

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

**PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA DO SETOR DE
EMBALAGENS POLIMÉRICAS ANTIMICROBIANAS PARA
ALIMENTOS**

CINDY MIYUKI KAWAUSHI

SÃO CARLOS -SP
2023

PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA DO SETOR DE EMBALAGENS POLIMÉRICAS ANTIMICROBIANAS PARA ALIMENTOS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Juliano Marini

São Carlos-SP
2023



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

NOME: Cindy Miyuki Kawaushi

RA: 746022

TÍTULO: Prospecção tecnológica do setor de embalagens poliméricas antimicrobianas para alimentos

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. Juliano Marini

CO-ORIENTADOR(A):

DATA/HORÁRIO: 20/03/2023, 14h

BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Juliano Marini	10,0	10,0
Prof. Dr. Francys Kley Vieira Moreira	10,0	10,0
Média	10,0	10,0

BANCA – ASSINATURAS:

Prof. Dr. Juliano Marini

Documento assinado digitalmente
gov.br JULIANO MARINI
Data: 20/03/2023 15:18:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Francys Kley Vieira Moreira

Documento assinado digitalmente
gov.br FRANCYS KLEY VIEIRA MOREIRA
Data: 20/03/2023 16:50:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer a todos que me apoiaram e contribuíram de certa forma para que pudesse realizar este trabalho de conclusão de curso.

Em especial, ao professor Dr. Juliano Marini, pela oportunidade de me orientar e por todo o suporte, conhecimento e paciência ao longo desta etapa, que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais, Gilberto e Janete, que me incentivaram a cada momento ao longo da elaboração desta dissertação e por todos os sacrifícios feitos durante toda a minha trajetória até aqui.

Aos meus amigos e colegas, especialmente do beisebol e softbol, pela amizade e apoio incondicional nestes anos de graduação.

À minha família, pelo auxílio e incentivo durante toda a minha vida.

À todo o corpo docente e funcionários do Departamento de Engenharia de Materiais, pelos ensinamentos e dedicação, que foram essenciais para minha formação.

RESUMO

Diante dos principais desafios do setor de embalagens alimentícias, como o desperdício de alimentos e o potencial risco de doenças de origem alimentar, o desenvolvimento de novas tecnologias como as embalagens ativas é impulsionado a fim de atender os requisitos da indústria e dos consumidores quanto à segurança e qualidade dos produtos. Dentre as embalagens ativas, em que o material interage com o alimento de forma desejável com o intuito de manter ou prolongar a sua qualidade e vida útil, as embalagens antimicrobianas destacam-se devido a sua capacidade de reduzir, retardar ou inibir o crescimento de microrganismos que aceleram a deterioração dos alimentos. Um grande interesse em embalagens antimicrobianas surge em razão da diversidade de materiais poliméricos utilizados, dos diferentes métodos de aplicação e da variedade de produtos que podem ser acondicionados. Desta forma, este trabalho teve como objetivo a apresentação de uma fundamentação teórica e breve revisão bibliográfica para contextualização acerca das embalagens antimicrobianas, além do mapeamento de desenvolvimento científico e tecnológico da temática. O monitoramento de patentes e artigos científicos através das bases de dados Derwent Innovations Index (DII) e Web of Science, considerando o intervalo de datas desde o ano inicial abordado por cada plataforma até 2022, permitiu abrangentes análises e projeções deste cenário, apontando o progressivo interesse ao longo dos anos neste campo em desenvolvimento, principalmente pelos países da região Ásia-Pacífico, como China e Japão. O estudo de prospecção tecnológica também indicou um crescente direcionamento das pesquisas às embalagens poliméricas de fontes renováveis e biodegradáveis, com destaque para a quitosana, celulose e o amido, demonstrando um maior compromisso com a sustentabilidade e possibilitando a identificação de futuras tendências no mercado de embalagens alimentícias antimicrobianas como, por exemplo, as embalagens comestíveis e as que apresentam revestimento polimérico interno, proporcionados principalmente pelo método *casting*.

Palavras-chave: Embalagens ativas. Antimicrobianos. Embalagens para alimentos.

ABSTRACT

The food packaging sector is currently challenged to reduce food waste and the potential risk of foodborne illnesses, which has driven the development of new packaging technologies to meet the consumers' requirements concerning product safety and quality. Among new active packaging, in which the material interacts with food in a desirable way to maintain or prolong its quality and shelf life, antimicrobial packaging stands out due to its ability to reduce, retard or inhibit the growth of microorganisms that accelerate food spoilage. A great interest in antimicrobial packaging arises because of the diversity of polymeric materials used, the different application methods and the variety of products that can be packaged. In this way, this work is aimed to present a theoretical foundation and a brief literature review about antimicrobial packaging, in addition to mapping the scientific and technological development in this theme. Monitoring through patents and scientific articles available at the Derwent Innovations Index (DII) and Web of Science databases, considering the date range from the initial year approached by each platform until 2022, allowed comprehensive analyses of main trends in antimicrobial packaging, pointing to the progressive interest over the years in this developing field, mainly in Asian-Pacific countries, such as China and Japan. The technological prospecting also indicated increasing research towards antimicrobial polymer packaging from renewable and biodegradable sources, with emphasis on chitosan, cellulose and starch demonstrating a greater commitment to sustainability and allowing the identification of future trends in the food packaging market, such as edible packaging and those with internal polymeric coating, mainly provided by the casting method.

Keywords: Active packaging. Antimicrobials. Food packaging.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esquema de embalagens ativas classificadas de acordo com a presença ou ausência migração de agentes ativos	6
Figura 2 - Possíveis mecanismos de liberação de agentes antimicrobianos em embalagens	10
Figura 3 - Sistemas de embalagens e comportamento de substâncias antimicrobianas; a) sem presença de espaço livre; b) com presença de espaço livre	11
Figura 4 - Placas de Petri com amostras de filme de PEAD revestido com TiO ₂ para análise de atividade antimicrobiana contra <i>E. coli</i> e <i>S. aureus</i>	14
Figura 5 - Microscopia obtida pelo MEV de filme de PLA (à esquerda) e PLA/nisina (à direita)	20
Figura 6 - Teste de Difusão em Ágar com filmes de PLA e PLA/nisina contra <i>L. monocytogenes</i>	20
Figura 7 - Gráfico de número de patentes relacionadas às embalagens ativas antimicrobianas para alimentos depositadas por ano	23
Figura 8 - Gráfico de número de patentes relacionadas a embalagens antimicrobianas para alimentos por país de depósito	24
Figura 9 - Gráfico dos cinco principais países com maior número de patentes depositadas por ano	25
Figura 10 - Gráfico de número de patentes depositadas por polímero	27
Figura 11 - Gráfico dos 6 principais polímeros com maior número de patentes relacionadas por ano	28
Figura 12 - Gráfico de número de artigos científicos publicados referentes às embalagens antimicrobianas por ano	30
Figura 13 - Gráfico de número de artigos científicos publicados referentes às embalagens antimicrobianas por país	31
Figura 14 - Gráfico dos 5 principais países que publicam mais artigos científicos relacionados às embalagens alimentícias antimicrobianas por ano	31
Figura 15 - Gráfico de número de artigos científicos publicados referentes às embalagens antimicrobianas por polímero	32
Figura 16 - Gráfico dos 6 principais polímeros com maior número de artigos científicos publicados por ano	33
Figura 17 - Gráfico comparativo do número de publicações relativas às embalagens antimicrobianas por ano	35
Figura 18 - Gráfico comparativo de publicações por país e suas respectivas posições no ranking mundial	36
Figura 19 - Gráfico comparativo de publicações por polímero	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação de embalagens ativas, componentes químicos e suas aplicações.	7
--	---

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 METODOLOGIA	4
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 EMBALAGENS ATIVAS.....	5
3.2 EMBALAGEM ATIVAS ANTIMICROBIANAS	8
3.3 PRINCIPAIS POLÍMEROS UTILIZADOS EM EMBALAGENS ALIMENTÍCIAS ANTIMICROBIANAS	12
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
4.1 ANÁLISE DE PATENTES	22
4.2 ANÁLISE DE ARTIGOS CIENTÍFICOS.....	29
4.3 ANÁLISE DE PATENTES E ARTIGOS CIENTÍFICOS	35
CONCLUSÃO	40
REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

O setor de embalagens abrange uma área onde a oferta e a procura estão continuamente mudando devido a um gradativo desenvolvimento do mercado internacional de alimentos e constantes adaptações aos requisitos de consumo, influenciadas por parâmetros tecnológicos, políticos, sócio culturais, ecológicos, demográficos e econômicos. A demanda do consumidor por alimentos prontos para consumo é crescente na economia de países desenvolvidos e no presente, é cada vez mais o caso de economias emergentes que estão submetidas à urbanização (COLES; MCDOWELL; KIRWAN, 2003).

Segundo a ABRE (Associação Brasileira de Embalagem), o estudo macroeconômico da indústria brasileira de embalagem conduzido pela FGV relata a previsão do valor bruto da produção física de embalagens atingir o montante de R\$110,9 bilhões em 2021, indicando um aumento de 31,1% em relação aos R\$84,6 bilhões atingidos em 2020. Dentre os diversos setores de materiais para embalagens, a indústria do plástico representa 37,1% do total, seguido do setor de papel, papel cartão e papelão ondulado, que em conjunto correspondem a 31,7%, metálicos com 21,4%, vidros com 4,2%, embalagens para indústria têxtil com 3,7% e madeira com 1,9%.

O mercado de embalagens proporciona também o aumento de empregos formais, atingindo 239.932 postos de trabalho em dezembro de 2021, superando em 3,9% o nível de empregos na indústria em relação ao ano anterior. A indústria de plástico corresponde a 54,0% do total destes postos de trabalho, seguido do setor de papelão ondulado (14,8%), papel (9,6%), metálico (8,0%), madeira (6,4%), papel cartão (4,2%) e vidro (3,1%) (ABRE, 2021).

Tradicionalmente, a importância das embalagens é atribuída às suas principais funções: contenção, proteção, comunicação e conveniência. A primeira refere-se à função de conter o produto para um deslocamento facilitado do mesmo durante o transporte e manuseio, evitando a poluição do meio ambiente e perda de produto com possíveis derramamentos ou vazamentos. A segunda funcionalidade está atrelada à proteção do conteúdo contra fatores ambientais externos como umidade, gases, odores, microrganismos, choques, vibrações e compressões que podem provocar a perda de integridade do produto ou adulterações que levam à sua deterioração.

A comunicação de embalagens transmite ao consumidor informações a respeito da identificação do produto, sua composição, informações nutricionais, instruções de uso/preparo e de armazenamento. Em relação aos distribuidores, permite a obtenção de informações para

gestão de estoque, instruções de armazenamento e de manuseamento, preço e rastreabilidade da mercadoria. A função de conveniência ou serviços é vinculada a adaptação ao estilo de vida do consumidor, seja através da facilidade de manuseio, da combinação ou do porcionamento de produtos prontos para consumo (BARÃO, 2011; COLES; MCDOWELL; KIRWAN, 2003; ROBERTSON, 2013).

Nos últimos tempos, o setor de embalagens vem presenciando mudanças em que novos processos tecnológicos foram desenvolvidos para atender as necessidades do consumidor, melhorando o acondicionamento e a proteção contra agentes externos. Segundo o estudo “Brasil Pack Trends 2020” (2012) publicado pelo ITAL (Instituto de Tecnologia de Alimentos) que realizou o mapeamento de tendências de embalagens, a macrotendência “Qualidade e Novas Tecnologias” denomina “embalagens ativas”, “embalagens inteligentes”, “nanotecnologia” e biopolímeros” como possíveis tendências para o mercado de embalagens, proporcionando alternativas de investimento e inovação.

O desenvolvimento de novas tecnologias é ditado pelas decorrentes necessidades dos consumidores e pela crescente demanda dos fabricantes que são incentivados à modernização e aprimoramento da qualidade de produtos, à distinção da concorrência, ao direcionamento do produto para um segmento de mercado diferenciado e ao posicionamento quanto às questões ambientais (WYRWA e BARSKA, 2017). Portanto, o forte investimento em pesquisa e desenvolvimento com tecnologias avançadas na indústria de embalagens, e especialmente com aplicação na indústria de alimentos, é resultante das tendências que buscam amplificar as funcionalidades das embalagens como manter a qualidade e segurança do produto e até mesmo estender a sua vida útil (HUANG, 2019).

Assegurar a segurança alimentar é fundamental para garantia da saúde humana, no entanto, inevitavelmente implica também na geração de desperdício de alimentos, o que dificulta o alcance de um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) proposto pela ONU (Organização das Nações Unidas) para 2030 que se trata da redução pela metade do desperdício alimentar global per capita no varejo e no nível do consumidor, assim como diminuir perdas ao longo das cadeias de produção e fornecimento. Em países industrializados onde 99,8% de alimentos e bebidas são comercializados em embalagens, melhorias das suas propriedades através das inovações tecnológicas, como o caso de embalagens ativas, são potenciais alternativas para o aumento da segurança alimentar e da longevidade de produtos, minimizando assim o desperdício (CAMMARELLE; VISCECCHIA; BIMBO, 2021).

Segundo Braga e Silva (2017), as embalagens ativas são embalagens planejadas que possuem agentes aditivos que interagem com o produto de forma desejável, protegendo,

preservando as propriedades sensoriais (aparência, aroma, consistência, textura e sabor) e prolongando a vida de prateleira do produto. Diante das múltiplas funcionalidades dessa categoria de embalagens, as embalagens ativas antimicrobianas atraem atenção devido à sua capacidade de redução de patógenos e controle de microrganismos que aceleram a deterioração do alimento, levando ao aumento da vida útil do produto e diminuição do risco de intoxicação alimentar (QUINTAVALLA e VICINI, 2002). A Organização Mundial da Saúde estima que doenças transmitidas por alimentos por contaminação microbiana causam cerca de 420.000 mortes por ano no mundo (BURROWS, 2022). Portanto, por meio de sistemas com incorporação de agentes antimicrobianos, as embalagens permitem a inibição do crescimento de microrganismos sem alterar o seu conteúdo durante o transporte e estocagem, estendendo a durabilidade do alimento e garantindo a saúde coletiva (FU; DUDLEY, 2021; HRNJAK-MURGIC, 2015).

Diante da relevância deste tema e do aparente interesse no tópico em escala global, este trabalho buscou realizar uma revisão bibliográfica contemplando uma contextualização acerca dos principais conceitos e técnicas desta área de conhecimento, com a finalidade de propiciar um maior embasamento teórico e auxílio na compreensão dos resultados posteriormente obtidos através do estudo de prospecção. Este estudo foi elaborado a partir do monitoramento tecnológico de patentes depositadas e artigos científicos publicados, a fim de extrair informações que indiquem a crescente tendência que as embalagens ativas antimicrobianas para alimentos propõem para a indústria e o mercado, assim como futuras perspectivas e potenciais oportunidades de desenvolvimento desses materiais.

2 METODOLOGIA

Para a obtenção de um panorama mais amplo a respeito das embalagens ativas antimicrobianas, foram selecionados e priorizados principalmente artigos publicados em periódicos científicos internacionais, capítulos de livros publicados por pesquisadores referência neste âmbito, teses e dissertações para o desenvolvimento da fundamentação teórica e revisão bibliográfica deste trabalho, sintetizando as informações consideradas relevantes para maior compreensão da temática.

Quanto ao monitoramento tecnológico acerca do tema, foi utilizado a base de dados Web of Science, uma plataforma que compreende mais de 9.000 instituições acadêmicas, corporativas e governamentais e milhões de pesquisadores viabilizando artigos de periódicos e documentos científicos em até 254 áreas temáticas. A busca por dados de patentes foi realizada especificamente através da plataforma Derwent Innovations Index (DII), uma ferramenta de pesquisa que detém mais de 80 milhões de documentos de 59 autoridades emissoras de patentes pelo mundo.

Em ambas as plataformas, foram adicionadas palavras-chave da categoria “tópico”, que realiza a busca em títulos e resumos pela plataforma Derwent Innovations Index, e em títulos, resumos, palavras-chave do autor e Keywords Plus dos documentos pelo Web of Science. As palavras-chave inseridas foram: “antimicrobial”, “food” e “packaging”, escolhidas com o propósito de alcançar mais precisamente a temática de embalagens antimicrobianas para alimentos. Quanto ao intervalo de datas, foram considerados os anos que cada ferramenta inicialmente abrange até o ano de 2022. Tanto os artigos científicos quanto as patentes foram analisadas referente ao ano de publicação, aos países de depósitos e ao material polimérico citado.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 EMBALAGENS ATIVAS

Segundo Sarantópoulos e Cofcewicz (2016, p.1) “o termo ‘embalagens ativas’ refere-se a uma série de tecnologias que permite uma interação entre o alimento e/ou ambiente, seja diretamente ou pelo espaço livre, que tem por finalidade assegurar a qualidade e a segurança durante a vida de prateleira do alimento”. Além de contribuir para a redução do uso de conservantes ou o desperdício de alimentos, as embalagens ativas permitem o controle das condições internas, a partir da emissão de substâncias benéficas ou absorção de substâncias que afetam negativamente o produto, contribuindo para a minimização de alterações bioquímicas e microbiológicas que podem levar a degradação do alimento (IFOPE, 2020; WYRWA; BARSKA, 2017).

Para que as embalagens ativas sejam projetadas, alguns fatores devem ser considerados como por exemplo, a resistência de microorganismos ou oxidação lipídica à ação do componente ativo; mecanismos de liberação controlada; natureza química e condições de armazenamento e distribuição dos alimentos; propriedades físicas e mecânicas dos materiais que constituem a embalagem; propriedades organolépticas (cor, odor, textura, sabor); potencial toxicidade dos agentes ativos e regulamentações acerca dos materiais e aditivos (BARROS-VELÁZQUEZ, 2016).

A função destas embalagens está associada às propriedades intrínsecas dos polímeros ou aditivos que são incorporados aos plásticos. Estes agentes ativos podem ser encontrados no material ou em sua superfície, em estruturas multicamadas ou em elementos associados à embalagem como sachês, rótulos e tampas de garrafas (vedantes) (PEREIRA *et al.*, 2020). No entanto, para o uso de sachês, devem ser considerados potenciais riscos como ingestão (especialmente por parte de crianças), apesar de instruções nos rótulos que advertem a não ingestão do componente, e possível vazamento do conteúdo para o alimento, alterando a qualidade do produto (AZEREDO, H.; FARIA, J.; AZEREDO, A., 2000).

