

Universidade Federal de São Carlos
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Departamento de Química

**Membrana de Celulose Bacteriana Regenerada Aplicada em
Embalagens de Alimentos**

Amanda Lyane Generoso

Orientador: Prof. Dr. Caio Marcio Paranhos da Silva

São Carlos

2021

Universidade Federal de São Carlos
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Departamento de Química

**Membrana de Celulose Bacteriana Regenerada Aplicada em
Embalagens de Alimentos**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Departamento
Química, da Universidade Federal
de São Carlos, como parte dos
requisitos obrigatórios para a
conclusão do curso de
bacharelado em Química
Tecnológica.

Amanda Lyane Generoso

Orientador: Prof. Dr. Caio Marcio Paranhos da Silva

São Carlos

2021

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE

AMANDA LYANE GENEROSO

APRESENTADO AO PROGRAMA DE BACHARELADO EM QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS EM 09 DE DEZEMBRO DE 2021.

BANCA EXAMINADORA:

Dra. Laís Angelice de Camargo

Dra. Laís Roncalho de Lima

AGRADECIMENTOS

A Deus e aos seres de luz pelas oportunidades, inspirações e conforto nos momentos mais desafiadores.

À minha mãe, por todo amor, confiança, paciência e motivação constante. Sem você, essa etapa não poderia ter sido concluída.

À minha irmã pela ajuda, inspiração e por sempre me encorajar a seguir em frente.

Aos meus amigos, em especial a minha dupla, pelo companheirismo e auxílio nos momentos de estudos.

Aos meus filhos de quatro patas, pela companhia e pelos momentos de pausa disfarçados de latidos e miados.

Ao meu pai e meus avós (in memoriam) por acreditarem na minha capacidade.

Aos professores do curso, por gentilmente compartilharem seu conhecimento. Em especial, ao meu orientador pela disponibilidade e paciência em colaborar com o desenvolvimento desse trabalho.

Finalmente, à UFSCar pela oportunidade de estudar.

RESUMO

As embalagens alimentícias tradicionais têm como função proteger e conservar ao máximo os alimentos acondicionados contra deterioração causada por danos ambientais, atuando como uma barreira inerte, possibilitando seu manuseio, transporte e distribuição de maneira segura e eficiente. Para atender a demanda dos consumidores por produtos com qualidades superiores, mais seguros, saudáveis e com menos conservantes, pesquisas voltadas para o aperfeiçoamento de embalagens funcionais, tais como as embalagens ativas e inteligentes, que prolongam a estabilidade e/ou indicam a qualidade do produto acondicionado, têm sido desenvolvidas. Atualmente, as embalagens de plástico são as mais empregadas no mundo devido às suas características que incluem leveza, baixo custo e elevado rendimento, gerando um enorme volume de resíduos sólidos poluentes, em consequência do descarte desse material. O desenvolvimento de embalagens constituídas por materiais biodegradáveis, provenientes de fontes naturais, como a celulose bacteriana vêm sendo impulsionadas pela necessidade não apenas de reduzir, como também, de substituir o uso de plástico no acondicionamento de produtos alimentícios. A celulose bacteriana é bastante versátil, a incorporação desse biopolímero na produção de nanocompósitos para a fabricação de embalagens alimentícias consiste num grande avanço na busca por materiais mais sustentáveis. As embalagens de celulose bacteriana são resistentes a água, biodegradáveis e com a incorporação de aditivos podem apresentar propriedades antioxidantes e antibacterianas. Com o intuito de reduzir os custos de produção, subprodutos da indústria de alimentos vêm sendo estudados como fontes alternativas de substrato buscando ampliar a utilização de celulose bacteriana, que ainda é limitada a nichos de mercado de alto valor. No presente trabalho, são apresentadas alternativas mais recentes e sustentáveis de produção de embalagens de alimentos empregando celulose bacteriana regenerada e suas perspectivas para o futuro.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVO	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1 SISTEMAS DE EMBALAGENS TRADICIONAIS PARA ALIMENTOS.....	12
3.2 NOVAS TECNOLOGIAS EM EMBALAGENS NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA	22
3.2.1 Embalagem Ativa.....	22
3.2.2 Embalagem Inteligente	31
3.3 BIOPOLÍMEROS.....	33
3.4 POLÍMEROS BIODEGRADÁVEIS	34
3.5 CELULOSE VEGETAL.....	36
3.6 CELULOSE BACTERIANA.....	37
3.6.1 Propriedades	37
3.6.2 Produção e Purificação.....	40
3.6.3 Meios de Cultura	42
3.6.4 Condições do Processo.....	44
3.6.5 Aplicações da Celulose Bacteriana	45
3.7 CELULOSE BACTERIANA NO SETOR ALIMENTÍCIO.....	47
3.8 MEMBRANA DE CELULOSE BACTERIANA REGENERADA EM EMBALAGEM DE ALIMENTOS	49
3.8.1 Inovações em Embalagens Ativas	50
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1. INTRODUÇÃO

Na indústria alimentícia, as embalagens são extremamente importantes pois elas atuam na preservação do alimento, retardando seu processo de deterioração até chegar ao seu consumidor final. As embalagens tradicionais atuam como uma barreira inerte protegendo e conservando os alimentos contra danos ambientais (físicos, mecânicos, químicos e microbiológicos), além de fornecer as informações sobre o produto ^[1].

Com o desenvolvimento da população e as inovações tecnológicas, novas alternativas vêm sendo criadas para prolongar a durabilidade e a segurança do alimento, vinculada à necessidade de reduzir a produção de resíduos sólidos. Nesse cenário, estudos voltados para o aperfeiçoamento de embalagens ativas e inteligentes vêm sendo desenvolvidos ^[2]. As embalagens ativas são capazes de aumentar a conservação do alimento inibindo a proliferação de microrganismos ao interagir de maneira desejável com o alimento, garantindo a sua segurança e qualidade nutricional ^{[3],[4]}. As embalagens inteligentes permitem que as informações a respeito da qualidade do alimento sejam mais detalhadas, apresentando indicadores e sensores capazes de detectar alterações indesejáveis no produto ^[4].

Metal, plástico, vidro e papel são as matérias-primas mais empregadas na produção de embalagens de alimentos ^[1], sendo os plásticos os mais empregados no mundo, desde a produção de embalagens simples a materiais mais complexos. As propriedades como baixo peso, resistência, estabilidade, flexibilidade, impermeabilidade e durabilidade, associadas ao baixo custo, são o que tornam o plástico um material extremamente atrativo para o mercado industrial ^[5].

Plásticos são constituídos por materiais poliméricos sintéticos ou naturais, que possuem a capacidade de serem moldados pela ação de calor ou pressão. Os materiais plásticos aplicados em embalagens de alimentos podem apresentar características diversificadas em função da incorporação de aditivos no seu processo de fabricação, como estabilizantes, antioxidantes e lubrificantes, como também, da combinação com outros polímeros, que propiciam o aperfeiçoamento do processamento e da qualidade desses materiais ^{[1], [6]}. Segundo a Associação Brasileira de Embalagens (ABRE) a produção de embalagens plásticas corresponde a maior porcentagem do setor, resultando em 39,6% do total em 2019 ^[7]. Sendo a indústria de alimentos, no segmento

de bens de consumo, uma das maiores consumidoras de embalagens plásticas no Brasil. O elevado consumo desse material gera um volume elevado de resíduos sólidos, agravando a poluição ambiental. A necessidade não apenas de reduzir o consumo, mas também de substituir o uso de plástico no acondicionamento de produtos alimentícios, impulsiona cada vez mais as pesquisas voltadas para o desenvolvimento de embalagens constituídas de materiais biodegradáveis provenientes de fontes naturais, como a celulose bacteriana.

A celulose é o polímero mais abundante encontrado na natureza e possui grande importância na economia global, sendo empregada como matéria-prima em diferentes setores industriais como fonte de energia, material de construção, papel, vestuário, entre outros [8]. A celulose é um biopolímero multifuncional, além de ser utilizada como matriz contínua, suas propriedades possibilitam que seja empregada também na forma de nanocelulose (nanofibrilas e nanocristais) [9].

Descoberta por Brown há mais de 130 anos, a celulose bacteriana (CB) possui a mesma fórmula química ($C_6H_{10}O_5$) da celulose vegetal [10]. Diferentemente da celulose extraída de plantas a CB é obtida por meio de um processo de fermentação acética, realizado por algumas bactérias do gênero *Komagataeibacter* [11]. Devido a sua natureza quimicamente pura, livre de lignina e hemicelulose, seu processo de purificação é mais simples que o da celulose vegetal [12], [13]. A celulose bacteriana possui excelentes propriedades, como alta resistência à tração, elasticidade, durabilidade, capacidade de retenção e absorção de água além de ser biodegradável, atóxica e biocompatível [13]. Essas características conferem a CB, um elevado potencial de aplicações industriais em diversas áreas, biomédica, eletrônica, produtos cosméticos e alimentos.

A produção de celulose bacteriana envolve um elevado custo comercial, limitando sua comercialização a nichos de mercado de alto valor, como em aplicações biomédicas, onde seu uso é mais evidenciado [11]. Diversas pesquisas para ampliar o uso de CB em outras áreas vêm sendo desenvolvidas para a otimização do seu processo de produção, focando em fontes alternativas de substrato, como subprodutos da indústria de alimentos, para reduzir o valor agregado da produção de CB vêm progredindo [14]. Além disso, pesquisas focadas no reaproveitamento de resíduos de membranas de celulose bacteriana, que a princípio seriam descartadas no processo de corte de curativos produzidos de CB, para incorporação a matrizes de hidroxipropil

metilcelulose, produzindo filmes biodegradáveis mais resistentes, demonstram um grande potencial para a produção de embalagens alimentícias ^[9].

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão bibliográfica focada em novas tecnologias associadas à aplicação de celulose bacteriana na indústria de embalagens de alimentos, um biomaterial promissor, seus desafios e perspectivas para o futuro.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma revisão da literatura quanto às alternativas mais recentes e sustentáveis de produção de embalagens alimentícias empregando celulose bacteriana regenerada.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 SISTEMAS DE EMBALAGENS TRADICIONAIS PARA ALIMENTOS

Na indústria alimentícia as embalagens desempenham importantes funções, além de acondicionar o produto são responsáveis pela preservação, conservação da sua qualidade e frescura, informação e praticidade, consistindo numa ferramenta indispensável que viabilizou o desenvolvimento do comércio.

De acordo com a Resolução RDC nº 91, de 11 de maio de 2001 da ANVISA, foi definido que embalagem para alimentos é “o artigo que está em contato direto com alimentos, destinado a contê-los, desde a sua fabricação até a sua entrega ao consumidor, com a finalidade de protegê-los de agente externos, de alterações e de contaminações, assim como de adulterações” [15].

O sistema de embalagem convencional, é responsável por proteger o alimento contra impactos que resultem na sua deterioração e/ou adulteração, possibilitando seu manuseio, transporte, distribuição e armazenamento de maneira segura e eficiente. A fim de atuar como uma barreira inerte, contra deterioração química e microbiológica do alimento, ou por ações físicas e mecânicas, a embalagem é responsável pelo controle de fatores ambientais, como umidade, exposição ao oxigênio e à luz, conservando e preservando ao máximo a qualidade do produto. O planejamento do sistema produto-embalagem é fundamental pois a embalagem está, muitas vezes, associada à etapa de preparo e conservação do alimento sendo essencial conhecer as características do alimento para associá-lo às tecnologias necessárias para seu acondicionamento [1],[16].

As embalagens também são responsáveis por transmitir informações importantes a respeito do produto para o consumidor e, em conjunto com o rótulo, fornece informações fundamentais tais como, nome e tipo de produto, ingredientes, quantidade, data de validade, fabricante, entre outras. Para o distribuidor, a embalagem auxilia no gerenciamento de estoque, pois contém instruções de armazenagem e manuseio, preço, rastreio e identificação do produto [1],[16].

A função de conveniência, está relacionada à praticidade de manuseio pertencente a cada tipo de embalagem, como doses individuais, abertura simples, viabilidade de fechamento após a utilização, possibilidade de aquecimento do produto

etc. Como a embalagem é o primeiro contato direto com o consumidor, sua função também engloba o *marketing*, exercendo um papel essencial na comunicação, divulgação e aceitação do produto ^{[1],[17]}.

As embalagens de alimentos podem ser classificadas em relação ao seu nível e podem ser identificadas como primárias, secundárias e terciárias. As embalagens primárias caracterizam-se por estar em contato direto com o produto, mantendo a sua conservação, tais como latas, garrafas ou sacos. As secundárias são responsáveis pela proteção físico-mecânica dos produtos e pelo suporte de informações, e pode incluir uma ou múltiplas embalagens primárias, são elas as caixas de cartão e cartolinas. Por fim, as embalagens terciárias são responsáveis por reunir e transportar diversas embalagens primárias ou secundárias, destacando-se as caixas de papelão e os engradados plásticos ^{[1],[18]}.

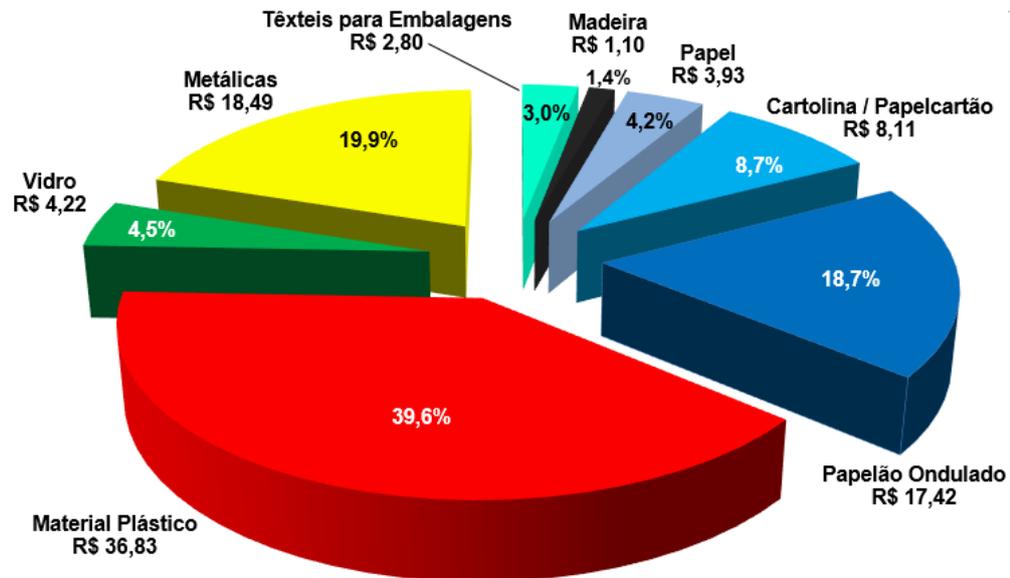
Em relação a estrutura dos materiais, as embalagens são classificadas como rígidas, semi-rígidas e flexíveis (Tabela 1).

TABELA 1. Classificação das embalagens de acordo com sua estrutura ^[1].

Embalagens	Metálica	Plástica	Vidro	Papel
Rígidas	Latas em folha de flandres e alumínio	Bandejas, garrafas, potes, grades e caixas	Garrafas e frascos	Caixas de papelão
Semi-rígidas	Bandejas de alumínio	Bandejas em poliestireno expandido, frascos, copos e potes termo-formados	-	Bandejas e alvéolos em polpa moldada
Flexíveis	Folha de alumínio Estruturas laminadas	Filmes Estruturas laminadas	-	Folha de papel Estruturas laminadas

Atualmente, os principais materiais empregados na fabricação de embalagens para produtos alimentícios são: metal, vidro, plástico e materiais celulósicos. Em geral, esses materiais apresentam bom desempenho mecânico, transparência adequada e propriedades de barreira de oxigênio e vapor [7].

