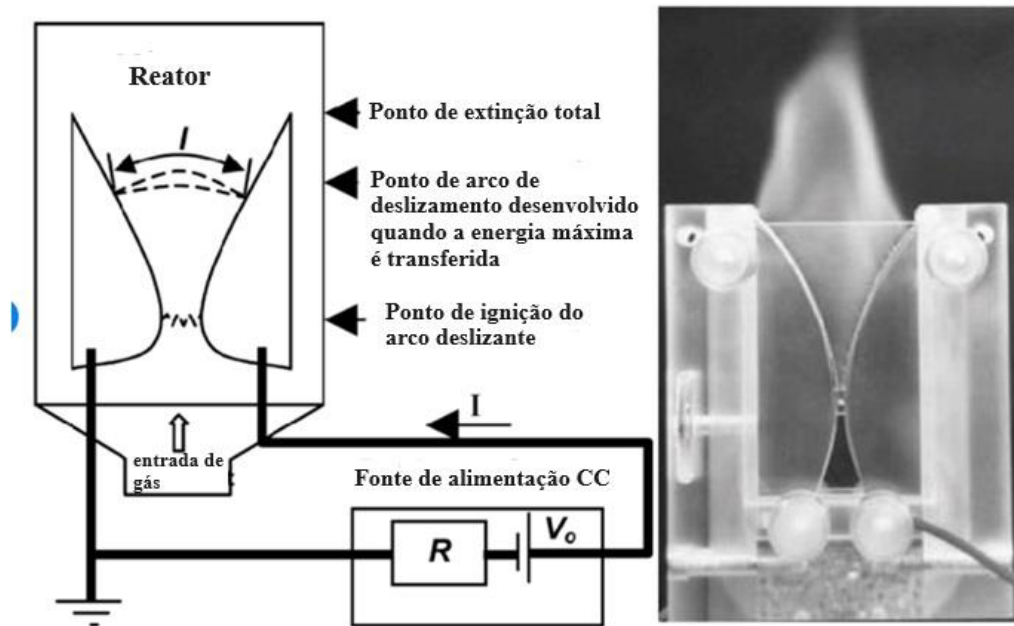
Entre as diversas formas de plasma, é comum definir em dois grupos designadamente, térmicos e não-térmicos, em modos de densidade eletrônica ou temperatura.

Descargas de arco, tochas ou radiofrequência normalmente são referidos à plasmas térmicos, nomeadamente desta forma devido à associação à energia considerável inseridos para permitir que os elementos de plasma não-térmico que utiliza menos energia, abrangendo descarga corona, descarga de barreira dielétrica, descarga de arco deslizante, descarga de brilho e descarga de faísca. Esse tipo de plasma é particularizado por uma temperatura eletrônica potente. Nele os elétrons conseguem chocar com moléculas de fundo (N_2 , O_2 , H_2O etc.) gerando elétrons secundários, fótons, íons e radicais (Vandenbroucke *et al.*, 2011).

3.3.1 Gliding Arc

O plasma elétrico *Gliding Arc* é uma técnica inovadora que envolve a criação de um estado altamente energético de plasma por meio da passagem de uma descarga elétrica entre dois eletrodos, enquanto um gás é continuamente injetado na região da descarga. O nome "*Gliding Arc*" refere-se ao movimento constante e oscilatório da descarga elétrica entre os eletrodos. Esta técnica gera temperaturas muito elevadas e cria um ambiente altamente reativo no qual várias reações químicas e físicas podem ocorrer (Vandenbroucke *et al.*, 2011). Algumas das aplicações notáveis do plasma elétrico *Gliding Arc* incluem: a) Tratamento de Efluentes: O *Gliding Arc* é usado para degradar poluentes orgânicos persistentes em águas residuais industriais e efluentes contaminados. As altas temperaturas e a reatividade do plasma facilitam a quebra de compostos tóxicos em produtos menos prejudiciais (Liu; Tian; Si, 2012). b) Síntese de Nanopartículas: O plasma *Gliding Arc* é empregado na produção de nanopartículas metálicas e cerâmicas de alta pureza e tamanho controlado. Essas nanopartículas têm aplicações em eletrônica, medicina e materiais avançados (Wang *et al.*, 2020a, 2021). c) Modificação de Superfícies: A técnica é usada para modificar a superfície de materiais, tornando-os mais hidrofóbicos, hidrofílicos ou aderentes. Isso é útil em revestimentos industriais, embalagens de alimentos e materiais biomédicos (Cerny *et al.*, 2019). d) Síntese de Gases e Combustíveis Limpos: O *Gliding Arc* é utilizado para converter gases de baixo valor, como metano e dióxido de carbono, em produtos químicos de maior valor, como hidrogênio ou síntese de combustíveis sintéticos, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa (Shenoy *et al.*, 2019). e) Descontaminação e Esterilização: A capacidade do plasma *Gliding Arc* de eliminar microrganismos patogênicos o torna útil na esterilização de instrumentos médicos, desinfecção de água e tratamento de alimentos. f) Reciclagem de Resíduos: Pode ser aplicado na reciclagem de resíduos plásticos, convertendo plásticos não recicláveis em gases e líquidos que podem ser reutilizados ou eliminados de forma mais segura (Yang; Chun, 2011). A Figura 4 contém uma representação esquemática da tocha de *Gliding Arc*. O *Gliding Arc* é um plasma não estacionário que evolui entre dois eletrodos, por onde passa o gás ionizado a 3kV/mm no ar forma uma pluma de plasma.

Figura 4 – Representação esquemática do plasma *Gliding Arc*



Fonte: adaptado de Kalra; Gutsol; Fridman, (2005).

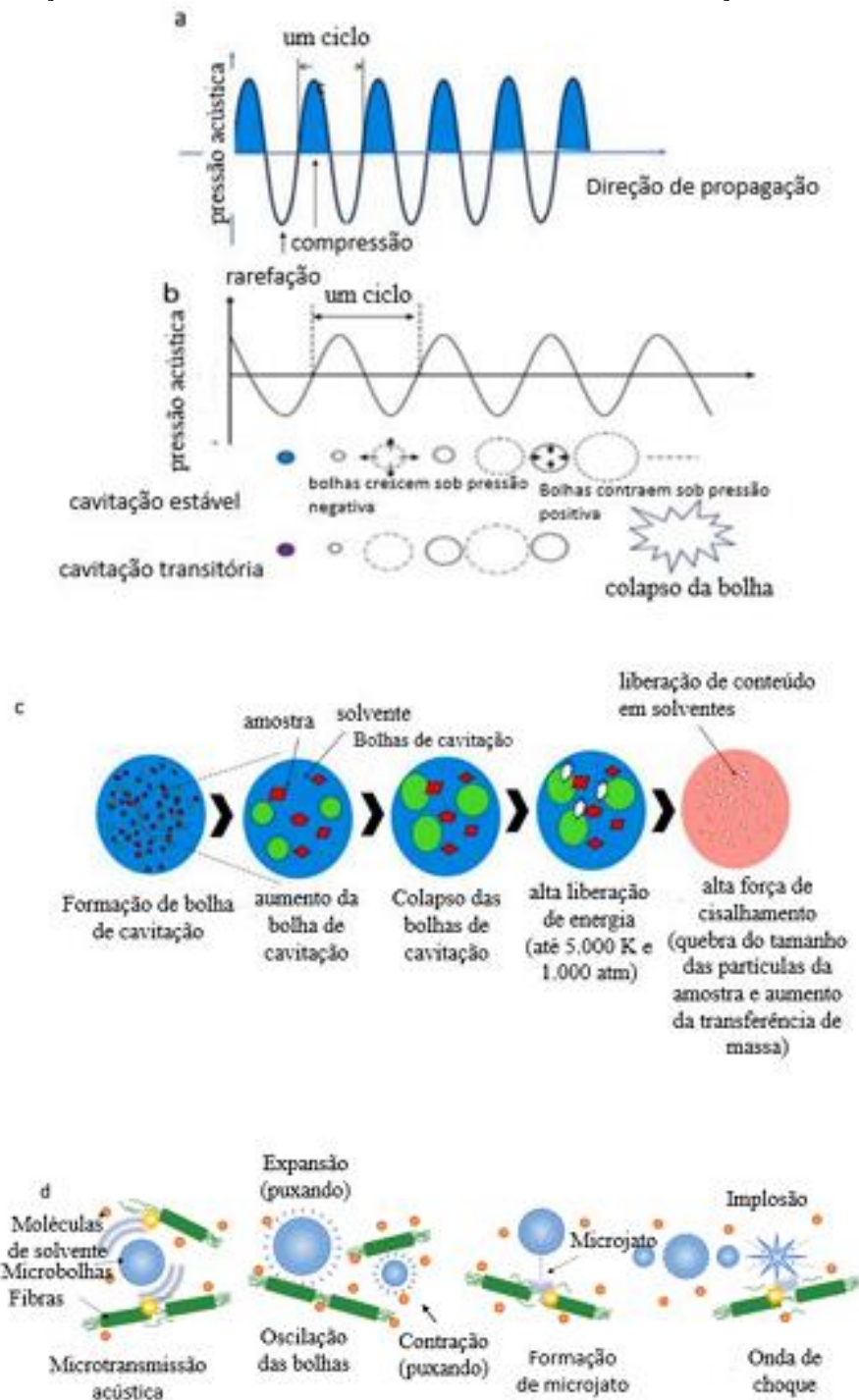
Além do plasma *gliding arc* como técnica de purificação da celulose bacteriana, temos uma técnica física mecânica bastante eficaz que é o ultrassom de alta potência, cuja técnica é verde.

3.4 Ultrassom de alta potência

Outro método físico para purificar membranas de celulose é o ultrassom de alta potência (Tischer *et al.*, 2010). Existem limitações na literatura disponível sobre a limpeza de membranas de celulose, pois a maioria emprega métodos alcalinos e ácidos. Porém, para o isolamento de nanofibras, o ultrassom tem sido utilizado. Segundo o estudo de Tischer *et al.*, (2010), revelou que o ultrassom é capaz de alterar levemente a estrutura das microfibrilas de celulose bacteriana. O ultrassom é um método verde e limpo de extração de nanocelulose, possuindo alta energia proveniente da cavitação acústica, garantindo eficiência no processo de desfibrilação. As forças hidrodinâmicas decompõem as fibras de celulose em microfibrilas, dividindo-as gradativamente na direção axial, facilitando a desintegração em nanofibras (Low *et al.*, 2022). Nguyen e Nguyen, (2022) analisaram o tempo e a temperatura de sonicação, concluindo que o tempo ideal foi de 60 minutos a uma temperatura de 65°C, resultando em uma melhoria nas propriedades mecânicas e térmicas da membrana de celulose.

Logo, após a purificação do filme e a obtenção de nanocelulose conforme apresentado na Figura 5, é possível utilizar esse biomaterial para eletrofição, juntamente com um outro polímero, para obtenção de não tecidos, com aplicação por exemplo em filtros de ar.

Figura 5 - (a) Propagação de ondas de ultrassom. (b) Ilustração de cavitação estável e transitória. (c) O mecanismo de cavitação acústica induzida por ondas ultrassônicas. (d) Fenômenos resultantes da oscilação acústica das ondas ultrassônicas e seus efeitos na extração da nanocelulose.



Fonte: adaptado de Low *et al.*, (2022).