As embalagens ativas podem ser classificadas em dois grandes grupos: embalagens ativas com a presença de migração, em que há a liberação gradativa de agentes voláteis e não voláteis na superfície ou ao redor do alimento e embalagens ativas que não apresentam migração, ou seja, onde não há migração intencional de componentes (Figura 1) (ARAÚJO, 2019; PEREIRA *et al.*, 2020). Desta forma, dois tipos de sistemas são associados às embalagens ativas: absorvedores e emissores. Os sistemas absorvedores modificam o ambiente

interno da embalagem ao redor do alimento, absorvendo compostos indesejáveis, tais como: oxigênio, etileno, dióxido de carbono, água e outras substâncias que aceleram a degradação do produto. Os sistemas emissores incorporam agentes ativos ao material da embalagem, e estes são liberados gradativamente ao alimento com o intuito de minimizar a deterioração do alimento. Alguns destes agentes incluem antioxidantes, antimicrobianos ou conservantes na estrutura ou superfície de materiais polímeros (BRAGA; SILVA, 2017; JAFARI; SILVA, 2022).

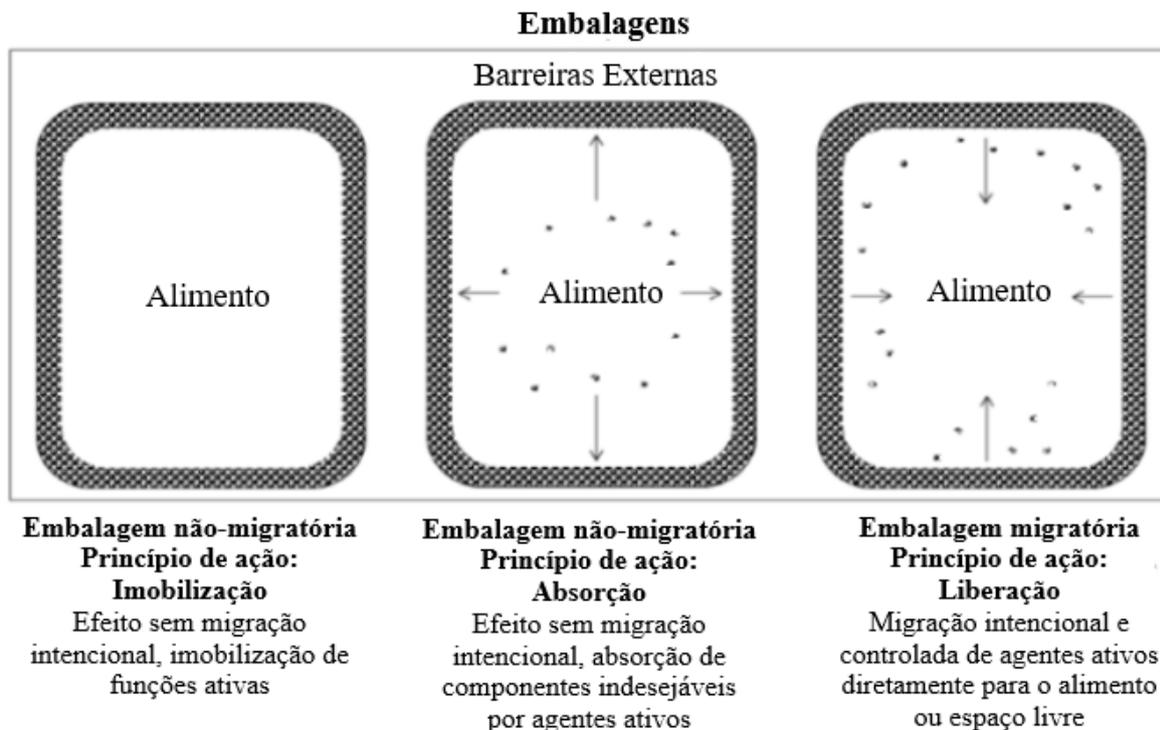


Figura 1: Esquema de embalagens ativas classificadas de acordo com a presença ou ausência de migração de agentes ativos. Adaptado de PEREIRA *et al.*, 2020.

Com base nos sistemas mencionados que podem ocorrer no interior das embalagens, à presença de gases ou efeitos indesejáveis são atreladas diversas funcionalidades para cada tipo de embalagem ativa, sendo estas: absorvedores de oxigênio; absorvedores de etileno; absorvedores de umidade; absorvedores de dióxido de carbono; sistemas antimicrobianos; sistemas antioxidantes; emissores de dióxido de carbono e emissores de etanol. A Tabela 1 apresenta as diferentes categorias de embalagens ativas com seus respectivos componentes químicos comumente utilizados e principais aplicações (BRAGA; SILVA, 2017).

Tabela 1: Relação de embalagens ativas, componentes químicos e suas aplicações. Adaptado de BRAGA e SILVA (2017).

Embalagens Ativas	Componentes Químicos	Aplicações
Absorvedor de oxigênio	Óxido de ferro Carbonato ferroso Ácido ascórbico Sorbitol	Queijos, leite, café, chás, produtos cárneos, produtos de panificação
Absorvedor de etileno	Óxido de alumínio Permanganato de potássio	Vegetais e frutas
Absorvedor de umidade	Sílica gel Poli(álcool vinílico)	Frutas, vegetais, produtos congelados e de padaria
Absorvedor de dióxido de carbono	Hidróxido de cálcio Hidróxido de potássio Carbonato ferroso	Café torrado, produtos desidratados
Sistemas Antimicrobianos	Ácido sórbico Ácido benzóico Etanol Prata, nanopartícula de prata Óleos essenciais (ex: alecrim, cravo, tomilho, orégano)	Alimentos frescos e processados, vegetais, frutas secas, arroz, feijão e produtos de padaria
Sistemas Antioxidantes	Ferro metálico Ácido ascórbico Quercetina	Frutas e vegetais
Emissor de dióxido de carbono	Ácido ascórbico Carbonato de ferro	Vegetais e frutas, peixes, carnes e aves
Emissor de etanol	Etanol	Produtos de panificação e peixe

Os absorvedores de oxigênio e de umidade compõem o maior volume em aplicação de embalagens ativas onde não há sistemas migratórios. A presença de umidade e oxigênio em embalagens alimentícias aceleram reações de degradação oxidativa e promovem a deterioração microbiológica. Ambos absorvedores eram comumente aplicados através de etiquetas e sachês inseridos no interior da embalagem. Atualmente, o enfoque encontra-se no desenvolvimento de embalagens onde o agente ativo está incluso no próprio material da embalagem, seja mono ou multicamada, ou em tampas, rolhas, vedantes e rótulos. Esta estratégia permite uma

maximização da eficiência da embalagem ativa e uma minimização de problemas decorrentes da inclusão de um agente estranho ao produto no interior da embalagem, o que pode ser mal interpretado pelos consumidores (PEREIRA *et al.*, 2020).

Ainda segundo Pereira *et al.* (2020), os absorvedores de etileno são majoritariamente utilizados para frutas frescas e vegetais, retardando o amadurecimento dos alimentos. Um grande interesse surge com a utilização destes absorvedores em relação a importação e exportação dos alimentos mencionados, o que estimula a expansão de mercados para produtos “não” sazonais e reduz custos de transporte. Em relação aos emissores de dióxido de carbono, Ozdemir e Floros (2004) afirmam que altas concentrações de CO₂ atuam positivamente no retardo de crescimento microbiano em carnes e aves e na maturação de frutas e vegetais. No entanto, dióxido de carbono formado a partir de café torrado, embalado em latas ou embalagens revestidas de alumínio, podem causar o estufamento destas embalagens, podendo ser controladas por absorvedores de CO₂.

O uso de etanol na indústria alimentícia é encontrado em sachês, onde a substância é liberada gradativamente para o interior da embalagem e possui eficiência na inibição de atividade microbiana em pães, bolos e pizzas (ARAÚJO, 2019). Os sistemas antioxidantes atuam no controle da oxidação de lipídios pelo mecanismo de sequestro de radicais livres, impedindo a continuação das reações de oxidação. Já os sistemas antimicrobianos em embalagens ativas incluem agentes antimicrobianos diretamente incorporados ao material polimérico ou imobilizados quimicamente e aplicados como revestimento, visando potencializar as funções das embalagens convencionais de forma a manter a qualidade, segurança e prolongar a vida útil do alimento (“BRASIL PACK TRENDS 2020”, 2012).

3.2 EMBALAGEM ATIVAS ANTIMICROBIANAS

Os materiais utilizados para embalagens devem ser inertes, atóxicos e apresentar boas propriedades mecânicas, além de sistemas de barreira para redução de migração de contaminantes ao alimento. Fatores como temperatura, luz solar, oxigênio, umidade e microrganismos são os principais responsáveis pela perda de qualidade dos produtos em embalagens alimentícias devido a aceleração da proliferação microbiana, seguido da degradação de componentes do próprio alimento. Apesar do reconhecimento da importância de altos padrões de higiene, doenças provocadas por alimentos ainda são problemáticas relacionadas à saúde pública. Na indústria alimentícia, tecnologias tradicionais como pasteurização, desidratação, congelamento e outros métodos têm sido utilizadas para

preservação de alimentos, estendendo sua vida útil. No entanto, a incorporação de agentes permite a conservação do produto e previne o crescimento de atividade microbiana. Desta forma, o desenvolvimento em pesquisas sobre embalagens ativas antimicrobianas ganha destaque devido a seu potencial benéfico na indústria (HRNJAK-MURGIC, 2015).

As embalagens antimicrobianas são utilizadas para preservação e aumento do tempo de prateleira dos produtos, atuando na redução, inibição ou retardação do crescimento de microrganismos que podem estar contidos no alimento embalado ou no material utilizado (ARAÚJO, 2019). Substâncias antimicrobianas presentes em embalagens podem controlar a atividade microbiana a partir da redução da velocidade de crescimento da população microbiana; retardação do crescimento por meio do aumento da fase “lag” (fase em que o número de microrganismos permanece inalterado) e inibição, por exemplo, através da inativação dos microrganismos devido ao contato direto polímero/embalagem (FERREIRA, 2012). A incorporação de agentes antimicrobianos no polímero pode afetar as propriedades físicas, mecânicas e estabilidade térmica da embalagem quando os agentes não são compatíveis com o material polimérico. No entanto, agentes antimicrobianos que apresentam compatibilidade, são impregnados facilmente na microestrutura do polímero.

Embalagens poliméricas antimicrobianas podem apresentar cinco categorias diferentes: 1) embalagens com a adição de sachês/almofadas contendo agentes antimicrobianos voláteis; 2) como revestimento ou absorção de agentes antimicrobianos nas superfícies poliméricas; 3) pela incorporação de agentes antimicrobianos no material polimérico; 4) que apresentam imobilização de agentes antimicrobianos aos polímeros através de ligações iônicas e covalentes e 5) embalagens que utilizam polímeros antimicrobianos (HRNJAK-MURGIC, 2015). A Figura 2 apresenta possíveis mecanismos de liberação de agentes antimicrobianos em embalagens ativas (ARAÚJO, 2019).

A técnica de incorporação consiste na adição de substâncias ativas diretamente na matriz polimérica, onde ocorre a liberação lenta e contínua do aditivo ao alimento. Em relação à imobilização, ligações iônicas e covalentes permitem que o agente ativo atue apenas na superfície do alimento, evitando a migração direta dos aditivos ao alimento. A técnica de revestimento consiste no contato direto com o produto, sendo os aditivos adsorvidos fisicamente ou revestidos sobre a superfície do alimento, mantendo propriedades de textura, cor e controle sobre o crescimento microbiano. Outra técnica bastante utilizada em embalagens antimicrobianas é a produção de filmes multicamadas, que permitem um maior controle da migração de agentes ativos para o alimento. Sua estrutura consiste em uma primeira camada (externa) que atua como barreira e minimiza a perda de substâncias ativas, seguida de uma

segunda camada intermediária que contém o agente ativo, e uma terceira (interna) que está em contato com o alimento e promove a liberação controlada do aditivo. Visto que muitos alimentos requerem maior proteção que um único material pode fornecer, os filmes multicamadas oferecem uma maior barreira à gases e umidade, e em muitos casos, é mais econômico incorporar uma fina camada de material para barreira ao invés de aumentar a espessura de uma monocamada. (BRAGA; SILVA, 2017; ROBERTSON, 2013).

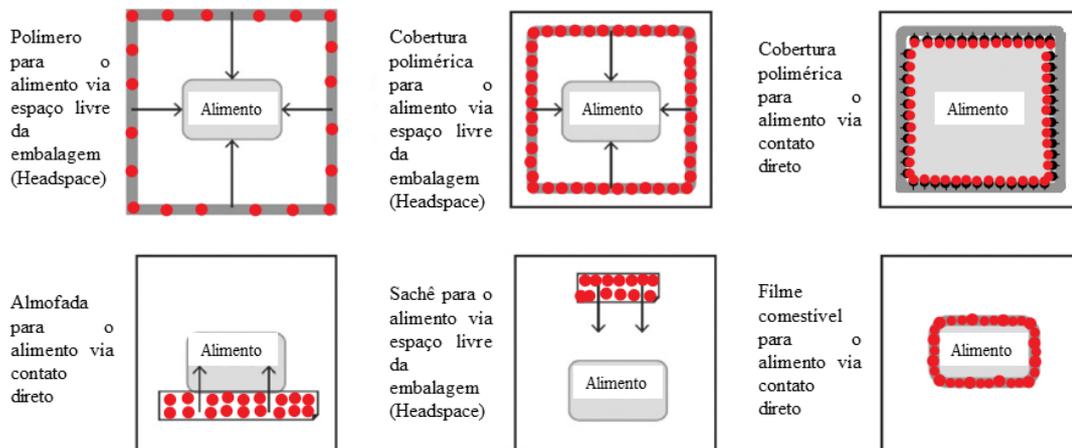


Figura 2: Possíveis mecanismos de liberação de agentes antimicrobianos em embalagens. Fonte: Adaptado de ARAÚJO (2019).

Dois sistemas de embalagens são apresentados, onde há o contato direto da embalagem com o produto (embalagem/produto) ou onde não ocorre o contato direto da embalagem com o produto, contendo o espaço-livre dentro da embalagem (headspace) (embalagem/headspace/produto). O agente ativo, que deve ser transferido para a superfície do alimento e impedir o crescimento microbiano, pode ser encontrado no próprio material da embalagem, na atmosfera interna da embalagem ou no espaço livre da embalagem (headspace). Dentre os métodos para incorporação destes agentes antimicrobianos em embalagens, pode-se citar: incorporação do agente ativo no material da embalagem durante o processo de extrusão, como no caso de filmes; incorporação em solventes para recobrimento; incorporação em materiais para recobrimento comestível e misturados em materiais como papel cartão (PIRES, 2009; QUINTAVALLA; VICINI, 2002).

Segundo Pires (2009), as embalagens ativas antimicrobianas podem ou não conter migração dos agentes antimicrobianos. Em embalagens onde há migração dos compostos ativos, este migra parcialmente ou completamente, através da difusão de uma fase para outra, da embalagem para o alimento ou pela volatilização para o espaço livre da embalagem.

Entretanto, as embalagens sem a presença de migração do agente, contém no material ou em sua superfície um composto ativo atuando como antimicrobiano quando o microrganismo alvo entra em contato com a superfície da embalagem.

O mecanismo de sistemas sem a presença do espaço livre (headspace) de embalagens, ou seja, onde há o contato direto entre embalagem e alimento, pode ser observado no esquema da Figura 3a, em que a migração pode ser realizada através da difusão. Por outro lado, um sistema não-migratório pode ser observado no mesmo desenho esquemático indicado pela imobilização química. Já no sistema com a presença de espaço livre (headspace), notam-se fenômenos como evaporação ou distribuição equilibrada do agente antimicrobiano através do espaço interno (Figura 3b) (FERREIRA, 2012; SAORIN, 2015).



Figura 3: Sistemas de embalagens e comportamento de substâncias antimicrobianas; a) sem presença de espaço livre; b) com presença de espaço livre. Fonte: SAORIN (2015)

Em embalagens antimicrobianas em que se obtém migração de agentes ativos, é visto que seu sistema migratório é contínuo, sendo desejável que o agente antimicrobiano difunda-se lentamente, permitindo concentrações do agente na superfície do produto por um longo período de tempo (HRNJAK-MURGIC, 2015). Portanto, a seleção do polímero que liberará o agente antimicrobiano é essencial pois uma lenta liberação não será efetiva quando o período da fase *lag* da atividade microbiana é curta. A seleção do componente antimicrobiano também deve levar em consideração a compatibilidade do agente com o polímero, de forma que influencia na cinética, podendo comprometer a liberação do agente. (BALASUBRAMANIAN *et al.*, 2009).

Na literatura, os agentes antimicrobianos destinados à aplicação em embalagens ativas podem ser voláteis ou não voláteis. Os componentes voláteis são liberados em forma de vapor, ou seja, ocupam o espaço livre dentro da embalagem sendo desnecessário o contato direto com o alimento. Dentre estes agentes antimicrobianos podem-se citar: dióxido de enxofre (SO₂),

dióxido de carbono (CO₂), etanol e extratos de plantas como óleos essenciais (alecrim, orégano) e isotiocianato de alila. Já os agentes antimicrobianos não voláteis mais estudados são: íons metálicos (prata), óxidos metálicos (óxido de zinco, dióxido de titânio), bacteriocinas (nisina), enzimas (lisozima), ácidos orgânicos (ácido sórbico, ácido benzóico, ácido láctico) e sais de ácidos (benzoato de sódio, benzoato de potássio, sorbato de potássio), em que a liberação ocorre por contato direto do material com o alimento (BARROS-VELÁZQUEZ, 2016; BRAGA; SILVA, 2017; FERREIRA, 2012; HRNJAK-MURGIC, 2015; ROBERTSON, 2013).