As embalagens metálicas começaram a ser desenvolvidas no século XIX, confeccionadas com ferro estanhado. Atualmente os principais metais empregados na confecção de embalagens são aço e alumínio. As embalagens metálicas possuem características fundamentais para o acondicionamento de alimentos, conferem proteção mecânica, barreira contra gases e umidade, proteção contraluz e microrganismos, além de serem recicláveis. Segundo a ABRE, as embalagens metálicas representam cerca de 19,9% da produção total de embalagens no Brasil [7].



Fonte: IBGE - PIA - Produto (UL) - Previsão para 2020 com base no PIA, PIM-PF e expedição de papelão ondulado
Elaboração: FGV

FIGURA 1. Gráfico de dados referente ao valor bruto de produção de embalagens por segmento em bilhões de reais [7].

As embalagens de aço são produzidas por óxido de ferro (FeO) e posteriormente tratadas com revestimentos de cromo ou estanho, para evitar a oxidação quando em contato com o ar [6],[18]. Esse material apresenta alta resistência mecânica, possibilita a esterilização adequada dos produtos, além de ser reciclável. Entretanto, quando

descartados permanecem por mais de 100 anos no ambiente ^{[1],[18]}. Além do aço, o alumínio também é aplicado na produção de embalagens de alimentos, utilizado na produção de latas, papel alumínio, plásticos laminados, filmes metalizados etc. ^[18]. As embalagens de alimentos empregam o alumínio combinado com outros elementos como manganês, magnésio, silício, cobre e cromo, na forma de ligas que apresentam teor de alumínio equivalente a 98,0% a 99,8% ^[1]. As vantagens dessas embalagens correspondem às propriedades do alumínio, que compreendem leveza e maleabilidade, impermeabilidade, resistência à corrosão e alta relação resistência/peso ^[6].

Após o descarte o alumínio pode permanecer na natureza entre 100 e 500 anos ^[18]. A reciclagem é a maneira mais vantajosa para reaproveitar embalagens metálicas, seus diversos benefícios incluem redução na quantidade de resíduos descartados no meio ambiente, diminuição do consumo de energia e água na produção de latas ^{[1],[6]}. A reutilização de embalagens à base de aço reduz em cerca de 70% do consumo de energia empregada na fabricação de latas, além de minimizar a emissão de gases poluentes e o consumo de água ^[1]. A reciclagem do alumínio gera uma economia de 5 kg do minério utilizado na fabricação do alumínio, a bauxita, para cada quilograma de alumínio reciclado, reduzindo o consumo de energia em cerca de 95% ^{[1],[6]}. Além disso, este processo de reciclagem é importante para estimular a educação e a consciência ambiental, gerar uma fonte de renda permanente e reduzir a quantidade de resíduos sólidos descartados no meio ambiente ^[1].

O vidro é um material constituído principalmente por óxido de silício (SiO_2) e outros óxidos inorgânicos, como óxido de sódio (Na_2O) e óxido de cálcio (Ca_2O), combinados em diferentes proporções ^{[1],[6],[18]}. Esses materiais são submetidos à fusão com temperatura entre 1350 °C a 1600 °C e, em seguida, são resfriados em processo controlado resultando num material rígido, inerte e de estrutura amorfa. Produzido desde a antiguidade, o vidro é um dos materiais mais antigos empregados em embalagens de alimentos ^[18]. No Brasil, em 1990, as embalagens de vidro se tornaram mais leves devido a introdução da tecnologia de vidros leves, reduzindo em 20% o peso da embalagem ^[1].

Segundo a ABRE, em 2019, as embalagens de vidro corresponderam a 4,5% da produção total de embalagens no Brasil ^[7]. Por ser um material inerte, as embalagens de vidro possuem excelentes propriedades de barreira, impedindo que haja migração de

compostos e transferência de sabores estranhos ao alimento, isso garante a segurança e a qualidade dos produtos armazenados. Outras características das embalagens de vidro incluem impermeabilidade a gases e vapores de água, desde que hermeticamente fechadas, elevada transparência, proteção de produtos sensíveis a luz, pois viabiliza a variação de cor e reutilização ^{[1], [18],[19],[20]}.

O vidro é um material totalmente reciclável, a produção de novas embalagens a partir de seus cacos reduzem o consumo de energia e a emissão de gás carbônico sem perder a qualidade e a pureza do produto ^{[1],[18]}. Além disso, essa reutilização contribui para a redução de lixo descartado nos aterros sanitários. Na indústria de reciclagem, após ser coletado, o vidro é separado por cor e tipo. Em seguida, é encaminhado para a descontaminação, etapa em que as impurezas são retiradas do material. Posteriormente, o vidro é moído e finalmente levado para a refundição, onde pode ser reutilizado para novas fabricações. ^{[1], [20]}.

A substituição das embalagens de vidro, geralmente por embalagens de plástico, ocorre devido às suas limitações, tais como sua fragilidade e densidade elevada, que acarretam altos custos de transporte e resultam no aumento da produção final ^[19].

As embalagens de plástico são as mais empregadas no mundo, devido às suas características que incluem leveza, baixo custo e elevado rendimento. Estudos indicam que a produção de embalagens plásticas ultrapassará cerca de 250 milhões de toneladas até 2050, gerando um enorme volume de resíduos sólidos poluentes, devido ao descarte desse material ^[21].

Segundo a ABRE, em 2019 no Brasil, os materiais plásticos representaram o maior valor na produção total de embalagens, correspondente a 39,6% ^[7].

A indústria de plástico é responsável pelo maior número de empregos formais e, em 2020, foi responsável por 54,3% do total de postos de trabalho no setor de embalagens. Segundo a Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST) o setor de alimentos é o segundo maior consumidor de produtos plásticos no Brasil, representando 20,3% do total ^[22].

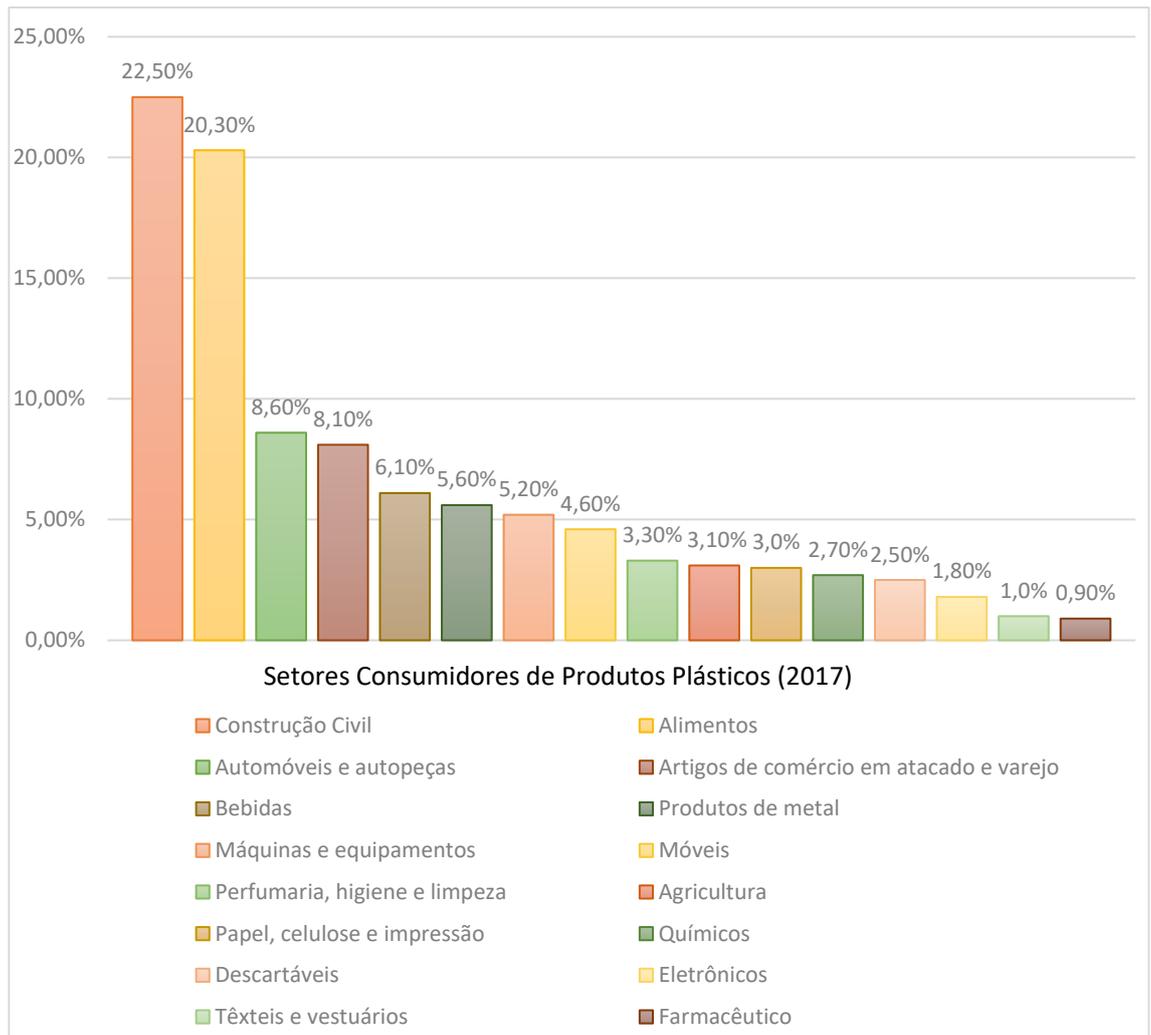


FIGURA 2. Gráfico de dados referente ao consumo de produtos plásticos no Brasil. Adaptado [22].

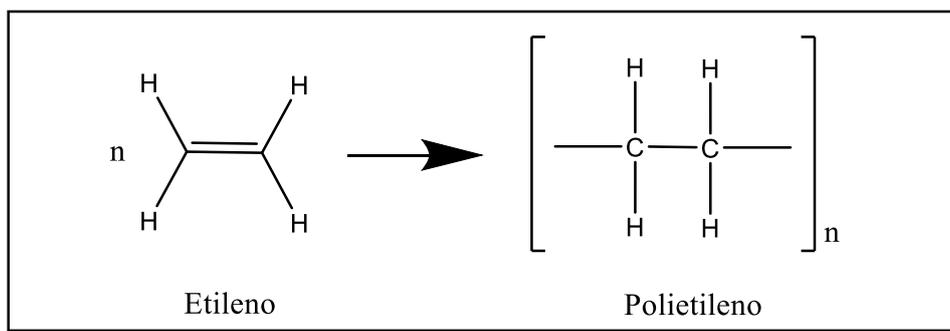
Apesar das vantagens associadas ao setor econômico, as embalagens plásticas possuem desvantagens devido às suas características: permeabilidade variável à vapores, luz e moléculas de baixa massa molar.

Constituídos por polímeros, os materiais plásticos são formados após o processo de polimerização dos monômeros, molécula com uma (mono) unidade de repetição. Os polímeros compostos por um único tipo de monômero são classificados como homopolímeros e quando formados por dois ou mais tipos de monômeros são classificados como copolímeros. Para a produção de embalagens alimentícias a escolha dos polímeros deve ser baseada nas seguintes características: propriedades de barreira a gases e vapor de água, resistência mecânica, rigidez, flexibilidade, resistência química e termossoldabilidade (capacidade de dois materiais se unirem pela ação combinada de calor e pressão durante um determinado tempo) [1],[19].

Os polímeros podem ser divididos de acordo com sua fonte de extração em polímeros naturais e polímeros sintéticos ou artificiais. Os polímeros naturais podem ser obtidos de origem natural como celulose, amido, quitina, quitosana e etc. Já os polímeros sintéticos são formados por monômeros, obtidos industrialmente a partir de matérias primas ricas em carbono como compostos derivados do petróleo, álcool etílico, carvão, que incluem, o polipropileno (PP), o polietileno (PE) e o policloreto de vinila (PVC) ^{[1],[19],[37]}.

Os principais polímeros empregados na confecção de embalagens de alimentos são PE, PP e PET ^{[1],[19]}. O PE é obtido por meio da polimerização de olefinas sendo composto basicamente por hidrocarbonetos de cadeia linear ou ramificada (ESQUEMA 1).

ESQUEMA 1. Estrutura química do polietileno (PE).



FONTE: Elaborada pela autora.

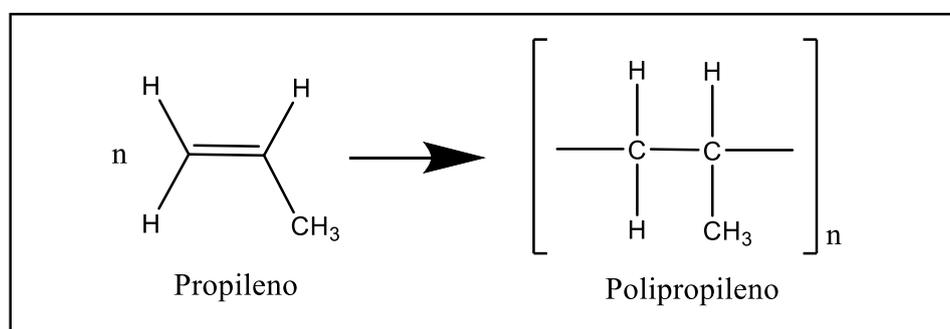
A densidade de uma cadeia polimérica é caracterizada de acordo com a dimensão da sua ramificação, ou seja, quanto maior o número de ramificações, menor é a sua densidade. O PE pode ser dividido em três categorias: polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno linear de baixa densidade (PEBDL) ^[19]. A Tabela 2, relaciona as principais características associadas às aplicações desses polímeros.

TABELA 2. Características e aplicações do polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno linear de baixa densidade (PEBDL). Adaptado ^{[1],[19]}.

Polietileno (PE)	Características	Aplicações em Embalagens de Alimentos
PEAD	Pouco ramificado Maior ponto de fusão, cristalinidade, resistência à tração, dureza e melhor resistência química quando comparado ao PEBD	Confecção de garrafas sopradas para embalagem de leite e iogurte Fabricação de filmes
PEBD	Bastante ramificado, flexível e esticável Alta transparência Boa termossoldabilidade	Fabricação de filmes Camada adesiva Termossoldagem em embalagens compostas
PEBDL	Cadeias laterais de baixo comprimento Transparência e termossoldabilidade do PEBD combinada à força e à rigidez do PEAD	Fabricação de filmes Embalagens alimentícias primárias e secundárias

O PP é um polímero semicristalino de cadeia linear, bastante leve, com densidade de 0,9 g/cm³, obtido por meio da polimerização do hidrocarboneto insaturado propeno ^[1] (ESQUEMA 2).

ESQUEMA 2. Estrutura química do hidrocarboneto polipropileno.