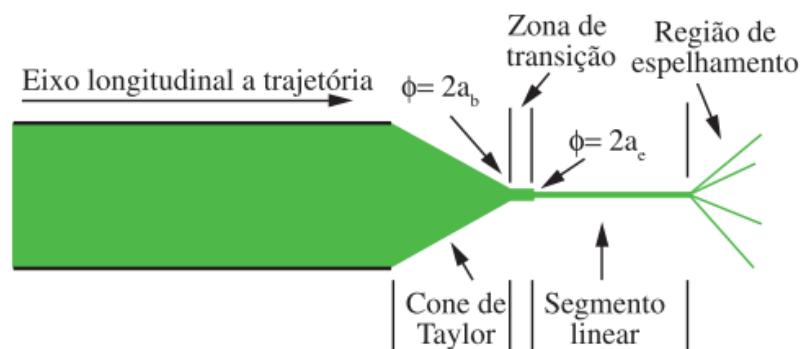
3.5 Eletrofiação

Eletrofiação é um método de fiação que utiliza força eletrostática para produzir fibras através de uma solução polimérica. Esse processo de formação das fibras é totalmente físico, através da evaporação do solvente. O processo tem ganhado extensa popularidade no laboratório na produção de fibras contínuas em nanoescala. Na indústria, encontra-se a eletrofiação para fabricação de filtros bastante eficazes (Tucker *et al.*, 2012).

A primeira observação de atração eletrostática de um líquido foi no século dezessete, pelo médico e cientista inglês William Gilbert. Gilbert visualizou o cone de Taylor através de uma gota de água sobre uma superfície seca, na qual se aproximar âmbar à essa gota esférica, a uma distância adequada, a água começa a sair da sua posição e forma um cone de Taylor. Gilbert passou a comparar força e distância, pois à medida que o âmbar se aproxima, mais rápido é o movimento da gota, pois forças mais fortes a atração aumenta (Gilbert, 1600).

Reneker e Yarin, (2008) apresentaram que um jato eletrofiado pode ser dividido em quatro regiões diferentes, conforme Figura 6. O cone de Taylor reportado por Taylor por uma gota, sendo que ao ser submetida a um potencial elétrico cada vez mais alto é o estiramento, tendendo a um formato cônico (Doshi; Reneker, 1995; Hohman *et al.*, 2001).

Figura 6 - Etapas do processo de eletrofiação



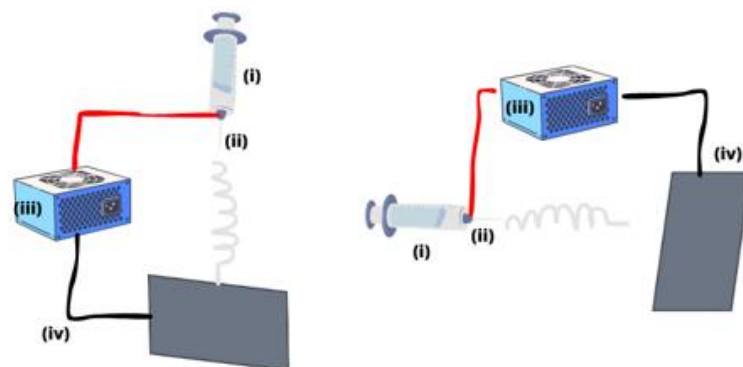
Fonte: adaptado de Costa *et al.*, (2012).

Através do uso de um campo elétrico no processo de eletrofiação, é possível produzir micro e nano fibras a partir de uma solução polimérica. O processo é fácil e acessível, mas

eficiente para produzir nanofibras. Embora tenha sido patenteado pela primeira vez em 1934 por Formhals, a popularidade da eletrospinning foi nos meados dos anos 90 em razão à ascensão dos assuntos relacionados à nanotecnologia e a investigação por materiais atuais.

A definição de eletrospinning concerne à produção de fibras, normalmente nanométricas, que são feitas a partir de uma solução precursora que sendo submetida à um campo elétrico em condições ambientais adequadas como temperatura e umidade, sendo organizado em quatro partes, conforme Figura 7: (i) bomba de seringa para deslocamento da solução; (ii) agulha; (iii) fonte de energia de alta tensão, em kV e (iv) coletor aterrado. Normalmente o sistema tem uma disposição vertical, mas também existe a disposição horizontal, mesmo sendo menos habitual (Silva; De Paula; Borges, 2021).

Figura 7 - Esquema de eletrospinning. (i) bomba de seringa para deslocamento da solução; (ii) agulha; (iii) fonte de energia de alta tensão, em kV e (iv) coletor aterrado



Fonte: adaptado de Silva; De paula; Borges, (2021).

O processo de eletrospinning compõe três etapas sucessivas, a primeira de geração da gota da solução precursora, a segunda do estiramento da gota e a terceira da concreção da fibra. À vista disso, primeiramente acontece a formação da gota à tensão elétrica na solução, fazendo com que as cargas se acumulem na superfície. Logo, as cargas se repelem de maneira que em um campo elétrico crítico são suficientes para exceder a tensão superficial da solução e gerar um cone de Taylor, que se estica mais no campo elétrico. O jato se transforma em fibras sólidas por motivo da evaporação do solvente. O jato que é estável na agulha se torna jato instável para produzir fibras eletrospinnadas. Quando o campo elétrico atinge valor crítico, a força de repulsão de carga extrapola a tensão superficial e os jatos aparecem na ponta do cone e transportam a

força de tração ao polímero. Por fim, o coletor está com cargas opostas, o que faz com que o jato que está no auge do cone se desloque até ele, pois o coletor está capaz de atrair fibras carregadas. Contudo, o solvente evapora durante o deslocamento do jato, resultando em fibras secas no coletor (Ibrahim; Klingner, 2020).

3.5.1 Eletrofiação de polivinil álcool com Nanocelulose

O polivinil álcool (PVA) possui uma elevada solubilidade em solventes que são polares e hidrofílicos, tais como a água. A capacidade de se dissolver facilmente em água torna seu uso seguro. O PVA é amplamente empregado em diversas aplicações, incluindo fibras, membranas, filmes e adesivos. Recentemente, sua utilização tem se destacado na fabricação de biomateriais, como hidrogéis, lentes de contato, componentes artificiais para o corpo humano e em sistemas de liberação controlada de medicamentos. Além disso, o PVA é um polímero biodegradável e biocompatível, o que o torna favorável para aplicações na indústria farmacêutica. Possui notável resistência química, à tração, compressão e abrasão, ao mesmo tempo em que apresenta baixo custo (Kadajji; Betageri, 2011). Além disso, o PVA pode ser facilmente eletrofiado, somente ele ou com algum aditivo. No entanto, a celulose pode ser um componente promissor na eletrofiação em conjunto com o PVA.

Estudos de Park *et al.*, (2019), produziram filtros de ar compostos de PVA/NC e obtiveram sucesso em relação à eficiência de filtração, através de um método ecologicamente correto. Sutka *et al.*, (2015) encontrou em seus experimentos de PVA/NC uma alternativa para filtração de ambientes com alta umidade relativa. Ji *et al.*, (2021), realizou testes de citotoxicidade e demonstraram que as membranas de nanofibras PVA/NC não são tóxicas, têm boa citocompatibilidade e são promissoras para uso no campo de curativos médicos.

3.6 Sistema de ventilação da aeronave

As cabines de aeronaves representam ambientes nos quais os passageiros são confinados em um espaço com pressurização, que, durante o voo, se encontra a uma altitude de baixa pressão, impossibilitando a evacuação. Estas cabines são caracterizadas por uma elevada densidade populacional, a incapacidade de saída durante o voo, níveis de umidade relativa reduzidos, necessidade de pressurização controlada e uma origem predominante de poluentes

provenientes dos próprios passageiros e de suas atividades, conforme destacado por Chen *et al.*, (2021). A ventilação da cabine é efetuada por meio de uma combinação de ar exterior e ar recirculado, conforme elucidado por Herbig *et al.*, (2023).

Dentro do sistema de ventilação da aeronave, destaca-se o sistema de controle ambiental, que desempenha um papel crítico na manutenção da qualidade do ar. Este sistema monitora dois tipos de contaminação distintos: a contaminação por partículas e a contaminação gasosa/vapor.

A contaminação por partículas resulta da recirculação do ar e abrange uma gama diversificada de materiais particulados, tais como poeira, fibras, escamas de pele, fungos, vírus e bactérias. Estes materiais particulados variam em tamanho desde 1000 μm até 0,01 μm (para referência, um cabelo humano médio possui cerca de 75 μm de tamanho), sendo ocasionalmente ainda menores. Por outro lado, a contaminação gasosa/vapor é constituída por gases como dióxido de carbono e ozônio, além de vapores decorrentes de compostos orgânicos e inorgânicos, incluindo vapor de água, como mencionado por Bull, (2008), originando-se principalmente da composição do ar atmosférico.

O objetivo primordial dos sistemas de ventilação implementados nas cabines de aeronaves é proporcionar um ambiente confortável para os passageiros e, ao mesmo tempo, garantir a saúde e o bem-estar dos ocupantes, como enfatizado por Liu *et al.*, (2023).

O sistema de ventilação predominantemente empregado em aeronaves comerciais é o sistema de ventilação de mistura, no qual o ar atmosférico flui para a cabine a partir do teto ou da parte superior das laterais da cabine, e a exaustão do ar ocorre por meio de saídas próximas ao piso. Este fluxo de ar é submetido a uma etapa de filtragem através de filtros de Alta Eficiência (HEPA), como exemplificado na Figura 8.

A qualidade do ar nas modernas aeronaves comerciais é mantida através de uma frequente taxa de troca de ar, ocorrendo a cada 2 a 3 minutos, conforme especificado por Boing (2023). Isso resulta em um fluxo de ar unidirecional, direcionado de cima para baixo em relação aos passageiros, com um fluxo mínimo para frente ou para trás, de acordo com as diretrizes da Organização de Aviação Civil Internacional (Nações Unidas, 2023).

Figura 8 - Sistema de Ventilação da Aeronave (a). Manutenção de um filtro HEPA em aeronave da Emirates (b).



Fonte: Adaptado <https://www.melhoresdestinos.com.br/filtro-de-ar-avioes-coronavirus.html>

Para economizar energia, os sistemas de controle ambiental, do Inglês “*Environmental Control Systems*” (ECS) de aviões comercial usam uma mistura de aproximadamente 50% de ar de sangria do motor que é muito limpo na altura de cruzeiro e 50% ar recirculado que é filtrado através do Filtro de ar particulado de alta eficiência (HEPA) (Bull, 2008).

O ar recirculado em ambientes fechados, como a cabine de uma aeronave, é suscetível à presença de aerossóis originados das atividades respiratórias dos passageiros, como evidenciado por Liu *et al.*, (2020). Portanto, a eficácia na remoção de aerossóis do ar recirculado é fundamental para assegurar um ambiente de saudável, seguro e confortável na cabine. Atualmente, a maioria das aeronaves comerciais emprega Filtros HEPA para essa finalidade, conforme destacado por Zhang *et al.*, (2022).

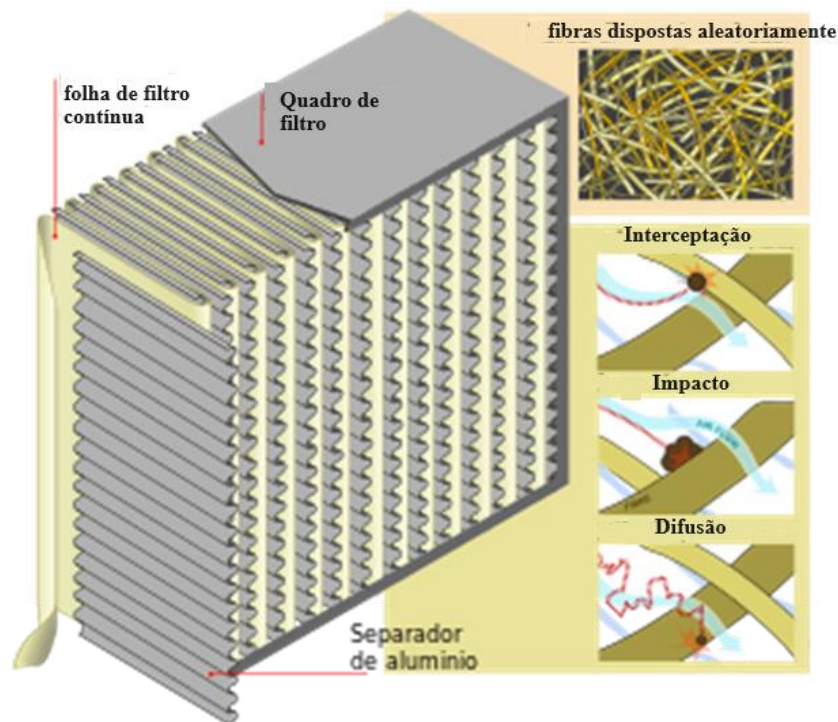
Os filtros HEPA utilizam uma matriz de fibra de vidro como meio de filtração, exibindo uma notável eficiência de filtração de 99,97% para partículas com um diâmetro aerodinâmico de 0,3 μm , além de uma capacidade de retenção de poeira significativa, conforme evidenciado por Zhang *et al.*, (2021b).

