

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

EMBALAGENS ATIVAS E INTELIGENTES: TENDÊNCIAS E PROJEÇÕES

Antônio Henrique Melo Cândido

Trabalho de Graduação apresentado
ao departamento de Engenharia
Química da Universidade Federal de
São Carlos

Orientador: Prof. Fábio Bentes Freire

São Carlos – SP

2023

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 13/03 perante a seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Fábio Bentes Freire, DEQ - UFSCar

Convidado: Profa. Maria do Carmo Ferreira, DEQ - UFSCar

Professor da Disciplina: Prof. André Bernardo, DEQ – UFSCar

Agradecimentos

Primeiramente, quero agradecer toda a minha família, que com todo o seu apoio me fez chegar aonde agora estou. Quero agradecer aos meus irmãos, Luís e Júlia, por sempre acreditarem em mim e pelos ótimos momentos que tivemos e que teremos juntos. Quero agradecer aos meus pais, Antônio e Janaína, por todos os aprendizados que me tornaram quem eu sou hoje, por todo amor que me ilumina nas mais escuras das noites e por terem me apoiado na decisão de ir estudar no estado de São Paulo. Quero agradecer, também, à minha avó, Maria do Carmo, por me colocar todos os dias em suas orações e pelo amor e apoio incondicional. Sem vocês eu não sou nada.

A todos meus amigos de Petrolina que passaram por minha vida, pelo companheirismo, carinho, conversas e momentos que tornaram meus dias mais alegres e simples. Aos meus amigos na graduação, que com a sua parceria e presença tornaram esse período os melhores e mais especiais da minha vida. Levarei vocês comigo, agora e sempre. Amém.

Por fim, quero agradecer ao meu orientador, o Prof. Dr. Fábio Bentes Freire, pela paciência, suporte e confiança, e que de uma pequena ideia fez este trabalho possível. O senhor é um exemplo de profissional no qual terei sempre como referência.

“Pra não deixar de acreditar
e respirar, também
Foi só um vento”
Giovani Cidreira

RESUMO

A embalagem é, em suma, uma técnica que consiste em envolver ou proteger produtos para distribuição, armazenamento, comercialização e uso. Uma embalagem não só contém o produto, mas também, identifica, descreve, protege, exhibe, promove e mantém propriedades e qualidade. Além desse leque de atributos, a embalagem de alimentos pode ser definida mais especificamente como o acondicionamento que protege de adulteração ou contaminação de fontes físicas, químicas e biológicas. Embalagens ativas e inteligentes são duas formas de comercialização que têm como principal papel prolongar o tempo de prateleira de produtos alimentícios, diminuindo, assim, os prejuízos com o desperdício de alimentos vencidos ou estragados. Ao contrário das embalagens convencionais, a embalagem ativa emprega tecnologia que intencionalmente libera ou absorve compostos do alimento ou do espaço livre da embalagem, estendendo a vida útil dos produtos ao interromper as reações degradativas de oxidação lipídica, crescimento microbiano e perda e ganho de umidade. Já a embalagem inteligente, por sua vez, se comunica com os consumidores e outros intermediários ao longo de toda a cadeia de comercialização. Estima-se que os dois tipos de embalagens irão impulsionar esse setor, no momento em que o número de habitantes do planeta ultrapassa os oito bilhões de habitantes, estratégias inteligentes para a produção, distribuição e comercialização de gêneros alimentícios tornam-se essenciais para o desenvolvimento das sociedades no século XXI. O objetivo desse Trabalho de Graduação foi descrever a atual situação das embalagens ativas e inteligentes dentro do setor alimentício, ressaltando os tipos já encontrados em uso, e relacionar os seus mecanismos de funcionamento com a engenharia química. A partir de uma contextualização comparativa entre embalagens convencionais e inteligentes, buscou-se identificar tendências de aplicações economicamente viáveis que projetem o futuro dessa forma de comercialização de alimentos. A revisão evidenciou um grande potencial tecnológico de inovação dentro do mercado de embalagens, dando oportunidades para melhorias sustentáveis e na segurança alimentar, e, devido aos seus mecanismos de funcionamento, uma nova área de pesquisa na qual a engenharia química pode atuar.