3.3 PRINCIPAIS POLÍMEROS UTILIZADOS EM EMBALAGENS ALIMENTÍCIAS ANTIMICROBIANAS

Para atender os requisitos padrão de embalagem para alimentos, os materiais poliméricos dispõem de diversas vantagens que justificam a sua ampla utilização no mercado. A aplicabilidade de proporcionar, em geral, bom desempenho mecânico, térmico e propriedades de barreira, assim como moldabilidade, permitindo maior flexibilidade de design são alguns dos benefícios que este tipo de material oferece. Além disso, a combinação das características citadas somadas a aspectos como baixo custo, inerticidade, leveza, transparência e a capacidade de impressão pela maior parte dos polímeros diferem os materiais poliméricos das outras classes de materiais, elevando sua atratividade para aplicações destinadas às embalagens alimentícias (HRNJAK-MURGIC, 2015).

Os materiais poliméricos empregados para o acondicionamento de produtos podem ser classificados em dois grupos baseados em sua origem: de fonte renovável e não renovável. O primeiro grupo é composto de polímeros naturais, provenientes de origem animal ou vegetal, como por exemplo quitosana, amido, acetato de celulose, poli(ácido láctico)(PLA), entre outros. Classificados como biopolímeros, esses materiais citados conquistam cada vez mais o interesse comercial devido às suas vantagens pois são biodegradáveis e mais sustentáveis do que polímeros convencionais. No entanto, o último grupo referente a estes polímeros derivados do petróleo, não-biodegradáveis, ainda é responsável pela parte mais significativa da indústria de embalagens para alimentos (KATIYAR, 2017; ZHONG *et al.*, 2020).

Os principais polímeros derivados de petróleo utilizados na indústria de embalagens incluem o polietileno de baixa densidade (LDPE), polietileno de alta densidade (HDPE), polietileno linear de baixa densidade (LLDPE), polipropileno (PP), poli(tereftalato de etileno)

(PET), poliestireno (PS), copolímero etileno acetato de vinila (EVA), copolímero de etileno e álcool vinílico (EVOH) e poli(cloreto de vinila) (PVC). Independentemente do tipo de material polimérico utilizado, é importante prevenir a migração de aditivos indesejáveis do polímero para o alimento, como pigmentos e plastificantes e concomitantemente, certificar-se da migração contínua do agente antimicrobiano ao produto (BARROS-VELÁZQUEZ, 2016; HRNJAK-MURGIC, 2015).

O polietileno é o termoplástico mais comumente empregado como matriz polimérica na produção de embalagens por se tratar de um material com boa resistência mecânica, química e térmica, baixo custo, alta resistência ao impacto e muito resistente à água. O tipo de polietileno mais utilizado para manufatura de embalagens ativas é o polietileno de baixa densidade (LDPE), que apresenta alta flexibilidade, transparência, estabilidade térmica e boa processabilidade, sendo normalmente encontrado na forma de filmes. O polietileno de alta densidade (HDPE) apresenta excelente resistência ao impacto, maior rigidez e por ser mais cristalino que o LDPE, sua taxa de permeabilidade ao vapor d'água é menor. As ramificações de cadeia curta presente na estrutura do polietileno linear de baixa densidade (LLDPE) permite que a sua cristalinidade seja maior que o LDPE, promovendo melhores propriedades mecânicas e temperatura de fusão mais elevadas (JAFARI; SILVA, 2022; RODRIGUES, 2018).

Em relação ao polietileno de baixa densidade (LDPE), na literatura encontram-se estudos como o de Bandpey *et al.* (2017) que investigaram a atividade antimicrobiana de filmes de PEBD revestidos com nanopartículas de prata para possível aplicação em embalagens de leite. Os filmes de LDPE foram modificados pelo tratamento corona para aumentar a natureza hidrofílica da superfície, como foi confirmado pelo ensaio de FTIR realizado, demonstrando o aumento de grupos polares (C-O e C=O) e assim, permitindo maior adesão das nanopartículas de prata. Os testes indicaram a promissora atividade contra microrganismos presentes no leite e a extensão da vida de prateleira do produto em até 13 dias.

O uso de nanopartículas metálicas mostra-se de grande interesse para o desenvolvimento de embalagens ativas antimicrobianas devido a maior estabilidade à altas temperaturas e alta relação de área de superfície por volume, permitindo a inativação de microrganismos de forma mais eficaz do que substâncias em micro ou macro escala. Dentre estes componentes metálicos, as nanopartículas de prata se destacam em razão de seu amplo espectro de efeito antimicrobiano contra patógenos de origem alimentar (BARROS-VELÁZQUEZ, 2016; HRNJAK-MURGIC, 2015).

Mulla *et al.* (2017) analisaram a atividade antimicrobiana de óleo essencial de cravo (OEC) em filmes de polietileno linear de baixa densidade (LLDPE) quimicamente modificados

para embalagem de carne de frango. Devido ao caráter apolar do polímero com baixa energia superficial, os filmes foram quimicamente tratados com ácido crômico para melhor adesão do revestimento de OEC. As propriedades mecânicas do filme de PELBD modificado com ácido crômico foram analisadas, apresentando um decréscimo da resistência à tração de 8,18 para 6,59 MPa, do alongamento na ruptura em 20% e do módulo elástico de 59 para 48 MPa devido ao que os autores cogitam um aumento de cisão de cadeias poliméricas com o tratamento superficial. O OEC não apresentou efeito significativo nas propriedades mecânicas por estar aderido à superfície dos filmes e não incorporado à matriz polimérica, no entanto, quanto às propriedades térmicas, o ensaio de DSC determinou que a temperatura de fusão dos filmes apresentou uma tendência de redução de 122 para 117°C devido ao efeito plastificante do óleo essencial. Quanto à atividade antimicrobiana, os filmes apresentaram grande eficácia contra *Salmonella Typhimurium* e *Listeria monocytogenes* em amostras de carne de frango embaladas e refrigeradas por 21 dias.

O revestimento de nanopartículas de dióxido de titânio (TiO_2) em superfície modificada de filmes de polietileno de alta densidade (HDPE) foi estudado por Saraschandra, Pavithra e Sivakumar (2013) para possível aplicação como embalagem antimicrobiana. A busca por agentes antimicrobianos eficientes e a ascensão da nanotecnologia promove maior enfoque de pesquisadores em óxidos metálicos, como o dióxido de titânio, que apresentam menor custo quando comparados à prata e ao ouro. Desta forma, o estudo analisou a atividade antimicrobiana dos filmes de HDPE revestidos com TiO_2 , em concentrações variando de 0,1% a 0,8% (p/v), observando a zona de inibição apresentada ao redor da amostra contra (a) *Escherichia coli* e (b) *Staphylococcus aureus* (Figura 4). O experimento reportou a ampliação da zona de inibição com o aumento da concentração da nanopartícula, revelando potencial para utilização em embalagens alimentícias devido a seu efeito antimicrobiano.

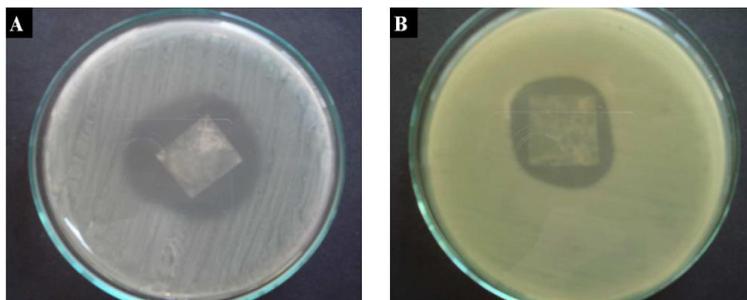


Figura 4: Placas de Petri com amostras de filme de HDPE revestido com TiO_2 para análise de atividade antimicrobiana contra *E. coli* e *S. aureus*. Fonte: SARASCHANDRA; PAVITHRA; SIVAKUMAR, 2013.

Chawengkijwanich e Hayata (2008) também investigaram o efeito antimicrobiano de nanopartículas de dióxido de titânio (TiO_2), porém, em filmes de polipropileno orientado (OPP)

e as habilidades de inativação de *Escherichia coli* em alface fresca. O resultado do estudo demonstrou que o número de células da bactéria *E. coli* obtidas da alface cortada e embalada em filmes de OPP revestidos com TiO₂ reduziu significativamente, em comparação a filmes não revestidos. Nanopartículas de dióxido de titânio são promissores agentes antimicrobianos devido a sua eficácia contra diversos patógenos e sua atividade antimicrobiana ocorre via fotocatalise, sendo necessária sua ativação com a presença de luz UV, como realizado no estudo.

A utilização de poli(tereftalato de etileno)(PET) com possível aplicação para embalagem ativa antimicrobiana foi investigada por Jin, Guo e Yang (2014). Sorbato de potássio e benzoato de sódio revestindo internamente garrafas PET para envase de suco de romã permitiram a vida útil de até 56 dias, em comparação à menos de uma semana em garrafas PET convencionais. Apesar de conservantes serem comumente adicionados diretamente em sucos antes do envasamento, estudos anteriores (JIN; ZHANG; BOYD, 2010) demonstraram que a aplicação de filmes ou revestimentos antimicrobianos que permitem a migração de agentes, promove um efeito antimicrobiano contínuo e maior eficácia do que a incorporação direta destes no produto. A adição direta de sorbato de potássio e benzoato de sódio à geléia de morango apresentou menor eficácia contra *E. coli*, em relação a filmes de PLA tratados com sorbato de potássio e benzoato de sódio. Adicionar agentes antimicrobianos diretamente na formulação normalmente requer altas concentrações do mesmo para a inibição de patógenos, e através do uso de filmes ou revestimentos, há uma migração mais controlada dos agentes, permitindo sua eficácia durante o transporte e armazenamento do produto.

O poli(cloreto de vinila) (PVC) também foi encontrado na literatura como matriz polimérica com revestimento de nanopartículas de prata para estudo da sua atividade antimicrobiana em bandejas de carne moída (MAHDI; VADOOD; NOURDAHR, 2012). As bandejas de PVC revestidas com 5% de nanopartículas de prata, com tamanho de partícula de 40-50 nm, depositadas pelo método de impressão a jato, permitiram o aumento da vida de prateleira dessa mercadoria perecível de 2 dias, em embalagens tradicionais, para até 7 dias.

A incorporação de agentes antimicrobianos em matrizes poliméricas vem sendo utilizada para controle da contaminação por microrganismos através da difusão do agente à embalagem de forma controlada. No entanto, a incorporação destes apresenta impasses como a dificuldade de liberação do agente de forma desejada para manter a atividade antimicrobiana, assim como possíveis mudanças nas propriedades funcionais dos filmes poliméricos com a adição dos agentes. Além disso, a incorporação de alguns agentes antimicrobianos como enzimas e peptídeos é dificultada devido a incompatibilidade com os processos típicos de

manufatura de filmes (por exemplo, em relação às solicitações termomecânicas ou miscibilidade com solvente). Desta forma, o mecanismo de imobilização de agentes antimicrobianos nos polímeros por meio de ligações covalentes aponta vantagens funcionais e regulamentares pelo fato dos agentes ativos não migrarem para o alimento e nem serem consumidos (MURIEL-GALET *et al.*, 2013).

Muriel-Galet *et al.* (2013) propuseram o desenvolvimento de filmes antimicrobianos com mecanismo de imobilização de lisozima em filmes de copolímero de etileno e álcool vinílico (EVOH) através de ligações covalentes para aplicação em embalagens alimentícias antimicrobianas. A lisozima é uma enzima antimicrobiana amplamente estudada para aplicações em embalagens por tratar-se de um agente antimicrobiano natural que obtém a classificação GRAS (Geralmente reconhecido como seguro) pela Food and Drug Administration (FDA) e é um aditivo para alimentos reconhecido pela Comissão Européia. A superfície do EVOH foi modificada com radiação UV para gerar grupos de ácido carboxílico e a lisozima ligou-se por meio de ligações covalentes ao polímero funcionalizado superficialmente. O estudo indicou a redução do crescimento de bactérias Gram-positivas sem a migração de lisozima do filme. A presença de grupos hidroxila na estrutura molecular do copolímero garante o seu caráter hidrofílico, levando a maior absorção de umidade e consequentemente afetando propriedades de barreira a gases. No entanto, a tecnologia de multicamadas permite que camadas de resinas com alta barreira à umidade, como as poliolefinas, envoltas à camada de EVOH auxiliem na barreira contra vapor d'água (ROBERTSON, 2013).

Filme monocamada de poliamida 6 biaxialmente orientado (BOPA6) contendo ácido láctico para uso em embalagem antimicrobiana de cortes de carne foi desenvolvido por Smulders *et al.* (2013). Para produtos como carnes, os filmes de poliamida proporcionam boas características de barreira a gases e aromas, além de boas propriedades mecânicas, térmicas, químicas e resistência à gordura. A sua propriedade higroscópica permite que agentes antimicrobianos solúveis em água sejam incorporados facilmente à matriz polimérica. O filme de BOPA6 de 15 µm de espessura foi extrudado através de uma matriz plana e imerso por duas horas em 80% (p/p) de ácido láctico. A partir do estudo, foi sugerido que o filme de poliamida com ácido orgânico contribui significativamente na redução de microrganismos em superfícies de cortes de carne embaladas à vácuo. No entanto, devido à má selabilidade de poliamidas, os filmes desenvolvidos são restritos às aplicações como envoltório primário que necessitam ser embalados em materiais seláveis como o polietileno, ou como revestimento interno fixado a um filme suporte de polietileno.

Na literatura, agentes antimicrobianos como benzoato de sódio, sorbato de potássio e nitrito de sódio incorporados em matriz polimérica de poliestireno (PS) foram analisados para potencial aplicação em embalagens antimicrobianas para alimentos. Todos estes agentes estão contidos na lista de aditivos usados como conservantes em alimentos, sendo o benzoato de sódio, o mais comumente utilizado em produtos ácidos como bebidas carbonatadas. O sorbato de potássio é destinado à inibição de mofo e leveduras em alimentos como queijos, produtos de panificação, frutas e legumes. Já o nitrito de sódio é aplicado para melhorar a coloração e estender a vida de prateleira de carnes processadas. Com concentração de 15% de agentes incorporados à matriz de PS e injetados em moldes de placas com dimensões 60mm x 30mm x 2mm, Vartiainen *et al.* (2003) determinaram a atividade antimicrobiana do nitrito de sódio em placas de PS contra *B. subtilis* e *A. niger*. Em relação ao benzoato de sódio e ao sorbato de potássio, demonstrou-se a inibição de crescimento do *B. subtilis* apenas.

Filmes de copolímero etileno acetato de vinila (EVA) revestido com uma solução carreadora à base de celulose contendo nisina para inibição de *Listeria monocytogenes* foram estudados por Neetoo, Ye e Chen (2007). O recobrimento do EVA com a bacteriocina demonstrou estabilidade da atividade antimicrobiana contra o patógeno durante seu armazenamento em temperatura ambiente e à 4°C por 12 semanas, indicando boa aplicabilidade para acondicionamento e conservação de alimentos a longo prazo.

À vista que materiais poliméricos derivados de petróleo representam uma extensa gama de aplicabilidade em embalagens alimentícias antimicrobianas, a gradativa demanda por essas embalagens, o seu descarte como resíduos após uso e a taxa de degradação implicam em consequências desfavoráveis para o âmbito econômico, ambiental e da saúde. Segundo Katiyar (2017), a disponibilidade de recursos fósseis ameaçada assim como os altos preços dos mesmos, a escassez de matérias primas, o aumento de custos do processo produtivo de embalagens, problemas ambientais relacionados à poluição e emissão de gases poluentes, e até mesmo o impacto imprevisível de componentes presentes no polímero à saúde de futuras gerações são fatores que despertam a incerteza no setor de embalagens convencionais e impulsionam o potencial ramo de embalagens de base biológica e biodegradável para alimentos.

Pesquisas para desenvolvimento de novas embalagens a partir destes tipos de polímeros estão em ascensão, com o intuito de satisfazer os requisitos de embalagem para garantir a segurança e qualidade do produto e concomitantemente, adotar uma abordagem mais sustentável visando a biodegradabilidade e a redução de pegada de carbono. A respeito de suas vantagens, a obtenção de embalagens de base biológica promove a redução das emissões de

carbono em 30-70%, quando comparados às de base petroquímica. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), método de avaliação e quantificação de impactos adversos no meio ambiente e na saúde ao longo do ciclo de vida de um produto, no caso dessa classe de materiais, é declarada eficaz e segura durante todo o sistema, salientando o crescente interesse nestes novos materiais, principalmente por parte de indústrias de embalagens (KATIYAR, 2017).

Moshood *et al.* (2022) apontam uma maior conscientização pelos consumidores dos danos ambientais nocivos provocados pelos plásticos convencionais, assim como maiores esforços de órgãos políticos e reguladores da América do Norte e Europa em promover programas de pesquisa referentes aos plásticos de base biológica. Programas de financiamento como *Framework Programmes* criados pela União Européia e iniciativas do Departamento de Energia (DoE) e do Departamento de Agricultura (USDA) nos Estados Unidos são medidas de política pública adotadas por esses governos com o intuito de estimular a pesquisa, o desenvolvimento e inovação em matérias-primas renováveis e biopolímeros por meio de financiamentos e incentivos concedidos para incitar avanços em rotas alternativas ao petróleo (BASTOS, 2007). Shaw (2022) também ressalta maiores responsabilidades por parte de produtores de polímeros no investimento em tecnologia sob a pressão de regulamentações governamentais mais severas e de consumidores que demandam alternativas ecologicamente corretas.

Desta forma, dentre os biopolímeros mais utilizados para aplicações em embalagens ativas encontra-se a quitosana. Um polissacarídeo obtido através do processo de desacetilação da quitina, o segundo mais abundante polissacarídeo encontrado depois da celulose, a quitosana é reconhecida por sua biocompatibilidade, biodegradabilidade, excelente capacidade em formação de filmes, além de propriedades antibacterianas e antifúngicas. Zhang *et al.* (2017) reportaram o potencial antimicrobiano de filmes de quitosana com a incorporação de nanopartículas de dióxido de titânio (TiO₂) para embalagem de uvas vermelhas. A adição de TiO₂ proporcionou o aumento em 89,64% na resistência à tração e 69,21% quanto ao alongamento na ruptura em relação à filmes de quitosana sem a presença deste componente. A respeito da atividade antimicrobiana contra patógenos: *E. coli* (bactéria gram-negativa), *S. aureus* (bactéria gram-positiva), *C. albicans* (fungos) e *A. niger* (bolor), foi demonstrado a completa esterilização dos testes após 12 horas de tratamento, apontando a sua eficácia. Além disso, o estudo mencionou o aumento do tempo de vida útil de uvas vermelhas quando embaladas em filmes de quitosana sem e com o agente antimicrobiano, resultando na duração em até 15 e 22 dias, respectivamente.