A variedade de estruturas e funções dos filtros de ar empregados nos Sistemas de Circulação de Ar (ECS) das cabines de aeronaves varia conforme o modelo da aeronave. Zhang *et al.*, (2022) compilou informações de filtros de ar utilizados em aeronaves como A320, A330, A340, A380, B737, B747, B757, B767, B777 e B787. As aeronaves utilizam diversas configurações de filtros, incluindo placas plissadas, placas separadoras, formas em V, cilíndricas e prismáticas, são empregadas, uma delas está exemplificada na Figura 9.

Regan *et al.*, (2022) conduziram uma revisão da literatura para identificar estudos que demonstram a capacidade dos filtros HEPA em reduzir substancialmente a carga de vírus, incluindo o SARSCoV-2, bem como aerossóis contendo fungos e bactérias.

Entretanto, é importante notar que os filtros HEPA são fabricados com fibra de vidro e não são facilmente degradados naturalmente, como enfatizado por Min; Kim; Kim, (2018). Essa característica cria um significativo impacto ambiental, conforme indicado por Geyer; Jambeck; Law, (2017). Portanto, há uma crescente necessidade de explorar novas tecnologias visando à mitigação de agentes infecciosos sem causar impactos negativos ao meio ambiente.

Figura 9 - Partes de um filtro com tecnologia HEPA



Fonte: Adaptado de Zhang *et al.*, (2022).

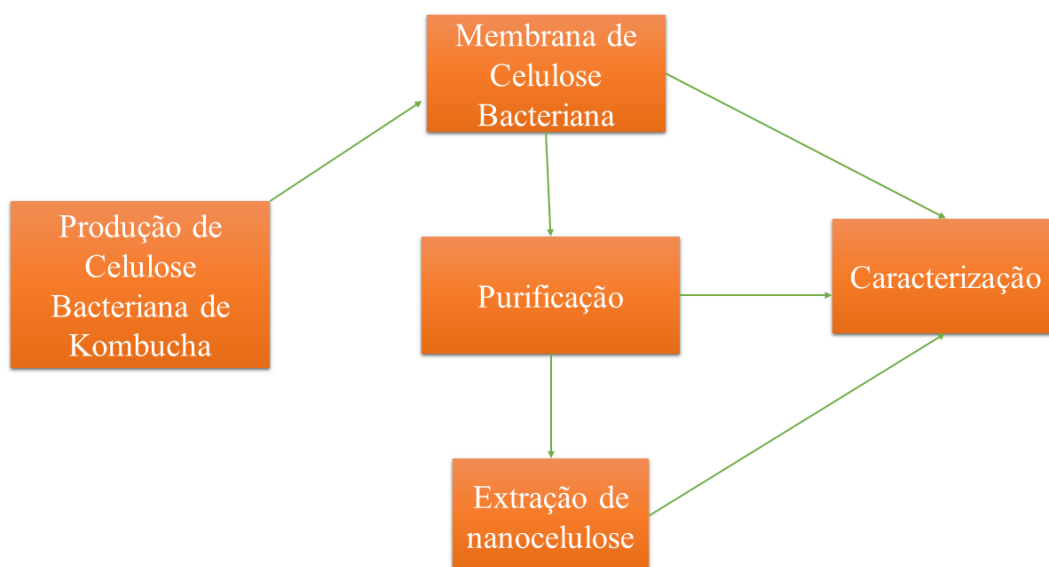
4 METODOLOGIA

A execução deste trabalho foi dividida em seis etapas experimentais: 1) Produção da celulose bacteriana de Kombucha e purificação da mesma, realizada no Laboratório de Nanotecnologia e Processos a Plasma (Nanotecplasma) situado no Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento (IP&D) da Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP), campus São José dos Campos; 2) Extração de nanofibrilas de celulose bacteriana de Kombucha, produzida no Laboratório de Cerâmicas Avançadas no IP&D da UNIVAP; 3) Caracterização das membranas de celulose bacteriana e das nanofibrilas na Central de Laboratório Multiusuários (CLM) no IP&D da UNIVAP; 4) Preparo de soluções de PVA/AC e PVA/AC com NC para eletrofição; 5) Eletrofição das soluções PVA/AC e PVA/AC+NC; 6) Caracterização das nanofibras produzidas por eletrofição.

4.1 Fluxograma experimental da produção e caracterização da CB

A primeira parte experimental deste trabalho foi desenvolvida conforme o fluxograma apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Fluxograma experimental.



Fonte: Elaborado pela autora

4.2 Meio de cultivo de celulose bacteriana

O meio de cultivo utilizado para produção de celulose bacteriana foi chá verde fermentado, conhecido como Kombucha e obtido mediante recomendação do fabricante.

4.2.1 Fermentação do Kombucha

Membrana de celulose bacteriana de kombucha, conhecida como SCOBY (Cultura Simbiótica de Bactérias e Leveduras), código FQ5MWXSSJ e chá verde foram adquiridos através do site <https://www.rosemaia.com.br/> e açúcar branco refinado da marca União, obtido em comércio local. A preparação da celulose bacteriana foi conforme manual de instruções, apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Materiais e proporções para preparo de kombucha

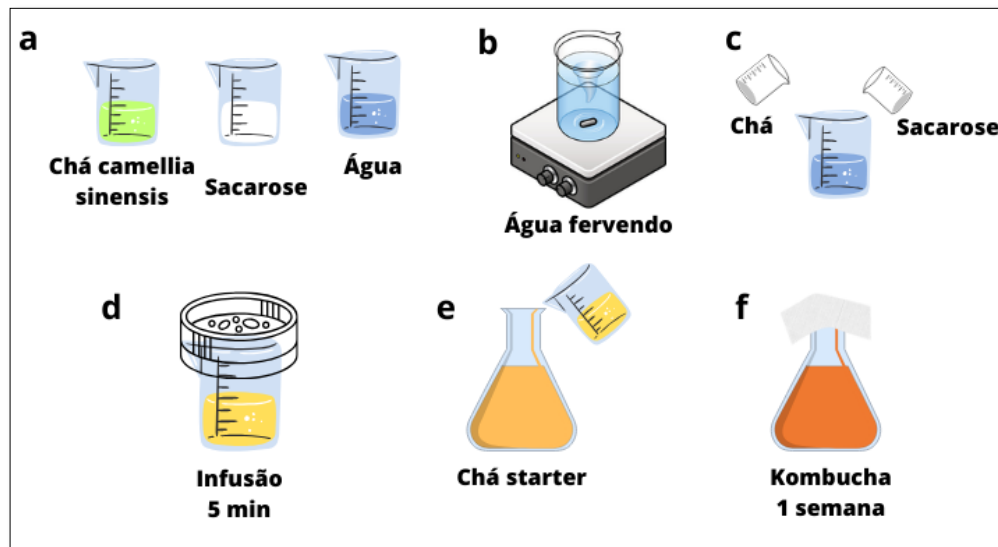
Materiais	Quantidade
Chá <i>camellia sinensis</i>	7,5g
Água	1,5 L
Açúcar	100 g
Chá de arranque	0,150 L
Inóculo (SCOBY)	86 g

Em um recipiente foi fervido 1, L de água e adicionada a ela 100 g de açúcar branco refinado e 7,5 g de chá verde.

A solução ficou 5 minutos em infusão e após esse período foi peneirada e deixou-se esfriar à temperatura ambiente. O inóculo de bactérias e leveduras foi colocado em um recipiente de vidro esterilizado e foi adicionado a ele a solução de chá doce, a temperatura ambiente. O bocal do pote foi coberto com papel toalha e elástico e deixou-o 7 dias fermentando, em temperatura ambiente, para a formação de um biofilme composto de celulose bacteriana.

O processo de obtenção de celulose bacteriana está representado na Figura 11.

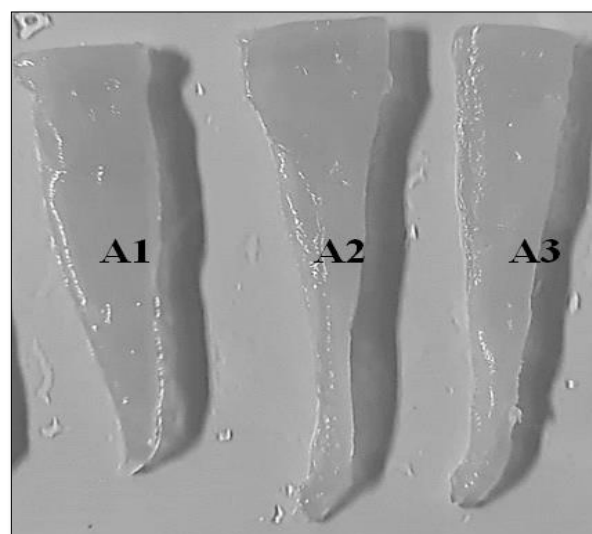
Figura 11 - Processo de obtenção da bebida kombucha.



Fonte: Elaborado pela autora

Após obtenção do biofilme de kombucha, este foi dividido em 3 segmentos para fazer o processo de purificação em diferentes tratamentos. Como está exposto na Figura 12, sendo A1 a amostra de controle, A2 a amostra tratada via plasma e A3 tratada via ultrassom de ponteira.

Figura 12 - Segmentos de celulose bacteriana. Amostra de controle (A1); amostra tratada via plasma (A2) e amostra tratada via ultrassom (A3).

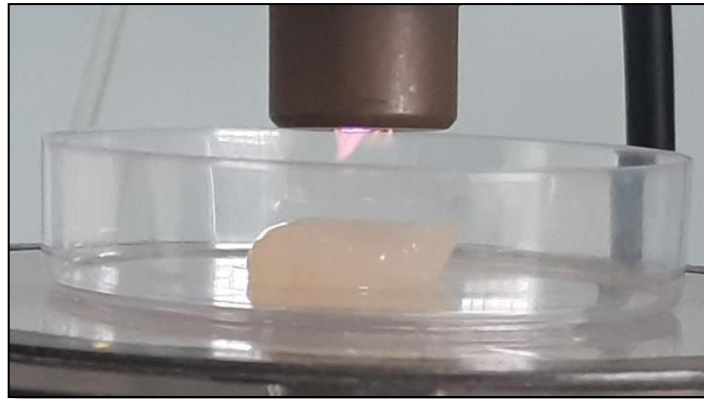


Fonte: Elaborado pela autora

4.3 Tratamento da celulose bacteriana via plasma não-térmico

O biofilme gelatinoso foi cortado em pedaços de 2 cm aproximadamente, como visto na Figura 13 para receber a descarga de plasma por toda sua área e alocado em uma placa de petri. Os gases de plasma utilizado foram de 4 L/min de ar comprimido e 6 L/min de argônio. A potência utilizada foi de 100W. O tempo da descarga de plasma em cada segmento de celulose bacteriana foi de 10 min em cada lado.

Figura 13 - Reator de plasma *gliding arc* com uma pluma de plasma tratando segmento de celulose bacteriana.