Palavras-chave: Embalagens. Embalagens Ativas. Embalagens inteligentes.

ABSTRACT

Packaging is a technique that involves wrapping or protecting products for distribution, storage, commercialization, and use. In addition to containing the product, packaging also identifies, describes, protects, displays, promotes, and maintains properties and quality. Food packaging can be specifically defined as the packaging that protects against physical, chemical, and biological sources of contamination or adulteration. Active and intelligent packaging are two forms of commercialization that have the primary role of extending the shelf life of food products, thus reducing losses from expired or spoiled food. Unlike conventional packaging, active packaging employs technology that intentionally releases or absorbs compounds from the food or the free space in the packaging, thereby extending the products' shelf life by interrupting degradative reactions such as lipid oxidation, microbial growth, and moisture gain and loss. Intelligent packaging, on the other hand, communicates with consumers and other intermediaries throughout the entire commercialization chain. It is estimated that these two types of packaging will drive this sector, as the number of the world's population exceeds eight billion, and smart strategies for the production, distribution, and commercialization of food products become essential for society's development in the 21st century. The objective of this undergraduate thesis was to describe the current status of active and intelligent packaging within the food sector, highlighting the types already in use, and relate their functioning mechanisms to chemical engineering. Through a comparative contextualization between conventional and intelligent packaging, we sought to identify economically viable application trends that project the future of this form of food commercialization. The review highlighted significant technological potential for innovation in the packaging market, providing opportunities for improvements in sustainability and in food safety. Due to their operating mechanisms, it also represents a new research area where chemical engineering can play a role.

Keywords: Packaging. Active Packaging. Intelligent Packaging.

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	1
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. EMBALAGENS.....	4
2.2. EMBALAGENS INTELIGENTES.....	7
2.2.1. INDICADORES DE TEMPO-TEMPERATURA.....	9
2.2.2. INDICADORES DE FRESCOR.....	13
2.3. EMBALAGENS ATIVAS.....	18
2.3.1. EMBALAGENS ABSORVEDORAS.....	20
2.3.1.1. EMBALAGENS ABSORVEDORAS DE OXIGÊNIO.....	22
2.3.1.2. EMBALAGENS ABSORVEDORAS DE ETILENO.....	23
2.3.1.3. EMBALAGENS ABSORVEDORAS DE CO ₂	25
2.3.1.4. EMBALAGENS ABSORVEDORAS DE UMIDADE.....	27
2.3.2. EMBALAGENS EMISSORAS.....	28
2.3.2.1. EMBALAGENS EMISSORAS DE CO ₂	30
2.3.2.2. EMBALAGENS EMISSORAS DE ETANOL.....	32
2.3.2.3. EMBALAGENS EMISSORAS DE ANTIOXIDANTES.....	32
2.3.2.4. EMBALAGENS EMISSORAS DE ANTIMICROBIANOS.....	33
3. DISCUSSÃO	35
3.1. Panorama das embalagens ativas e inteligentes no Brasil.....	35
3.2. Embalagens ativas e inteligentes e a Engenharia Química.....	37
4. CONCLUSÃO	39
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxo das embalagens na cadeia de Suprimentos e seus respectivos agrupamentos de embalagens.....	5
Figura 2 – Fluxo conceitual de informação das embalagens inteligentes.....	8
Figura 3 - Representação esquemática do procedimento para aplicação do TTI como monitor da qualidade do alimento.....	10
Figura 4 - Mudanças de cor de um TTI de Lisina e Xilose durante 15 minutos de incubação, a 80°C.....	11
Figura 5 - Curva de luminosidade (L*) do sistema ITT baseado na observação visual da mudança de cor de colônias de <i>Janthinobacterium</i> sp e o tempo crítico do ITT.....	12
Figura 6 - Resposta colorimétrica do ITT de extrato de repolho roxo em diferentes condições de pH.....	13
Figura 7 - Relações diretas e indiretas das embalagens inteligentes indicadoras para avaliação da qualidade do alimento.....	14
Figura 8 - Indicador de amônia (esquerda) e sua aplicação como embalagem inteligente para peixes (direita).....	15
Figura 9 - Doces “Golden Drop” embalados com etiquetas indicadoras de apodrecimento. (Legenda: verde = fresco; laranja = atenção, vermelho = podre).....	17
Figura 10 - Processo de amadurecimento de maçãs durante, indicado pela concentração de etileno e a cor do indicador de etileno.....	18
Figura 11 - Efeitos da acumulação de etileno pós colheita e o uso de absorvedores de etileno no tempo de prateleira de frutas frescas.....	24
Figura 12 - Representação esquemática de um sachê absorvedor de etileno usado em embalagens para produção horticultural.....	25
Figura 13 - Estrutura de um zeólito do tipo 4A.....	27
Figura 14 - Pontos experimentais e linhas de tendência da quantidade de água absorvida pelo absorvedor em diferentes temperaturas a 80% RH (esquerda) e diferentes RH a 12°C (direita).....	28
Figura 15 - Fenômenos-chave de transporte de vapor de etanol dentro da embalagem ativa.....	30
Figura 16 - Efeitos da embalagem antimicrobiana a base de semolina no crescimento de: (a) bactérias, (b) total de micróbios, e (c) fungos no queijo a 4±1°C.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados da modelagem matemática do tempo de prateleira de peixes badejo embalados em atmosfera modificada e em atmosfera modificada mais emissor de CO ₂ , em temperaturas de 0, 5 e 10°C.....	32
---	----