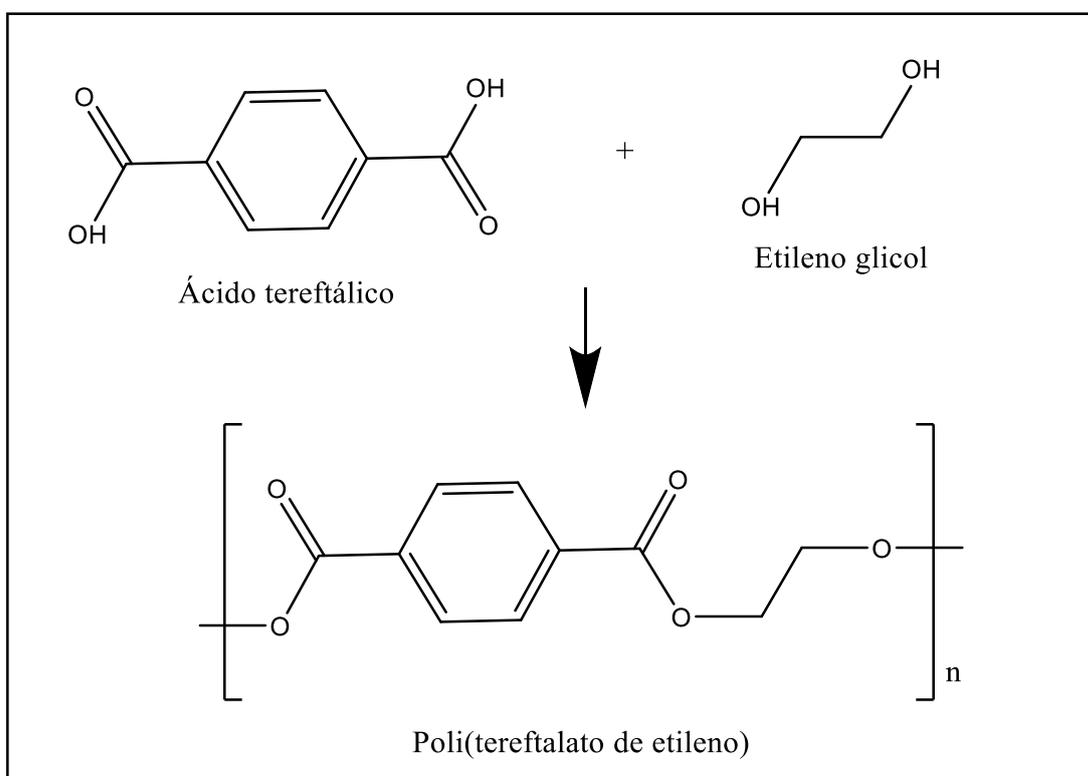
FONTE: Elaborada pela autora.

Quando comparado ao PE, o PP apresenta maior rigidez e resistência à tração, melhor barreira a óleos e gorduras, e menor permeabilidade ao gás oxigênio e ao vapor

de água. Possui elevada temperatura de fusão cristalina, a aproximadamente 165°C, além de ser altamente resistente a baixas temperaturas. Devido às propriedades mencionadas, esse polímero pode ser empregado em embalagens de produtos submetidos ao envase a quente, bem como no acondicionamento de alimentos congelados. O PP é empregado na confecção de potes para sorvetes e margarinas, camada interna de bandejas termoprocessáveis e para uso em fornos de microondas, garrafas para ketchup e filmes termorretráteis ^{[1], [19]}.

O poliéster mais utilizado em embalagens flexíveis é o poli(tereftalato de etileno), popularmente conhecido como PET. Esse polímero é formado a partir da reação entre o ácido tereftálico e o etileno glicol (ESQUEMA 3), possui alta resistência química a solventes hidrocarbonados, clorados, cetonas, ésteres e ácidos diluídos. Além de alta resistência mecânica, ótima barreira a gases, baixo peso, elevada transparência, maleabilidade e capacidade de reciclagem ^{[1], [19]}.

ESQUEMA 3. Estrutura química das substâncias: ácido tereftálico, etileno glicol e poli (tereftalato de etileno).



FONTE: Elaborada pela autora.

Esse material possui alta permeabilidade a vapores de água, sendo necessário um revestimento, em geral, com o homopolímero policloreto de vinilideno (PVDC), para reduzir essa permeabilidade. Outra desvantagem do PET, decorre da contaminação do alimento, provocada pela migração de componentes utilizados em sua fabricação, como aditivos e monômeros não reagidos, por meio de interações alimento – embalagem (mediante processos de transferência de massa) ^{[19], [51]}.

As inúmeras propriedades do plástico, incluindo sua grande viabilidade de recuperação, durabilidade e leveza, que promovem a redução dos custos de produção e transporte nas indústrias, proporcionam um excelente custo/benefício que estimulam a grande demanda aliada ao consumo desse material. As embalagens plásticas de alimentos são rapidamente descartadas, sendo em sua maioria consumidas por menos de uma semana, acarretando um aumento acentuado no volume de resíduos sólidos poluentes no meio ambiente.

Os materiais desenvolvidos a partir da celulose são amplamente empregados na confecção de embalagens para produtos alimentícios. Os principais materiais utilizados são papel, papelão e o celofane. De acordo com a ABRE, em 2019 no Brasil, os materiais celulósicos (que incluem embalagens de papel/cartão/papelão) representaram o segundo maior valor na produção total de embalagens, equivalente a 31,6% ^[7]. Em geral, os materiais celulósicos são empregados em embalagens secundárias ou terciárias, por serem higroscópicos e altamente permeáveis a umidade, o contato com o alimento pode prejudicar a integridade da embalagem, comprometendo suas propriedades mecânicas e a estabilidade do alimento acondicionado. Apesar das desvantagens, esses materiais possuem excelentes capacidades, tais como reciclabilidade (de origem biodegradável, levam cerca de seis meses para serem degradados na natureza), baixo peso, resistência a baixas temperaturas, variabilidade de formatos e espessuras, possibilidade de impressão, além disso, podem ser combinados com outros materiais a fim de corrigir sua porosidade e higroscopicidade ^{[1],[6],[18]}.

3.2 NOVAS TECNOLOGIAS EM EMBALAGENS NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA

As embalagens de alimentos tradicionais foram fundamentais para o desenvolvimento do sistema de distribuição de alimentos, atendendo às demandas do consumidor e do setor industrial. Porém às novas exigências dos consumidores por alimentos mais frescos e contendo menos conservantes, além da crescente preocupação em reduzir a produção de resíduos sólidos poluentes no meio ambiente, impulsionaram as pesquisas no setor de alimentos buscando inovações tecnológicas para o acondicionamento de produtos alimentícios, neste cenário destacam-se as embalagens ativas e as embalagens inteligentes.

3.2.1 Embalagem Ativa

O sistema de embalagem ativa vem sendo estudado há mais de 40 anos, visando a interação da embalagem com o alimento através da modificação de suas condições de maneira intencional e benéfica, proporcionando um aumento na preservação e qualidade do produto. Essa embalagem é capaz de prolongar o tempo de prateleira dos alimentos, mantendo suas propriedades sensoriais, inserindo às suas funções substâncias que absorvam oxigênio, etileno, umidade, aromas e odores, compostos emissores de dióxido de carbono, além de agentes antioxidantes e antimicrobianos, garantindo a segurança dos produtos alimentícios [23], [24].

Diferentemente das embalagens tradicionais que atuam como uma barreira externa passiva entre o alimento e o ambiente, as embalagens ativas interagem de maneira direta com o produto alimentício. Foram definidas por Sarantópoulos et al. (1996), as seguintes condições que devem ser obedecidas pelas embalagens ativas:

- Ser segura em termos de saúde pública atendendo à legislação vigente;
- Absorver/emitir o gás ou vapor de interesse em velocidade apropriada;
- Apresentar alta capacidade de absorção do gás ou vapor de interesse;
- Não acarretar reações paralelas desfavoráveis;
- Não causar alterações organolépticas no produto;
- Se manter estável durante a estocagem;

- Ser compacta;
- Apresentar custo compatível com a aplicação.

As embalagens ativas podem variar em relação a sua composição e confecção, as mais importantes desenvolvidas e com crescente aplicação, incluem-se os filmes antimicrobianos, filmes antioxidantes, sachês absorvedores de oxigênio, absorvedores de etileno, absorvedores de umidade, além dos filmes e revestimentos comestíveis^[19],^[25]. Os filmes comestíveis formados por biopolímeros, consistem numa fina camada produzida separadamente para posterior aplicação nos alimentos. Já os revestimentos comestíveis, consistem numa suspensão ou emulsão aplicada diretamente na superfície do alimento, com a subsequente formação do filme^[2]. Esses sistemas de embalagens de alimentos, vêm apresentando eficácia na preservação de frutas e hortaliças para manter a aparência fresca, a firmeza e o brilho, aumentando a resistência do produto e agregando valor comercial^[34].

Cada sistema de embalagens ativa apresenta um tipo de componente químico responsável por absorver ou emitir substâncias que atuam no controle do mecanismo de deterioração dos alimentos acondicionados, levando em consideração suas propriedades e composição. A Tabela 3 abaixo, relaciona os diferentes tipos de embalagens ativas seus componentes químicos e aplicações.

TABELA 3. Embalagens ativas, componentes químicos e aplicações. Adaptado^[71].

Embalagens	Componentes Químicos	Aplicações
Filmes antimicrobianos	<p>Ácido sórbico ($C_6H_8O_2$)</p> <p>Ácido benzóico (C_6H_5COOH)</p> <p>Ácido propiônico ($C_3H_6O_2$)</p> <p>Triclosan ($C_{12}H_7Cl_3O_2$)</p> <p>Dióxido de enxofre (SO_2)</p> <p>Etanol (C_2H_6O)</p> <p>Prata, nanopartícula de prata (Ag)</p> <p>Cloreto de sódio (NaCl)</p> <p>Óleos essenciais (exemplos: manjeriço, alecrim, cravo, tomilho, orégano)</p>	Alimentos frescos e processados, vegetais, frutas secas, arroz, feijão e produtos de padaria
Absorvedores de Oxigênio	<p>Óxido de ferro (FeO)</p> <p>Carbonato ferroso ($FeCO_3$)</p> <p>Ácido ascórbico ($C_6H_8O_6$)</p> <p>Sorbitol ($C_6H_{14}O_6$)</p> <p>Catecol ($C_6H_6O_2$)</p>	Queijos, leite, café, chás, produtos cárneos, produtos de panificação
Absorvedores de Etileno	<p>Óxido de alumínio (Al_2O_3)</p> <p>Permanganato de potássio ($KMnO_4$)</p> <p>Ozônio (O_3)</p>	Vegetais e frutas
Absorvedores de umidade	<p>Sílica gel ($Na_2SiO_3 + H_3PO_4$)</p> <p>Propilenoglicol ($C_3H_8O_2$)</p> <p>Poli(álcool vinílico) ($C_4H_6O_2$)_n</p>	Frutas, vegetais, produtos congelados e de padaria

Absorvedor de dióxido de carbono	Hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) Hidróxido de potássio (KOH) Carbonato ferroso (FeCO_3) Óxido de cálcio (CaO)	Café torrado, produtos desidratados
Sistemas antioxidantes	Ácido ascórbico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) Quercetina ($\text{C}_{15}\text{H}_{10}\text{O}_7$) Butil hidroxitolueno ($\text{C}_{15}\text{H}_{24}\text{O}$)	Frutas e vegetais
Emissores de dióxido de carbono	Ácido ascórbico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) Carbonato de ferro (FeCO_3)	Vegetais e frutas, peixes, carnes e aves

Os filmes antimicrobianos atuam na redução, ou remoção de microrganismos da superfície dos alimentos acondicionados, devido à incorporação de aditivos diretamente na matriz polimérica da embalagem. O desenvolvimento de microrganismos é inibido com mais eficiência pois o agente antimicrobiano migra seletivamente da embalagem para a superfície do alimento na concentração necessária, provocando um equilíbrio entre a cinética de crescimento microbiano e a atividade antimicrobiana na superfície do produto, prolongando assim, sua segurança e vida de prateleira. Em contrapartida, as propriedades físicas e mecânicas dos filmes podem ser prejudicadas pela incorporação de agentes antimicrobianos ^{[19], [25]}.

Estudos realizados por Limjaroen et al. (2003), demonstram que a incorporação dos agentes antimicrobianos: ácido sórbico, sorbato de potássio ou nisina, às embalagens causam danos as propriedades de barreira, físicas e mecânicas dos filmes constituídos por PVC e PVDC ^[26].

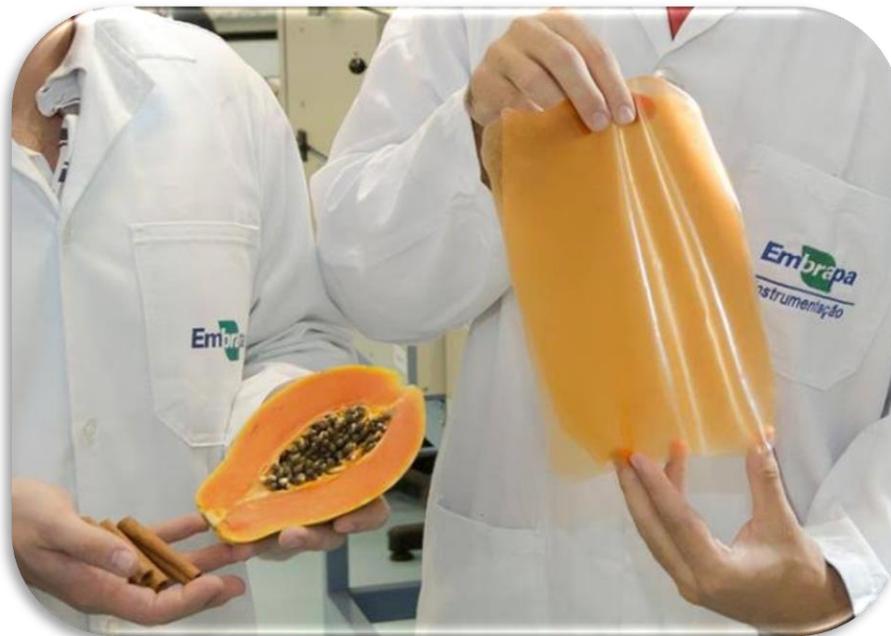
De acordo com Azeredo et al. (2012), é necessário que os filmes antimicrobianos atendam aos seguintes requisitos: (a) Apresentar efetividade contra um largo espectro de microrganismos; (b) Apresentar eficiência em baixas concentrações dos aditivos incorporados; (c) Não causar alterações sensoriais no produto; (d) Apresentar custo compatível; (e) Atender à legislação vigente; (f) Possuir estabilidade térmica; (g) Apresentar eficácia em baixas temperaturas ^[19].

Diversos compostos vêm sendo estudados para serem empregados na formação de filmes antimicrobianos, incluindo sais de ácidos orgânicos como o sorbato e benzoato [27], bacteriocinas como a nisina e pediocina [28]; enzimas tais como a lisozima e lactoperoxidase [27]; alguns óleos essenciais; polissacarídeos, como pectina, quitosana; extratos vegetais; alguns metais, entre outros.

A quitosana tem sido muito utilizada na fabricação de embalagens ativas devido ao seu potencial antimicrobiano. Esse polissacarídeo possui ação bactericida e fungicida além de apresentar boas propriedades formadoras de filmes [11],[19].

Otoni et al. (2013), desenvolveram filmes comestíveis de nanoemulsão à base de pectina e purê de mamão incorporados por cinemaldeído com propriedades semelhantes aos plásticos convencionais. Além de serem produzidos a partir de fontes renováveis, essas embalagens antimicrobianas são uma excelente alternativa para a demanda dos consumidores por produtos mais nutritivos, com menos conservantes, vida útil prolongada e mais seguros.

FIGURA 3. Filme antimicrobiano comestível a base de pectina, purê de mamão papaia e óleo essencial de canela [19].



Fonte: GOOGLE, 2021.

Os agentes antimicrobianos podem estar contidos em sachês no interior das embalagens, adsorvidos na superfície do polímero, incorporados diretamente ao polímero ou imobilizados no material polimérico por ligações covalentes ou iônicas [19]. [30]. Os filmes antimicrobianos têm sido desenvolvidos para aplicação em produtos de panificação, queijo, frutas, peixes, carnes [30].

Estudos demonstram a eficiência e aplicabilidade de filmes antimicrobianos no acondicionamento de alimentos, comprovando os benefícios dessa inovação tecnológica na indústria alimentícia.

Lopes et al. (2014), verificaram a eficácia de filmes incorporados com aldeído cinâmico para o controle de crescimento microrganismos patogênicos, principalmente sobre os fungos *Aspergillus flavus* e *Fusarium oxysporum* e sobre as bactérias gram-positivas *Staphylococcus aureus* e *Listeria monocytogenes* [25].