Fonte: Elaborado pela autora

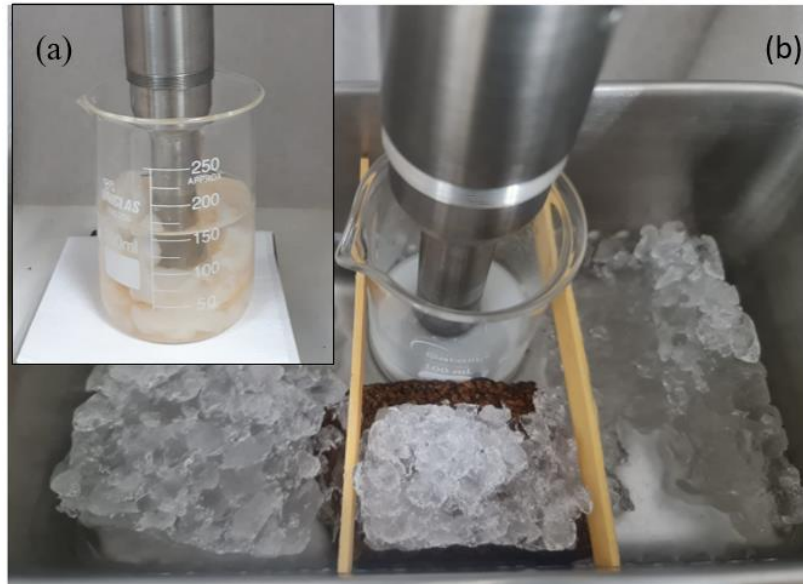
4.4 Produção de nanocelulose por ultrassom de ponteira de alta potência

Segmentos de celulose bacteriana foram alocados em um béquer com 150 mL de água destilada com banho de gelo dentro de outro béquer, representado na Figura 14, para evitar superaquecimento durante o processo de lavagem e da obtenção de suspensão de nanocelulose. O béquer com as celulosas bacterianas foi inserido no sonicador (Sonis Vibra-Cell, VCX 500) com amplitude de 30% por 15 min. O processo foi repetido três vezes para remoção de resíduos fermentativos, com trocas de água.

Em seguida, as CB foram novamente ao sonicador em um béquer com banho de gelo, com 100% de amplitude, temperatura de setup de 50 °C e deixado por 1h para produção de nanopartículas de celulose. As suspensões de nanocelulose foram centrifugadas a 4000 rpm por

10 min. O sobrenadante foi descartado e o precipitado foi recolhido e colocado em uma placa de Petri e levado à estufa por 24h em 40 °C.

Figura 14 - (a) Segmentos de celulose bacteriana foram alocados em um béquer com 0,150 L de água destilada e (b) banho de gelo para evitar superaquecimento.



Fonte: Elaborado pela autora

4.5 Caracterizações das amostras

As amostras foram caracterizadas conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Amostras, Tratamentos e Caracterizações.

Amostras	Tratamentos	Caracterizações
A1	Pura	
A2	Plasma <i>gliding arc</i> não térmico	MEV/FEG FTIR
A3	Ultrassom de ponteira com amplitude de frequência 30%	MC RMN

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5.1 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Os segmentos secos de celulose bacteriana foram analisados por Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) com comprimento de onda na faixa de 4000 até 450 cm^{-1} , com resolução de 4,5 cm^{-1} , 16 varreduras no modo transmitância. Amostras de segmentos de celulose bacteriana foram analisadas por microscopia confocal de varredura a laser acoplado à um scanner confocal. Os espectros de infravermelho foram obtidos no método de Reflectância Total Atenuada (ATR). O ATR é um método de amostragem que introduz luz na amostra para adquirir informações estruturais e de composição molecular em termos do comparecimento de grupos funcionais e características espectrais de infravermelho para celulose bacteriana (Stuart, 2004).

4.5.2 Análises de microscopia confocal

Análises de microscopia confocal (ZEISS – LSM 700-SP-Brasil) foram empregadas para examinar células vivas e mortas. Para uma penetração celular ideal, foram adicionados corantes e solução salina tamponada com fosfato para uma incubação de 15 minutos, proveniente da Invitrogen produzida pela ThermoFischer®, que se mostrou conveniente e fácil de usar para monitorar a viabilidade da população bacteriana com base na integridade da membrana celular. Uma alíquota do corante SYTO, foi diluída em tampão fisiológico PBS na faixa de pH de 7,0 a 8,0. Este conjunto foi usado para emissão de luz no comprimento de onda do laser de 488 nm.

4.5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microscopia Eletrônica de Varredura por Efeito de Campo (FEG)

Também foram utilizadas Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microscopia Eletrônica de Varredura por Efeito de Campo (FEG) após amostras metalizadas fornecerem insights sobre as partes internas e externas da celulose bacteriana. O SEM foi utilizado no modo de elétrons secundários a 20 kV e a preparação da amostra é descrita a seguir. A fixação do material foi realizada imediatamente após a coleta, iniciando com glutaraldeído 25% (1,2mL), tampão fosfato 0,2M (5mL) e completando o volume para 10mL com 3,8mL de H₂O

deionizada. A amostra passou por três lavagens de 30 minutos, sendo a terceira lavagem como ponto de parada, seguindo sequência adaptada para bactérias celulósicas, considerando os períodos de fixação variáveis. A desidratação sequencial com acetona (10 minutos cada: 30%, 50%, 70%, 90% e 100%) foi então aplicada. Após fixação e desidratação, as amostras foram transferidas para uma centrífuga de baixo vácuo da marca e modelo (concentrador *Eppendorf* 5301) durante 40 minutos sob pressão e temperatura controladas. Esta etapa foi importante para remover o líquido residual dentro da célula evitando danos celulares. A liberação cuidadosa da pressão foi crucial para evitar quaisquer mudanças repentinas que pudessem danificar a amostra, necessitando de um manuseio cuidadoso para evitar danos mecânicos. Antes de montar as amostras para aquisição de imagens MEV ou FEG, uma fina camada de ouro como revestimento condutor foi aplicada para aumentar a condutividade da amostra e melhorar a qualidade da imagem. Seguindo o procedimento de camada fina de ouro, as amostras foram seguradas em um stub e fixadas com fita de carbono como adesivo condutor.

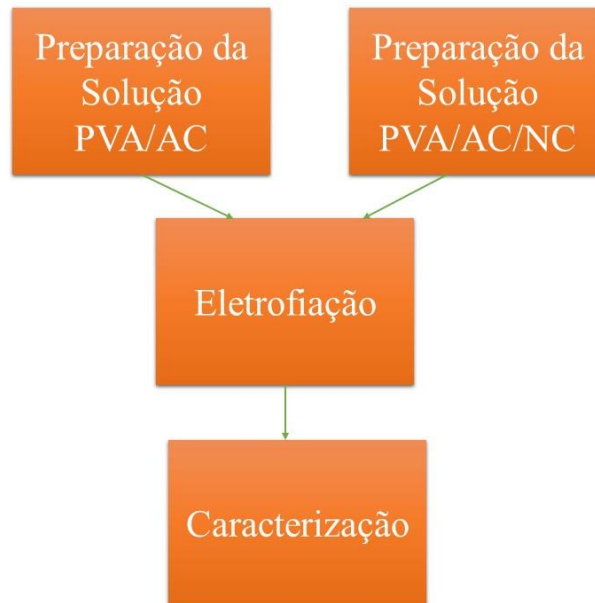
4.5.4 Ressonância Magnética Nuclear (RMN) ^{13}C

Os espectros de RMN dos núcleos ^{13}C foram adquiridos no espectrômetro Bruker AC400 utilizando técnicas de polarização cruzada e rotação de ângulo mágico (CP/MAS), com tempo de contato de 3 ms. O tempo de repetição foi definido em 3 s. A frequência utilizada foi de aproximadamente 4 KHz e para aquisição de dados foi utilizado um rotor de ZrO_2 com diâmetro de 7 mm. Notavelmente, o adamantano foi utilizado como composto de referência padrão-ouro, garantindo a máxima precisão e confiabilidade na interpretação espectral.

4.6 Fluxograma experimental de preparação das soluções para eletrofição

A segunda parte experimental deste trabalho foi desenvolvida conforme o fluxograma apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Fluxograma de preparação das soluções para eletrofiação



Fonte: Elaborado pela autora

4.7 Preparação de Solução PVA/AC

O Álcool polivinílico anidro em pó (Neon, SP, Brasil) P.M. 192,12 foi dissolvido em água para produzir nanofibras. 2,5g de PVA, 0,125g de AC e 22,5g de água foram pesados em balança analítica com concentração final de 11% p/p de PVA e 5% de AC. A solução foi sonicada no ultrassom de ponteira por 15 min, 50°C e amplitude de 50%.

4.8 Preparação de Solução PVA/AC/NC

Para preparar a solução de PVA/AC/NC foi pesado 2,5g de PVA, 0,125g de AC e 6,25g de nanocelulose. A solução pronta foi dissolvida no ultrassom para total dissolução. O béquer contendo a solução foi colocado dentro de outro béquer com banho de gelo para evitar superaquecimento. Os parâmetros de processo foram de 50% de amplitude, temperatura 50°C e por 1h, com paradas de 15 em 15 min para troca de gelo.

4.9 Eletrofição de Solução PVA/AC/NC

Uma seringa com capacidade de 5mL foi carregada com 3mL de solução PVA/AC e ajustada na bomba de eletrofição com os seguintes parâmetros: vazão de 1 mL/h; tensão de 15 kV; distância da ponta da agulha até o coletor de 11,5 cm. Fibras ultrafinas e brancas foram eletrofiadas. Da mesma forma foi realizada a eletrofição de fibras de solução PVA/AC/NC, com os mesmos parâmetros.

4.10 Caracterizações

4.10.1 Microscopia Eletrônica de Varredura

As amostras foram metalizadas com um filme fino de ouro, com a utilização de um sistema de *Sputtering* serem utilizadas na análise morfológica via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e pistola de emissão de campo (FEG). O MEV foi utilizado no modo de elétrons secundários a 20 kV e a preparação da amostra é descrita a seguir. A fixação do material foi realizada imediatamente após a coleta, iniciando com glutaraldeído 25% (1,2mL), tampão fosfato 0,2M (5mL) e completando o volume para 10mL com 3,8mL de H₂O deionizada. A amostra passou por três lavagens de 30 minutos, sendo a terceira lavagem como ponto de parada, considerando os períodos de fixação variáveis. A desidratação sequencial com acetona (10 minutos cada: 30%, 50%, 70%, 90% e 100%) foi então aplicada. Após fixação e desidratação, as amostras foram transferidas para uma centrífuga de baixo vácuo da marca e modelo (concentrador *Eppendorf* 5301) durante 40 minutos sob pressão e temperatura controladas. Esta etapa foi importante para remover o líquido residual das nanofibras evitando danos celulares. A liberação cuidadosa da pressão foi crucial para evitar quaisquer mudanças repentinas que pudessem danificar a amostra, necessitando de um manuseio cuidadoso para evitar danos mecânicos. Antes de montar as amostras para aquisição de imagens MEV ou FEG, uma fina camada de ouro como revestimento condutor foi aplicada para aumentar a condutividade da amostra e melhorar a qualidade da imagem. Seguindo o procedimento de camada fina de ouro, as amostras foram seguradas em um stub e fixadas com fita de carbono como adesivo condutor.

5. Resultados e Discussões

5.1 Espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros de FTIR forneceram informações sobre a estrutura molecular do material à base de celulose antes e depois dos tratamentos com plasma e ultrassom. Os espectros foram registrados na faixa de 4.000 a 500 cm^{-1} usando o modo ATR, e os gráficos resultantes foram representados em porcentagens de transmitância. Três acumulações foram utilizadas para refinar os espectros, com cada ponto de dados adquirido em um intervalo de 10 segundos.