1. INTRODUÇÃO

Embalagens são descritas como um dos principais meios para proteger, transportar e preservar um produto, agregando valor comercial e estendendo sua durabilidade, sua atratividade e sua segurança. Após produzida, uma mercadoria, seja um alimento ou um fármaco, ao ser armazenada, se torna suscetível à predadores, como insetos e animais, ou à contaminação por microrganismos, deixando de ser atrativa ou mesmo podendo apodrecer e em pouco tempo ser imprópria ao consumo humano. Soma-se a isso as próprias intempéries do local de armazenamento, como variações expressivas de temperatura e umidade, que podem levar à deterioração e a reações indesejáveis, reduzindo a qualidade do produto (PAINE ET AL, 1992).

Por uma boa parte da história primitiva, os homens consumiam o que era coletado nos seus arredores, e conforme o nomadismo foi dando lugar ao sedentarismo, aumentou a necessidade de armazenar recursos para uso futuro, novas tecnologias de embalagem foram então surgindo e se desenvolvendo. No século XV A.C., os egípcios desenvolveram a utilização de vidro como forma de armazenamento. No século II ou I A.C., os chineses utilizavam folhas de casca de amoreira para armazenar alimentos (BERGER, 2002). Nos séculos XVII e XVIII, eram disponíveis jarras e potes de vidro de várias formas, dominando o mercado de embalagens de produtos líquidos. No começo do século XIX, às políticas de “Terra queimada” de adversários e bloqueios ingleses ao fornecimento de açúcar para conservação de frutas levou Napoleão Bonaparte a lançar um desafio para o desenvolvimento de um método de conservação de alimentos para o exército francês, fazendo com que Nicholas Appert criasse o método de processamento térmico de produtos, que se desenvolveu no processo de enlatamento. A invenção do plástico, ainda no século XIX, embora primariamente para fins militares, alcançou as embalagens comerciais, revolucionando o setor com diversas aplicações e propriedades, mostrando uma capacidade inovadora de se adaptar ao tipo de comercialização, podendo ser moldada de acordo com o produto (BERGER, 2002; RISCH, 2009).

Hoje, as embalagens são tão presentes no cotidiano que dificilmente se reconhece a amplitude e a complexidade dos processos e técnicas que as envolvem. Com o aumento e diversidade da produção, elas protegem os alimentos, conservam fármacos e transportam e envolvem todos os bens de consumo imagináveis, tornando