Mallick *et al.* (2020) estudaram a ação antimicrobiana de filmes a base de amido sob o efeito da inserção de diferentes óleos essenciais (cravo, manjeriço e canela) para estender a vida de prateleira de alimentos. Filmes a base de amido são considerados materiais de bom custo-benefício, além de serem ambientalmente amigáveis devido a sua natureza biodegradável. Para amplificar o efeito antimicrobiano desses materiais, óleos essenciais foram incorporados a fim de retardar o crescimento de patógenos como *Staphylococcus aureus*, *Bacillus cereus* e *Escherichia coli*. Os resultados do estudo indicaram maior ação inibitória dos óleos essenciais de canela e manjeriço contra *S. aureus*, e do óleo de cravo contra *E. coli*. Assume-se que o óleo essencial interage com a parede celular e posteriormente com a membrana citoplasmática, inibindo a síntese de DNA e resultando na morte da bactéria.

Como mencionado anteriormente, a celulose é o biopolímero mais abundante apresentando vantagens como estabilidade química, baixa permeabilidade ao oxigênio e baixo custo. Um estudo realizado por Saedi *et al.* (2021) sugere a potencial aplicação de filmes semi-transparentes de celulose regenerada com nanopartículas de óxido de zinco (ZnONP) para embalagem de carnes. O interesse em filmes de celulose regenerada parte da boa barreira a gases, transparência, flexibilidade e propriedades mecânicas. Já em nanopartículas de óxido de zinco, suas características antimicrobianas, segurança e maior biocompatibilidade do que nanopartículas de prata atraem pesquisas para a dada aplicação. Tal potencial foi confirmado com o aumento da estabilidade térmica e propriedades de barreira à luz UV com a adição de ZnONP, assim como a inibição da atividade microbiana de bactérias gram-positiva e gram-negativa.

Um polímero biodegradável alternativo que ganha destaque para aplicações em embalagens alimentícias é o Poli(ácido láctico)(PLA). Derivado de recursos renováveis como milho, serragem de madeira e outras biomassas, o PLA obtém a certificação GRAS, é biodegradável e apresenta propriedades mecânicas adequadas para tal aplicação. Jin e Zhang (2008) realizaram um experimento de análise do efeito antimicrobiano de filmes de PLA incorporados com nisina para aplicações como recobrimento em garrafas de alimentos líquidos (suco de laranja e clara de ovo) ou recobrimento de filmes para embalagens de alimentos sólidos. Um ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi executado para avaliar a distribuição da bacteriocina na superfície de PLA. As micrografias da Figura 5 demonstraram uma superfície mais lisa dos filmes de PLA e um efeito marmorizado uniformemente distribuído com tamanho de partícula de 5 a 50 μm nos filmes de PLA/nisina.

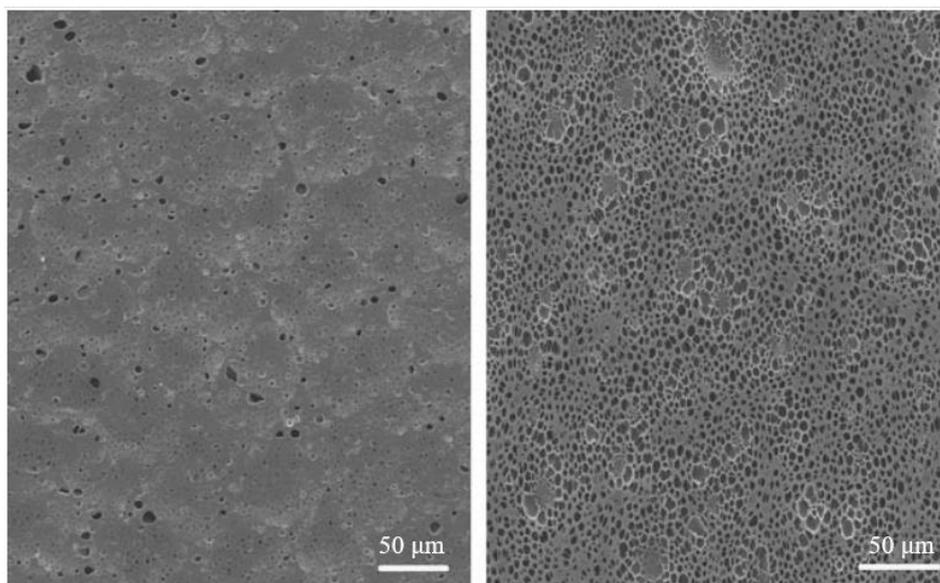


Figura 5: Microscopia obtida pelo MEV de filme de PLA (à esquerda) e PLA/nisina (à direita). Fonte: Adaptado de JIN e ZHANG (2008).

O desempenho da atividade antimicrobiana do filme de PLA/nisina pôde ser observada através do teste de difusão em ágar dos filmes contra a bactéria *L. monocytogenes*. A zona de inibição presente ao redor da amostra de PLA/nisina (área A) indica a liberação de moléculas de nisina a partir do polímero e a difusão para o meio sólido, diferentemente da amostra B de filme de PLA (Figura 6). O estudo concluiu que os filmes se mostraram eficazes contra patógenos: *L. monocytogenes*, *E. coli O157:H7* e *S. Enteritidis*, indicando potencial utilização em embalagens para alimentos.

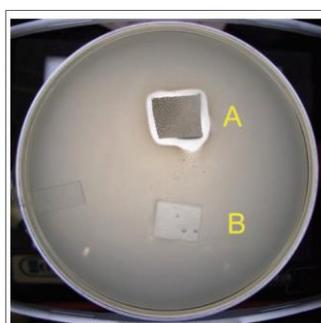


Figura 6: Teste de Difusão em Ágar com filmes de PLA e PLA/nisina contra *L. monocytogenes*. Fonte: JIN e ZHANG (2008).

Por mais que os biopolímeros exibem atributos atrativos como materiais para embalagens alimentícias e principalmente pelo fato de serem ambientalmente amigáveis, suas aplicações industriais são limitadas devido ao alto custo de produção e propriamente de suas propriedades funcionais comparadas à variedade dos polímeros a base de petróleo. Fatores

como barreira à oxigênio/vapor d'água, resistência térmica e outras propriedades mecânicas, por exemplo, restringem a aplicabilidade de alguns desses polímeros de base biológica, refreando o seu avanço em maiores magnitudes. Desta maneira, os polímeros petroquímicos configuram majoritariamente o mercado de embalagens destinadas à alimentos (ZHONG *et al.*, 2020).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Diante do conjunto de informações tecnológicas compilado proveniente da literatura com o intuito de propiciar maior contextualização acerca do tema de embalagens ativas antimicrobianas, a breve revisão bibliográfica desta ampla área de conhecimento instigou à realização de um estudo de prospecção a partir do monitoramento de patentes depositadas e artigos científicos publicados. Para a análise de cada um destes modelos, avaliaram-se parâmetros como o ano de publicação, países que demonstram maior interesse pela temática e principais materiais poliméricos empregados, a fim de ratificar a relevância e mapear a crescente tendência que estes tipos de embalagens propõem ao âmbito acadêmico e mercadológico.

4.1 ANÁLISE DE PATENTES

De acordo com a pesquisa de documentos de patentes realizada em 20/12/2022 e as palavras-chave (“*packaging*”, “*food*” e “*antimicrobial*”) inseridas, a plataforma indicou a presença de 1.476 documentos. Na análise de número de patentes por ano, através da Figura 7, pode-se observar uma tendência crescente de número de patentes relacionadas às embalagens ativas antimicrobianas para alimentos depositadas anualmente em um intervalo de 1975 até 2022. A partir do gráfico, duas transições podem ser observadas com o crescimento mais significativo do número de patentes a partir dos anos de 1995 e 2010. Segundo Borschiver *et al.* (2005), a evolução da nanotecnologia principalmente aplicada ao setor de materiais poliméricos indicou um aumento mais expressivo no número de patentes relacionadas aos materiais nanoestruturados a partir de 1996, o que pode sugerir tal incremento.

Outro possível aspecto que sugere o maior engajamento no estudo desta área são os biopolímeros. Apesar das inovações tecnológicas em biopolímeros começarem a se concretizar comercialmente a partir da década de 1990, a competitiva e dominante indústria petroquímica consolidava-se fortemente no mercado, limitando o seu maior desenvolvimento. No entanto, a retomada desta tecnologia obteve maior êxito com a possibilidade de esgotamento do petróleo, a elevação do seu preço e com a maior preocupação às questões ambientais na última década, o que impulsionou a busca por alternativas aos polímeros petroquímicos (BASTOS, 2007).

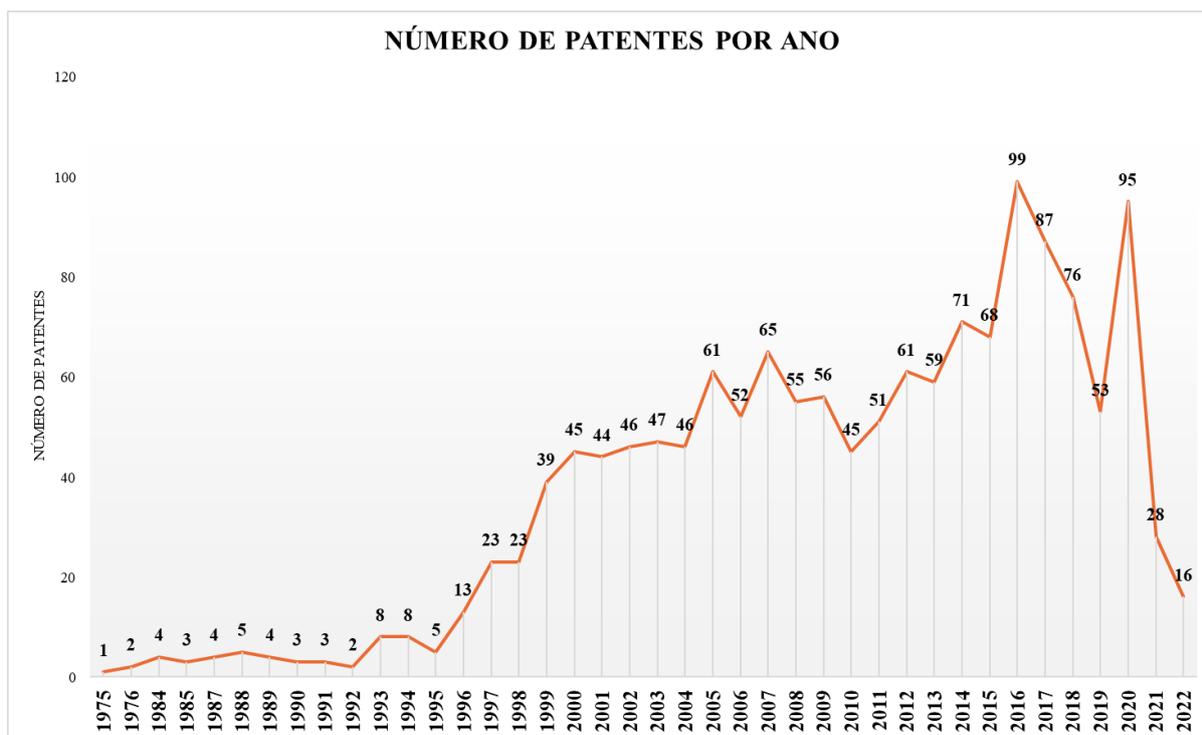


Figura 7: Gráfico do número de patentes relacionadas às embalagens ativas antimicrobianas para alimentos depositadas por ano. Fonte: Autoria própria.

A relevância desses dados está atrelada à uma sugestão de interesse nessa nova área de embalagens plásticas. Casanova (2019) alega a importância de patentes como indicadores para medir o progresso tecnológico de países. O acesso à informações sobre as patentes permite um monitoramento de inovações tecnológicas, auxilia no conhecimento do potencial de países em relação a pedidos de registro e concessões, assim como tendências, mercados priorizados e entidades pioneiras na área. Além disso, os indicadores de melhorias a serem realizadas, o fortalecimento de políticas públicas e geração de incentivos e apoios que promovam o desenvolvimento de tecnologias e ecossistemas de inovação podem ser obtidas através da análise de relatórios que coletam dados estatísticos disponíveis.

Visto que os números de patentes destinadas ao estudo de embalagens ativas antimicrobianas possivelmente apontam prospecções de mercado, o relatório “Antimicrobial Packaging Market” publicado pela organização de consultoria e pesquisa de mercado *Precedence Research* corrobora para validação do interesse tecnológico nessa área. O estudo declara que o mercado global de embalagens antimicrobianas contabilizou 9,6 bilhões de dólares em 2021 e é estimado atingir o valor de 19,7 bilhões de dólares até 2030, com CAGR (taxa de crescimento anual composto) de 8,31%. No ano de 2021, o setor de alimentos e bebidas correspondeu a majoritária fração de 47% do volume geral do mercado de embalagens antimicrobianas e é esperado o aumento de 5,6% desta categoria. Outro dado reportado é o

destaque da Ásia como maior mercado regional em relação à demanda mundial, correspondente a 35% neste mesmo ano. Um aumento de 6,7% é esperado destes países, resultado de mudanças na preferência de consumidores por refeições prontas condizentes com o estilo de vida acelerado destas nações. Já a América do Norte corresponde a 28,6% deste mercado (PRECEDENCE RESEARCH, 2022).

Apesar de países como China, Japão e Índia comporem significativa parte deste mercado de embalagens antimicrobianas, as principais companhias deste ramo apresentam em sua maioria origem norte-americana e europeia: The Dow Chemical Company (Estados Unidos), BASF SE (Alemanha), Mondi Plc (África do Sul), PolyOne Corporation (Estados Unidos), Biocote Limited (Reino Unido), Dunmore Corporation (Estados Unidos), Linpac Senior Holdings (Reino Unido), Microban International (Estados Unidos), Oplon Pure Sciences Ltd. (Israel) e Takex Labo Co. Ltd. (Japão) (VERIFIED MARKET RESEARCH, 2022).

Os dados obtidos pela plataforma Derwent Innovations Index (DII) a respeito do número de patentes publicadas por país de depósito designa os Estados Unidos como maior país detentor de patentes relacionadas ao tópico, com 611 resultados. A Figura 8 apresenta os países ranqueados de acordo com o número de patentes depositadas.

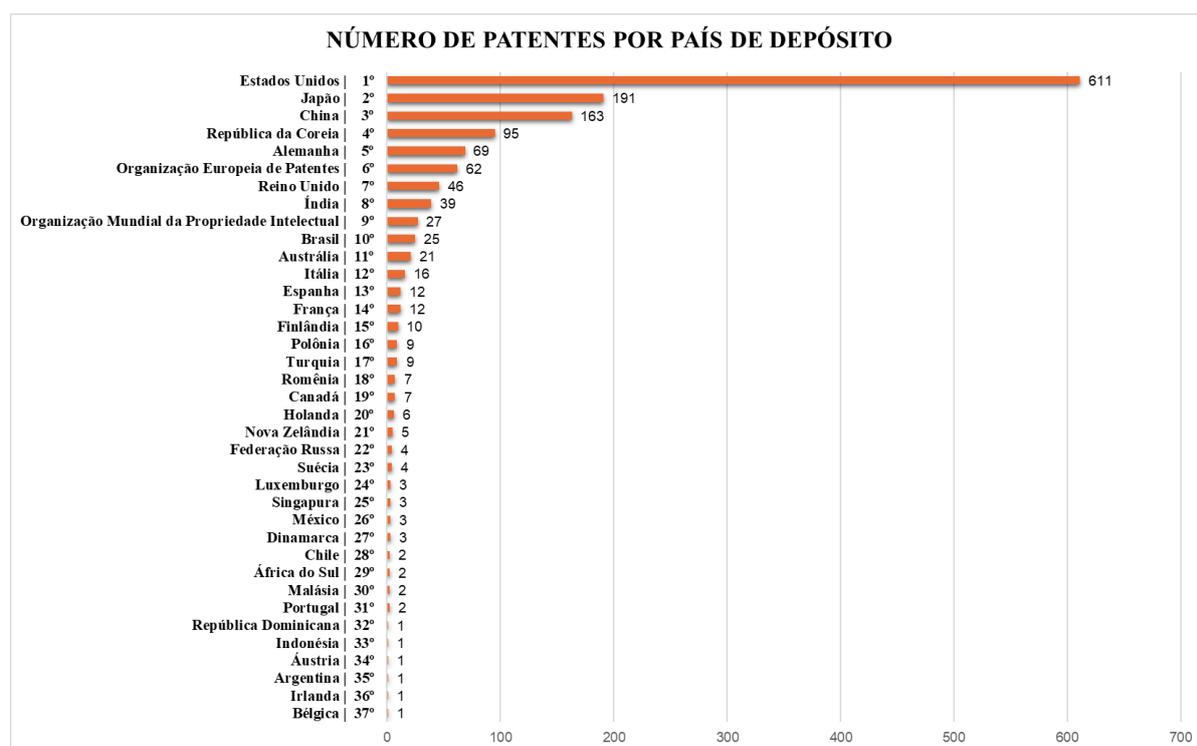


Figura 8: Gráfico de número de patentes relacionadas a embalagens antimicrobianas para alimentos por país de depósito. Fonte: Autoria própria.

A expressiva disparidade na quantidade de documentos depositados pelos Estados Unidos que se classifica em 1º lugar pôde ser observada em relação à segunda posição ocupada pelo Japão, com 191 resultados. O terceiro lugar foi ocupado pela China, com 163 patentes, seguido da Coreia do Sul com 95 e Alemanha em 5º lugar com 69 documentos. O Brasil ocupou a 10º posição no ranking mundial com 25 patentes encontradas, sendo a maioria proveniente de instituições públicas como: Universidade Federal de Viçosa (UFV), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (Unesp), Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), e outros.