A referência ao trabalho de Stuart (2004) propiciou a identificação de bandas específicas dos espectros de FTIR de transmitância da CB.

Pode ser observado na Tabela 4 a presença de uma banda de amida NH_2 primária em 3343 cm^{-1} , indicando alongamento assimétrico grupos de aminoácidos. Esta banda exibiu contribuições do grupo OH em 3726–3743 cm^{-1} , característica da vibração de grupos OH "livres" associados à água ligada.

Os lipídios foram discerníveis através de bandas de estiramento simétrico de CH_3 em 2.870 cm^{-1} , seguidos por aldeídos alifáticos na faixa de 1.740 a 1.720 cm^{-1} .

A banda NH_2 apresentou vibrações na faixa de 1650 a 1620 cm^{-1} , atribuídas a uma banda amida secundária.

O estiramento do composto azo $\text{N}=\text{N}$ foi evidente entre 1450 e 1400 cm^{-1} . As aminas aromáticas apresentaram bandas de estiramento de C-N na faixa de 1360 a 1250 cm^{-1} , enquanto as aminas alifáticas foram identificadas entre 1220 e 1020 cm^{-1} , confirmando a presença de proteínas em CB.

O estiramento de $\text{O}=\text{C}-\text{N}$ centrado em 627 ocorreu entre uma banda larga de 700 e 600 cm^{-1} , enquanto o estiramento de S-S entre 550-450 cm^{-1} indicou a presença de grupos funcionais de enxofre na estrutura de CB.

Tabela 4 - Análise dos grupos funcionais da CB segundo seus respectivos espectros vibracionais com base em Stuart (2004)

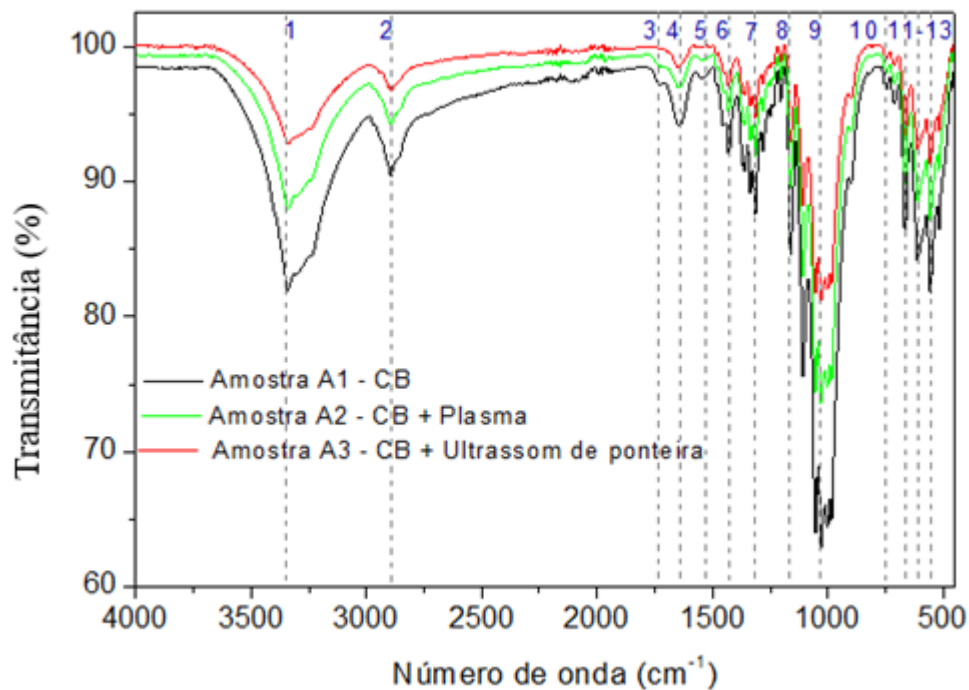
Sequência	Número de onda (cm ⁻¹)	Stuart (2004)	Ligação
1	3343	3340-3360 cm ⁻¹ - Amida primária alongamento assimétrico de NH ₂	NH ₂
2	2870	Bandas dos lipídios-alongamento simétrico	CH ₃
3	1735	Aldeído saturado	Aldeído alifático
4	1644	Amida I	NH ₂
5	1427	Banda fraca devido a pequena mudança no momento dipolar	N=N
6	1321	Todas as aminas apresentam bandas de estiramento C-N, aminas aromáticas entre 1360-1250 cm ⁻¹	C-N aromático
7	1160	Aminas alifáticas	
8	1107	Aminas alifáticas	C-N alifático
9	1030	Aminas alifáticas	
10	667	OCO linear	O=C-N
11	627	Bandas amida de proteínas	
12-13	551	550-450 cm ⁻¹	S-S alongamento

Fonte: Adaptado de: Stuart (2004).

Uma redução discernível na intensidade é evidente em todas as bandas, significando a eficácia dos métodos de purificação por plasma e ultrassom na diminuição da intensidade da ligação em comparação com o biomaterial não processado. Esta redução mostra-se vantajosa para eliminar bactérias, proteínas, ácidos nucleicos e outros resíduos fermentativos. Notavelmente, uma diminuição significativa é observada na banda de 3343 cm⁻¹ em todos os tipos de tratamento, particularmente em amostras tratadas com ultrassom. Esta redução é indicativa de um impacto notável na região associada às amidas primárias. Os resultados ressaltam a eficácia dos tratamentos de ultrassom e plasma no aumento da pureza do CB, mitigando a presença de várias impurezas, incluindo bactérias, ácido acético, ácido glucônico

e ácido glucurônico, que podem surgir durante o processo de fermentação. O efeito do tratamento com plasma também foi observado por Da Rocha Santana *et al.*, (2023). No entanto, este estudo enfatiza a importância de examinar minuciosamente o resultado do método de purificação devido ao emaranhado bacteriano nas estruturas de celulose, onde as bactérias não são apenas incorporadas, mas também protegidas por novas camadas de celulose, resultando na formação contínua de camadas, adicionais com novos descendentes. Este arranjo intrincado forma uma estrutura de tecido multicamadas, sugerindo que uma abordagem de tratamento de superfície pode ser insuficiente para uma purificação eficaz. A persistência de bactérias em camadas envolvidas que são protegidas enfatiza a necessidade de estratégias de purificação abrangentes para remover bactérias que residem em camadas protegidas, garantindo processos de purificação mais completos e eficazes.

Figura 16 - Espectros de celulose bacteriana (CB) amostra CB-A1 como controle. Na linha verde está a amostra CB-A2 após o tratamento com plasma, na linha vermelha está a amostra CB-A3 após o tratamento com ultrassom de ponteira 30%.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 Espectros de ressonância magnética nuclear (RMN) de ^{13}C

A Figura 17 apresenta os espectros de RMN de ^{13}C das amostras de celulose (A1 não tratada, A2 tratada com plasma e A3 tratada com ultrassom), acompanhados da representação estrutural do monômero de celulose com carbonos identificados, facilitando a compreensão.

Todos os sinais que representam os deslocamentos químicos atribuídos aos seis carbonos, correspondentes aos presentes numa unidade monomérica de celulose, podem ser observados.

O carbono 1 apresenta o maior deslocamento químico, em torno de 105 ppm em ambas as amostras, devido à sua ligação com dois átomos de oxigênio. O carbono 4 é identificado por sinais de 89 e 84 ppm, consistentes em ambas as amostras, e está ligado a um átomo de oxigênio. Os deslocamentos químicos na região entre 74 e 71 ppm são atribuídos aos carbonos 2, 3 e 5, que possuem ambientes químicos equivalentes, ou seja, são carbonos secundários ligados a hidroxilas e grupos -CH. O carbono 6 apresenta o menor deslocamento químico, em torno de 65 ppm, sendo um carbono primário ligado a uma hidroxila e o único grupo -CH₂ presente na molécula de celulose.

Todos os dados são consistentes com os encontrados na literatura (Atalla; Vanderhart, 1999); Melo *et al.*, 2011; Vieira *et al.*, 2014). Na mesma figura é apresentado o espectro correspondente à amostra A2, que foi tratada com plasma. Foi observada uma distinção na definição deste espectro em relação aos anteriores, bem como variações nos deslocamentos químicos identificados.

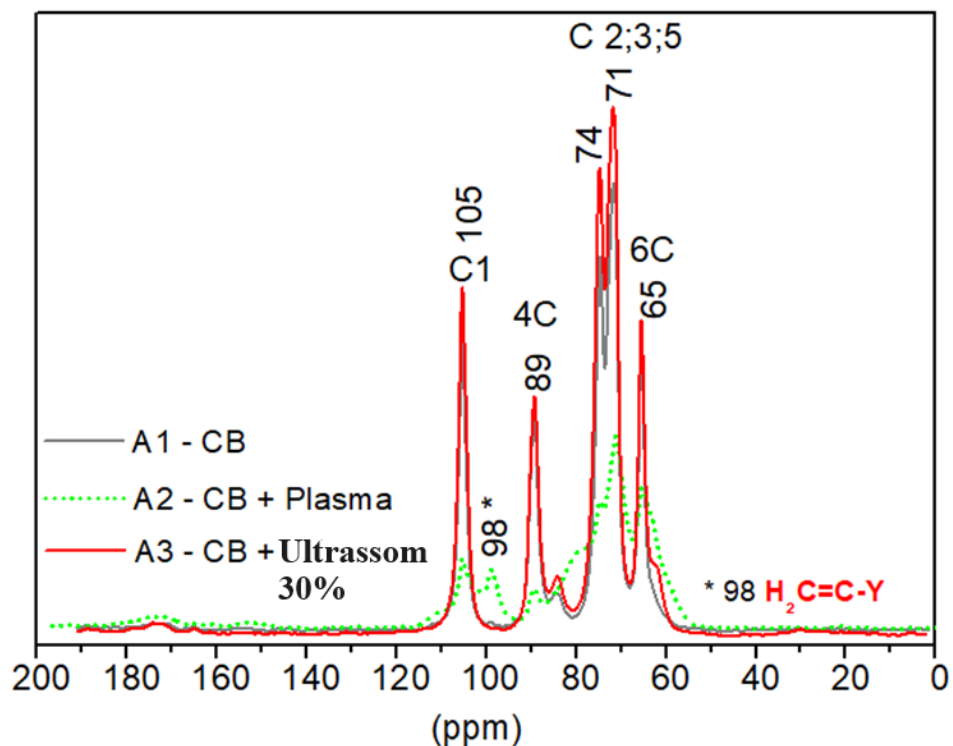
Além disso, um novo deslocamento em torno de 98 ppm foi observado e pode estar relacionado com a formação do alceno H₂C₂Y₂ (Silverstein, 1996). Onde Y poderia ser um substituinte polar como Nitrogênio ou Oxigênio, tais substâncias são comuns em ambiente de plasma, conforme apresentado em um outro estudo do grupo no espectro de emissão óptica de descarga de plasma em ambiente aéreo (De Oliveira *et al.*, 2019).

A mudança em 88 ppm permanece, embora o sinal em 84 ppm esteja obscurecido. Mudanças em 74 e 71 ppm, bem como em 65 ppm, também são identificadas, mas com menor definição.

Esses resultados sugerem possíveis danos à amostra devido à exposição ao plasma, o que pode ter influenciado na intensidade e clareza dos sinais espectrais. Uma hipótese sugere a formação de $H_2C_2N_2$ (Etilideno Cianamida) com pico em 98 ppm.

A etilideno cianamida é comumente usada como regulador de crescimento em plantas. Quando aplicado em concentrações e tempos específicos durante o ciclo de crescimento da planta, pode impactar o desenvolvimento da planta por meio de uma brotação mais consistente, quebrando a dormência das gemas e sincronizando a floração. Além disso, o Etilideno Cianamida é eficaz como fungicida e bactericida em diversas culturas agrícolas, auxiliando no controle de doenças de plantas. Mais testes são necessários para confirmar essas propriedades.