produto e embalagem interdependentes ao ponto de não ser possível imaginar um sem o outro (HANLON et al,1998). Conforme a humanidade chega a marca de 8 bilhões de habitantes em 2022, sendo o dia 15 de novembro designado pelas Nações Unidas como o “Dia dos 8 Bilhões” (ONU, 2022), o crescimento da indústria e tecnologia de embalagens tem seguido um ritmo exponencial, de forma a entender as demandas do mercado. Em 2021, o mercado global de embalagens superou o valor de \$1.0 trilhão, com previsões de atingir \$1.22 trilhão em 2026 (SMITHERS, 2021), montante equivalente ao PIB da Indonésia em 2021 (BANCO MUNDIAL, 2021). No Brasil, o valor bruto da produção de embalagens atingiu R\$ 111 bilhões, um aumento de 31% em relação ao ano de 2020, empregando 239.932 pessoas no país (ABRE, FGV IBRE, 2022). Acompanhado desse crescimento, a exigência do consumidor por produtos mais frescos, com qualidade e segurança, e a constante atualização e aprimoramento de leis de segurança sanitária e alimentar têm se tornado um desafio para a indústria de embalagens, criando gatilhos para o desenvolvimento de novas tecnologias e conceitos de embalagem, como as embalagens inteligentes e as embalagens ativas (BARSKA et al, 2017; WYRNA et al, 2017; FIROUZ et al, 2021).

As embalagens inteligentes monitoram, por meio de sensores, mudanças em seu ambiente interno e externo, oferecendo ao consumidor final ou à fabricante informações sobre a qualidade, segurança e localização do produto durante o transporte, armazenamento, varejo e uso, dando meios de avaliar o processo de embalagem e de monitorar a qualidade do produto (BARSKA et al, 2017; BRODY, 2017, GHAANI et al, 2016; PAL et al, 2019; YAM, 2012). Com as embalagens inteligentes, é possível monitorar variáveis por meio de indicadores, como, por exemplo, os de temperatura, refletindo os efeitos cumulativos dessa variável num determinado produto (WANG et al, 2015), e os de frescor, a partir de metabólitos voláteis, como o dióxido de carbono (NOPWINYUWONG et al, 2010; SHAO et al 2021).

As embalagens ativas, em contrapartida, são produzidas com sistemas onde os seus constituintes interagem quimicamente, fisicamente ou biologicamente com o produto, aumentando seu tempo de prateleira ao retardar processos químicos e biológicos, como o amadurecimento (ALVAREZ-HERNANDEZ et al, 2021) e a oxidação (JOHANSSON et al, 2014). Segundo PEREIRA DE ABREU et al. (2012), preservar a qualidade do produto e ao mesmo tempo aprimorar a segurança de

consumo implicam em reduzir a atividade microbiana (IRKIN et al, 2015) e melhorar as condições internas da embalagem, como, por exemplo, a regulação da umidade (PANTALEÃO et al, 2007). As interações entre embalagem, produto e ambiente interno podem ser executadas de duas formas principais, através de sistemas absorvedores, removendo metabólitos ou compostos indesejáveis ao ambiente interno da embalagem, e de sistemas emissores, que liberam substâncias desejáveis para manutenção da integridade do produto e indesejáveis à microrganismos (FIROUZ et al, 2021).

A partir das informações apresentadas, este Trabalho de Graduação teve, como principal objetivo, realizar uma revisão bibliográfica sobre a atual situação das embalagens ativas e inteligentes no setor alimentício. Inserido no objetivo principal, foram divididos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre embalagens ativas e inteligentes;
- Analisar os mecanismos de funcionamento que englobam essas categorias de embalagens;
- Relacionar os mecanismos de funcionamento com os princípios da engenharia química.

Revisões da literatura técnico-científica fornecem status e *feedback* sobre os assuntos sob revista, destacando suas principais atividades em andamento. Trata-se de uma importante via para comunicar os avanços e transferir conhecimento entre os membros de uma mesma área de interesse. Seguindo critérios para destacar a recente conjuntura das embalagens ativas e inteligentes, contextualizando essa área como meta dentro do desenvolvimento sustentável da atual sociedade, buscou-se organizar contribuições relevantes na seção de Revisão Bibliográfica a seguir.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Embalagens

Embalagens são elementos ou conjuntos de elementos, feitos de qualquer material de qualquer natureza, destinados a envolver, conter e proteger produtos durante a sua movimentação, transporte, armazenagem, comercialização e consumo (NBR, 1985; PAINE et al, 1981).