Pesquisadores do Centro de Desenvolvimento de Materiais Funcionais (CDMF), em parceria com a NANOX Tecnologia, desenvolveram para uma garrafa plástica capaz de prolongar de 7 para 15 dias o prazo de validade do leite fresco pasteurizado, empregando em sua estrutura nanopartículas de prata. Foram depositadas na matriz do PEAD, utilizada para moldar as garrafas plásticas por injeção ou sopro, micropartículas de sílica em pó incorporadas por nanopartículas de prata. As micropartículas à base de prata incorporadas ao plástico das garrafas, apresentam propriedades bactericida, antimicrobiana e autoesterilizante. A embalagem antimicrobiana foi empregada nas garrafas de leite fresco tipo A da marca Letti, comercializado pela empresa agropecuária Agrindus [72].



FIGURA 4. Embalagem antimicrobiana para armazenamento de leite fresco tipo A da marca Letti ^[72].

Mesmo em baixas concentrações, a presença de O₂ no interior das embalagens resultam na perda de nutrientes, modificação dos sabores e odores característicos do alimento, além de propiciar a proliferação de microrganismos aeróbios. Os absorvedores de oxigênio atuam reduzindo o teor de oxigênio contido nas embalagens para níveis inferiores a 100 ppm (0,01%), e preservam esses níveis garantindo por mais tempo a qualidade dos alimentos acondicionados. Os processos de absorção geralmente envolvem alguns dos seguintes mecanismos de oxidação, ou também, a combinação deles: oxidação do ácido ascórbico, do ferro em pó, oxidação enzimática de ácidos graxos insaturados, como por exemplo os ácidos oléico e linoléico ^{[2],[19],[30]}.

Os absorvedores de oxigênio podem ser acondicionados na forma de sachês, rótulos ou etiquetas, filmes, cartão e vedantes. Em geral, as embalagens que possuem essa tecnologia são utilizadas para o acondicionamento de produtos de panificação, café, chá, leite em pó, queijos e produtos cárneos ^[30].

FIGURA 5. Sachê absorvedor de oxigênio.



Fonte: GOOGLE, 2021.

Os absorvedores de etileno, atuam no controle dos níveis de etileno (C_2H_4) liberados durante o metabolismo de algumas frutas climatéricas e vegetais, que provocam efeitos fisiológicos distintos que podem acelerar os processos de respiração causando a maturação e envelhecimento desses alimentos. Geralmente este processo é realizado empregando-se um agente oxidante, como o permanganato de potássio ($KMnO_4$), responsável por remover o etileno do sistema, convertendo-o a ácido acético por meio de sua oxidação. Devido à sua toxicidade, os absorvedores de etileno são acondicionados em sachês para evitar seu contato com o alimento ^[19], ^[30].

FIGURA 6. Sachês absorvedores de etileno constituídos de $KMnO_4$.



Fonte: GOOGLE, 2021.

Estudos demonstram os excelentes benefícios dos absorvedores de etileno na preservação de frutas e vegetais. Os pesquisadores Amarante e Steffens (2009), comprovaram que ao utilizar sachês de permanganato de potássio, como absorvedores de etileno, o processo de amadurecimento de maçãs “Royal Gala”, analisadas sob armazenamento refrigerado e em temperatura ambiente, foi desacelerado ^[31].

Segundo Brody (2001), a associação entre absorvedores de etileno e absorvedores de oxigênio garantem uma efetividade maior às embalagens, pois em baixas concentrações de oxigênio ocorre a retenção da metionina, precursora do etileno, nas células do tecido vegetal diminuindo a formação desse gás que promove a maturação do produto ^{[32],[33]}.

A presença de umidade no alimento embalado favorece a proliferação de microrganismos responsáveis pela deterioração do alimento, além de resultar na perda das características de alimentos sólidos, como o amolecimento de biscoitos, bolachas, leite e chocolate em pó e produtos higroscópicos como doces e balas. A redução máxima dessa umidade relativa no espaço livre entre a embalagem e o alimento, é necessária para preservar a qualidade e manter a segurança dos alimentos acondicionados. Os níveis de umidade relativa no interior das embalagens podem ser reduzidos por meio da incorporação de umectantes, como poliálcoois e carboidratos, entre duas camadas de um filme plástico. Utilizam-se também sachês compostos por substâncias dessecantes, como álcool, propilenoglicol, polpa de celulose virgem, amido, dentre outros carboidratos ^[19].

Em países como o Japão, Estados Unidos (EUA) e Austrália as embalagens ativas são bem aceitas e apresentam-se como uma tendência em expansão. No Brasil ainda é lento o desenvolvimento e a comercialização de embalagens ativas, sendo necessário, muitos estudos nessa área para avaliar diversos parâmetros relacionados aos efeitos químicos e microbiológicos das substâncias incorporadas aos materiais de interesse, para garantir a segurança dos alimentos acondicionados, ao seu impacto ambiental, aceitação de mercado e vantagens para o setor econômico. Atualmente, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) não dispõe de uma legislação específica para esse tipo de embalagem. De acordo com Sarantópoulos e Cofcewicz (2016), no Brasil a aplicação de embalagens ativas em produtos é feita pela compra de embalagens de fabricantes internacionais, como por exemplo, as empresas Bemis

(distribuidora de filmes com incorporação de absorvedores de oxigênio), Multisorb Technologies, Mitsubishi Gas Chemical, Didai Tecnologia LTDA (distribuidoras de diversos tipos de absorvedores de oxigênio).

3.2.2 Embalagem Inteligente

As embalagens inteligentes possuem mecanismos que possibilitam detectar os processos de deterioração, verificando as mudanças de pH, as oscilações de temperatura sofridas no armazenamento ou até indicar, pela mudança da cor, se uma fruta está madura para o consumo.

As três principais funções das embalagens inteligentes são indicar qualidade, proporcionar comodidade e fornecer proteção [33], [34], [35]. Seu principal objetivo é reduzir drasticamente o tempo para a detecção de microrganismos patogênicos de dias para horas ou até mesmo minutos.

As informações sobre a qualidade do produto são obtidas por meio de sensores e indicadores contidos em rótulos ou etiquetas, permitindo o acesso às reais condições do alimento, antes do consumo. As embalagens inteligentes interagem diretamente com o alimento respondendo às suas alterações de maneira rápida e eficiente [34],[23].As embalagens inteligentes podem ser divididas em duas categorias: embalagens carreadoras de informações e embalagens indicadoras. As embalagens carreadoras de dados incluem o código de barras e as etiquetas de identificação por frequência de rádio (RFID) [2]. As etiquetas RFID são sistemas que possuem um leitor responsável por transmitir ondas de rádio que capturam os dados armazenados na etiqueta e os transferem análise em um programa computacional. Já dentre as embalagens indicadoras destacam-se os indicadores do binômio tempo-temperatura, indicadores de gases, como oxigênio e etileno, e os indicadores de microrganismos patogênicos e toxinas. Os sistemas indicadores são compostos por substâncias que registram a concentração ou ausência de determinados compostos, e mensuram o nível de interação entre duas substâncias através da alteração visual da embalagem [2], [30].

Ainda, de acordo com Yam et al. (2005), a tecnologia dos biossensores é outra grande área de aplicação das embalagens inteligentes. Os biossensores são dispositivos compactos analíticos (um biorreceptor e um transdutor) responsáveis por detectar, registrar e transmitir informações em resposta a reações biológicas [36]. Os

biorreceptores são constituídos por materiais orgânicos como enzimas, antígenos, microrganismos, hormônios e ácidos nucleicos responsáveis por analisar as substâncias. Transdutores convertem os sinais biológicos quantificáveis fornecendo uma resposta elétrica e podem ser constituídos por dispositivos eletroquímicos, ópticos, colorimétricos entre outros. Os sistemas de embalagens inteligentes associados aos biossensores permitem que a qualidade do alimento seja detectada pelos próprios consumidores, pois a resposta ocorre em tempo real [2],[32],[36].

Um exemplo de embalagem inteligente disponível no mercado internacional é a RipeSense. Trata-se de um sensor, sensível ao gás etileno, que pode ser integrado à embalagem na forma de uma etiqueta, que muda de cor de acordo com a quantidade de gás etileno liberada pela fruta ao longo do tempo. A cor da etiqueta (em formato de círculo) permanece vermelha, quando a fruta ainda está firme, passa para rosada, conforme ela esteja parcialmente madura e se torna amarela se estiver totalmente madura. Dessa maneira, o consumidor é capaz de garantir o melhor aproveitamento do alimento.



FIGURA 7. Embalagem inteligente RipeSense que varia de cor de acordo com o nível de maturação das frutas acondicionadas [73].

De acordo com a ABRE, as embalagens inteligentes ainda não são tão comuns aqui no Brasil, como em outros países, mas a expectativa é que as marcas comecem investir gradativamente mais nessa tecnologia, que está em expansão mundial. Garantindo vários benefícios importantes, como o combate ao desperdício, proporcionando maior sustentabilidade e economia para o setor industrial de embalagens.



FIGURA 8. Embalagem inteligente de salmão que varia de cor de acordo com o tempo e a temperatura de conservação [73].

3.3 BIOPOLÍMEROS

Os biopolímeros consistem em polímeros ou copolímeros derivados de fontes naturais e renováveis, como amido, cana-de-açúcar, celulose, quitina, quitosana, entre outros. Diferentemente dos polímeros obtidos de fontes não renováveis, que emitem monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂) durante a sua degradação, os biopolímeros não produzem excesso de gás carbônico. Provenientes de fontes naturais, a partir de elementos que realizam fotossíntese, o carbono presente nesses materiais, quando degradado, é novamente absorvido pelas plantas, completando o ciclo do carbono [23], [37], [45].

Geralmente, os biopolímeros possuem limitações em seu processo de extração e produção, os materiais obtidos apresentam baixa resistência térmica e propriedades mecânicas inferiores aos polímeros tradicionais. Diversos estudos vêm sendo realizados para otimizar o processamento dos biopolímeros, buscando melhorias nas propriedades desse material [23], [37], [45]. A aplicação desse material em blendas e nanocompósitos, pretende aperfeiçoar algumas propriedades como, processabilidade, resistência térmica, propriedades mecânicas, propriedades reológicas, permeabilidade a gases e taxa de degradação desse material [45].

3.4 POLÍMEROS BIODEGRADÁVEIS

As embalagens biodegradáveis vêm despertando o interesse de pesquisadores como uma alternativa sustentável para reduzir os impactos ambientais causados pelo uso excessivo de polímeros sintéticos ^{[37],[44]}.

Atualmente, os materiais plásticos são os mais empregados na fabricação de embalagens para produtos alimentícios, devido à sua versatilidade e características que incluem elevada durabilidade, flexibilidade e leveza, associadas ao seu preço acessível, proporcionam um melhor custo-benefício para o setor industrial. A maioria dos materiais plásticos utilizados são produzidos a partir de derivados de petróleo, matéria-prima de origem natural não renovável. Sua degradação pode levar centenas de anos, associada ao descarte inadequado, ocasiona um crescente acúmulo de resíduos sólidos, aumentando a poluição ambiental. Os polímeros são formados por longas cadeias de hidrocarbonetos, apresentam grande estabilidade química por serem formados por fortes ligações covalentes, características que dificultam a sua degradação por microrganismos ^[37]. A incorporação de aditivos foto e termoestabilizantes aos materiais poliméricos, em processos industriais, limita o processo de degradação devido ao aumento da sua estabilidade ^[44].

O grande volume de lixo produzido por materiais plásticos, associado ao descarte inadequado também impactam na poluição marinha. Esses polímeros são capazes de adsorver substâncias tóxicas, que podem ser ingeridas pelos animais marinhos, resultando em intoxicações e podendo levar à morte ^[37].

Apesar de serem facilmente recicladas, algumas embalagens plásticas são formadas por multicamadas compostas por outros materiais, como alumínio, incorporados para otimizar as propriedades de barreira física das embalagens, além de serem descartadas de maneira incorreta, resultando na contaminação do material, limitando consideravelmente sua capacidade de reciclagem. Além disso, o esgotamento de recursos naturais para a fabricação desse material, vêm aumentando a preocupação com os impactos ambientais e intensificando a busca por alternativas para substituição deste produto ^[37].

Os polímeros biodegradáveis são materiais que se degradam rapidamente, levando cerca de semanas ou meses, em circunstâncias adequadas, pela ação de microrganismos como bactérias fungos e algas [44]. Essa degradação pode ocorrer rapidamente sob circunstâncias favoráveis, devido à existência de grupos funcionais alifáticos presentes nas cadeias desses polímeros, como ésteres e carbonilas, levando cerca de algumas semanas ou meses [37].

Os polímeros biodegradáveis oriundos de fontes naturais (biopolímeros) podem ser derivados de insumos como a celulose, cana-de-açúcar, milho, batata, beterraba, sintetizados por bactérias ou provenientes de origem animal, como a quitina, o colágeno, proteínas entre outros. Existem também os polímeros biodegradáveis sintéticos, provenientes de fontes não renováveis ou da mistura entre biomassa e petróleo, destacam-se as policaprolactonas (PCL), as poliesteramidas, os copoliésteres alifáticos e os copoliésteres aromáticos [37], [38], [44].

A Tabela 4, relaciona alguns exemplos de polímeros biodegradáveis e suas respectivas fontes de matéria-prima:

TABELA 4. Fontes de matéria-prima e exemplos de polímeros biodegradáveis [38].

Matéria-prima	Exemplos de Polímeros
Fontes naturais renováveis, como polissacarídeos (milho, batata, cana-de-açúcar), proteínas e lipídeos	Amido, Celulose e Caseína
Síntese por bactérias a partir de pequenas moléculas, como o ácido butírico e o ácido valérico	Polihidroxibutirato (PHB) e Polihidroxibutirato-co-valerato (PHB-HV)
Síntese convencional a partir de biomônômeros	Poli (Ácido Lático) (PLA)
Fontes fósseis, como o petróleo, ou da mistura entre biomassa e petróleo	Policaprolactonas (PCL) e Poliesteramidas

Pesquisas voltadas para o aperfeiçoamento dos polímeros biodegradáveis, destacando-se os de origem natural, estão em constante evolução, buscando o desenvolvimento de materiais com as propriedades mecânicas e de barreira equivalentes aos polímeros provenientes de fontes não renováveis, que apresentem desempenho favorável e custos atrativos. Por serem facilmente degradados por microrganismos, os materiais poliméricos biodegradáveis possuem grande potencial de se tornarem substitutos dos materiais plásticos, não apenas em embalagens de alimentos, como também em embalagens de produtos de limpeza e higiene, pois não apresentam riscos de contaminação ^{[6], [37]}.

De acordo com a ABIPLAST, apesar do mercado de bioplásticos corresponder a apenas 1% de representatividade no mercado mundial de plásticos, segundo a *European Bioplastics*, ele apresenta uma tendência de crescimento ^[39]. Existem diversos desafios associados a inserção desse novo material no mercado em escala comercial.

Recentemente, uma das alternativas mais viáveis para o uso de polímeros biodegradáveis está na produção de compósitos, onde as propriedades dos materiais podem ser aperfeiçoadas incorporando reforços à sua estrutura ^[40]. Embalagens biodegradáveis produzidas a partir do reaproveitamento de resíduos agrícolas constituem numa linha de pesquisa promissora, com enorme potencial de desenvolvimento ^[41]. Esses resíduos são constituídos por fibras naturais de origem vegetal, podem ser utilizados como material de reforço para matrizes poliméricas ^[40]. ^[41]. Filmes biodegradáveis constituídos apenas por amido de milho apresentam baixa resistência mecânica e elevada hidrofobicidade, resultando em materiais mais quebradiços e com maior capacidade de absorção de água. Com o intuito de reduzir essas limitações, foram desenvolvidos filmes de amido reforçados com fibras de celulose, que apresentaram propriedades mecânicas superiores e maior resistência à umidade ^{[41], [42]}.