Figura 17 - Espectros de RMN da Amostra A1 de Celulose Bacteriana (CB) como amostra de controle. Na linha verde está a Amostra A2-CB após tratamento com plasma e na linha vermelha está a Amostra A3-CB após tratamento



Fonte: Elaborado pela autora

5.3 Morfologia e ensaio de células vivas/mortas

A morfologia da celulose bacteriana (CB), tanto não tratada quanto submetida a tratamentos de plasma e ultrassom, foi examinada através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microscopia Confocal de Fluorescência - Ensaio de Células Vivas/Mortas, conforme ilustrado na Figura 18. A Figura 18 compreende três linhas e três colunas, delineadas da seguinte forma: a linha 1 representa CB em seu estado natural (amostra A1), a linha 2 representa (amostra A2) tratada com plasma não térmico de arco deslizante e a linha 3 (amostra A3) apresentando celulose bacteriana tratada usando uma sonda de ultrassom. As colunas um e dois apresentam imagens MEV, com ampliação da coluna 1 definida em 1,5K, apresentando uma barra de 20 μ m como guia de referência para interpretação visual. A coluna 2 fornece imagens MEV complementares destacando detalhes da mesma amostra, mas em uma área de exploração diferente. Esta coluna oferece ampliações distintas de barras de 10, 20 e 2 μ m como guias para maior clareza visual. Na Figura 18, a Linha 1 revela bactérias em forma de bastonete com extensões de fibras, enquanto as Colunas 1 e 2 apresentam indicações de bactérias em forma esférica e superfície mais lisa, entrelaçadas com fibras de celulose. A coluna 3 é designada para o ensaio de células vivas/mortas do microscópio confocal de fluorescência da CB.

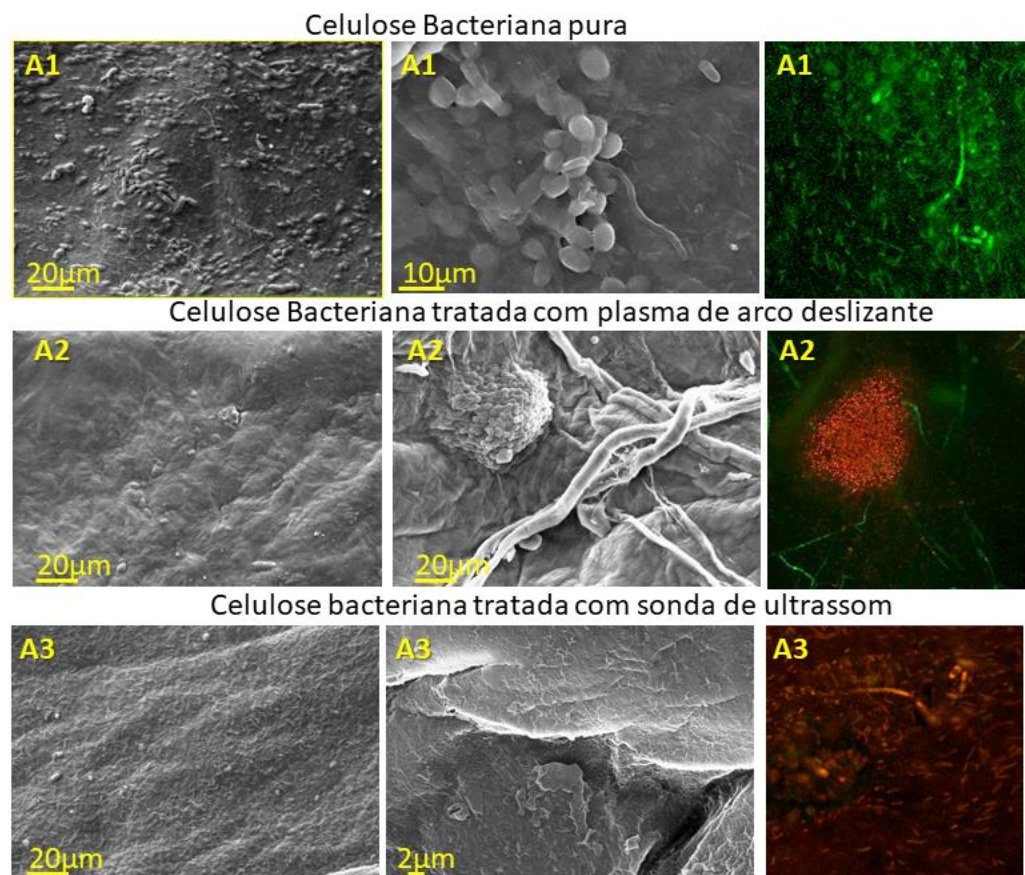
Na Linha 1 da Coluna 3, a CB aparece na coloração verde, significando que as bactérias estão vivas. Passando para a Figura 18, a Linha 2 ilustra o impacto do tratamento com plasma, reduzindo efetivamente a presença de bactérias, deixando apenas um aglomerado visível na coluna 2, linha 2. No entanto, o ensaio de células vivas/mortas na coluna três, linha 2, revela regiões com células viáveis em verde no meio do fundo. A Figura 18, Linha 3, demonstra que o tratamento com ultrassom quase erradicou as bactérias, preservando apenas pequenos fragmentos.

Os tratamentos com plasma e ultrassom parecem eficazes na remoção de bactérias, com notável ênfase no ultrassom preservando a estrutura da fibra e deixando apenas as fibras de celulose evidentes. A avaliação da sobrevivência bacteriana pós-plasma e os tratamentos ultrassonográficos revelaram que o ultrassom é um método mais eficiente na erradicação de bactérias, pois o ultrassom promoveu maior remoção de bactérias nas membranas. Curiosamente, estas descobertas contrastam com os de Cubas *et al.* (2022), que relataram uma exposição de 10 minutos ao plasma não térmico como ineficaz na eliminação bacteriana. Neste

estudo, uma exposição de 10 minutos ao plasma de arco deslizante mostrou-se suficiente para reduzir significativamente as quantidades bacterianas.

No entanto, essa investigação destaca a necessidade de um exame minucioso dos resultados da purificação devido ao emaranhamento bacteriano nas estruturas de celulose. As bactérias não são apenas incorporadas, mas também protegidas por novas camadas de celulose, dando origem a camadas contínuas com novos descendentes. Este arranjo intrincado forma uma estrutura de tecido complexa e de múltiplas camadas, desafiando a adequação das abordagens de tratamento de superfície para uma purificação eficaz. A presença persistente de bactérias em camadas fechadas e protegidas destaca a necessidade de estratégias de purificação abrangentes, garantindo o tratamento de bactérias dentro de camadas protegidas para um processo de purificação mais abrangente e eficaz.

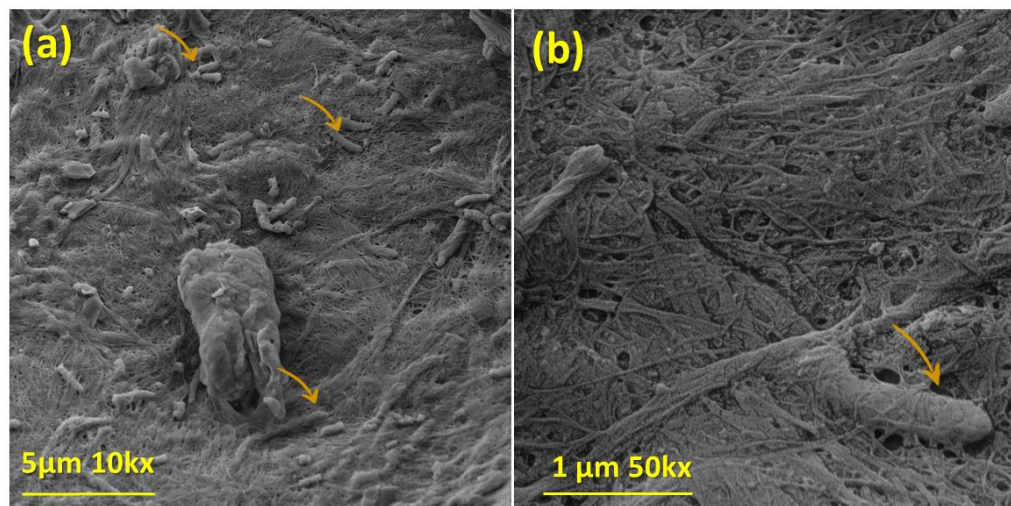
Figura 18 - Imagens das colunas 1 e 2 obtidas por MEV e imagens da coluna 3 obtidas por microscopia confocal de fluorescência. Amostra A1 Linha 1 CB pura. Amostra A2 Linha 2 CB tratada com plasma por 10 minutos. Amostra A3 CB tratada com sonda de ultrassom 30% de amplitude de frequência por 15 minutos.



Fonte: Elaborado pela autora

A Figura 19 contém duas imagens do Field Emission Gun (FEG) da amostra A2. O objetivo foi analisar a morfologia das bactérias residentes após os tratamentos com plasma, uma vez que estas residências foram observadas para este tratamento. Na Figura 19 (a), na grande área, a imagem revela uma redução significativa na população bacteriana, indicando mortalidade catastrófica induzida pelo tratamento com plasma, restando apenas remanescentes mínimos de bactérias, conforme indicado pelas setas laranja. Por outro lado, a Figura 19 (b), capturando uma área distinta, da mesma amostra, revela uma bactéria intacta apontada por uma seta laranja, é possível observar nesta imagem uma entidade envolta no tecido de celulose, ressaltando o impacto matizado e heterogêneo de o tratamento com plasma na sobrevivência bacteriana.

Figura 19 - (a) A micrografia da celulose bacteriana exposta ao plasma seguindo a Figura 19 (b) de uma entidade bacteriana intacta envolvida no tecido de celulose.



Fonte: Elaborado pela autora

5.4 Morfologia das nanofibras de PVA/AC/NC eletrofiadas

A Figura 20 contém três amostras, sendo a Figura 20 (a) representando a Amostra PVA/AC, Figura 20 (b) representando a Amostra PVA/AC/NC e Figura 20 (c) representando a Amostra de filtro HEPA. Na Figura 20 (a), temos fibras na escala menor que 1 µm, sendo que o agente reticulante utilizado, o ácido cítrico, auxilia no afinamento das fibras, como já investigado em pesquisas anteriores na literatura (Park *et al.*, 2019). Na Figura 20 (b), pode-se

observar fibras ainda mais finas, na escala nanométrica, o que se pode concluir que com a adição de nanofibrilas de celulose à solução de PVA/AC, é vantajoso para o afinamento das fibras. Já na Figura 20 (c), pode-se observar fibras finas e uniformes, mas ainda maiores que as nanofibras eletrofiadas.