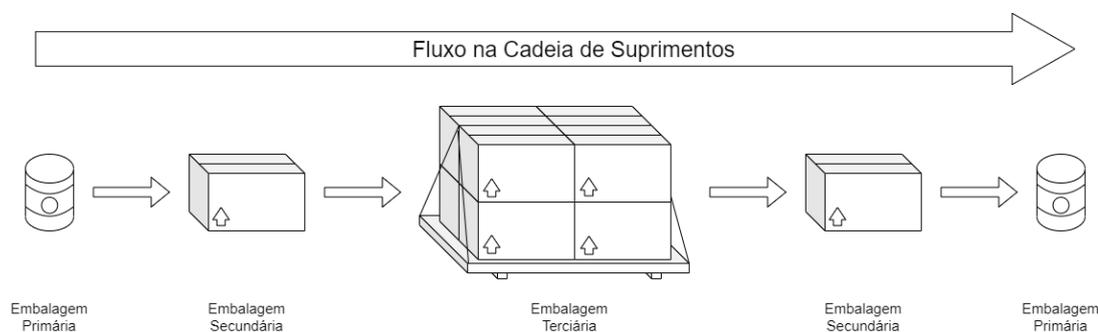
As embalagens devem, como uma das propriedades chave, subdividir grandes volumes de produto, provenientes do processo de manufatura, em unidades mais apropriadas para manejo e transporte na cadeia de suprimentos. Aliado a avanços no transporte, as embalagens tornaram possível aproveitar as vantagens econômicas das operações de larga escala, centralizando as unidades produtivas em locais próximos das matérias-primas e tornando acessível os produtos aos locais de maior consumo. (HANLON, 1998).

Dependendo da posição na cadeia de suprimentos, as embalagens podem ser hierarquizadas como primárias, secundárias e terciárias:

- As primárias são definidas como o menor conjunto de embalagem que envolve o produto e que entra em contato direto com o consumidor final ao usufruí-lo;
- As secundárias, os conjuntos de embalagens que agregam as primárias em unidades maiores, visando facilitar o manejo;
- As terciárias, o maior conjunto de embalagem no qual é possível agregar os subconjuntos, visando facilitar o transporte. (INNS, 2012)

Esses níveis de agrupamento tornam o fluxo logístico e a distribuição do produto otimizada, agregando os produtos em maiores cargas a partir da necessidade de armazenamento e transporte: o produto é embalado em embalagens unitárias, e é agregado para transporte até os centros de distribuição, onde são armazenados em grandes quantidades, e são desagregados conforme são destinados a atacados e varejo, e, por fim, são utilizados pelo consumidor final na sua embalagem unitária (HANLON, 1998; PAINE, 1981). A Figura 1 mostra o fluxo descrito, e seus respectivos níveis de embalagem.

Figura 1 – Fluxo das embalagens na cadeia de Suprimentos e seus respectivos agrupamentos de embalagens



Fonte: Adaptado de Paine, 1981

Além de envolver o produto, as embalagens possuem várias outras funções, facilitando e otimizando todos os processos envolvendo a cadeia produtiva do produto. Essas funções podem ser divididas em: proteção, contenção, repartição, unitização, conveniência, informação e comunicação. (INNS, 2012; HELSTROM et al, 2017; PAINE 1981)

- **Proteção:** durante toda a cadeia de suprimentos, o produto pode entrar em contato com fatores físicos, químicos, microbiológicos e climáticos que podem danificá-lo. Então, a embalagem tem a função de garantir a segurança do seu conteúdo de fontes externas e vice-versa. A embalagem garante proteção contra fatores físicos, como vibração, compressão e choque mecânico, químicos e microbiológicos, protegendo o produto de deterioração, e climáticos, como temperatura e umidade.
- **Contenção:** devido aos produtos existirem de diversas formas, tamanhos, materiais e reagir de diferentes formas com o ambiente, a sua contenção é necessária. As embalagens, então, têm a função de coletar todos os componentes do produto em uma unidade, tornando os produtos acessíveis para o consumidor final, de forma segura. Um exemplo prático é a contenção de grãos, como arroz, numa embalagem, contendo vários grãos em uma só embalagem.