3.5 CELULOSE VEGETAL

A celulose (C₆H₁₀O₅) é o biopolímero mais abundante do planeta, altamente versátil pode ser empregada na fabricação de materiais sustentáveis, como embalagens e

filmes biodegradáveis. Por ser parte constituinte da parede celular de plantas, pode ser extraída de qualquer fonte vegetal, além de outras formas de vida, como fungos, bactérias, algas e protozoários ^[47].

A celulose extraída de fonte vegetal, contém substâncias como lignina, pectina e hemicelulose, responsáveis pela produção de resíduos tóxicos durante o processo de purificação. A celulose é bastante empregada como matéria-prima na fabricação de papel, além de ser utilizada na indústria madeireira como agente emulsificante, dispersante, gelificante, entre outros. Segundo Donini et al. (2010), a fonte industrial predominante de celulose é a madeira de eucalipto, composta por celulose, lignina e hemiceluloses, em diferentes proporções ^[47]. A crescente demanda de celulose vegetal para fins industriais ocasiona um aumento no desmatamento florestal, agravando a poluição ambiental, tornando necessária a busca por fontes alternativas de extração de celulose, como a celulose bacteriana ^[80].

3.6 CELULOSE BACTERIANA

3.6.1 Propriedades

A celulose bacteriana (CB) é um polissacarídeo, sintetizado por algumas bactérias, em especial dos gêneros : *Komagataeibacter* (antigo *Gluconacetobacter*), *Acetobacter*, *Achromobacter*, *Aerobacter*, *Agrobacterium*, *Alcaligenes*, *Azotobacter*, *Escherichia*, *Pseudomonas*, *Rhizobium* e *Sarcina* ^{[12], [13], [52]}. Em geral, as bactérias do gênero *Komagataeibacter* são as mais empregadas em pesquisas, principalmente na área alimentícia, devido ao seu elevado rendimento e pureza ^[11].

A celulose bacteriana não apresenta lignina, hemicelulose e outros materiais orgânicos em sua composição, como a celulose vegetal, não havendo necessidade de tratamentos químicos rigorosos para sua purificação ^{[13], [46]}.

A celulose bacteriana é composta pela associação de cadeias nascentes que se agregam formando longas subfibrilas, com cerca de 1,5 nm. Em seguida, as subfibrilas são cristalizadas em microfibrilas, formando feixes de microfibrilas ou microfibrilas. As microfibrilas consistem numa estrutura reticulada densa estabilizada por várias ligações de hidrogênio, com pequenas dimensões, que variam 1 a 9 nm de largura. Essas redes

apresentam um elevado nível de polimerização, geralmente em torno de 2000 a 6000 [13].

Comparadas às fibrilas de celulose vegetal, as nanofibrilas de celulose bacteriana possuem propriedades superiores, sendo elas: maior área superficial, elevada cristalinidade, elasticidade, força de tensão, baixa densidade e maior capacidade de retenção de água [13], [47]. Além disso, sua estrutura permite a inserção de materiais para a obtenção de blendas e compósitos com a finalidade de eliminar algumas de suas limitações, como por exemplo, a inexistência de transparência óptica, e obter estruturas com propriedades superiores [48].

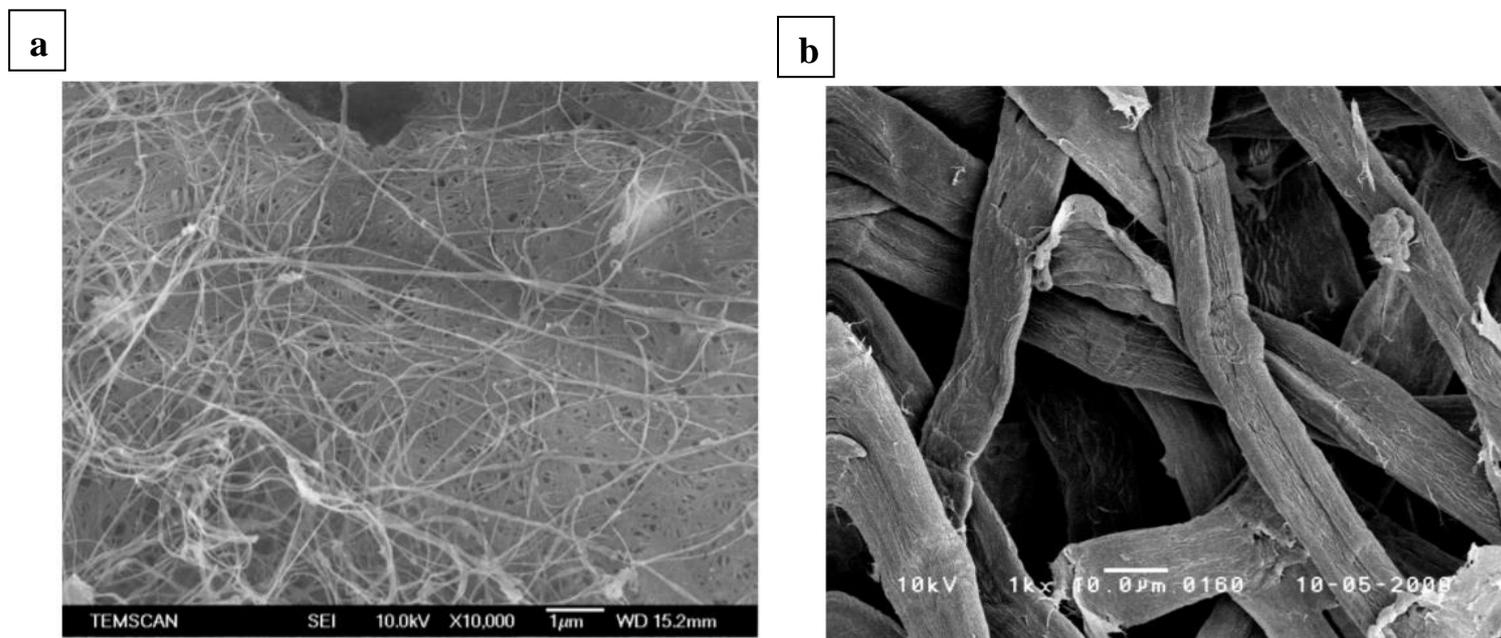


FIGURA 9. Representação das (a) nanofibras de celulose bacteriana (b) microfibras de celulose vegetal [47].

A CB pode ser produzida por um processo de fermentação, realizado em condição estática ou agitada. Por meio da fermentação estática, obtém-se na superfície do meio de cultivo uma membrana gelatinosa (FIGURA 10-a). Na fermentação agitada, a celulose bacteriana é obtida no formato de esferas (FIGURA 10-b). [48],[50].

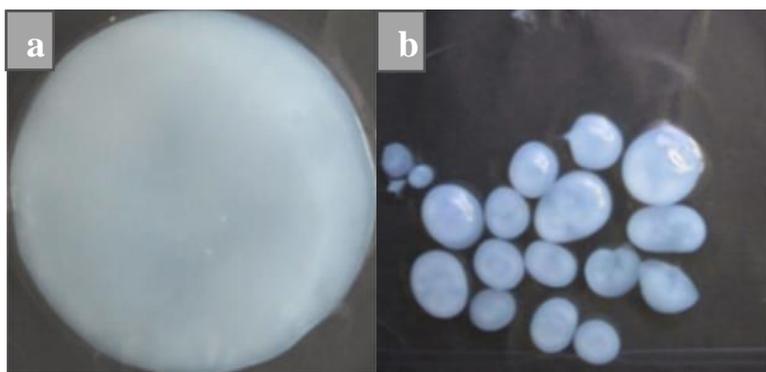


FIGURA 10. Celulose bacteriana obtida por meio da bactéria *K. xylinus*, após sete dias nos diferentes meios de cultivo: estático (a) e agitado (b) ^[81].

A membrana de celulose bacteriana exerce a flotação, um mecanismo importante de autodefesa que possibilita ao microrganismo permanecer na superfície do meio de cultivo a fim de obter oxigênio mais facilmente, auxiliando seu desenvolvimento. A CB também atua como proteção contra a radiação ultravioleta além prevenir a desidratação do substrato pois seu caráter higroscópico proporciona a retenção de umidade ^{[11], [47]}.

A celulose bacteriana também é uma importante fonte de nanocelulose. O termo nanocelulose é utilizado para designar materiais celulósicos que possuem ao menos uma de suas dimensões em escala nanométrica. Suas propriedades que incluem elevada estabilidade térmica, alta relação de aspecto e reforço mecânico, proporcionam um grande interesse acerca desse material, estimulando pesquisas no campo acadêmico e industrial ^{[74], [75], [76], [77]}.

A nanocelulose pode ser subdividida em duas categoriais: nanocristais e nanofibras. A celulose bacteriana nanofibrilada (CBNF), consiste em nanopartículas longas e flexíveis formadas por domínios cristalinos e amorfos alternados. As nanofibras podem ser obtidas através do processo de fibrilação mecânica da celulose que ocasiona a desagregação física e/ou química das fibras de celulose, em fibras de diâmetros nanométricos (< 100 nm), modificando também suas propriedades estruturais e de superfície ^{[74], [75], [76], [77]}.

Os nanocristais (ou *nanowhiskers*) de celulose bacteriana (CBNC) consistem em segmentos de celulose em uma estrutura cristalina perfeita, equivalentes a pequenas partículas no formato de hastes. Esse material pode ser isolado por meio de hidrólise ácida ou enzimática. As propriedades desse nanomaterial, incluem elevada resistência

mecânica, e força. Além de alta razão de aspecto (comprimento/diâmetro), capaz de conferir grande capacidade de reforço para matrizes poliméricas variadas [74], [75], [76], [77].

Atualmente, diversas pesquisas têm sido realizadas para avaliar os melhores métodos de obtenção desses nanomateriais, garantindo seu melhor aproveitamento para produção de materiais biodegradáveis como embalagens, filmes e revestimentos, compósitos, membranas ópticas, entre outros.

3.6.2 Produção e Purificação

A síntese da celulose bacteriana é um processo complexo e pode ser dividido em duas etapas intermediárias: (i) a formação intracelular de cadeias de 1,4- β -glucano e (ii) a montagem e cristalização de cadeias de celulose. A primeira etapa está relacionada à polimerização dos resíduos de glicose em cadeias de 1,4- β -glucano. A segunda etapa consiste na excreção extracelular das cadeias lineares seguida pela cristalização e disposição das cadeias de celulose que são mantidas por ligações de hidrogênio intermoleculares (a) e intramoleculares (b) [11], [48].

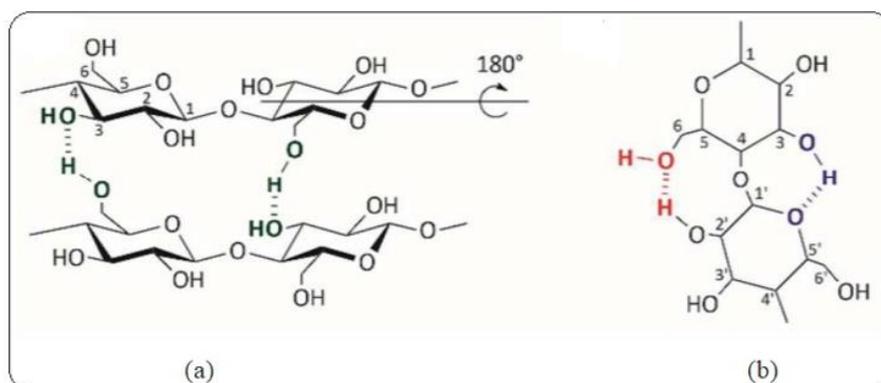


FIGURA 11. Representação da estrutura da CB mantida por ligações de hidrogênio intermoleculares e intramoleculares [11].

Os grupos hidroxila presentes na estrutura da celulose bacteriana são os responsáveis pela sua grande capacidade de absorção de água e pelo seu processo de biodegradação [48].

Pesquisas realizadas por Huang et al. (2014), com bactérias *Komagataeibacter xylinus*, demonstraram que a fonte de nutrientes utilizada no meio de cultura são os responsáveis pelo crescimento celular e, em consequência, pela produção de celulose

bacteriana ^[12]. A CB da bactéria *Komagataeibacter xylinus*, pode ser biossintetizada através de duas rotas: pelo ciclo de Krebs ou pela via do 6-P gliconato, em conjunto com o processo de formação da glicose. Para iniciar o método de obtenção de celulose bacteriana, é necessário avaliar alguns parâmetros, como a cepa bacteriana e as condições do bioprocesso (cultivo estático ou agitado, e meio de cultura), para obter elevado rendimento de celulose bacteriana ^{[11],[49]}.

Para elevar os níveis de produção em escala industrial, a membrana de celulose bacteriana é obtida através do meio cultivo agitado, com o auxílio de equipamentos específicos, como os biorreatores e também os frascos de agitação. Desse modo, as bactérias no meio se multiplicam de maneira mais rápida e, por consequência, ocorre um aumento na produção de CB.

O tempo de cultivo é determinado pela escolha do meio de cultura, do modo de cultivo, assim como, da cepa de bactéria utilizada, podendo variar de alguns dias, no caso de cultivo agitado, a poucas semanas se desempenhado em modo de cultivo estático^[46]. Segundo Lee et al. (2014), a obtenção de celulose bacteriana em modo de cultivo estático apresenta um rendimento baixo, referente a cinco gramas por litro, após aproximadamente 30 dias de cultivo ^[49]. A lenta taxa de crescimento pode ser explicada pelo processo de transferência em massa de oxigênio e outros compostos nutritivos para as bactérias dentro das películas. O tempo de cultivo pode ser reduzido de semanas para dias, empregando-se o cultivo agitado. No entanto, apesar do aumento na taxa de crescimento das bactérias, o rendimento de CB ainda é reduzido ^[46]. Essa limitação ocorre devido à mutação de bactérias produtoras de CB para bactérias que não possuem a capacidade de produzir CB, consistindo numa desvantagem desse modo de cultivo. Ao longo dos anos, avanços no desenvolvimento de biorreatores que sejam capazes de otimizar os processos de produção, reduzindo a probabilidade de mutação e os custos de trabalho vêm sendo desempenhados ^[46].

Os biorreatores mais citados na literatura, usados para ampliar a quantidade de produção da celulose bacteriana, são os seguintes: biorreator de membrana (utilizado no cultivo estático de bactérias), biorreator Airlift, rotativo, aerossol e finalmente os reatores de mistura contínua (CSTR). O biorreator Airlift, modificado por Wu e Li (2015), que, por finalidade, proporciona um adequado suprimento de oxigênio durante todo o processo, apresenta como vantagem a produção de membranas de celulose

bacteriana com uma maior capacidade de retenção de água do que as produzidas pelo cultivo estático [11], [46], [49], [53].

A purificação da celulose bacteriana é necessária para retirar impurezas e resíduos do meio de cultivo, como células bacterianas e toxinas (Figura 12-a), garantindo a obtenção da celulose pura (Figura 12-b).