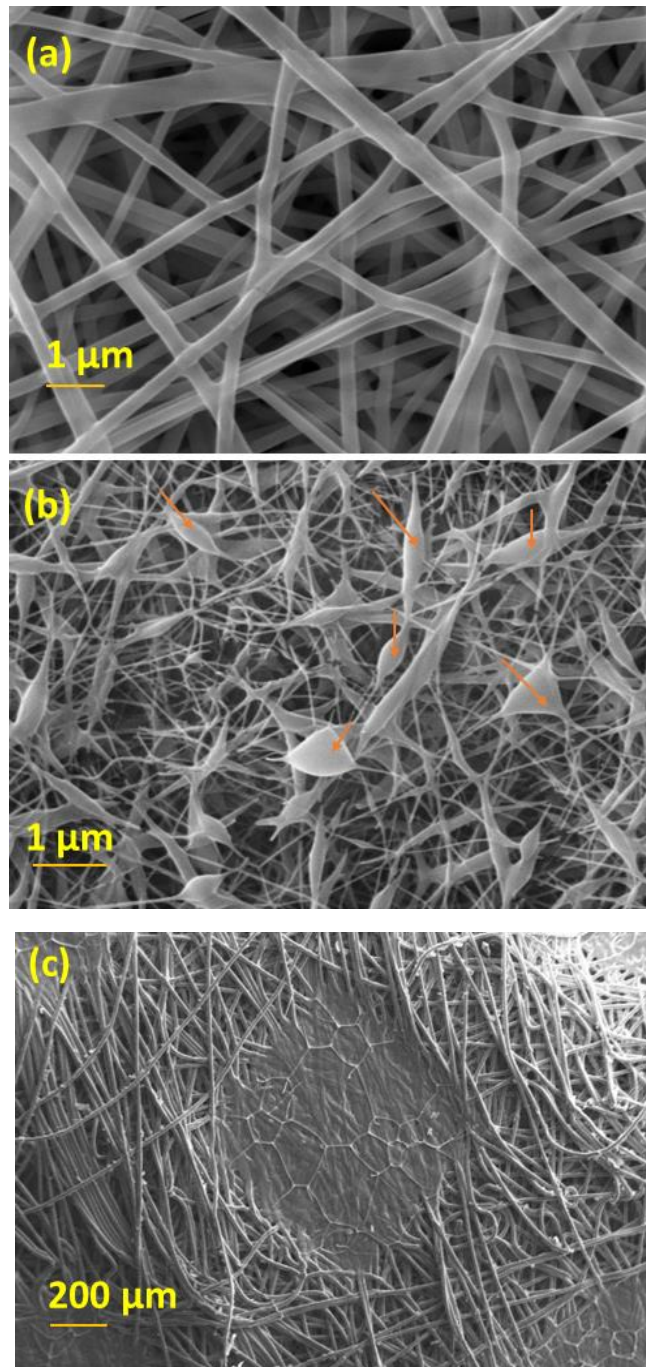
Também pode-se observar na Figura 20 (b) que há formação de “*beads*”, apontados pelas setas em laranja. Na eletrofiação, o termo “*beads*” refere-se a pequenas gotas ou esferas formadas durante o processo. A eletrofiação é uma técnica na qual um polímero líquido é extrudado através de um orifício em condições eletrostáticas. As cargas elétricas presentes fazem com que o líquido seja esticado em filamentos finos que se solidificam rapidamente.

Durante esse processo, em algumas condições, podem se formar gotas ou esferas nas extremidades dos filamentos. Essas gotas são comumente chamadas de “*beads*” (contas, em inglês). A presença de *beads* pode ser controlada ajustando os parâmetros do processo, como a viscosidade do polímero, a taxa de fluxo e as condições eletrostáticas.

A formação de *beads* pode ter implicações na qualidade do produto final, dependendo da aplicação da eletrofiação, podendo diminuir a resistência mecânica. Em alguns casos, os *beads* são desejados e podem ser úteis, enquanto em outros podem ser indesejados e métodos de controle são implementados para evitá-los (Mercante; Corrêa, 2023).

Neste estudo, precisa de mais pesquisas para verificar se esses “*beads*” seriam desejados ou não, na aplicação de filtros de ar para aeronaves.

Figura 20 - (a) nanofibras de PVA/AC eletrofiadas. (b) Nanofibras de PVA/AC/NC eletrofiadas. (c) Nanofibras de filtro HEPA.



Fonte: Elaborado pela autora

6 CONCLUSÃO

Os resultados apresentados neste estudo indicam que a exposição ao plasma e a sonicação da membrana de celulose demonstraram a eficácia de ambos os tratamentos na remoção de bactérias do material à base de celulose.

- A análise dos espectros de FTIR destacou alterações moleculares pós-tratamento, revelando reduções nas intensidades de ligação em todas as bandas.
- Nos resultados de RMN, os espectros sugerem possíveis danos à amostra devido à exposição ao plasma, o que pode ter afetado a intensidade e a clareza dos sinais espectrais.

Uma exposição de 10 minutos ao plasma de arco deslizante não térmico demonstrou ser eficaz na redução significativa das quantidades bacterianas, contrariamente às descobertas anteriores sobre o plasma não térmico. Por fim, a amostra de celulose tratada com ultrassom foi eleita para seguintes experimentos, sendo adicionada à solução de PVA/AC e eletrofiada. Mostrou-se atraente por resultar em fibras mais finas que apenas o PVA/AC e aparição de *beads*, que podem ser atraentes para filtração, por apresentar uma maior área superficial para captura de partículas.

O destaque aqui presente foi que não há registros de celulose bacteriana provenientes da bebida fermentada kombucha, tratados com ultrassom e posteriormente eletrofiados com PVA/AC, sendo inovador na área de nanotecnologia e a utilização de materiais atraentes no quesito de biodegradabilidade, merecendo maiores pesquisas e investigações para aplicação em filtros de ar em aeronaves.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEER, M. M.; MOHD AMIN, M. C. I.; MARTIN, C. A review of bacterial cellulose-based drug delivery systems: Their biochemistry, current approaches and future prospects. **Journal of Pharmacy and Pharmacology**, v. 66, n. 8, p. 1047-1061, 2014.
- AITHAL, P. S.; RAVINDRA, H. J. **Textbook of Engineering Physics**. New Delhi: Acme Learning, 2011.
- ANDRADE, F. K. et al. Studies on the hemocompatibility of bacterial cellulose. **Journal of Biomedical Materials Research - Part A**, v. 98 A, n. 4, p. 554–566, 15 set. 2011.
- ATALLA, R. H.; VANDERHART, David L. The role of solid state ¹³C NMR spectroscopy in studies of the nature of native celluloses. **Solid State Nuclear Magnetic Resonance**, v. 15, n. 1, p. 1-19, 1999.
- AZEREDO, Henriette M. C. *et al.* Bacterial cellulose as a raw material for food and food packaging applications. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 3, p. 7, 2019.
- BHANTHUMNAVIN, W. et al. Surface modification of bacterial cellulose membrane by oxygen plasma treatment. **Surface and Coatings Technology**, v. 306, p. 272–278, 25 nov. 2016.
- BHUSHAN, B. Governance, policy, and legislation of nanotechnology: a perspective. **Microsystem Technologies**, v. 21, n. 5, p. 1137–1155, 1 maio 2015.
- BOGAERTS, Annemie et al. Gas discharge plasmas and their applications. **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**, v. 57, n. 4, p. 609-658, 2002.
- BULL, K. Cabin air filtration: Helping to protect occupants from infectious diseases. **Travel Medicine and Infectious Disease**, v. 6, n. 3, p. 142–144, maio 2008.
- CAMPANO, Cristina *et al.* Enhancement of the fermentation process and properties of bacterial cellulose: a review. **Cellulose**, v. 23, p. 57-91, 2016.
- CANCINO, J.; MARANGONI, V. S.; ZUCOLOTTI, V. Nanotecnologia em medicina: Aspectos fundamentais e principais preocupações. **Química Nova**, v. 37, n. 3, p. 521–526, 2014.
- CARVALHO, G. G. A importância da nanotecnologia para a indústria farmacêutica. *In*: SOARES, Adriano Mesquita (org.). **Tópicos especiais em ciências da saúde: teoria, métodos e práticas 3**. Ponta Grossa: AYA Editora, 2022. p. 306–316.
- CERNY, P. *et al.* Hydrophobization of cotton fabric by Gliding Arc plasma discharge. **Current Applied Physics**, v. 19, n. 2, p. 128–136, 1 fev. 2019.
- CHAKRAVORTY, S. *et al.* Kombucha tea fermentation: Microbial and biochemical dynamics. **International Journal of Food Microbiology**, v. 220, p. 63–72, 2 Mar. 2016.
- CHAWLA, Prashant R. *et al.* Microbial cellulose: fermentative production and applications. **Food Technology & Biotechnology**, v. 47, n. 2, p. 107–124, 2009.
- CHEN, Ruiqing *et al.* Cabin air quality on non-smoking commercial flights: A review of published data on airborne pollutants. **Indoor Air**, v. 31, n. 4, p. 926-957, 2021.

- COELHO, Raquel Macedo Dantas et al. Kombucha. **International Journal of Gastronomy and Food Science**, v. 22, p. 100272, 2020.
- COSTA, Rodrigo GF *et al.* Eletrofiação de Polímeros em Solução: parte I: fundamentação Teórica. **Polímeros**, v. 22, p. 170-177, 2012.
- COTTET, Celeste et al. Biobased materials from microbial biomass and its derivatives. **Materials**, v. 13, n. 6, p. 1263, 2020.
- CUBAS, Anelise Leal Vieira et al. Application of non-thermal plasma as an alternative for purification of bacterial cellulose membranes. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 29, p. 100800, 2022.
- DA ROCHA SANTANA, Rayany Magali *et al.* Original nanostructured bacterial cellulose/pyrite composite: Photocatalytic application in advanced oxidation processes. **Chemosphere**, v. 319, p. 137953, 2023.
- DE OLIVEIRA, A. E.; AGUIAR, M. L.; GUERRA, V. G. Improved filter media with PVA/citric acid/Triton X-100 nanofibers for filtration of nanoparticles from air. **Polymer Bulletin**, v. 78, n. 11, p. 6387–6408, 1 nov. 2021.
- DE OLIVEIRA, S. M. M. *et al.* Comparative Study of Candida albicans Inactivation by Nonthermal Plasma on Stainless Steel with and without Diamond-like Carbon Film. **ACS Omega**, v. 4, n. 4, p. 6891–6902, 16 abr. 2019.
- DIMA, S. O. et al. Bacterial nanocellulose from side-streams of kombucha beverages production: Preparation and physical-chemical properties. **Polymers**, v. 9, n. 8, 18 ago. 2017.
- DIMER, Frantiescoli A. et al. Impactos da nanotecnologia na saúde: produção de medicamentos. **Química Nova**, v. 36, p. 1520-1526, 2013.
- DOSHI, J.; RENEKER, D. H. Electrospinning Process and Applications of Electrospun Fibers. **Journal of Electrostatics**, v. 35, p. 151-160, 1995. [http://dx.doi.org/10.1016/0304-3886\(95\)00041-8](http://dx.doi.org/10.1016/0304-3886(95)00041-8)
- ESA, F.; TASIRIN, S. M.; RAHMAN, N. A. Overview of Bacterial Cellulose Production and Application. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 2, p. 113–119, 2014.
- FARADAY, M. X. The Bakerian Lecture. —Experimental relations of gold (and other metals) to light. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 147, p. 145–181, 31 dez. 1857.
- FERREIRA, Hadma Sousa; RANGEL, Maria do Carmo. Nanotecnologia: aspectos gerais e potencial de aplicação em catálise. **Química nova**, v. 32, p. 1860-1870, 2009.
- GAAZ, Tayser Sumer *et al.* Properties and applications of polyvinyl alcohol, halloysite nanotubes and their nanocomposites. **Molecules**, v. 20, n. 12, p. 22833-22847, 2015.
- GEYER, Roland; JAMBECK, Jenna R.; LAW, Kara Lavender. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science advances**, v. 3, n. 7, p. e1700782, 2017.
- GIBSON, Phillip; SCHREUDER-GIBSON, Heidi; PENTHENY, Christopher. Electrospinning technology: direct application of tailorable ultrathin membranes. **Journal of Coated Fabrics**, v. 28, n. 1, p. 63-72, 1998.
- GULLO, M. et al. Increased production of bacterial cellulose as starting point for scaled-up applications. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 101, n. 22, p. 8115–8127, 1 nov. 2017.