- **Repartição:** de forma a facilitar o alcance dos produtos na escala industrial para o consumidor final, as embalagens têm como objetivo a repartição em unidades manuseáveis e padronizadas em tamanho e porção. Isso permite com que o varejo consiga destinar as dimensões corretas do produto baseado no consumidor-alvo, ajuda o consumidor a gerir seu estoque do produto e reduz o desperdício, ao repartir em porções adequadas.
- **Unitização:** pensando também no transporte dos produtos em diferentes níveis da cadeia, no começo da cadeia de distribuição, grandes unidades são divididas em menores unidades na produção para que sejam agregadas posteriormente. A unitização tem como definição, então a consolidação de pequenas unidades em maiores para aprimorar a eficiência do processo. Diferente da repartição, a unitização agrega as unidades repartidas e desagregam conforme necessário.
- **Conveniência:** se relacionando à unitização e repartição, as embalagens devem ser fáceis e convenientes, facilitando o manejo em diferentes estágios da cadeia de fornecimento. A percepção de conveniência nas embalagens pode englobar a possibilidade de consumir os produtos em qualquer lugar, a qualquer hora; os quais devem ser fáceis de abrir, carregar e esvaziar; de fácil distribuição e descarte.
- **Informação:** devido às embalagens serem a interface entre o produto e a logística e entre o produto e o consumidor, a função da embalagem como portadora de informação é essencial. As principais funções das informações contidas nas embalagens são ajudar os consumidores a identificar o conteúdo da embalagem e fornecer instruções de como usá-lo. Outra função também pode ser endereçada, como selos de autenticidade e antifurto, servindo como fonte de informação sobre a procedência do produto.

- **Comunicação:** o marketing é a ferramenta principal de comunicação entre a marca e o consumidor, e a embalagem tem um papel essencial nela. A embalagem é o meio com maior contato que os consumidores têm com o produto, se tornando, então, uma forma chave de influenciar o consumidor através da criação de uma identidade, otimizando a forma que a embalagem se apresenta e é percebida, gerando valor ao produto e aumentando vendas.

Dentro da categoria de embalagens, as inteligentes e ativas têm se mostrado uma tendência moderna para a proteção e conservação de alimentos e outros produtos, trazendo soluções que envolvem interações físicas, químicas, físico-químicas com o ambiente que envolve o produto ou com o produto, sendo possível identificar a qualidade do produto que se é consumido e reduzir as reações de deterioração do mesmo. Essas novas funções atribuem um papel ativo às embalagens, tornando-as uma ferramenta importante de estudo para manutenção da qualidade do produto (PEREIRA DE ABREU et al, 2012, WYRNA et al, 2017; BARSKA et al, 2017). As interações entre embalagem-ambiente-produto envolvem fundamentos de grande importância na engenharia química, como fundamentos da transferência de calor, da transferência de massa, das reações químicas, bioquímicas e enzimáticas e da termodinâmica. As embalagens ativas e inteligentes, então, podem ser definidas como sistemas que se comportam como pequenos processos químicos ou pequenos reatores químicos, abrindo possibilidade para estudos cinéticos, de fenômenos de transporte e químicos, análogos aos estudados no ramo da engenharia química.