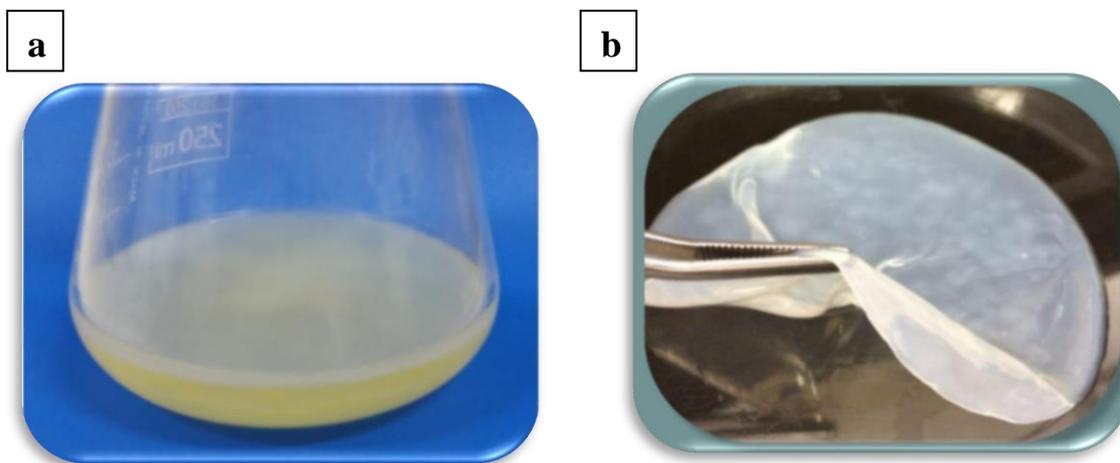


FIGURA 12. Representação da estrutura membrana de celulose bacteriana formada em cultivo estático (a) película não purificada (b) película purificada.

O tratamento das membranas de celulose bacteriana, empregando-se hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH), ácido clorídrico (HCl), ácidos orgânicos ou lavagens repetidas com água de osmose reversa e/ou água aquecida consistem nos principais processos de purificação descritos na literatura. De acordo com as diferentes aplicações, empregam-se diferentes metodologias para a purificação da CB [76], [78].

3.6.3 Meios de Cultura

Para o processo de produção de celulose bacteriana, o meio de cultura necessário deve ser constituído por uma rica de fonte de carbono, nitrogênio e aditivos, como sais e micronutrientes. O custo elevado do meio de cultivo é o principal fator limitante para a produção de CB em larga escala [11], [46].

O meio de cultura sintético mais comum utilizado é o HS (Hestrin e Schramm), formado pelos substratos, glicose, peptona e extrato de levedura, como fontes de

carbono e nitrogênio ^{[46],[54]}. Em função de seu elevado custo, outras fontes de açúcares, como a frutose, têm sido consideradas como substitutas da glicose na produção de celulose bacteriana. O nitrogênio também é uma importante fonte de nutrientes para as bactérias produtoras de celulose. O emprego de uma fonte alternativa de nitrogênio no meio de cultura, como a água proveniente processo de trituração do milho, demonstrou grande potencial de aplicação, quando adicionada em pequenas proporções, foi capaz de promover a produção de celulose bacteriana ^[46].

A incorporação de aditivos no meio de cultura, podem beneficiar a produção de celulose bacteriana. A incorporação de etanol ao meio de cultura é capaz de auxiliar na extinção do processo de mutação natural das bactérias que produzem celulose em espécies modificadas não produtoras de celulose ^{[11],[46]}.

Atualmente diversas alternativas para substituir os meios de cultura tradicionais, com o objetivo de reduzir os custos e ampliar a produção de celulose bacteriana, como o emprego de resíduos agrícolas como fonte de carbono e nutrientes, têm sido desenvolvidas.

Foi evidenciado por Hungund et al. (2013), a eficácia na produção de celulose bacteriana empregando-se vários sucos de frutas incluindo laranja, abacaxi, maçã, pêra japonesa e uva. Essas substâncias apresentam baixo custo além de serem ricas em nutrientes, como carboidratos, proteínas e oligoelementos ^[55].

Os pesquisadores Tyagi e Suresh (2016) demonstraram a capacidade de produção de CB por bactérias *Gluconacetobacter intermedius* SNT-1, utilizando o melaço das indústrias produtoras de açúcar, como substrato, reduzindo os custos de produção e garantindo características semelhantes às obtidas usando o meio de cultivo padrão com glicose, além de proporcionar um destino sustentável para os resíduos industriais ^[55]. No estudo recente, realizado por Souza et al. (2020), empregando frutose, obtida do suco de caju, como fornecedora de carbono e melaço de soja como provedor de nitrogênio para a produção de celulose bacteriana por bactérias *Acetobacter xylinus* (ATCC 53582), resultaram na produção de membranas com características semelhantes às obtidas através do meio de cultivo padrão (HS), porém com maior rendimento e menor valor ^[57].

A diversidade de estudos que comprovam a eficácia dos meios de cultura alternativos para a produção de celulose bacteriana, possibilitam a redução dos custos e a otimização do processo de produção deste material, que possui diversas aplicações em potencial. A Tabela 5, apresenta o resultado de alguns estudos que utilizaram resíduos para a produção de CB.

TABELA 5. Bactérias, fontes de carbono e aditivos na produção de celulose bacteriana. Adaptado ^[46].

Bactéria	Fonte de Nutrientes	Modo de Cultivo	Rendimento (g·L ⁻¹)	Referência
<i>G. hansenii</i> PJK (KCTC 10505 BP)	Escórias oriundas da cultura de cerveja	-	8,6	Ha et al. (2008)
<i>A. xylinus</i> (NBRC 13693)	Frutose obtida do suco de laranja e nitrogênio do meio de cultivo Hestrin e Schramm	Estático	5,9	Kurosumi et al. (2009)
<i>K. xylinus</i>	Algodão hidrolisado	Estático	10,8	Hong et al. (2012)
<i>A. xylinum</i> (NRRL B-42)	Resíduos do bagaço de uva e líquido oriundo da trituração de milho	Estático	6,7	Cerrutti et al. (2016)
<i>K. xylinus</i>	Fonte de carbono obtida do suco de caju e melão de soja como fonte de nitrogênio	Estático	4,5	Souza et al. (2020)

3.6.4 Condições do Processo

As condições do processo de produção da celulose bacteriana afetam diretamente suas propriedades e conseqüentemente suas possíveis aplicações. No decorrer do processo fermentativo, existe uma faixa ótima de pH, que varia de 4,0 a 7,0, para o crescimento das bactérias e a formação de celulose bacteriana, que varia de acordo com a espécie do microrganismo ^{[11],[46]}. Segundo Lee et al. (2014), o rendimento máximo de CB pode ser atingido através do monitoramento e do controle do pH durante o processo de produção, pois ele sofre alterações no decorrer do tempo, devido ao

acúmulo de metabólitos secundários, como os ácidos glucônico, acético ou lático que são produzidos durante o consumo das fontes de carbono e nitrogênio [49]. O controle do pH também é recomendado para evitar perigos de contaminação do meio de cultivo em produção industrial [46].

A temperatura é outra importante variável no processo produtivo, um estudo realizado por Volova et al. (2018), analisando o efeito da temperatura na produção de celulose pela bactéria *Komagataeibacter xylinus* (B-12068), indicou uma faixa ótima bem estreita, variando de 28-30°C [11],[58]. Finalmente, o controle dos níveis de oxigênio dissolvidos no meio de cultivo, consiste numa variável fundamental, pois as bactérias produtoras de CB são fundamentalmente aeróbias [11],[46].

O teor de oxigênio apropriado garante a respiração celular e o crescimento das bactérias, possibilitando a formação de biopolímeros com propriedades adequadas e rendimento satisfatório [11].

3.6.5 Aplicações da Celulose Bacteriana

A celulose bacteriana possui uma diversificada área de estudos e aplicações, presente na indústria alimentícia, farmacêutica, de papel, têxtil, eletrônica, cosmética, na biomedicina, entre outras. Devido ao seu elevado custo comercial, as principais aplicações da celulose bacteriana ainda se concentram na área biomédica, como na produção de curativos no tratamento de úlceras, queimaduras, regeneração de tecidos, vasos sanguíneos.

A Tabela 6, relaciona algumas aplicações da celulose bacteriana em diferentes campos de pesquisa.

TABELA 6. Diversas Aplicações da Celulose Bacteriana.

Aplicações	Referências
Filmes compósitos de celulose bacteriana e polianilina (CB/PAni), para fabricação de sensores, dispositivos eletrônicos, roupas inteligentes, eletrodos flexíveis e engenharia de tecidos "Scaffolds"	MÜLLER et al., 2012
Endodontia, no tratamento de canais radiculares dentais.	YOSHINO et al., 2012
Excipiente farmacêutico	AMIN; ABADI; KATAS, 2013
Sistema de liberação tópica de cafeína para aplicação em tratamento da celulite	SILVA et al., 2014
Utilização de substratos de celulose bacteriana em transplantes, para o tratamento de doenças degenerativas na retina, para o crescimento do epitélio pigmentar da retina (EPR)	GONÇALVES et al., 2015
Utilização de enxertos de celulose bacteriana na cicatrização de perfurações da membrana timpânica	SILVEIRA et al., 2016

Curativo para o tratamento de úlceras
varicosas nos membros inferiores

CAVALCANTI et al., 2017

Preparação de Compósitos de celulose
bacteriana e materiais inorgânicos
(óxidos e sulfetos metálicos)

FORESTI; VÁZQUEZ; BOURY, 2017

Células de combustível

GADIM et al., 2017

Máscara de celulose bacteriana
impregnada com vitamina C

de AMORIM et al., 2019

3.7 CELULOSE BACTERIANA NO SETOR ALIMENTÍCIO

A produção da nata de coco (FIGURA 13), sobremesa indígena Filipina, foi o primeiro registro da utilização da celulose bacteriana como matéria-prima. A nata de coco é obtida através da fermentação estática da água de coco, que fornece uma película gelatinosa com aproximadamente 1cm de espessura, em seguida, essa membrana é cortada e embebida em xarope de açúcar ^[60].

FIGURA 13. Sobremesa nata de coco



FONTE: GOOGLE, 2021.

Okiyama et al. (1993), comprovaram que a celulose bacteriana é amplamente aplicável como hidrocoloides (gomos) alimentares para melhorar a qualidade de alimentos processados, devido a sua alta capacidade de retenção de água e textura macia [61].

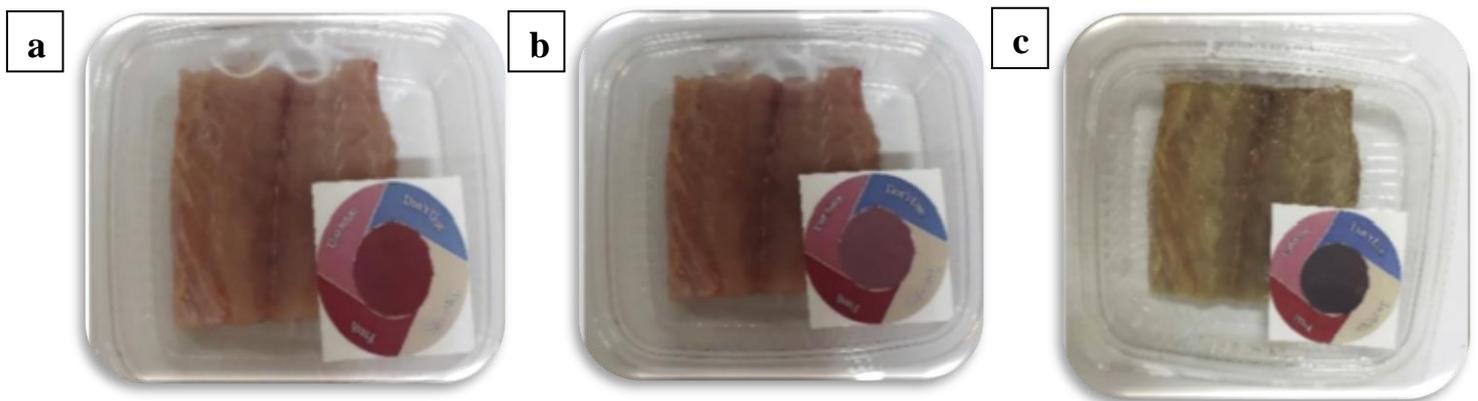
Aplicações sugerem a utilização de celulose bacteriana como substitutos de gordura, estudos realizados por Chau et al. (2008), demonstraram que refeições contendo celulose bacteriana são capazes de reduzir de maneira significativamente maior, os níveis de lipídios e colesterol em comparação a refeições contendo celulose vegetal [62].

Um gel constituído por nanocelulose bacteriana integrado com proteína de soja foi utilizado como gordura para fabricação de sorvetes. A incorporação da celulose bacteriana foi capaz de retardar o descongelamento do sorvete, mantendo-o de maneira estável por aproximadamente uma hora após retirada do refrigerador [63].

Pesquisadores desenvolveram um dispositivo inteligente de monitoramento de pH constituído por nanocelulose bacteriana e pigmentos vegetais de cenoura preta, para

inspecionar os níveis de frescura e o processo de decomposição de carnes de peixes da espécie truta arco-íris e filé de carpa comum, acondicionados a 4 °C. De acordo com os resultados obtidos, na faixa de pH 2-11, o equipamento de detecção apresentou mudanças significativas de cor (Figura 15), possibilitando a distinção nítida dos estágios de frescor: fresco, adequado para consumo e deteriorado [64].

Figura 15. Filé de truta arco-íris em seus distintos estágios para consumo, fresco (vermelho carmim), adequado para consumo (rosa) e deteriorado (marrom).



FONTE: MORADI, 2019.

A busca por meios de cultura alternativos, para reduzir as despesas e viabilizar o aumento da produção de celulose em escala industrial ainda é um grande desafio na atualidade [11],[46]. Contudo a utilização desse material na formação de compósitos biodegradáveis, fornecem novas aplicações, como a incorporação da celulose bacteriana na produção de nanocompósitos para a fabricação de embalagens de alimentos, promovendo um avanço na busca por materiais mais sustentáveis.

3.8 MEMBRANA DE CELULOSE BACTERIANA REGENERADA EM EMBALAGEM DE ALIMENTOS

No setor alimentício, a celulose bacteriana também pode ser empregada na área de embalagens. As embalagens de celulose bacteriana, apresentam diversas vantagens: são constituídas por polímeros biodegradáveis, são altamente hidrofílicas e, a partir da inserção de aditivos, podem desenvolver características antimicrobianas, antioxidantes, entre outras [46].

3.8.1 Inovações em Embalagens Ativas

A celulose bacteriana pode ser utilizada como uma matriz para filmes e revestimentos, inclusive filmes e revestimentos comestíveis. Filmes de celulose bacteriana impregnados com agentes antimicrobianos ampliam a estabilidade dos alimentos ao controlar o crescimento bacteriano, garantindo sua segurança e qualidade. Além de substâncias antimicrobianas, outros compostos como absorvedores de etileno e oxigênio, substâncias antioxidantes, podem ser incorporadas às membranas de celulose bacteriana para formação de um sistema de embalagem ativa que promove o aumento da preservação do alimento.

Filmes antimicrobianos comestíveis foram produzidos por pesquisadores, empregando-se filmes de celulose bacteriana e proteína bovina lactoferrina, para o acondicionamento de produtos cárneos frescos, pela interação direta com o alimento. Foi realizada a caracterização dos filmes analisando às propriedades mecânicas, permeabilidade a vapores de água e ação antimicrobiana contra dois patógenos alimentares *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus*. Foi analisada também, a taxa de alteração metabólica nas células em cultura, dos filmes, em contato com células de embrião de camundongo 3T3. A eficiência bactericida foi comprovada, com base na redução significativa da proporção de crescimento das bactérias examinadas. Os filmes obtidos também apresentaram boa eficiência mecânica. Os autores verificaram que a citotoxicidade encontrada não foi relevante contra as células 3T3 para os filmes anteriormente e posteriormente a simulação de digestão. Os filmes de CB e lactoferrina bovina foram considerados bactericidas e atóxicos. A partir dos resultados obtidos concluiu-se que os filmes funcionalizados produzidos podem ser empregados como embalagens antimicrobianas comestíveis para produtos cárneos, como linguiça fresca [65].

A celulose bacteriana pode ser obtida em diferentes formatos nanofibrilas e nanocristais, que podem atuar como reforço para estruturas. Esses materiais podem ser combinados com outros polímeros, com a intenção de corrigir suas limitações, refinando às propriedades de barreira, mecânica ou resistência à água.