Uma análise mais detalhista do acervo de patentes em relação aos cinco principais países depositantes ao longo dos anos pode ser realizada. A Figura 9 exhibe uma comparação quanto ao número de patentes depositadas pelos Estados Unidos, Japão, China, República da Coreia e Alemanha a cada ano, dentro do intervalo de 1975 a 2021.

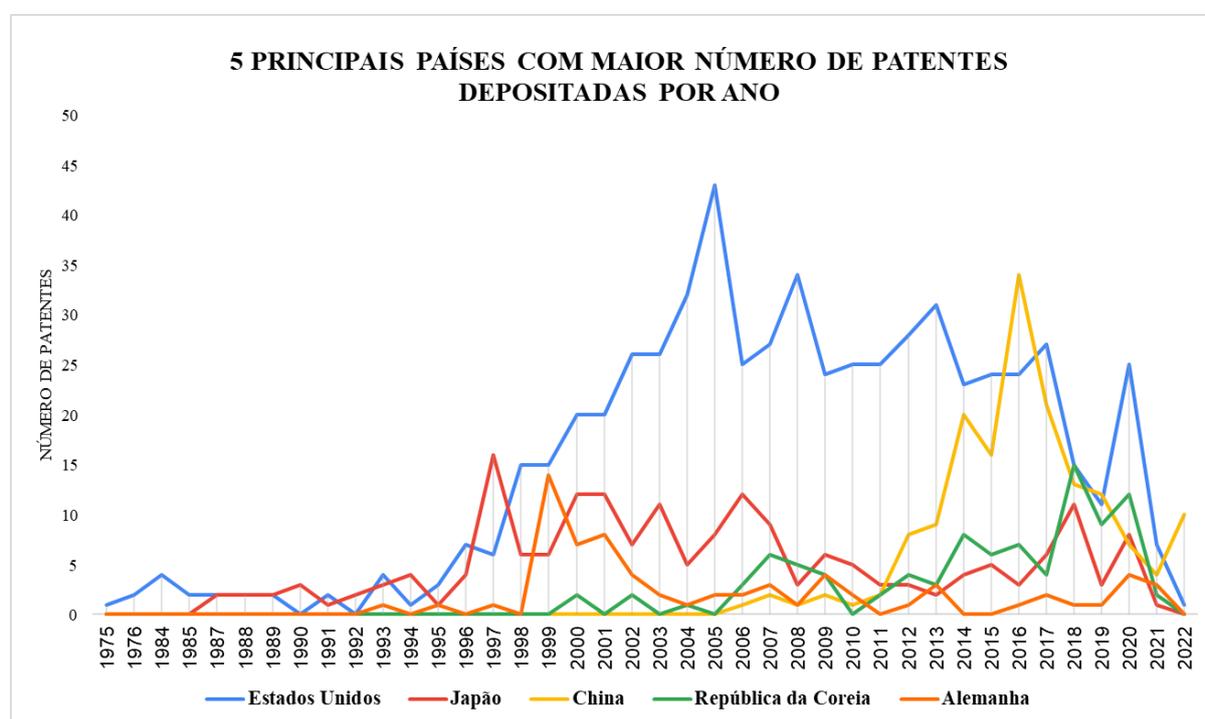


Figura 9: Gráfico dos cinco principais países com maior número de patentes depositadas por ano. Fonte: Autoria própria.

A partir do gráfico acima, pode-se inferir um predominante interesse dos Estados Unidos em embalagens antimicrobianas destinadas a aplicações alimentícias. Além de dispor das principais companhias fabricantes de embalagens antimicrobianas como citado anteriormente, o país manteve-se comprometido à pesquisa e desenvolvimento desta nova tecnologia desde 1975, sendo o primeiro país a conceder patentes relacionadas ao tema, e ao

decorrer dos anos, liderou em número de publicações de patentes em sua maioria. A concorrência somente se estabeleceu com o depósito de patentes do Japão, em 1987. O interesse do Japão nesta inovação pode ser justificado pelas limitações existentes no âmbito da agricultura e na produção de alimentos, levando à busca de alternativas para conservação dos mesmos. Porém, os dados mostram que a nação norte-americana regularmente superou a quantidade de depósitos em relação à nação nipônica, com significativas desigualdades. Em 2005, por exemplo, os Estados Unidos depositaram 43 patentes relacionadas às embalagens antimicrobianas, enquanto o Japão foi responsável por apenas 8 delas. Apesar de países como o Japão e a Coreia do Sul não atingirem o nível de depósitos dos Estados Unidos, o interesse em embalagens antimicrobianas mostra-se plausível diante destes países apresentarem grandes mercados consumidores.

O surgimento de patentes depositadas pela China a respeito de embalagens antimicrobianas surgiu apenas a partir de 2006. O atraso em relação a outros países pode estar relacionado à primeira Lei de Patentes da República Popular da China ser somente promulgada em 1984, diferentemente dos Estados Unidos (1790), Japão (1885), Coreia do Sul (1908) e Alemanha (1877) (DI BLASI e FRANCO, 2022). No entanto, a vertiginosa ascensão da China, possivelmente resultado de subsídios governamentais de incentivo, possibilitou que em 2016, o número de patentes da China (34) superasse o dos Estados Unidos (24). Por mais que os Estados Unidos liderem este cenário voltado para embalagens antimicrobianas no geral, a China liderou o número de patentes depositadas mundialmente com 1,58 milhões de pedidos de um total de 3,4 milhões em 2021, mostrando-se um forte concorrente. Um aumento em 5,9% em relação à 2020 permitiu que o país correspondesse a 46,6% do total de publicações mundiais. Já a nação norte-americana ficou em segundo lugar com 591.473 depósitos, à frente do Japão (289.200), da República da Coreia (237.998) e da Alemanha em sétimo lugar (58.569) (WIPO, 2022).

Visto que uma das principais finalidades das embalagens antimicrobianas para alimentos consiste na diminuição da taxa de desperdício de alimentos, a possibilidade de interesse nessa tendência por parte de países como os EUA, Japão, China e Alemanha mostra-se fundamentada, uma vez que estes ganham visibilidade quanto ao total de alimentos desperdiçados em toneladas por ano e à estimativa de desperdício per capita em quilogramas. Segundo o relatório “Índice de Desperdício de Alimentos 2021” publicado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), a China é responsável por 91,6 milhões de toneladas de alimentos desperdiçados, com uma estimativa per capita de 64 kg e os Estados Unidos desperdiçaram mais de 19 milhões de toneladas, sendo o desperdício per capita de 59

kg. O valor anual do Japão é de 8,1 milhões de toneladas, porém seu desperdício per capita iguala-se ao da China, com 64 kg. Por sua vez, a Alemanha apresenta cerca de 6,3 milhões de toneladas de alimentos desperdiçados com uma alta estimativa per capita de 75 kg. Já a Coreia do Sul possui o menor valor numérico de desperdício entre estes cinco países (aproximadamente 3,7 milhões de toneladas), com per capita de 71 kg (UNEP, 2021).

A partir do monitoramento tecnológico de patentes depositadas, outra informação relevante que pôde ser extraída foi a natureza do material polimérico utilizado. O refinamento na busca de patentes com a inserção de palavras-chave correspondente aos principais polímeros utilizados na indústria de embalagens atualmente indicou uma maior predileção ao polietileno, citado em 117 patentes. A Figura 10 exhibe também quantitativamente os resultados obtidos pela busca para diversos polímeros como a quitosana (74), celulose (69), polipropileno (57), amido (48), PLA (26), PVC (23), PET (20), poliestireno (19), poliamida (18), EVA (15) e EVOH (9). Vale ressaltar que o critério de seleção dos polímeros para a pesquisa baseou-se nos artigos citados na fundamentação teórica e a resposta obtida pela base de dados considerou apenas palavras-chave que estavam contidas no campo “Tópico”.

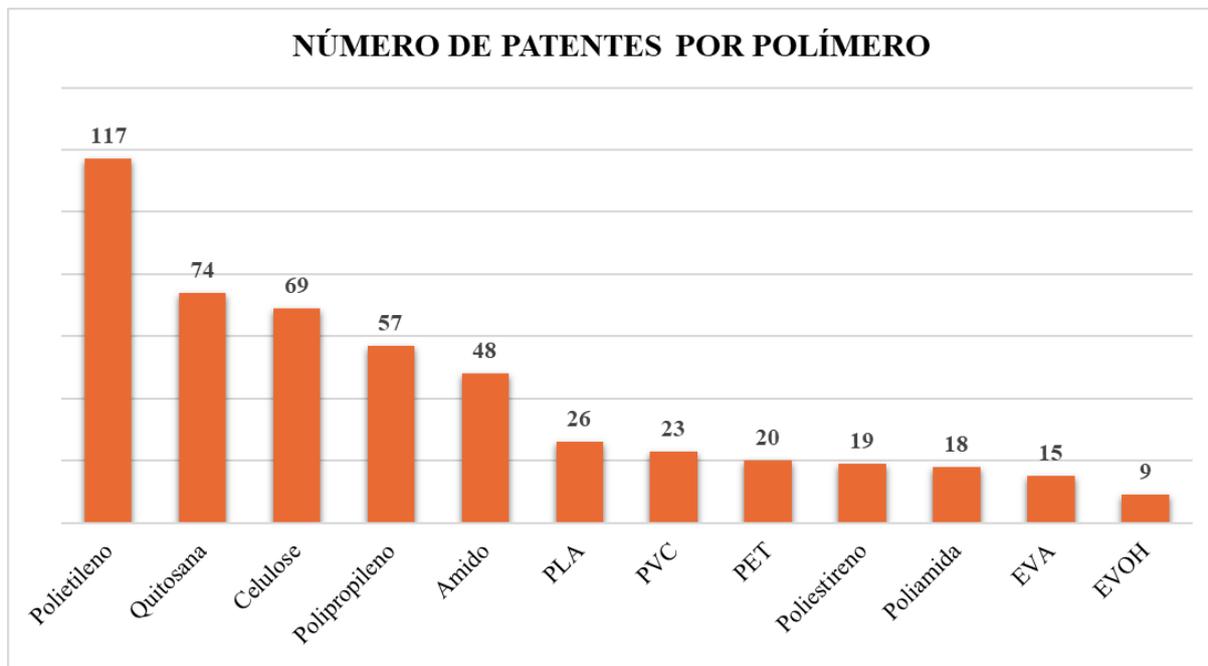


Figura 10: Gráfico do número de patentes depositadas por polímero. Fonte: Autoria própria.

Uma outra perspectiva acerca dos 6 principais polímeros citados em patentes por ano pode ser avaliada a partir do gráfico da Figura 11, em que é possível obter uma melhor visualização a respeito da evolução e do interesse em cada material polimérico ao longo dos anos.

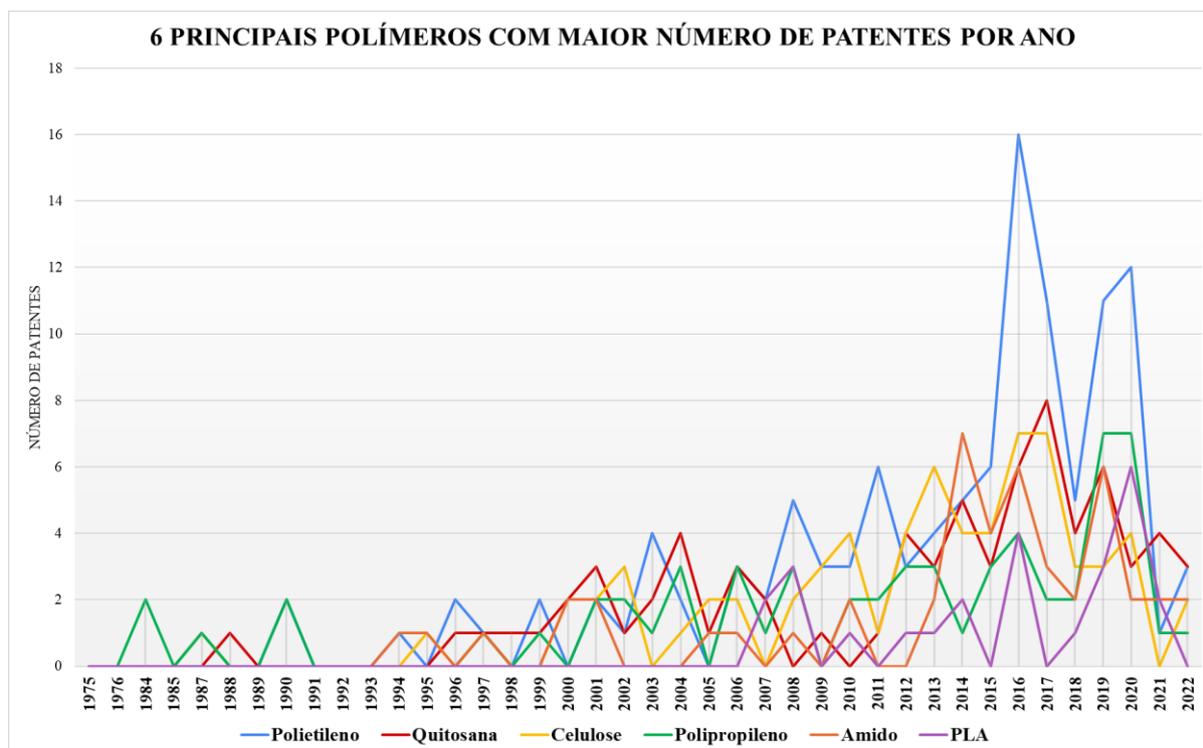


Figura 11: Gráfico dos 6 principais polímeros com maior número de patentes relacionadas por ano. Fonte: Autoria própria.

Dentre os polímeros não biodegradáveis, o polipropileno e o polietileno mostraram-se alvos de pesquisas destinadas a aplicações em embalagens alimentícias antimicrobianas desde 1984 e 1987, respectivamente. Características como alta resistência química e térmica, leveza, fácil processabilidade, boa resistência à fadiga, atoxicidade, reciclabilidade e baixa permeabilidade ao vapor d' água indicam a importância do polipropileno e polietileno como matéria-prima para a fabricação de embalagens alimentícias. No entanto, a maior versatilidade do polietileno quanto aos seus diversos tipos, sejam alguns deles o LDPE, LLDPE ou HDPE, destinados às aplicações em embalagens rígidas ou flexíveis, intitula o PE como o material mais utilizado pela indústria (BARROS-VELÁZQUEZ, 2016; INSTITUTO DE EMBALAGENS, 2014).

Há crescente investimento em materiais de base biológica, a fim de evitar o uso de recursos fósseis e a sua escassez, assim como o maior desenvolvimento em materiais biodegradáveis, onde a demanda por tais polímeros está atrelada às preocupações com o fim de vida útil do material, incluindo os resíduos acumulados em cursos d' água e aterros sanitários.

Um aspecto que ganha popularidade é a utilização de biopolímeros como a quitosana, celulose e o amido como embalagens comestíveis na forma de filmes. Estes tipos de embalagem são inerentemente biodegradáveis, e tem como funções retardar a migração de

umidade, transporte de gás, óleos e gorduras, além da possibilidade de carregar aditivos como agentes antimicrobianos e antioxidantes. As principais vantagens de embalagens comestíveis em relação às embalagens petroquímicas consistem no consumo do alimento sem deixar resíduos a serem descartados, e mesmo sem o consumo, estes filmes são suscetíveis a uma degradação mais rápida, o que contribui para a diminuição de poluição (ROBERTSON, 2013).

À vista disso, nota-se que o maior desenvolvimento nestes biopolímeros com respeito ao número de patentes depositadas ocorreu a partir de meados de 1990, e é possível indicar que estes polímeros como a quitosana, celulose e amido demonstram certa tendência de crescimento ao longo dos anos, mesmo não alcançando os patamares do polietileno. Já em relação ao poli(ácido láctico), a iniciativa em pesquisas obteve um êxito mais tardio, sendo publicados apenas a partir de 2007. Devido a sua biodegradabilidade, biocompatibilidade, baixa toxicidade e fácil processamento, o PLA demonstra potencial para aplicações em embalagens alimentícias antimicrobianas, tendo o alto custo da matéria-prima e carência de infraestrutura de compostagem pelos mercados europeus, japoneses e americanos como alguns dos fatores limitantes de seu maior desenvolvimento (AHVENAINEN, 2003; SÜFER; OZ; ÇELEBI SEZER, 2017).

4.2 ANÁLISE DE ARTIGOS CIENTÍFICOS

Um interesse na temática de embalagens ativas antimicrobianas destinadas a alimentos também pode ser comprovada através do monitoramento de artigos científicos publicados pela comunidade acadêmica. A pesquisa realizada em 01/02/2023 na base de dados *Web of Science* apontou 3.567 artigos encontrados a partir da inserção das palavras-chave “*packaging*”, “*food*” e “*antimicrobial*”, além de filtros adicionais como o intervalo de tempo de 1966 a 2022 e o tipo de documento, sendo considerado apenas artigos, artigos de conferência e acesso antecipado.

Apesar da plataforma possibilitar a busca por artigos científicos a partir de 1966, o primeiro artigo publicado resultante da pesquisa e referente ao tópico de embalagens ativas antimicrobianas surgiu apenas em 1986. O gráfico da Figura 12 indica o número de artigos científicos publicados relacionados a embalagens ativas antimicrobianas para alimentos ao longo dos anos até 2022. Notoriamente, o valor numérico de publicações é substancialmente superior ao de patentes e a partir da análise da curva do gráfico pode-se inferir um crescimento quase exponencial, indicando verdadeiramente o interesse nesta área.