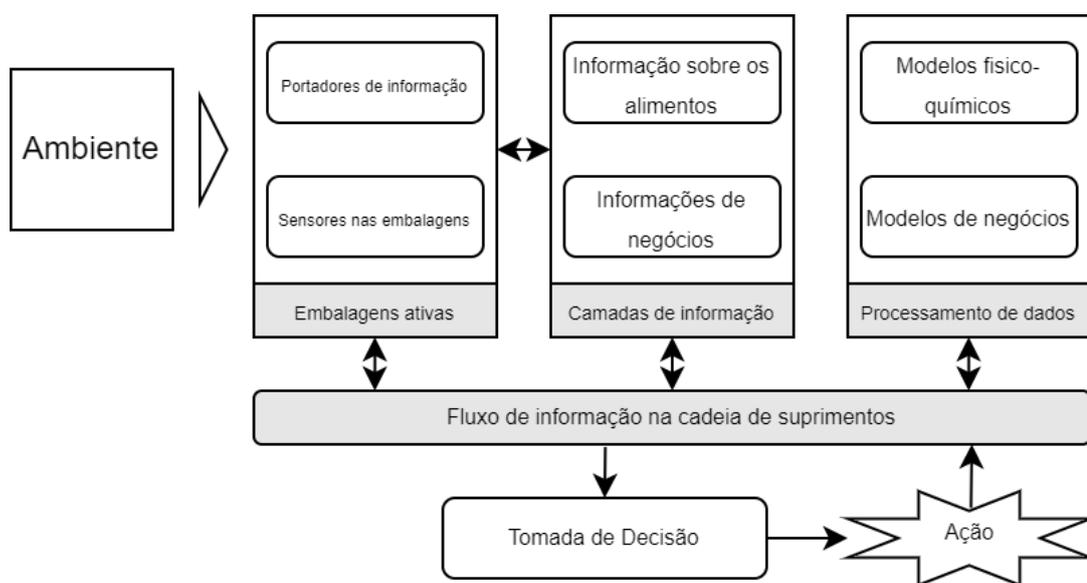
2.2. Embalagens inteligentes

O setor de embalagens inteligentes é uma das áreas emergentes para a comercialização de alimentos. As embalagens inteligentes são definidas como sistemas de embalagem com ferramentas de comunicação que monitoram mudanças internas e externas no ambiente, comunicando a condição do sistema embalagem-produto às partes inseridas na cadeia de suprimentos - incluindo o produtor, o varejista e o cliente -, dando informações sobre a qualidade e a segurança do produto. (YAM, 2012; PEREIRA DE ABREU et al, 2012; GHAANI et al, 2016; BARSKA et al, 2017)

Devido à função de comunicação empregada, as embalagens inteligentes possuem um papel facilitador no fluxo de informação dentro da cadeia alimentícia de suprimentos, carregando informações sobre as condições do produto de forma visual, através dos indicadores, ou de forma eletrônica, por meio de portadores de informação, como código de barras. Com o fluxo de informação otimizado, é possível a integração das embalagens ativas com os sistemas de tomada de decisão na cadeia de suprimentos, alimentando modelos de negócio, voltados à otimização operacional ou financeira, e modelos de determinísticos ou fenomenológicos dos alimentos, voltados à conservação e qualidade do produto (YAM, 2012). O fluxo de comunicação descrito está ilustrado na Figura 2.

Os dispositivos que integram as embalagens inteligentes são definidos como pequenos rótulos ou etiquetas atreladas à embalagem primária (sacos, garrafas, latas) ou à embalagem secundária (caixas e bandejas), disponibilizando informação de forma interativa para a cadeia de suprimentos (YAM, 2012). Os dispositivos podem ser divididos em duas categorias, os indicadores e os portadores de informação, que são utilizados conforme o objetivo (GHAANI et al, 2016; BARKSA et al, 2017; FIROUZ et al, 2021). Devido às interações físicas, químicas e bioquímicas que estão inseridas no funcionamento dos dispositivos indicadores, este será o objeto de estudo principal desta revisão bibliográfica, no que tange as embalagens inteligentes.

Figura 2: Fluxo conceitual de informação das embalagens inteligentes.



Fonte: Adaptado de YAM, 2012.

2.2.1. Indicadores de tempo – temperatura

Os indicadores de tempo-temperatura (ITTs) são indicadores em forma de etiquetas, vinculados às embalagens alimentícias, que utilizam de interações químicas, microbiológicas ou enzimáticas para monitorar o efeito cumulativo da temperatura na qualidade do produto, tendo como resposta às variações de temperatura mudanças visuais irreversíveis na etiqueta, usualmente na forma de mudança de cor (FIROUZ et al, 2021; GHAANI et al, 2016). A temperatura é um dos parâmetros mais importantes que influenciam o tempo de prateleira de um produto, e o consumidor geralmente tem disponível, ao tomar posse de um produto alimentício, a validade impressa estimada a partir de condições apropriadas de temperatura (WANG et al, 2015). No entanto, a temperatura é um fator com baixa previsibilidade que pode variar significativamente na cadeia de suprimentos alimentícia, inutilizando a validade impressa como indicador de tempo de prateleira do produto e aumentando a necessidade de sistemas que indiquem de forma rápida e efetiva essas mudanças, tornando a utilização de ITTs uma estratégia de importância significativa (WANG et al, 2015; GORANSSON et al, 2018).