Azeredo et al. (2018), produziram filmes comestíveis à base de CBNF (Celulose bacteriana nanofibrilada) e/ou pectina, em diferentes proporções, incorporados com

purês de manga ou goiaba. Os filmes obtidos com uma proporção maior de CBNF que pectina, apresentaram força elevada, maior resistência à água e a vapores. Além de serem aplicados como embalagens primárias comestíveis, esses filmes também, podem ser consumidos como folhas ou fitas de frutas, pois são caracteristicamente ricos em fibras [67].

Haghighi et al. (2020), demonstraram que a incorporação de nanowiskers de celulose bacteriana (CBNW) em filmes constituídos pela mistura de gelatina-álcool polivinílico (GL/PVA) apresentaram um efeito de reforço significativo, melhorando as propriedades mecânicas e de barreira de água dos filmes GL/PVA responsáveis pela preservação de alimentos, ampliando seu potencial de aplicação [5].

Subprodutos do caju foram utilizados no preparo de goma de cajueiro e celulose bacteriana, dois polissacarídeos com propriedades distintas em relação à viscosidade e tração, para analisar a fabricação de embalagens ou revestimentos alimentícios a partir da combinação desses dois materiais em diferentes proporções. Separadamente, os filmes de celulose bacteriana (CB) e os filmes de goma de caju (GC) apresentam limitações. Os filmes de GC apresentam baixa viscosidade, resultando na baixa estabilidade de suspensões e emulsões, encolhimento pós-secagem e espessura irregular. Por outro lado, os filmes de celulose bacteriana nanofibrilada (CBNF) produzidos pela bactéria *Komagataeibacter xylinus* (ATCC 53582), possuem elevada viscosidade, característica que pode interferir em algumas etapas do processamento como mistura, remoção de bolhas de ar e derramamento.

Foi utilizado suco de caju, como meio de cultivo alternativo, suplementado com extrato de levedura e peptona (5 g / L cada) em modo estático. A goma de cajueiro foi obtida a partir de cajueiros exsudatos fornecidos pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). A adição de celulose bacteriana nanofibrilada aos filmes de CG foi capaz de aumentar a resistência do material, reforçando as barreiras de vapor de água, resultando na redução acentuada da solubilidade do material. De acordo com os resultados obtidos por Silva et al. (2021), foi concluído que a combinação em diferentes proporções dos filmes de goma de caju e celulose bacteriana proporcionam filmes com excelentes propriedades para embalagens ou revestimentos alimentícios [14].



FIGURA 16. Filmes de CB e goma de caju em diferentes proporções ^[14].

Filmes biodegradáveis foram desenvolvidos a partir de resíduos industriais de celulose bacteriana. Melo et al. (2020), reaproveitaram o material descartado durante a produção de curativos de membrana de celulose bacteriana para extrair nanocristais de celulose bacteriana e incorporá-los ao hidroxipropil metilcelulose (HPMC), obtendo uma solução filmogênica (ou um compósito natural), material promissor para aplicação em embalagens alimentícias. Os filmes de HPMC apresentam baixa resistência mecânica e elevadas taxas de permeabilidade a vapores de água, uma alternativa para reduzir essas limitações e ampliar sua aplicabilidade consiste na adição de nanocristais de celulose bacteriana a sua composição. Os nanocristais de celulose bacteriana (CBNC), foram obtidos a partir dos resíduos de CB submetidos a tratamentos químicos e mecânicos em condições randomizadas. Em seguida a suspensão de nanocristais obtida é adicionada ao HPMC diluído em água, formando uma solução filmogênica.

Foram obtidos filmes opticamente transparentes que apresentaram um bom reforço em sua estrutura, suas propriedades de barreira de umidade, resistência mecânica e rigidez foram aumentadas 20%, 40% e 80%, respectivamente.

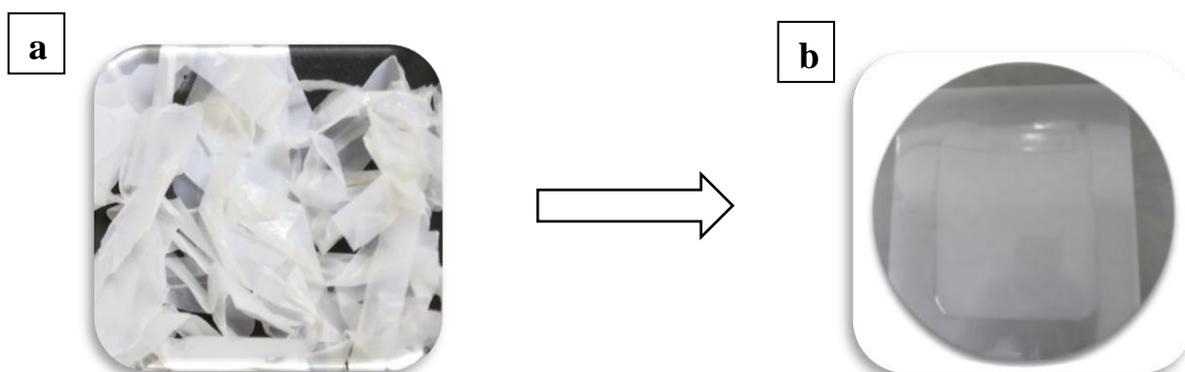


Figura 17. (a) Resíduos industriais de CB e (b) filme biodegradável constituído por CBNC e HPMC.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A valorização de resíduos industriais é extremamente importante no contexto atual em que as embalagens plásticas, produzidas por matéria-prima não renovável, possuem elevada demanda e são rapidamente consumidas, gerando um volume exagerado de lixo descartado no meio ambiente. A inserção de materiais biodegradáveis, como substitutos para embalagens plásticas, produzidos a partir de materiais de descarte é uma incrível oportunidade de colocar em prática técnicas mais sustentáveis de consumo e reaproveitamento dos materiais, reduzindo a quantidade de resíduos gerados. Além de aumentar a competitividade da celulose bacteriana no mercado, em relação aos custos de produção, ao utilizar as sobras obtidas na etapa de corte dos curativos, que seriam descartadas ou utilizadas em aplicações de baixo valor agregado.

As embalagens alimentícias permitem que os alimentos cheguem até consumidor de maneira segura e com qualidade. Buscando melhorias nos sistemas tradicionais de embalagens de alimentos, novos avanços têm sido feitos com foco no desenvolvimento de embalagens funcionais, que interagem de maneira intencional com o alimento, promovendo o aumento de sua estabilidade e/ou indicando a qualidade do produto acondicionado. Outra importante motivação, é a substituição de polímeros derivados do petróleo por polímeros biodegradáveis para reduzir os impactos ambientais causados pela exploração desse material.

A utilização de CB na fabricação de embalagens alimentícias, produzidas a partir de resíduos agrícolas e/ou industriais, torna o processo de produção mais sustentável, auxiliando na redução da poluição ambiental, devido a reutilização de materiais que geralmente seriam descartados, além de reduzir os custos do ponto de vista econômico. Estes aspectos corroboram para maior aplicabilidade desse biopolímero na fabricação de embalagens.

Os nanocompósitos de celulose bacteriana têm se mostrado grandes ferramentas na fabricação de embalagens de alimentos e revestimentos comestíveis. Os nanocristais de celulose bacteriana (CBNC), permitem que grupos carregados sejam introduzidos em sua superfície, otimizando sua estabilidade coloidal derivada de repulsões eletrostáticas. Além de apresentarem uma aplicação em potencial para aumentar as propriedades de

barreira de água e otimizar as propriedades mecânicas dos materiais de embalagem . As nanofibrilas de celulose bacteriana (CBNF), empregadas como uma matriz alternativa apresentam características aprimoradas para as propriedades de filmes devido à alta resistência à tração, bem como sua capacidade de aumentar a resistência à água, fatores que melhoram o desempenho físico-mecânico das embalagens e que são de grande importância para a indústria.

A celulose bacteriana é um biopolímero sustentável e multifuncional, além das vantagens econômicas, relacionadas à purificação, a utilização de CB como fonte de celulose evita o desmatamento, proporcionando preservação das árvores, essenciais para a vida na Terra.

As perspectivas para o futuro indicam avanços nas pesquisas voltadas para a otimização dos processos de produção da celulose bacteriana, promovendo a sua aplicação em embalagens de alimentos e comercialização no mercado como embalagens ativas e inteligentes.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] JORGE, N. Embalagens para alimentos / Neuza Jorge. – São Paulo: Cultura Acadêmica: Universidade Estadual Paulista, Pró-Reitoria de Graduação, 2013.
- [2] SOUZA, L. B. de; MOURA, A. A. C.; SILVA, J. B. A. da. Embalagens Para Alimentos: Tendências e Inovações. Hig.aliment, p. 25-29, 2017.
- [3] AZEREDO, H. M. C. de; FARIA, J. de A. F.; AZEREDO, A. M. C. de. Embalagens ativas para alimentos. Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos, v. 20, n.3, 2000.
- [4] FREIRE, B. C. F., RABELO, J. L. G., da SILVA MACÊDO, R. C. B., & de PAIVA E SOARES, K. M. Inovações e Atualidades em Tecnologia De Embalagens Para Alimentos: Uma Revisão.
- [5] HAGHIGHI, H.; BIARD, S.; BIGI, F., Riccardo De Leo, BEDIN E.; PFEIFER F.; SIESLER H. W.; LICCIARDELLO F.; PULVIRENTI A.; Comprehensive characterization of active chitosan-gelatin blend films enriched with different essential oils, Food Hydrocolloids, Volume 95, p. 33-42, ISSN 0268-005X. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.04.019>.
- [6] LANDIM, A. P. M. et al. Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil. Polímeros [online]. 2016, v. 26, n. spe [Acessado 6 Setembro 2021] , pp. 82-92. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0104-1428.1897>>. Epub 19 Jan 2016. ISSN 1678-5169.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGENS – ABRE (2021). Estudo Abre Macroeconômico Da Embalagem e Cadeia de Consumo. Apresentação março de 2020: retrospecto de 2019 e perspectivas para o ano de 2020. Disponível em:< <https://www.abre.org.br/dados-do-setor/ano2019/> >. Acesso em: 6 de set. de 2021.
- [8] POLETTO, M.; ORNAGHI Jr., H. Cellulose: Fundamental Aspects and Current Trends. Ed. Books on Demand, 2015.
- [9] MELO, P. T.; OTONI, C. G.; BARUD, H. S.; AOUADA, F. A.; de MOURA, M. R. Upcycling microbial cellulose scraps into nanowhiskers with engineered performance as fillers in all-cellulose composites. ACS Applied Materials & Interfaces, 12(41), 46661-46666, 2020.

- [10] BROWN, A. J. On an acetic ferment which forms cellulose. *Journal of the Chemical Society. Transactions*, v. 49, p. 432, 1886.
- [11] AZEREDO, H. M. C.; BARUD, H., FARINAS, C. S.; VASCONCELLOS, V. M.; CLARO, A. M. Bacterial Cellulose as a Raw Material for Food and Food Packaging Applications. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v.3, p.7, 2019. doi: 10.3389/fsufs.2019.00007.
- [12] HUANG, Y., ZHU, C., YANG, J. et al. Recent advances in bacterial cellulose. *Cellulose* 21, p. 1–30, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10570-013-0088-z>>.
- [13] LIMA, L. R. et al. Nanocristais de celulose a partir de celulose bacteriana. *Química Nova* [online], v. 38, n. 9 [Acessado 16 Setembro 2021] , pp. 1140-1147, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.5935/0100-4042.20150131>>. ISSN 1678-7064.
- [14] SILVA, S.M.F., RIBEIRO, H.L., MATTOS, A.L.A. et al. Films from cashew byproducts: cashew gum and bacterial cellulose from cashew apple juice. *J Food Sci Technol* 58, 1979–1986 (2021). Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04709-7>>.
- [15] Resolução RDC nº 91, de 11 de maio de 2001. Aprova o “Regulamento técnico sobre padrões microbiológicos para alimentos”. Órgão emissor: ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Disponível em: < <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inspecao/produtos-vegetal/legislacao-1/biblioteca-de-normas-vinhos-e-bebidas/resolucao-rdc-no-91-de-11-de-maio-de-2001.pdf/view>>. Acesso em 05 de novembro de 2011.
- [16] SOUSA, L. C. F. S.; da SILVA SOUSA, J.; BORGES, M. D. G. B.; MACHADO, A. V.; da Silva, M. J. S.; FERREIRA, R. T. F. V.;SALGADO, A. B. Tecnologia de embalagens e conservação de alimentos quanto aos aspectos físico, químico e microbiológico. *Agropecuária Científica no Semiárido*, 8(1), p. 19-28 (2013).
- [17] BARÃO, M. Z. Embalagens para produtos alimentícios. Instituto de Tecnologia do Paraná–TECPAR, 2011.
- [18] JOSÉ, J. F. B. S.; OLIVEIRA, J. S.; CARVALHO, J. S. Reflexões sobre embalagens de alimentos e sustentabilidade. *Revista Ibero Americana de Ciências*

Ambientais , v.12, n.3, p.586-597, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.003.0047>

[19] AZEREDO, H.M.C. Fundamentos de estabilidade de alimentos, editora técnica. – 2 ed. rev. e ampl., Brasília, DF: Embrapa, 2012.

[20] VETTORATO, J. G., GIEHL, J. L. R., CHITOLINA, S., BETTKER, D. R., FREITAS, N. C. W. O VIDRO E A IMPORTÂNCIA DE SEU PROCESSO DE RECICLAGEM E LOGÍSTICA REVERSA. Revista GEDECON-Gestão e Desenvolvimento em Contexto, 10(1), p. 25-47, 2021.

[21] SANGRONIZ, A., ZHU, JB., TANG, X., ETXEBERRIA, A., CHEN, E. Y. X., SARDON, H.. Packaging materials with desired mechanical and barrier properties and full chemical recyclability. Nat Commun 10, 3559 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11525-x>

[22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO – ABIPLAST (2021). Estudo encomendado pelo picplast mapeia a indústria de reciclagem do plástico no brasil. Disponível em: < <http://www.abiplast.org.br/noticias/estudo-encomendado-pelo-picplast-mapeia-a-industria-de-reciclagem-do-plastico-no-brasil/> <http://www.abiplast.org.br/noticias/estudo-encomendado-pelo-picplast-mapeia-a-industria-de-reciclagem-do-plastico-no-brasil/> >. Acesso em: 06 de novembro de 2021.

[23] SOARES, N. D. F. F., DA SILVA, W. A., DOS SANTOS PIRES, A. C., CAMILLOTO, G. P., SILVA, P. S. Novos desenvolvimentos e aplicações em embalagens de alimentos. Ceres, 56(4), 2015. <http://www.ceres.ufv.br/ojs/index.php/ceres/article/view/3438>

[24] VERMEIREN, L., DEVLIEGHERE, F., DEBEVERE, J. Effectiveness of some recent antimicrobial packaging concepts. Food additives & contaminants, 19:sup1, p.163-171, 2002. doi: 10.1080/02652030110104852

[25] LOPES, F. A., SOARES, N. D. F. F., LOPES, C. D. C. P., SILVA, W. A. D. Desenvolvimento e caracterização de filmes de base celulósica incorporados com aldeído cinâmico. Brazilian Journal of Food Technology, 17, p.33-40, 2014.