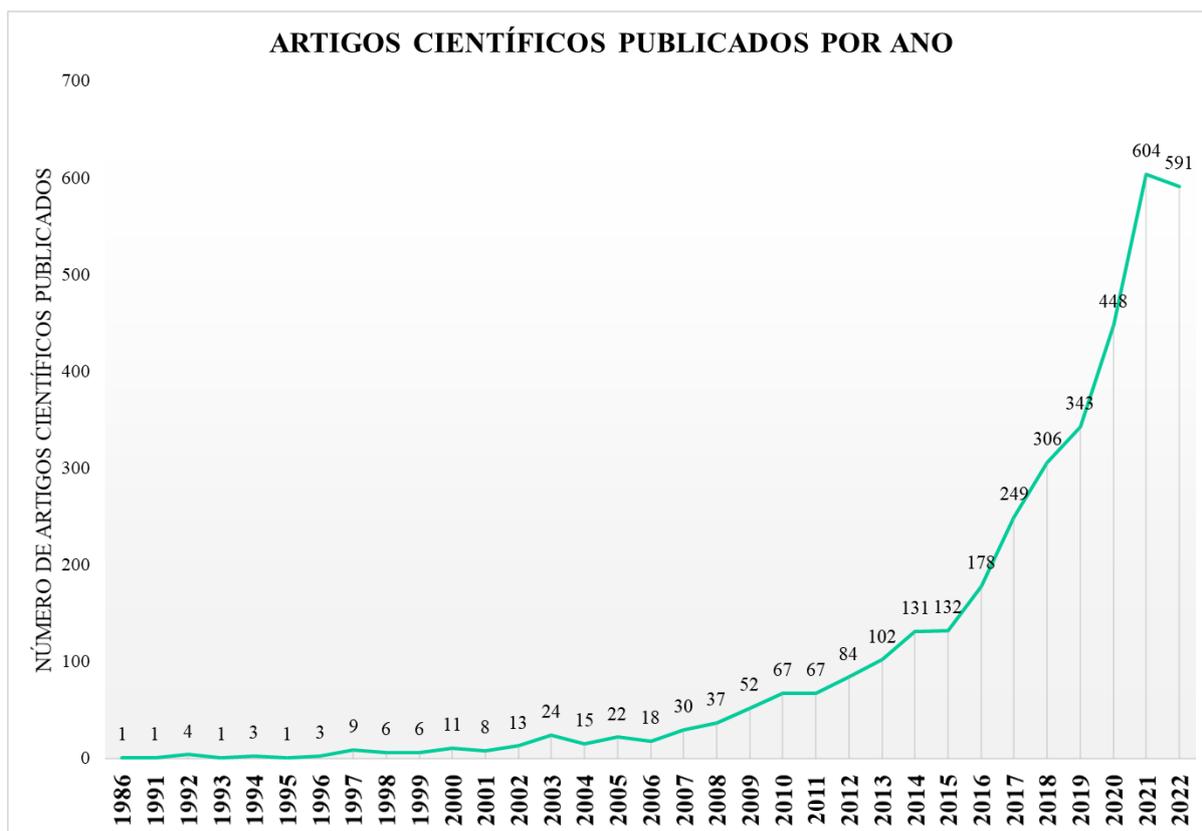


Figura 12: Gráfico de número de artigos científicos publicados referentes às embalagens antimicrobianas por ano. Fonte: Autoria própria.

Como visto anteriormente, o forte investimento da China em inovação tecnológica permitiu que o país alcançasse outros patamares além da indústria manufatureira, como por exemplo, as instituições acadêmicas. A Figura 13 expõe o ranking de países com maior número de artigos científicos publicados, sendo a China detentora do primeiro lugar com 580 publicações referentes às embalagens alimentícias antimicrobianas. Com uma diferença significativa de mais de 200 publicações, os Estados Unidos ocupam o segundo lugar com 374 artigos, seguido da Espanha com 347, a Índia com 326 e o Irã com 309 títulos. Já o Brasil encontra-se na 6ª posição do ranking mundial com 265 publicações.

Uma análise mais detalhada dos 5 principais países publicadores de artigos científicos com respeito às embalagens ativas antimicrobianas ao longo dos anos é realizada através do gráfico da Figura 14. Explicitamente, é possível notar um sutil crescimento do número de publicações ao longo dos primeiros anos deste intervalo de datas determinado, sendo os Estados Unidos dominante nesta área de pesquisa. Um interesse partiu da Espanha veementemente a partir de 2003, em que por determinados anos, superou a nação norte-americana. No entanto, os países que posteriormente representariam uma forte concorrência

para os Estados Unidos somente estabeleceram-se a partir de 2006, sendo eles a China e a Índia, e a partir de 2009, o Irã.

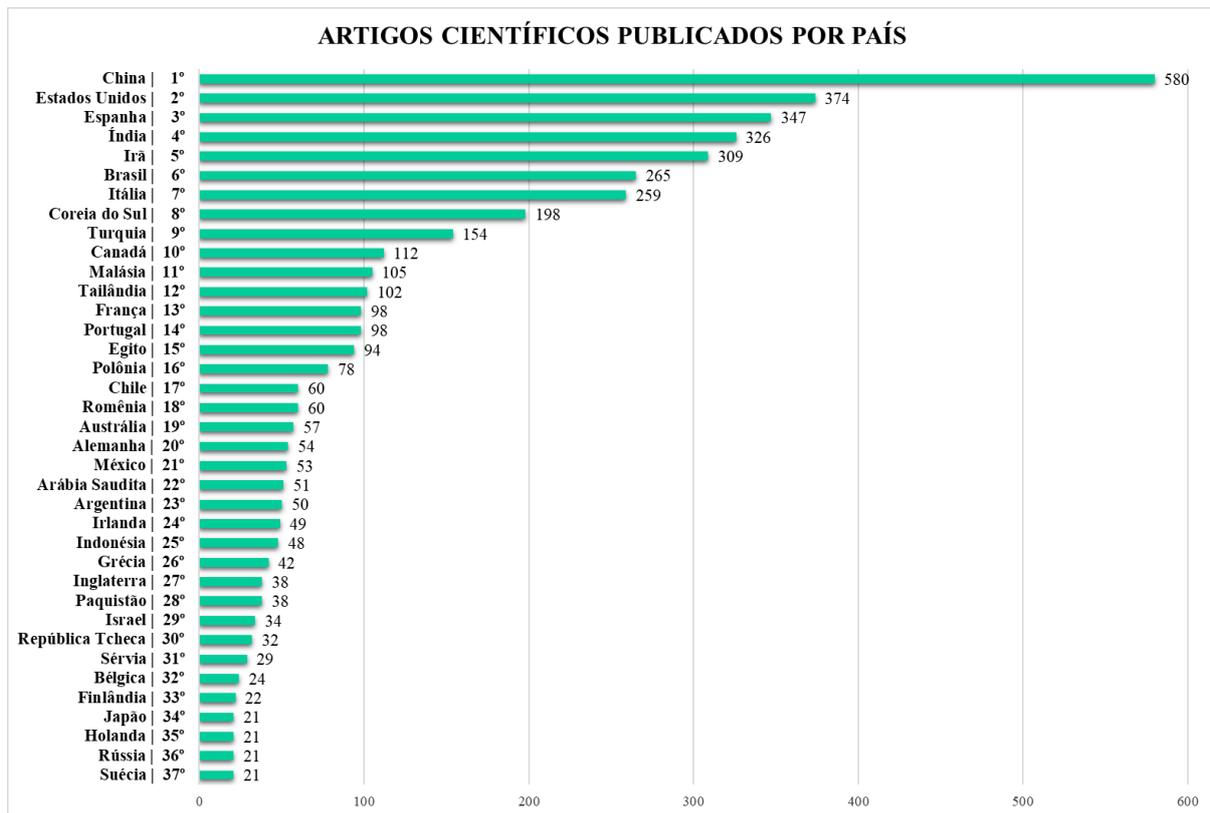


Figura 13: Gráfico de número de artigos científicos publicados referentes às embalagens antimicrobianas por país. Fonte: Autoria própria.

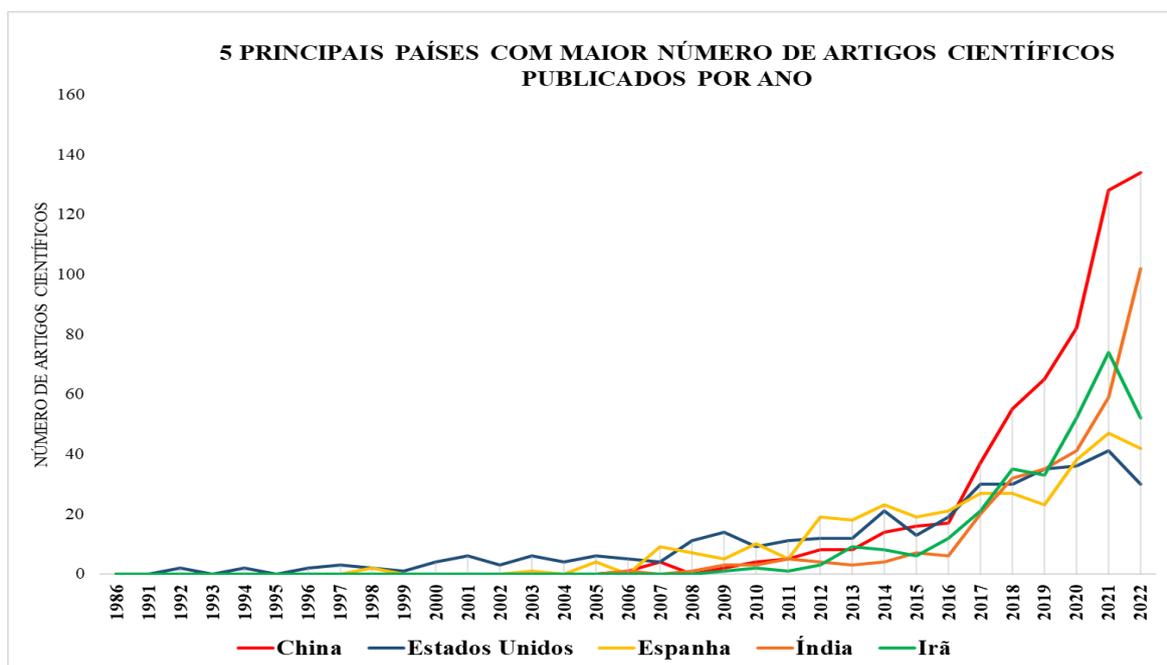


Figura 14: Gráfico dos 5 principais países que publicam mais artigos científicos relacionados às embalagens alimentícias antimicrobianas por ano. Fonte: Autoria própria.

Apenas no ano de 2022, a China foi responsável por obter mais que o quádruplo do número de artigos publicados em relação aos Estados Unidos (30), constando 134 artigos. Em valores percentuais, a nação chinesa correspondia a 22,7% das publicações realizadas mundialmente, seguida da Índia com 17,3%, Irã (8,8%), Espanha (7,1%) e do Brasil com 6,6%, sendo os Estados Unidos representados por apenas 5,0% dos artigos publicados.

Segundo um relatório da "National Science Foundation" de 2018, que avaliou o panorama mundial de publicações de artigos de ciência e engenharia, os países de renda média alta como a China, Brasil, Irã e de renda média baixa como a Índia demonstraram maior impacto com relação ao número de publicações à uma taxa mais elevada quando comparados a países de renda alta como por exemplo os Estados Unidos e Espanha. Em relação aos artigos científicos baseados em embalagens alimentícias antimicrobianas, a premissa mantém-se verdadeira, visto que pelo gráfico, a China, Índia e o Irã apresentaram um crescimento mais abrupto nos últimos anos, contrariamente aos Estados Unidos e à Espanha (WHITE, 2019).

Assim como foi realizado na análise de patentes, a investigação quanto aos materiais poliméricos citados nos artigos científicos publicados permitiu a obtenção dos seguintes resultados (Figura 15). A partir do gráfico de barras, mostrou-se evidente a predileção de estudo por biopolímeros pelos pesquisadores, ao invés dos convencionais materiais poliméricos. Numericamente, as maiores respostas por artigos científicos estão relacionadas à quitosana em primeiro lugar com 1.197 artigos, a celulose em segundo lugar com 600 publicações e o amido citado em 511 artigos. Os polímeros derivados do petróleo como o polietileno e o polipropileno ocupam o 4º e 6º lugar, com 326 e 112 artigos, respectivamente.

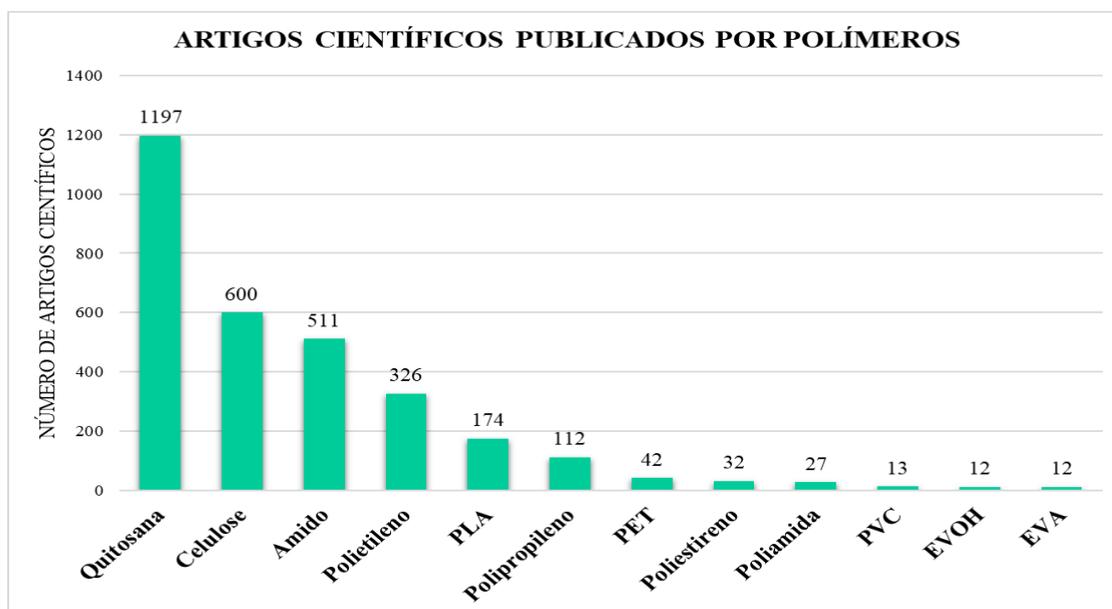


Figura 15: Gráfico de número de artigos científicos publicados referentes às embalagens antimicrobianas por polímero. Fonte: Autoria própria.

O atípico resultado apresentado pelo gráfico acima, visto que os biopolímeros superaram as poliolefinas em número de artigos científicos publicados, pode ser melhor interpretado pelo gráfico da Figura 16, correspondente aos seis principais polímeros com maior número de publicações dentro do intervalo de 1986 a 2022. Devido ao fato de que os polímeros convencionais constituem majoritariamente o mercado de embalagens plásticas alimentícias atualmente, era esperado que o retorno da busca feita indicasse os polímeros derivados de petróleo como os maiores alvos de pesquisa relacionados à temática. No entanto, a resposta incomum da pesquisa comprovou a ascensão do interesse nos biopolímeros, principalmente na última década, devido à facilidade de realizar experimentos para tal aplicação em escala laboratorial, diante da natureza hidrossolúvel destes polímeros e da simplicidade e baixo custo do método *casting* para a produção de filmes

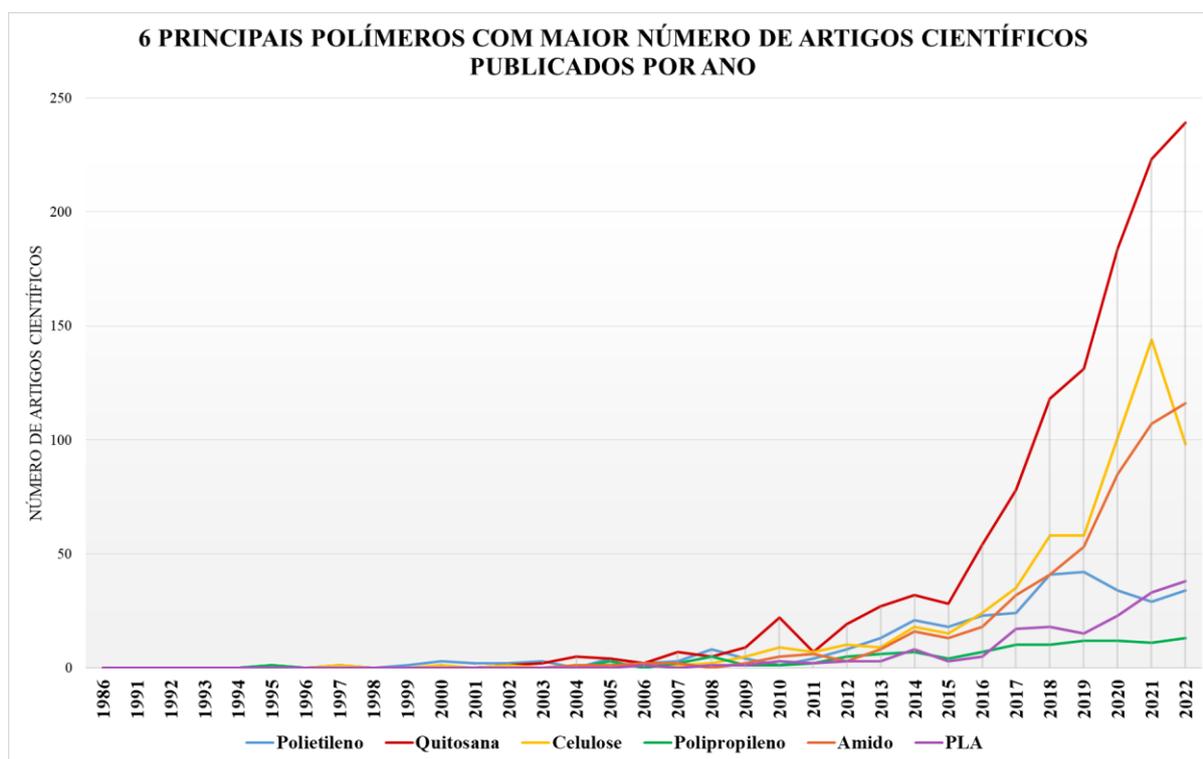


Figura 16: Gráfico dos 6 principais polímeros com maior número de artigos científicos publicados por ano. Fonte: Autoria própria.