- HASHEMINYA, S. M. *et al.* Development and characterization of biocomposite films made from kefiran, carboxymethyl cellulose and Satureja Khuzestanica essential oil. **Food Chemistry**, v. 289, p. 443–452, 15 ago. 2019.
- HERBIG, B. *et al.* Effects of increased recirculation air rate and aircraft cabin occupancy on passengers' health and well-being – Results from a randomized controlled trial. **Environmental Research**, v. 216, 1 jan. 2023.
- HOHMAN, M. M. *et al.* Electrospinning and electrically forced jets. I. Stability theory. **Physics of Fluids**, v. 13, n. 8, p. 2201–2220, 2001.
- HULLA, J. E.; SAHU, Saura C.; HAYES, A. Wallace. Nanotechnology: History and future. **Human & experimental toxicology**, v. 34, n. 12, p. 1318-1321, 2015.
- IBRAHIM, Hassan M.; KLINGNER, Anke. A review on electrospun polymeric nanofibers: Production parameters and potential applications. **Polymer Testing**, v. 90, p. 106647, 2020.
- JAEGER, Raimund *et al.* Electrospinning of ultra-thin polymer fibers. *In: MACROMOLECULAR symposia*. Basel: Hüthig & Wepf Verlag, 1998. p. 141-150.
- JAYABALAN, Rasu *et al.* A review on kombucha tea—microbiology, composition, fermentation, beneficial effects, toxicity, and tea fungus. **Comprehensive reviews in food science and food safety**, v. 13, n. 4, p. 538-550, 2014.
- JI, X. *et al.* Preparation of electrospun polyvinyl alcohol/nanocellulose composite film and evaluation of its biomedical performance. **Gels**, v. 7, n. 4, 1 dez. 2021.
- KADAJJI, Veeran Gowda; BETAGERI, Guru V. Water soluble polymers for pharmaceutical applications. **Polymers**, v. 3, n. 4, p. 1972-2009, 2011.
- KALE, S. R. *et al.* Air flow through a non-airconditioned bus with open windows. **Sadhana**, v. 32, p. 347-363, 2007.
- KALRA, C. S.; GUTSOL, A. F.; FRIDMAN, A. A. Gliding arc discharges as a source of intermediate plasma for methane partial oxidation. **IEEE Transactions on Plasma Science**, v. 33, n. 1 I, p. 32–41, fev. 2005.
- LIU, Y. *et al.* Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two Wuhan hospitals. **Nature**, v. 582, n. 7813, p. 557–560, 25 jun. 2020.
- LIU, Ya-na; TIAN, Hui; SI, An-heng. Gliding arc discharge for decolorization and biodegradability of azo dyes and printing and dyeing wastewater. **Plasma Chemistry and Plasma Processing**, v. 32, p. 597-607, 2012.
- LIU, Z. *et al.* A numerical study of COVID-19-laden droplets dispersion in aircraft cabin ventilation system. **Heliyon**, v. 9, n. 3, 1 mar. 2023.
- LOW, Zhen Li *et al.* Ultrasonic cavitation: An effective cleaner and greener intensification technology in the extraction and surface modification of nanocellulose. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 90, p. 106176, 2022.
- LUPAȘCU, Raluca Elisabeta *et al.* An overview regarding microbial aspects of production and applications of bacterial cellulose. **Materials**, v. 15, n. 2, p. 676, 2022..
- MARGARITA, A. *et al.* Bacterial Cellulose: A Sustainable Source to Develop Value-Added Products – A Review. **BioRes.**, v.11, n. 2, p.5641-5655, 2016.

- MARIN, E.; ROJAS, J.; CIRO, Y. African Journal of Pharmacy and Pharmacology Review A review of polyvinyl alcohol derivatives: Promising materials for pharmaceutical and biomedical applications. **African Journal of Pharmacy and Pharmacology**, v. 8, n. 24, p. 674–684, 2014.
- MARSH, A. J. *et al.* Sequence-based analysis of the bacterial and fungal compositions of multiple kombucha (tea fungus) samples. **Food Microbiology**, v. 38, p. 171–178, abr. 2014.
- MAY, A. *et al.* Kombucha: A novel model system for cooperation and conflict in a complex multi-species microbial ecosystem. **PeerJ**, v. 7, p. e7565, 2019.
- MEDEIROS, E. S. *et al.* Electrospun nanofibers of poly(vinyl alcohol) reinforced with cellulose nanofibrils. **Journal of Biobased Materials and Bioenergy**, v. 2, n. 3, p. 231–242, 2008.
- MELO, J. C. P. *et al.* Synthesized cellulose/succinic anhydride as an ion exchanger. Calorimetry of divalent cations in aqueous suspension. **Thermochemica Acta**, v. 524, n. 1–2, p. 29–34, 20 set. 2011.
- MERCANTE, L. A.; CORRÊA, D. S. **Eletrofição e nanofibras: fundamentos e aplicações**. Ponta Grossa - PR: Atena, 2023.
- MIN, K.; KIM, S.; KIM, S. Silk protein nanofibers for highly efficient, eco-friendly, optically translucent, and multifunctional air filters. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, 1 dez. 2018.
- NAÇÕES UNIDAS. Guia da ONU faz gestão de risco da Covid em viagens aéreas em todo o mundo. **ONU News: Perspectiva Global Reportagens Humanas**, 20 Jan. 2023. Disponível em: <https://news.un.org/pt/tags/icao>. Acesso em: jun. 2023.
- NGUYEN, T. A.; NGUYEN, X. C. Bacterial Cellulose-Based Biofilm Forming Agent Extracted from Vietnamese Nata-de-Coco Tree by Ultrasonic Vibration Method: Structure and Properties. **Journal of Chemistry**, v. 2022, 2022.
- PANKAJ, Shashi Kishor *et al.* Applications of cold plasma technology in food packaging. **Trends in Food Science & Technology**, v. 35, n. 1, p. 5-17, 2014.
- PARK, Y. *et al.* Thermal conductivity enhancement in electrospun poly(vinyl alcohol) and poly(vinyl alcohol)/cellulose nanocrystal composite nanofibers. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, 1 dez. 2019.
- PORTELA, Raquel *et al.* Bacterial cellulose: a versatile biopolymer for wound dressing applications. **Microbial biotechnology**, v. 12, n. 4, p. 586-610, 2019.
- RAMÍREZ TAPIAS, Yuly A. *et al.* Kombucha tea by-product as source of novel materials: Formulation and characterization of films. **Food and Bioprocess Technology**, v. 13, p. 1166-1180, 2020.
- REGAN, D. P. *et al.* Improved Recovery of Captured Airborne Bacteria and Viruses with Liquid-Coated Air Filters. **ACS Applied Materials and Interfaces**, v. 14, n. 45, p. 50543–50556, 16 nov. 2022.
- RENEKER, Darrell H.; YARIN, Alexander L. Electrospinning jets and polymer nanofibers. **Polymer**, v. 49, n. 10, p. 2387-2425, 2008.
- ROSSETTI, R.; BRUS, L. E. Picosecond resonance Raman scattering study of methylviologen reduction on the surface of photoexcited colloidal cadmium sulfide crystallites. **The Journal of Physical Chemistry**, v. 90, n. 4, p. 558-560, 1986.
- SEDERAVIČIŪTĖ, F.; BEKAMPIENĖ, P.; DOMSKIENĖ, J. Effect of pretreatment procedure on properties of Kombucha fermented bacterial cellulose membrane. **Polymer Testing**, v. 78, p. 105941, 2019.

- SENTHILKUMAR, P.; KARTHIK, T. Effect of Argon Plasma Treatment Variables on Wettability and Antibacterial Properties of Polyester Fabrics. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series E**, v. 97, n. 1, p. 19–29, 1 abr. 2016.
- SHEHADI, M.; HOSNI, M.; JONES, B. Airflow and turbulence analysis inside a wide-body aircraft cabin mockup. **Indoor and Built Environment**, v. 27, n. 6, p. 766–785, 1 jul. 2018.
- SHENOY, S. B. *et al.* Process optimization of methane reforming to syngas using Gliding Arc Plasmatron. **Plasma Processes and Polymers**, v. 16, n. 4, 1 abr. 2019.
- SHIN, Y. M. *et al.* Electrospinning: A whipping fluid jet generates submicron polymer fibers. **Applied Physics Letters**, v. 78, n. 8, p. 1149–1151, 19 fev. 2001.
- SILVA, Camilla Fonseca; MORAES DE PAULA, Daiane D.; BORGES, Keyller Bastos. Electrospinning applied to the development of adsorbent nanofibers aiming at improving solid phase (micro) extraction techniques. **Quimica Nova**, v. 44, n. 9, p. 1137-1150, 2021..
- SOUSA, L. P. S. B. *et al.* Effect of water and alkali on purification bacterial cellulose membrane from Kombucha. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 15, p. e526101523267, 2 dez. 2021.
- STUART, B. H. **Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- SUTKA, A. *et al.* Enhanced stability of PVA electrospun fibers in water by adding cellulose nanocrystals. **Holzforschung**, v. 69, n. 6, p. 737–743, 2015.
- THOMAS, Bejoy *et al.* Nanocellulose, a versatile green platform: from biosources to materials and their applications. **Chemical reviews**, v. 118, n. 24, p. 11575-11625, 2018.
- TISCHER, P. C. S. F. *et al.* Nanostructural reorganization of bacterial cellulose by ultrasonic treatment. **Biomacromolecules**, v. 11, n. 5, p. 1217–1224, 10 maio 2010.
- TUCKER, Nick *et al.* The history of the science and technology of electrospinning from 1600 to 1995. **Journal of engineered fibers and fabrics**, v. 7, n. 2_suppl, p. 155892501200702S10, 2012. Disponível em: <<http://www.jeffjournal.org>>.
- VANDENBROUCKE, Arne M. *et al.* Non-thermal plasmas for non-catalytic and catalytic VOC abatement. **Journal of hazardous materials**, v. 195, p. 30-54, 2011..
- VIDOTTO, Francielle Lina; RIBEIRO, Geovana Piveta; TISCHER, Cesar Augusto. Production of cellulose and profile metabolites by fermentation of glycerol by gluconacetobacter xylinus. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 61, p. e16160696, 2018..
- VIEIRA, A. P. *et al.* High performance maleated lignocellulose epicarp fibers for copper ion removal. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 31, p. 183-193, 2014.
- WANG, Cheng *et al.* Synthesis of carbon nanoparticles in a non-thermal plasma process. **Chemical Engineering Science**, v. 227, p. 115921, 2020a.
- WANG, Cheng *et al.* Synthesis of ultrafine silicon carbide nanoparticles using nonthermal arc plasma at atmospheric pressure. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 104, n. 8, p. 3883-3894, 2021.
- WANG, Feng *et al.* Recent progress on studies of airborne infectious disease transmission, air quality, and thermal comfort in the airliner cabin air environment. **Indoor air**, v. 32, n. 4, p. e13032, 2022.
- WANG, Hongping *et al.* The motion of respiratory droplets produced by coughing. **Physics of Fluids**, v. 32, n. 12, 2020b.

WU, J. et al. Filter evaluation and selection for heating, ventilation, and air conditioning systems during and beyond the COVID-19 pandemic. **Indoor Air**, v. 32, n. 8, 1 ago. 2022.

YANG, Y. C.; CHUN, Y. N. Naphthalene destruction performance from tar model compound using a gliding arc plasma reformer. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 28, n. 2, p. 539–543, fev. 2011.

ZHANG, Q. *et al.* Optimization of electrospun poly(vinyl alcohol)/cellulose nanocrystals composite nanofibrous filter fabrication using response surface methodology. **Carbohydrate Polymer Technologies and Applications**, v. 2, 25 dez. 2021a.

ZHANG, X. *et al.* HEPA filters for airliner cabins: State of the art and future development. **Indoor Air**, v. 32, n. 9, 1 set. 2022.

ZHANG, X. *et al.* Performance optimization of airliner cabin air filters. **Building and Environment**, v. 187, 1 jan. 2021b.

ZSIGMONDY, Richard A. Properties of colloids. **Nobel lecture**, v. 11, p. 47-57, 1926.

ŻYWICKA, A. *et al.* Argon plasma-modified bacterial cellulose filters for protection against respiratory pathogens. **Carbohydrate Polymers**, v. 302, 15 fev. 2023.