- [26] LIMJAROEN, P., RYSER, E., LOCKHART, H., HARTE, B. (2003). Development of a food packaging coating material with antimicrobial properties. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 19(2), p.95-109, 2003.
- [27] HAN, J. H., FLOROS, J. D. (1997). Casting antimicrobial packaging films and measuring their physical properties and antimicrobial activity. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, 13(4), p. 287-298, 2021. <https://doi.org/10.1177/875608799701300405>
- [28] ZHU, S. N., ZHU, Y. Y., MING, N. B. Quasi-phase-matched third-harmonic generation in a quasi-periodic optical superlattice. *Science*, 278(5339), p.843-846, 1997. DOI: 10.1126/science.278.5339.843
- [29] JOERGER, R. D. Antimicrobial films for food applications: a quantitative analysis of their effectiveness. *Packaging Technology and Science: An International Journal*, 20(4), p.231-273, 2007. <https://doi.org/10.1002/pts.774>
- [30] BRAGA, L. R., Peres, L. New Trends In Packaging For Foods: A Review [novas Tendências Em Embalagens Para Alimentos: Revisão]. *Boletim Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos*. 10.5380/cep.v28i1.17899, 2010.
- [31] AMARANTE, C. V. T. D., & STEFFENS, C. A. (2009). Sachês absorvedores de etileno na pós-colheita de maçãs 'Royal Gala'. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 31, 71-77. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452009000100011>
- [32] BRODY, A.L. What's active about inteligente packaging. *Food Technology*. Chicago, v.55, n.6, p.75-78, 2002.
- [33] SARANTÓPOULOS, C. I. G. L., MORAES, B. B. Embalagens ativas e inteligentes para frutas e hortaliças. *Boletim de Tecnologia e Desenvolvimento de Embalagens*, 21(1), 2. 2009.
- [34] FONTOURA, D. R. S., CALIL, R. M., CALIL, E. M. B. A importância das embalagens para alimentos-aspectos socioeconômicos e ambientais. *Atas de Saúde Ambiental-ASA* (ISSN 2357-7614), 4(1), p. 138-160, 2016.
- [35] ROBERTSON, G.L. *Food Packaging: Principles and Practice*, Second Edition (2nd ed.). CRC Press, 2005. <https://doi.org/10.1201/9781420056150>

- [36] YAM, K.L., TAKHISTOV, P., MILTZ, J. Intelligent Packaging: Concepts and Applications. *Journal of Food Science*, 70, 5, 2005.
- [37] SIMAN FILHO, A. J., SANFELICE, R. C. Estudo bibliográfico sobre polímeros ambientalmente sustentáveis. *Revista brasileira de ciência, tecnologia e inovação*, 3(2), p. 131-148, 2018. <http://orcid.org/0000-0002-2176-7177>
- [38] Compostagem e vermicompostagem de resíduos sólidos: resultados de pesquisas acadêmicas. São Paulo: Ed. Blucher, Cap. 4, p. 108-133, 2017.
- [39] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO – ABIPLAST (2021). Transformando a Indústria do Plástico no Brasil. Disponível em: <http://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2019/03/livro_abiplast_50anos_completo_web-1.pdf>. Acesso em: 06 de novembro de 2021.
- [40] AZEVEDO, J.B. et al. Avaliação da Biodegradação em Compósitos com Fibras naturais através de perda de massa e produção de CO₂. *Revista Virtual Química*. 2016.
- [41] TOSCAN, E., VANIN, A. B., FRINHANI, E. D. M. D., MARQUEZI, S. L.. Potencial de utilização de resíduos da agricultura para a produção de embalagens biodegradáveis. *Anuário Pesquisa e Extensão Unoesc Joaçaba*, 3, e16663-e16663, 2018.
- [42] DE LIMA SILVA, M., DOS SANTOS SILVA, W. J., PEREIRA, A. K. L. S. Aproveitamento de resíduos vegetais como alternativa na fabricação de embalagens biodegradáveis. *Brazilian Journal of Development*, 6(11), p. 86238-86250, 2020. doi:10.34117/bjdv6n11-155.
- [43] FRANCO, P. C. I.; FARIA, M. L.; BILICK, A. P. Preparo e caracterização de filmes biodegradáveis reforçados com fibras de cana-de-açúcar. In: FRANCO, Paula. *Estudos Interdisciplinares nas Ciências Exatas e da Terra e Engenharias*. Ponta Grossa, PR: Atena Editora, p.1-9, 2019.
- [44] FECHINE, G. J. M. Polímeros biodegradáveis: tipos, mecanismos, normas e mercado mundial. Brasil: Editora Mackenzie, 2013.
- [45] BRITO, G. F., AGRAWAL, P., ARAÚJO, E. M., & MÉLO, T. J. A. Biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes. *Revista eletrônica de materiais e Processos*, 6(2), p. 127-139, 2011.

- [46] GOTTSCHALK, L., PIRES, M. D. S., OLIVEIRA, A., FREITAS-SILVA, O. (2021). Produção de Celulose Bacteriana e suas Aplicações. Embrapa Agroindústria de Alimentos-Documentos (INFOTECA-E).
- [47] DONINI, Í. A., DE SALVI, D. T., FUKUMOTO, F. K., LUSTRI, W. R., BARUD, H. S., MARCHETTO, R., RIBEIRO, S. J. Biossíntese e recentes avanços na produção de celulose bacteriana. *Eclética Química*, 35, p. 165-178, 2010.
- [48] ESA, F., TASIRIN, S. M., RAHMAN, N. A. Overview of Bacterial Cellulose Production and Application, *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, Volume 2, p. 113-119, ISSN 2210 7843, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2014.11.017>.
- [49] LEE K.Y., BULDUM, G., MANTALARIS, A., BISMARCK, A. More than meets the eye in bacterial cellulose: biosynthesis, bioprocessing, and applications in advanced fiber composites. *Macromol Biosci.* Jan.14(1), p.10-32, 2014. doi: 10.1002/mabi.201300298. Epub 2013 Jul 30. PMID: 23897676.
- [50] ANDRADE, F. K., PERTILE, R., DOURADO, F., GAMA, F. M. Bacterial Cellulose : Properties , Production and Applications. In: LEJEUNE, A. T. D. (Ed.). *Cellulose: Structure and Properties*. p. 427–458, 2010.
- [51] BACH, C., DAUCHY, X., SEVERIN, I., MUNOZ, J. F., ETIENNE, S., CHAGNON, M. C. Effect of temperature on the release of intentionally and non-intentionally added substances from polyethylene terephthalate (PET) bottles into water: Chemical analysis and potential toxicity. *Food Chemistry*, 139(1-4), p. 672-680, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.01.046>. PMID:23561160.
- [52] YAMADA, Y., YUKPHAN, P., VU, H.T.L., MURAMATSU, Y., OCHAIKUL, D., NAKAGAWA, Y. Subdivisão do gênero *Gluconacetobacter* Yamada, Hoshino e Ishikawa 1998: a proposta de *Komagatabacter* gen. nov., para cepas acomodadas ao grupo *Gluconacetobacter xylinus* na α -Proteobacteria . *Ann Microbiol* 62, p. 849–859, 2012. <https://doi.org/10.1007/s13213-011-0288-4>
- [53] WU, S.C., LI, M. H. Production of bacterial cellulose membranes in a modified airlift bioreactor by *Gluconacetobacter xylinus*. *J. Biosci. Bioeng.* 120, p. 444–449, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2015.02.018>.

- [54] HESTRIN, S., SCHRAMM, M. Synthesis of cellulose by *Acetobacter xylinum*. II. Preparation of freeze-dried cells capable of polymerizing glucose to cellulose. *The Biochemical journal*, 58(2), p. 345–352, 1954. <https://doi.org/10.1042/bj0580345>
- [55] HUNGUND, B., PRABHU, S., SHETTY, C., ACHARYA, S., PRABHU, V., GUPTA, S. G. Production of bacterial cellulose from *Gluconacetobacter persimmonis* GH-2 using dual and cheaper carbon sources. *J Microb Biochem Technol*, 5(2), p. 31-33, 2013.
- [56] TYAGI, N., SUMATHI SURESH, S. Production of cellulose from sugarcane molasses using *Gluconacetobacter intermedius* SNT-1: optimization & characterization, *Journal of Cleaner Production*, Volume 112, Part 1, p. 71-80, ISSN 0959- 526, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.054>.
- [57] SOUZA, E. F., FURTADO, M. R., CARVALHO, C., FREITAS-SILVA, O., GOTTSCHALK, L. Production and characterization of *Gluconacetobacter xylinus* bacterial cellulose using cashew apple juice and soybean molasses. *International journal of biological macromolecules*, 146, p. 285–289, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.180>
- [58] VOLOVA, T. G., PRUDNIKOVA, S. V., SUKOVATYI, A. G., SHISHATSKAYA, E. I. Production and properties of bacterial cellulose by the strain *Komagataeibacter xylinus* B-12068. *Applied microbiology and biotechnology*, 102(17), p. 7417–7428, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9198-8>
- [59] SILVEIRA F.C.A., PINTO, F.C.M., CALDAS NETO, S.S., Leal, M.C., CESÁRIO, J., AGUIAR, J.L.A. Treatment of tympanic membrane perforation using bacterial cellulose: a randomized controlled trial. *Braz J Otorhinolaryngol*. 2016;82: 203-8. Institution: Service of Otolaryngology, Hospital das Clínicas, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, PE, Brazil. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology* [online]. v. 82, n. 2 [Accessed 5 November 2021] , p. 203-208, 2016. Available from: <<https://doi.org/10.1016/j.bjorl.2015.03.015>>. ISSN 1808-8686.
- [60] VIEIRA, D. C. M. Produção de biofilme (membrana de biocelulose) por *Gluconacetobacter xylinus* em meio de resíduos de frutas e folhas de chá verde. Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo, 2013.

https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/9/9134/tde-19062013-185045/publico/VIEIRA_DCM_Doutorado_2013_1.pdf

[61] OKIYAMA, A., MOTOKI, M., YAMANAKA, S., Bacterial cellulose IV. Application to processed foods, *Food Hydrocolloids*, Volume 6, p. 503-511, 1993, ISSN 0268-005X. [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(09\)80074-X](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(09)80074-X).

[62] CHAU, C. F., YANG, P., YU, C. M., YEN, G. C. Investigation on the lipid and cholesterol lowering abilities of biocellulose. *Journal of agricultural and food chemistry*, 56(6), p. 2291–2295, 2008. <https://doi.org/10.1021/jf7035802>

[63] GUO, Y., ZHANG, X., WENHUI HAO, XIE, Y., CHEN, L., ZHIXI LI, Z., ZHU, B., FENG, X., Nano-bacterial cellulose/soy protein isolate complex gel as fat substitutes in ice cream model, *Carbohydrate Polymers*, Volume 198, p. 620-630, ISSN 0144-8617, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.06.078>.

[64] MORADI, M., TAJIK, H., ALMASI, H., FOROUGH, M., & EZATI, P. A novel pH-sensing indicator based on bacterial cellulose nanofibers and black carrot anthocyanins for monitoring fish freshness. *Carbohydrate polymers*, 222, 115030, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115030>

[65] PADRÃO, J., GONÇALVES, S., SILVA, J. P., SENCADAS, V., LANCEROS-MÉNDEZ, S., PINHEIRO, A. C., VICENTE, A. A., RODRIGUES, L. R., DOURADO, F. Bacterial cellulose-lactoferrin as an antimicrobial edible packaging, *Food Hydrocolloids*, Volume 58, p. 126-140, ISSN 0268-005X, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.02.019>.

[66] SILVA, S.M.F., RIBEIRO, H.L., MATTOS, A.L.A., ROSA, M.F., de AZEREDO, H.M.C. Films from cashew byproducts: cashew gum and bacterial cellulose from cashew apple juice. *J Food Sci Technol* 58, p. 1979–1986, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04709-7>

[67] VIANA, R. M., SA, N. M.S.M., BARROS, M. O., de FATIMA BORGES, M., & AZEREDO, H. M. C., Nanofibrillated bacterial cellulose and pectin edible films added with fruit purees. *Carbohydrate Polymers*, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.05.017>

- [68] HAGHIGHI, H., GULLO, M., LA CHINA, S., PFEIFER, F., SIESLER, H. W., LICCIARDELLO, F. PULVIRENTI, A. Characterization of bio-nanocomposite films based on gelatin/polyvinyl alcohol blend reinforced with bacterial cellulose nanowhiskers for food packaging applications, *Food Hydrocolloids*, Volume 113, 106454, ISSN 0268-005X, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106454>.
- [69] SARANTOPOULOS, C. I. G. L. et al. Embalagens com atmosfera modificada. Campinas: CETEA/ ITAL, p. 114, 1996.
- [70] SARANTÓPOULOS, C. I. G. L, & COFCEWICZ, L.S. Embalagens ativas para produtos perecíveis. *Bol. Tecnol. Desenvolv. Embalagens*, 28(3), p. 1-12, 2016.
- [71] BRAGA, L. R., & SILVA, F. M. Embalagens ativas: uma nova abordagem para embalagens alimentícias. *Brazilian Journal of Food Research*, Campo Mourão, 8(4), 170-186, 2017.
- [72] CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS FUNCIONAIS – CDMF (2021). Garrafa plástica aumenta prazo de validade de leite pasteurizado. Disponível em: < <http://cdmf.org.br/2015/06/15/garrafa-plastica-aumenta-prazo-de-validade-de-leite-pasteurizado/> >. Acesso em: 8 de nov. de 2021.
- [73] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGENS – ABRE (2021). Embalagens inteligentes: como elas podem beneficiar consumidores e varejistas. Disponível em: < <https://www.abre.org.br/dados-do-setor/ano2019/> >. Acesso em: 8 de nov. de 2021.
- [74] COSTA, J. F. D., GARCIA, M. C. F., APATI, G. P., BARUD, H. D. S., SCHNEIDER, A. L. D. S., PEZZIN, A. P. T. Nanocristais de celulose bacteriana: da obtenção, sob diferentes condições de hidrólise, à incorporação como reforço em poli (L-ácido láctico). *Matéria* (Rio de Janeiro), 22, 2018. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170005.0253>
- [75] LIMA, H. L. S. (2018). Filmes antioxidantes comestíveis de celulose bacteriana e hidrolisado de gelatina de pele de peixe. Embrapa Agroindústria Tropical- Tese/dissertação (ALICE). Disponível em: < <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1103386> >. Acesso em: 08 de nov. de 2021.

- [76] ALBUQUERQUE, R. M. B. D. (2019). Desenvolvimento de uma blenda biodegradável à base de celulose bacteriana (cb) e polihidroxi-butarato (phb) para aplicação como embalagem ativa para alimentos. Disponível em: <<http://tede2.unicap.br:8080/handle/tede/1112>>. Acesso em: 08 de nov. de 2021.
- [77] NASCIMENTO, E. S. D. (2018). Filmes nanocompósitos à base de celulose bacteriana e nanocristais de celulose. Disponível em: <<http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/34774>>. Acesso em: 08 de nov. de 2021.
- [78] CHAWLA, P. R., BAJAJ, I. B., SURVASE, S. A., SINGHAL, R. S. Microbial cellulose: fermentative production and applications. *Food Technology and Biotechnology*, 47(2), p.107-124, 2009.
- [79] Otoni, C.G., de Moura, M.R., Aouada, F.A., Camilloto, G.P., Cruz, R.S., Lorevice, M.V., Soares, N.d.F.F., Mattoso, L.H.C., Antimicrobial and physical-mechanical properties of pectin/papaya puree/cinnamaldehyde nanoemulsion edible composite films, *Food Hydrocolloids* (2014), doi: 10.1016/j.foodhyd.2014.04.013.
- [80] PARK, J. K.; PARK, Y. H.; JUNG, J. Y. Production of bacterial cellulose by *Gluconacetobacter hansenii* PJK isolated from rotten apple. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, v. 8, n. 2, p. 83-88, 2003.
- [81] SINGHSA, P.; NARAIN, R.; MANUSPIYA, H. Physical structure variations of bacterial cellulose produced by different *Komagataeibacter xylinus* strains and carbon sources in static and agitated conditions. *Cellulose*, v. 25, n. 3, p. 1571-1581, 2018.