Estudos referentes à quitosana iniciaram-se a partir de 2002, e desde então, um abrupto crescimento foi demonstrado, principalmente nos últimos anos, sobressaindo-se entre os demais polímeros. O destaque pode estar relacionado à abundância no material, ranqueado em segundo lugar dentre os polissacarídeos, indicando a gradativa preferência por estudos envolvendo embalagens provenientes de fontes renováveis, além da consideração de aspectos como a boa barreira ao oxigênio, flexibilidade, aplicabilidade para formação de filmes,

propriedades antibacterianas e a biodegradabilidade (ZHANG *et al.*, 2017). Por outro lado, considerada o polissacarídeo mais abundante, a celulose apresentou um crescimento mais sutil ao longo dos anos, quando comparado à quitosana. Fatores como alta cristalinidade, natureza fibrosa e insolubilidade em água são parâmetros que dificultam a sua produção em forma de filmes, e conseqüentemente sua aplicação em embalagens alimentícias, possivelmente justificando tal disparidade (KATIYAR, 2017).

Pode-se dizer que o mesmo pressuposto se aplica ao amido, visto que o seu caráter hidrofílico e frágil limita sua funcionalidade para embalagens alimentícias. No entanto, diante de vantagens como a possibilidade de fabricação de filmes em grandes quantidades por baixo custo, com baixa permeabilidade ao oxigênio, além de sua abundância, mantém-se o interesse no material, em busca de alternativas para aprimorar suas propriedades mecânicas. Uma solução comumente utilizada é a incorporação de plastificantes como glicerol ou sorbitol, a fim de converter o amido em amido termoplástico, melhorando sua flexibilidade e facilidade de processamento (ZHONG *et al.*, 2020).

Apesar dos primeiros estudos encontrados sobre a temática abordarem os polímeros derivados de recursos não renováveis como o polietileno e o polipropileno a partir de 1995, a taxa de crescimento ao longo dos anos mostrou-se equivalente aos biopolímeros selecionados. Entretanto, na última década é possível inferir uma maior estabilização das curvas do gráfico relacionadas ao PE e PP, em comparação ao crescimento mais acentuado das curvas correspondentes à quitosana, celulose e ao amido. Em relação ao poli(ácido láctico), a recente aplicabilidade destinada às embalagens para alimentos, datada pelo gráfico a partir de 2006, indica o potencial em desenvolvimento deste polímero biodegradável.

Informações adicionais correlacionando os países com os polímeros citados acima foram extraídos a partir do monitoramento tecnológico de artigos científicos. A China, por exemplo, demonstra o seu interesse em todos os polímeros, com exceção do polipropileno, liderando em número de publicações. Por outro lado, o Irã foi o segundo país com mais artigos correspondentes à quitosana e à celulose. Já o segundo país que mais contabilizou em estudos de embalagens à base de amido é o Brasil. Tal conhecimento acerca da manifestação de interesse destes países propõe uma maior perspectiva acerca de previsões de investimento e futuras tendências de mercado por cada nação para embalagens antimicrobianas.

4.3 ANÁLISE DE PATENTES E ARTIGOS CIENTÍFICOS

A partir da sobreposição dos dados obtidos pelo monitoramento de patentes e artigos científicos quanto ao ano de publicação, países envolvidos e polímeros estudados, um balanço comparativo pôde ser realizado com o intuito de proporcionar uma visão mais direta a respeito dos aspectos tecnológicos e científicos das embalagens ativas antimicrobianas para alimentos. Indubitavelmente, o interesse na temática atribuído ao aumento do número de estudos publicados ao longo dos anos é comprovado por ambas as vertentes, como visto pelo gráfico da Figura 17.

Especialmente nos últimos anos, o número de artigos científicos publicados ultrapassou o de patentes registradas em até 6 vezes. Tal defasagem pode ser resultado do desestímulo dos pesquisadores à ideia de patentear, visto que implica no potencial de atualidade do conhecimento proposto no documento. Uma vez que o tempo levado para registro até a sua concessão é maior do que a publicação em periódicos científicos relativos à área, o fator da novidade, da atualidade, da vigilância tecnológica, definição e financiamento de pesquisas também são comprometidos (GARCIA, 2006).

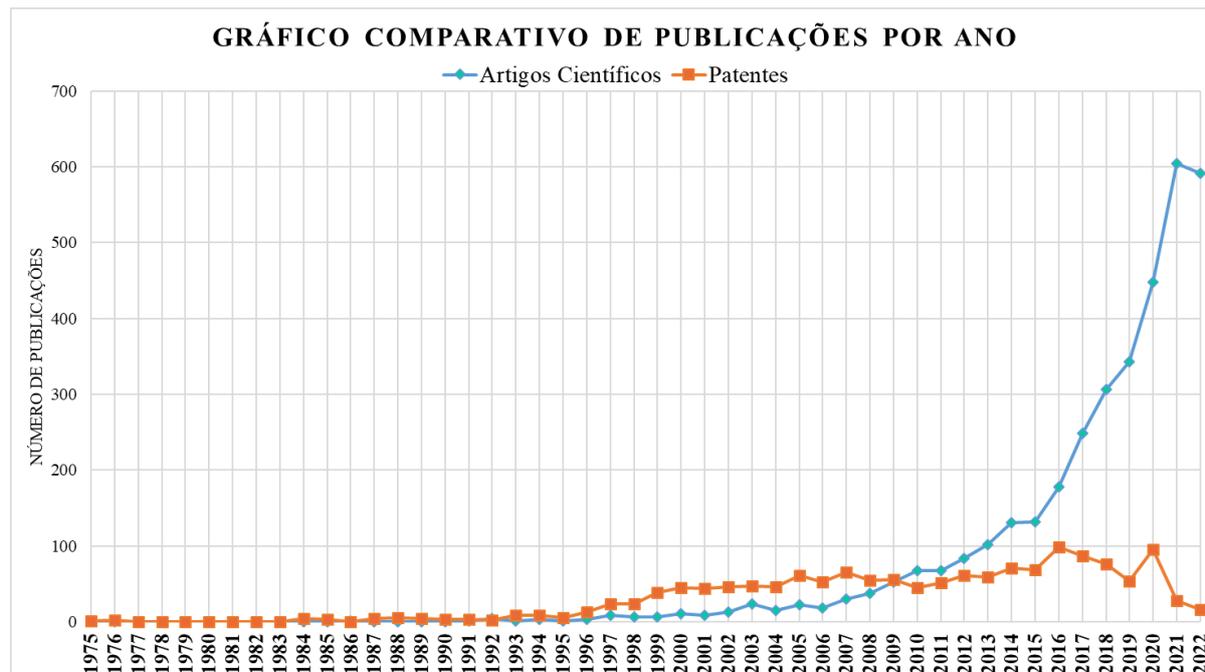


Figura 17: Gráfico comparativo do número de publicações relativas às embalagens antimicrobianas por ano. Fonte: Autoria própria.

Segundo um artigo publicado na revista Nature, o tempo de revisão e publicação de um artigo científico leva em média de 85 a 150 dias (POWELL, 2016). No entanto, a mesma

duração não condiz com a realidade do processo de depósito de patentes, principalmente para determinados países que se deparam com um procedimento mais demorado e burocrático. Maurya (2021) sintetizou informações a respeito das etapas do processo para obtenção de um título de patente, assim como o tempo médio gasto para países como os Estados Unidos, Reino Unido, China, Japão e Índia. O tempo estimado para solicitação e a concessão de uma patente na Índia é de 2 a 3 anos. Na China, o processo pode levar aproximadamente 3 anos para ser concluído. Para a obtenção do certificado pelo Escritório Europeu de Patentes (EPO, em inglês), é previsto um período de 3 até 5 anos. Já nos Estados Unidos, é esperado a duração em torno de 32 meses e no Japão de 22 meses.

Perante tais informações, pode-se sugerir que o tempo atribuído para a aquisição do título de patente seja um reflexo da desigualdade numérica encontrada entre artigos científicos e patentes publicadas. A Figura 18 exhibe esquematicamente a proporção de cada uma destas vertentes para os diversos países analisados, assim como a sua respectiva posição no ranking mundial para um exame comparativo.

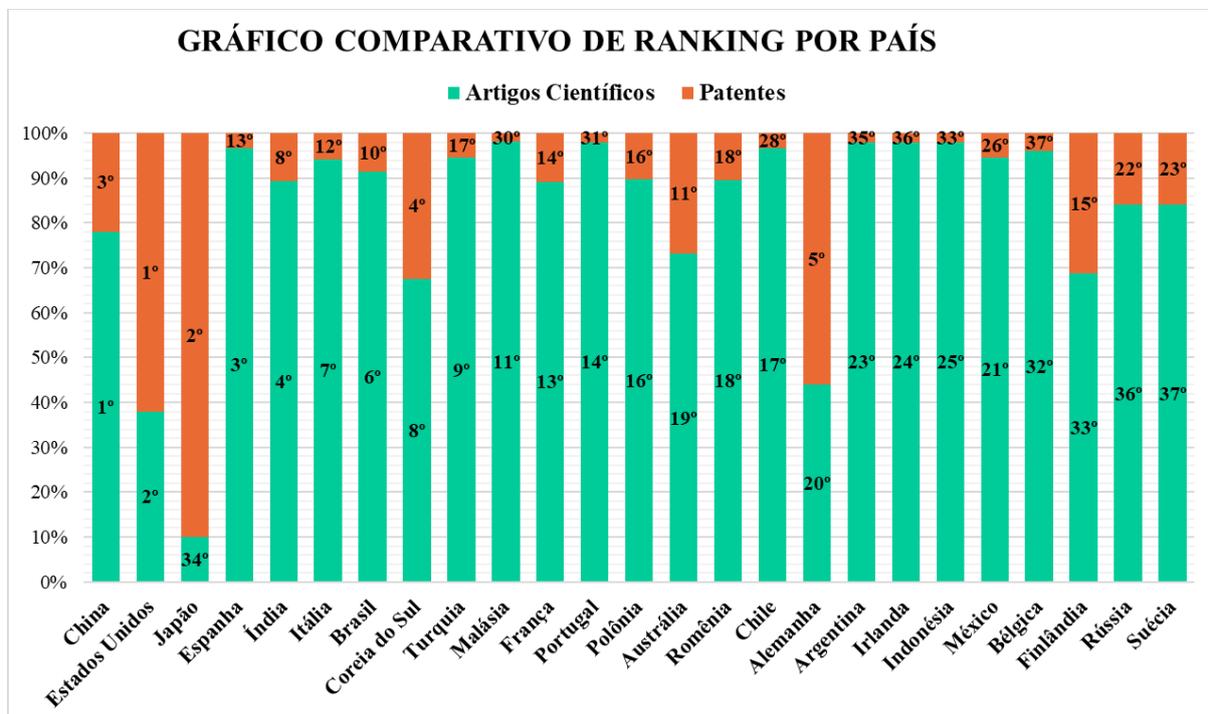


Figura 18: Gráfico comparativo de publicações por país e suas respectivas posições no ranking mundial. Fonte: Autoria própria.

O relativo curto período de tempo gasto no processo de registro de patentes (de 2 a 3 anos), para países como a China, Índia e Estados Unidos, em comparação aos outros países citados, pode indicar um maior entusiasmo à ação de patentear. A classificação destes entre os 10 principais países que depositam patentes relacionados à embalagens alimentícias

antimicrobianas constata tal feito. Já um prazo maior de 3 a 5 anos para solicitação e concessão destinado aos países membros do Escritório Europeu de Patentes, como por exemplo a Espanha, Itália, França e Portugal, reflete em sua maioria em um menor interesse em patentear e conseqüentemente em menores publicações, como pode ser visto pelas suas colocações no ranking mundial.

A associação também é válida para o Japão, que estima 22 meses para o depósito de uma patente e é o segundo maior país depositante. No entanto, um grande contraste é observado entre o número de patentes e de artigos científicos publicados, que classifica o país em 34º lugar. Uma possível explicação para tal fenômeno pode ser atribuída à reforma do sistema de patentes do Japão, que obteve maior êxito a partir de 1990. Um maior reconhecimento da importância do sistema de propriedade intelectual em uma economia por parte de formuladores de políticas industriais japonesas resultou em maiores investimentos nas aplicações. Além disso, vale ressaltar que os maiores números de solicitações de registro partem de grandes empresas, uma vez que as universidades e entidades de pequeno a médio porte ainda não reconhecem veementemente a importância das patentes (NAGAOKA, 2006; WIPO, 2020).

Diante da ascensão da China em inovação, a sua colocação em 3º lugar no ranking mundial de países depositantes de patentes poderá sofrer uma alteração nos próximos anos, principalmente no alcance da liderança em ambos os aspectos. Além da tal projeção comprometer a hegemonia dos Estados Unidos em relação ao número de patentes, um relatório da Grand View Research prevê uma maior concorrência no mercado, devido a investimentos relacionados à expansão operacional em regiões emergentes como países da Ásia-Pacífico, Oriente Médio e África por parte de empresas estadunidenses fabricantes de materiais destinados à embalagens antimicrobianas como a Dow Chemical e a Dunmore Corporation (JANDHYALA, 2020).

Em relação ao Brasil, o cenário é pouco otimista visto que o tempo médio de espera para análise e proferimento de patentes é de 5,1 anos, segundo o Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI). De certa forma, esta estimativa reflete em sua classificação em 10º posição no ranking mundial, uma vez que o lento desempenho compromete o fomento de inovações no país, assim como gera maior desinteresse por parte de investidores externos e internos (DIÁRIO DO COMÉRCIO, 2022).

Outro fator que possivelmente interfere na maior disseminação do uso de embalagens ativas antimicrobianas é o âmbito legal regido por agências reguladoras. O uso correto, segurança e comercialização de embalagens ativas pelos Estados Unidos atendem requisitos da FDA (Food and Drug Administration), que se mostram melhores estabelecidos neste ramo. Em

relação aos países europeus, a EFSA (European Food Safety Authority) dispõe de legislações mais rigorosas, e somado ao elevado custo e baixa aceitação do consumidor por esta tecnologia, culmina em uma maior dificuldade de difusão da mesma no mercado. A circunstância mais restrita dos países europeus assemelha-se ao do Brasil, uma vez que não há legislações específicas sobre o uso de embalagens ativas. É considerada a resolução RDC n.326, 03 de dezembro de 2019, publicado pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) que apresenta a lista de aditivos destinados à elaboração de materiais plásticos e revestimentos poliméricos em contato com alimentos (BRAGA; SILVA, 2017; CANTANHEDE, 2020; VILELA *et al.*,2018).

Quanto aos materiais poliméricos destinados a dada aplicação, o gráfico comparativo da Figura 19 expõe a totalidade de publicações de patentes e artigos científicos para cada um dos polímeros empregados.

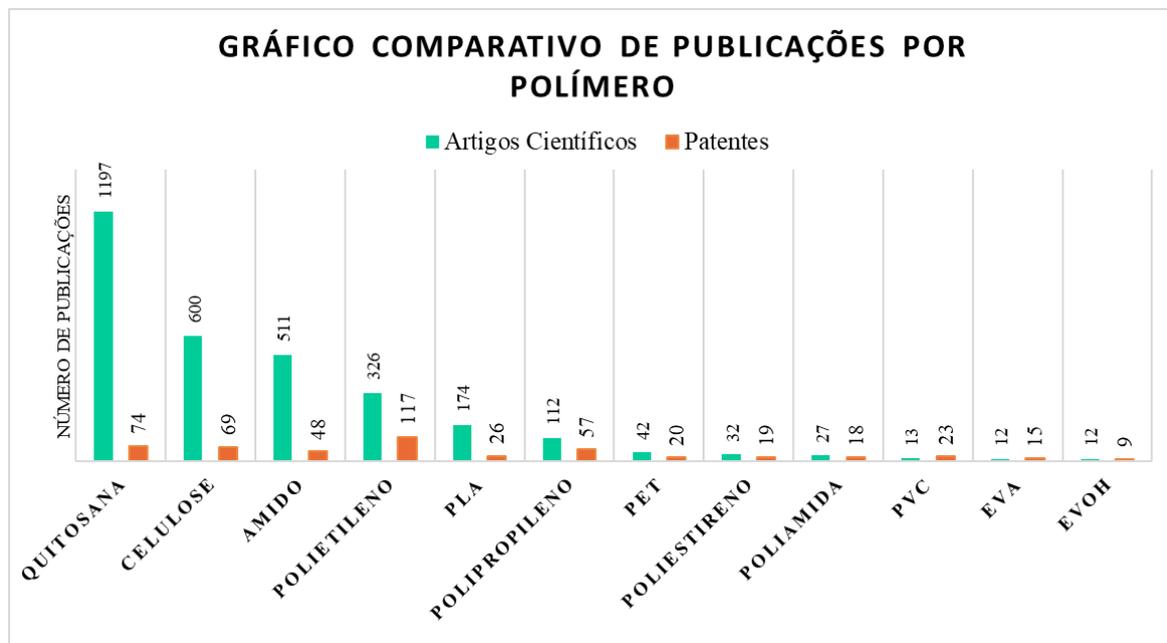


Figura 19: Gráfico comparativo de publicações por polímero. Fonte: Autoria própria.

Categorizados entre polímeros derivados de petróleo ou de base biológica, o gráfico indica a elevada tendência que os materiais poliméricos *bio-based* representam. Apesar da aplicabilidade de polímeros de fontes não renováveis como o polietileno e o polipropileno estar vinculada ao seu desempenho superior, à versatilidade e a custos menores, o panorama atual configura-se em maiores investimento em polímeros de fonte renováveis ou biodegradáveis, como a quitosana, celulose, amido e poli(ácido láctico).

Maiores imposições através de regulamentações governamentais, assim como atender a demanda resultante da conscientização do consumidor pela aquisição de materiais

ecologicamente corretos, são parâmetros que instigam o crescente interesse por estes tipos de polímeros. Preocupações de cunho político, social, econômico, ambiental, tecnológico e legal configuram o maior engajamento em sustentabilidade e no desenvolvimento dos biopolímeros ou de polímeros biodegradáveis.

O caráter político exprime o comprometimento de governos em atingir uma economia de baixo carbono, assim como a implementação de regulamentações que buscam a transição de materiais poliméricos convencionais para biodegradáveis. O aspecto social atrela-se à ignorância quanto ao descarte de resíduos, a reutilização e reciclagem de materiais, sendo necessário uma maior conscientização de consumidores e proprietários de marcas. No âmbito econômico, a iniciativa é realizada principalmente através da implementação de impostos sobre os plásticos convencionais. Em um contexto ambiental, a produção de polímeros convencionais está sujeita a maiores liberações de gases de efeito estufa, realçando os benefícios de polímeros biodegradáveis. Já os aspectos tecnológicos e legais, respectivamente, dizem respeito ao elevado custo de produção e maiores investimentos neste quesito, assim como o maior foco de fundos de investimento em métricas ESG (Ambiental, Social e Governança) (SHAW, 2022).

CONCLUSÃO

Como visto no presente trabalho, novas tecnologias destinadas ao setor de embalagens para alimentos são cada vez mais desenvolvidas, especialmente as embalagens com propriedades antimicrobianas. A demanda dos consumidores por alimentos mais seguros e com menores teores de conservantes diretamente adicionados nos alimentos são alguns dos fatores que contribuem para a predileção por este tipo de embalagem. Por meio dos dados coletados, foi possível indicar o gradativo interesse nesta nova área de conhecimento por meio do crescente número de patentes e artigos científicos encontrados ao longo dos anos. A evolução da nanotecnologia e a ascensão dos biopolímeros são potenciais fatores que podem justificar tal crescimento.

A totalidade de 1.476 patentes e 3.567 artigos científicos referentes às embalagens alimentícias antimicrobianas obtidas através das bases de dados Derwent Innovations Index (DII) e Web of Science permitiu a análise do cenário tecnológico mundial acerca da temática. O estudo apontou um maior engajamento dos Estados Unidos desde os primeiros estágios desta inovação no âmbito das patentes, confirmando seu comprometimento à pesquisa e desenvolvimento. Tal empenho pôde ser denotado pela origem norte-americana das principais empresas fabricantes no ramo. No entanto, os países da região Ásia-Pacífico como o Japão e a China também demonstraram significativo interesse no patenteamento, e futuramente podem alcançar a liderança dos Estados Unidos e tornarem-se fortes concorrentes no mercado.

A razão pela qual estes países asiáticos demonstraram interesse neste setor de embalagens antimicrobianas pode estar relacionado ao exacerbado consumo de embalagens plásticas para alimentos, condizentes com o estilo de vida acelerado adotado. Desta forma, sobressaem-se em razão do maior mercado consumidor em relação à demanda por estas embalagens. Já no âmbito dos artigos científicos, a China destacou-se pelo número de publicações realizadas, possivelmente motivadas pelos subsídios governamentais de incentivo dado pelo forte investimento do país em inovação tecnológica nos últimos anos.

Além disso, há a possibilidade do amplo interesse nas embalagens antimicrobianas por parte dos países citados devido às altas taxas de desperdício alimentar dos mesmos. A capacidade de reduzir, retardar ou inibir o crescimento microbiano, que leva à degradação dos alimentos e conseqüentemente ao aumento da vida de prateleira do produto tornam estas novas tecnologias atrativas no combate ao desperdício.

Quanto aos polímeros utilizados para a dada aplicação, o polietileno demonstra ser o material polimérico mais estudado pela análise de patentes. Por outro lado, pela análise de

artigos científicos, a quitosana, celulose e o amido expõem o crescente interesse do setor de embalagens em biopolímeros, com destaque para a quitosana que foi citada em 33,56% dos artigos publicados. Já o amido revela-se de grande interesse para o Brasil, configurando possivelmente futuras tendências de mercado nacional.

Apesar da rígida pressão de regulamentações governamentais e exigências dos consumidores por materiais alternativos mais ecologicamente corretos, impostas às indústrias de embalagens poliméricas, o desempenho inferior quanto às propriedades de barreira e o alto custo de produção de embalagens a base de biopolímeros demonstram-se âmbitos desafiadores e ainda em desenvolvimento, podendo ser melhor explorados.

Desta forma, este estudo de prospecção tecnológica de embalagens antimicrobianas para alimentos pode representar uma ferramenta estratégica para as empresas inseridas no meio competitivo, expondo oportunidades de desenvolvimento e pesquisa na área e indicando alternativas de investimento promissoras em mercados consumidores. Visto que a partir dos dados obtidos pelo monitoramento de patentes e artigos científicos houve um maior direcionamento à natureza das embalagens poliméricas que agregam os aditivos, sugere-se para futuros trabalhos uma análise mais específica destinada aos agentes antimicrobianos integrados à estes materiais, a fim de aprofundar o conhecimento acerca da natureza dos agentes de maior interesse e que apresentam maior eficácia, sendo estes voláteis ou não voláteis.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGEM (ABRE). **Dados do Setor 2021**. Disponível em: <<https://www.abre.org.br/dados-do-setor/2021-2/>>. Acesso em: 09 out. 2022.

AHVENAINEN, Raija (Ed.). **Novel food packaging techniques**. Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2003. 400 p.

ARAÚJO, Luís Otávio de. **Embalagens ativas: síntese de filmes antimicrobianos à base de Polietileno de baixa densidade e zeólita A contendo prata**. 2019. 60f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

AZEREDO, Henriette Monteiro Cordeiro de; FARIA, José de Assis Fonseca; AZEREDO, Alberto Monteiro Cordeiro de. Embalagens ativas para alimentos. **Food Science and Technology**, v. 20, p. 337-341, 2000.

BALASUBRAMANIAN, A. *et al.* Antimicrobial packaging: potential vs. reality—a review. **Journal of Applied Packaging Research**, v. 3, n. 4, p. 193-221, 2009.

BANDPEY, Niloofar *et al.* Surface coating of silver nanoparticles on polyethylene for fabrication of antimicrobial milk packaging films. **International Journal of Dairy Technology**, v. 70, n. 2, p. 204-211, 2017.

BARÃO, M. Z. **Embalagens para produtos alimentícios**. Instituto de Tecnologia do Paraná – TECPAR. Dossiê Técnico. Agosto, 2011.

BARROS-VELÁZQUEZ. **Antimicrobial food packaging**. Amsterdam Boston Heidelberg London Elsevier: Academic Press, 2016. 654 p.

BASTOS, Valéria Delgado. Biopolímeros e polímeros de matérias-primas renováveis alternativos aos petroquímicos. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, v.14, n.28 , p. [201]-234, dez. 2007.

BORSCHIVER, Suzana *et al.* Patenteamento em nanotecnologia: estudo do setor de materiais poliméricos nanoestruturados. **Polímeros**, v. 15, p. 245-248, 2005.

BRAGA, L. R.; SILVA, F. M. Embalagens ativas: uma nova abordagem para embalagens alimentícias. **Brazilian Journal of Food Research**, v. 8, n. 4, p. 170-186, 2017.

BRASIL PACK TRENDS 2020. Campinas: ITAL, 2012. Disponível em: <<http://ital.agricultura.sp.gov.br/brasilpacktrends/br/2/>>. Acesso em: 24 jul. 2022.

BURROWS, L. **Food-packaging system reduces health risks and saves food**. Harvard John A. Paulson School of Engineering and Applied Sciences, 27 jun. 2022. Disponível em: <<https://seas.harvard.edu/news/2022/06/food-packaging-system-reduces-health-risks-and-saves-food>>. Acesso em: 14 jan. 2023.

CAMMARELLE, Antonella; VISCECCHIA, Rosaria; BIMBO, Francesco. Intention to purchase active and intelligent packaging to reduce household food waste: Evidence from Italian Consumers. **Sustainability**, v. 13, n. 8, p. 4486, 2021.

CANTANHEDE, V. **Nova legislação de material plástico para contato com alimentos – sua empresa já se adequou?**. Food Safety Brazil, 04 fev. 2020. Disponível em: <<https://foodsafetybrazil.org/nova-legislacao-material-plastico-alimentos/>>. Acesso em: 3 mar. 2023.

CASANOVA, H. **As patentes como indicadores de inovação tecnológica**. CAF (Banco de Desenvolvimento da América Latina), 26 ago. 2019. Disponível em: <<https://www.caf.com/pt/conhecimento/visoes/2019/08/as-patentes-como-indicadores-de-inovacao-tecnologica/>>. Acesso em: 28 jan. 2023.

CHAWENGKIJWANICH, Chamorn; HAYATA, Yasuyoshi. Development of TiO₂ powder-coated food packaging film and its ability to inactivate Escherichia coli in vitro and in actual tests. **International journal of food microbiology**, v. 123, n. 3, p. 288-292, 2008.

COLES, R.; MCDOWELL, D.; KIRWAN, M. J. **Food packaging technology**. Boca Ratón, Florida: Crc Press, Cop, 2003. 346 p.

DI BLASI, G.; FRANCO, P. **Brasil e China em rumos distintos?**. Migalhas, 22 out. 2022. Disponível em: <<https://www.migalhas.com.br/depeso/376145/brasil-e-china-em-rumos-distintos>>. Acesso em: 13 jan. 2023.

DIÁRIO DO COMÉRCIO. **Prazo para análise de patentes pode demorar mais de cinco anos no País**. 26 ago. 2022. Disponível em: <<https://diariodocomercio.com.br/legislacao/prazo-para-analise-de-patentes-pode-demorar-mais-de-cinco-anos-no-pais/>>. Acesso em: 1 fev. 2023.

FERREIRA, Márcia Pires Fortes. **Embalagens ativas para alimentos: caracterização e propriedades**. 2012. 123f. Tese de Doutorado (Programa de Pós Graduação em Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012).

FU, Yezhi; DUDLEY, Edward G. Antimicrobial-coated films as food packaging: A review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 20, n. 4, p. 3404-3437, 2021.

GARCIA, Joana Coeli Ribeiro. Os paradoxos da patente. **DataGramZero–Revista de Ciência da Informação**, v. 7, n. 5, 2006. Disponível em: <https://www.brapci.inf.br/_repositorio/2010/01/pdf_d0eae37713_0007609.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2023.

HRNJAK-MURGIC, Zlata. **Nanoparticles in active polymer food packaging**. Smithers Pira, 2015. 260 p.

HUANG, Tianqi *et al.* Polymeric antimicrobial food packaging and its applications. **Polymers**, v. 11, n. 3, p. 560, 2019.

IFOPE. **Embalagens Ativas: qual o interesse da indústria**. Disponível em: <<https://blog.ifopecom.br/embalagens-ativas/>>. Acesso em: 18 ago. 2022.

INSTITUTO DE EMBALAGENS. **Better Packaging. Better World**. Barueri, 2014. 338 p.

JAFARI, S. M.; SILVA, A. S. **Releasing systems in active food packaging** : preparation and applications. Cham: Springer, 2022. 531 p.

JANDHYALA, H. **Top 5 trends shaping the antimicrobial packaging market**. Packaging Digest, 16 mar. 2020. Disponível em: <<https://www.packagingdigest.com/technologies/top-5-trends-shaping-antimicrobial-packaging-market>>. Acesso em: 13 jan. 2023.

JIN, Tony Z.; GUO, Mingming; YANG, Ruijin. Combination of pulsed electric field processing and antimicrobial bottle for extending microbiological shelf-life of pomegranate juice. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 26, p. 153-158, 2014.

JIN, T.; ZHANG, Howard. Biodegradable polylactic acid polymer with nisin for use in antimicrobial food packaging. **Journal of food science**, v. 73, n. 3, p. M127-M134, 2008.

JIN, Tony; ZHANG, Howard; BOYD, Glenn. Incorporation of preservatives in polylactic acid films for inactivating Escherichia coli O157: H7 and extending microbiological shelf life of strawberry puree. **Journal of Food Protection**, v. 73, n. 5, p. 812-818, 2010.

KATIYAR, Vimal. **Bio-based plastics for food packaging applications**. Smithers Pira, 2017. 298 p.

MAHDI, S. S.; VADOOD, R.; NOURDAHR, R. Study on the antimicrobial effect of nanosilver tray packaging of minced beef at refrigerator temperature. **Global Veterinaria**, v. 9, n. 3, p. 284-289, 2012.

MALLICK, N. *et al.* Starch based antimicrobial food packaging film towards a sustainable environment. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2020. p. 012019.

MAURYA, V. **Time taken to grant a patent in different countries : a comparative analysis**. Ipleaders, 15 out. 2021 . Disponível em: <<https://blog.ipleaders.in/time-taken-to-grant-a-patent-in-different-countries-a-comparative-analysis/>>. Acesso em: 16 jan. 2023.

MOSHOOD, Taofeeq D. *et al.* Sustainability of biodegradable plastics: New problem or solution to solve the global plastic pollution?. **Current Research in Green and Sustainable Chemistry**, p. 100273, 2022.

MULLA, Mehrajfatema *et al.* Antimicrobial efficacy of clove essential oil infused into chemically modified LLDPE film for chicken meat packaging. **Food Control**, v. 73, p. 663-671, 2017.

MURIEL-GALET, Virginia *et al.* Covalent immobilization of lysozyme on ethylene vinyl alcohol films for nonmigrating antimicrobial packaging applications. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 61, n. 27, p. 6720-6727, 2013.

NAGAOKA, Sadao. Reform of patent system in Japan and challenges. In: NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **21st Century Innovation Systems for Japan and the United States: Lessons from a Decade of Change: Report of a Symposium**. National Academies Press, 2009. p. 153-168.

NEETOO, Huda; YE, Mu; CHEN, Haiqiang. Effectiveness and stability of plastic films coated with nisin for inhibition of *Listeria monocytogenes*. **Journal of Food Protection**, v. 70, n. 5, p. 1267-1271, 2007.

PEREIRA *et al.* Active and intelligent packaging: security, legal aspects and global market. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 61766-61794, 2020.

PIRES, Márcia *et al.* Compostos antimicrobianos em filme de polietileno – Técnicas de Caracterização e Quantificação. **Anais do 10º Congresso Brasileiro de Polímeros**, Foz do Iguaçu, out. 2009.

POWELL, K. **Does it take too long to publish research?**. Nature, 10 fev. 2016. Disponível em:

<<https://www.nature.com/articles/530148a#:~:text=His%20study%2C%20done%20for%20Nature,analysis%20comes%20with%20major%20caveats.>>. Acesso em: 02 fev. 2023.

PRECEDENCE RESEARCH. **Antimicrobial Packaging Market Size to Hit Around USD 19.7 Bn by 2030**. GlobeNewswire, 9 set. 2022. Disponível em: <<https://www.globenewswire.com/news-release/2022/09/09/2513095/0/en/Antimicrobial-Packaging-Market-Size-to-Hit-Around-USD-19-7-Bn-by-2030.html>>. Acesso em: 07 jan. 2023.

QUINTAVALLA, S.; VICINI, L.. Antimicrobial food packaging in meat industry. **Meat science**, v. 62, n. 3, p. 373-380, 2002.

ROBERTSON, G. L. **Food packaging : principles and practice**. 3. ed. Boca Raton, Fl: Crc Press, 2013. 733 p.

RODRIGUES, Taynara Tatiane. **Polímeros nas indústrias de embalagens**. 2018. 59f. Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

SAEDI, Shahab *et al.* Semi-transparent regenerated cellulose/ZnONP nanocomposite film as a potential antimicrobial food packaging material. **Journal of Food Engineering**, v. 307, p. 110665, 2021.

SAORIN, Franciele. **Estudo de vida útil de alimentos acondicionados em embalagens contendo partículas de prata incorporadas na estrutura do material**. 2015. 171p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SARANTÓPOULOS, Claire; COFCEWICS, Luisa Sartori. Embalagens ativas para produtos perecíveis. **Boletim de Tecnologia e Desenvolvimento de Embalagens**, v. 28, n. 3, p. 1-12, 2016.

SARASCHANDRA, N.; PAVITHRA, M.; SIVAKUMAR, A. Antimicrobial applications of TiO₂ coated modified polyethylene (HDPE) films. **Archives of Applied Science Research**, v. 5, n. 1, p. 189-194, 2013.

SHAW, Olu. **Developments in the biodegradable polymers industry**. Nexanteca, 7 mar. 2022. Disponível em: <<https://www.nexanteca.com/blog/202203/developments-biodegradable-polymers-industry>>. Acesso em: 01 fev. 2023.

SMULDERS, F. J. M. *et al.* Effectiveness of a polyamide film releasing lactic acid on the growth of *E. coli* O157: H7, Enterobacteriaceae and Total Aerobic Count on vacuum-packed beef. **Meat science**, v. 95, n. 2, p. 160-165, 2013.

SÜFER, Ö.; OZ, A. T.; ÇELEBI SEZER, Y. Poly (lactic acid) films in food packaging systems. **Food Sci. Nutr. Technol**, v. 2, p. 000131, 2017.

UNEP. **Índice de Desperdício de Alimentos 2021**. Disponível em: <<https://www.unep.org/pt-br/resources/relatorios/indice-de-desperdicio-de-alimentos-2021>>. Acesso em: 17 jan. 2023.

VARTIAINEN, Jari *et al.* Properties of antimicrobial plastics containing traditional food preservatives. **Packaging Technology and Science: An International Journal**, v. 16, n. 6, p. 223-229, 2003.

VERIFIED MARKET RESEARCH. **Antimicrobial Packaging Market Size, Share, Opportunities And Forecast**. Disponível em: <<https://www.verifiedmarketresearch.com/product/antimicrobial-packaging-market/>>. Acesso em: 7 jan. 2023.

VILELA, Carla *et al.* A concise guide to active agents for active food packaging. **Trends in Food Science & Technology**, v. 80, p. 212-222, 2018.

WHITE, Karen. Publications Output: US Trends and International Comparisons. Science & Engineering Indicators 2020. NSB-2020-6. **National Science Foundation**, 2019. Disponível em: <<https://nces.nsf.gov/pubs/nsb20206/executive-summary>>. Acesso em: 12 jan. 2023.

WIPO. **International IP Applications: Current Status in the World and Japan**. WIPO, 26 mai 2020. Disponível em: <https://www.wipo.int/about-wipo/en/offices/japan/news/2020/news_0037.html>. Acesso em: 22 jan. 2023.

WIPO (World Intellectual Property Organization). **WIPO IP Facts and Figures 2022**. Disponível em: <<https://www.wipo.int/publications/en/details.jsp?id=4642>>. Acesso em: 15 jan. 2023.

WYRWA, J.; BARSKA, A.. Innovations in the food packaging market: Active packaging. **European Food Research and Technology**, v. 243, p. 1681-1692, 2017.

ZHANG, Xiaodong *et al.* Preparation of chitosan-TiO₂ composite film with efficient antimicrobial activities under visible light for food packaging applications. **Carbohydrate Polymers**, v. 169, p. 101-107, 2017.

ZHONG, Y. *et al.* Biodegradable polymers and green-based antimicrobial packaging materials: A mini-review. **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**, v. 3, n. 1, p. 27-35, 2020.