É possível modelar a utilização dos ITTs como indicador de qualidade do produto utilizando princípios cinéticos, correlacionando matematicamente a resposta do ITT com a redução da qualidade do alimento que esteve em contato com qualquer variação de temperatura, a partir da equação de Arrhenius (WANG et al, 2015; LING et al, 2015). Como os alimentos são sistemas biológicos complexos, várias reações acontecem em série, em paralelo, ou em competição, com diferentes energias de ativação, como o decaimento microbiológico, deterioração enzimática, oxidação lipídica e mudanças sensoriais (LABUZA, 1984). A partir da equação de Arrhenius, a função da qualidade do alimento está descrita na Equação 1 (TAOUKIS et al. 1991):

$$f(A)_t = \int_0^t k dt = k_A \int_0^t \exp\left[\frac{-E_A}{RT(t)}\right] dt \quad (1)$$

onde $f(A)$ é a função da qualidade do alimento, A é o índice de qualidade do alimento, t o tempo, k a constante da reação, k_A a constante de Arrhenius, E_A a energia de ativação da reação que controla a perda de qualidade, R a constante dos gases ideais e $T(t)$ a variação da temperatura no tempo. Para desenvolvimento, é definido o T_{eff} , um valor de temperatura constante que causa a mesma perda de qualidade que a

variação de temperatura T(t). Com isso, a função da qualidade do alimento pode ser representada a partir da Equação 2 (TAOUKIS et al. 1991):

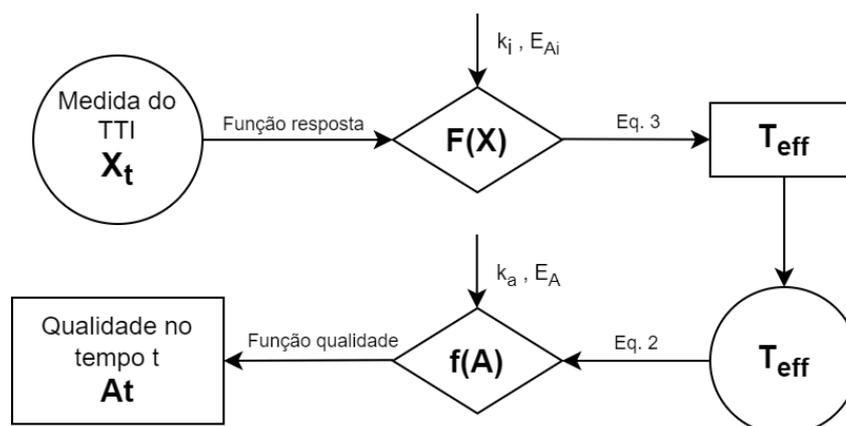
$$f(A)_t = k_A \exp \left[\frac{-E_A}{RT_{eff}} \right] t \quad (2)$$

Por fim, a resposta do ITT pode ser modelada matematicamente de forma análoga a partir da equação de Arrhenius, definido pela função resposta F(X), onde X é a resposta do indicador. A função resposta em função da T_{eff} está apresentada na Equação 3:

$$F(X)_t = k_i \exp \left[\frac{-E_{Ai}}{RT_{eff}} \right] t \quad (3)$$

onde k_i e E_{Ai} são os parâmetros cinéticos do ITT. Com a função resposta, é possível determinar o índice de qualidade A do alimento em qualquer momento da cadeia de suprimentos; a partir da medição de X num tempo t, a Equação 3 pode ser resolvida, encontrando o valor de T_{eff} e, com isso, a função qualidade do alimento (TAOUKIS et al. 1991). Diferentes indicadores possuem diferentes formas de interação com o produto, como químicas, microbiológicas e enzimáticas e, com isso, diferentes parâmetros cinéticos e categorias de alimentos onde é aplicável. Para que o ITT seja aplicável com baixos erros, a energia de ativação do ITT e a energia de ativação do alimento devem ter valores próximos, com diferenças abaixo de 42 kJ/mol (TAOUKIS et al 1991). O uso do ITT para monitoramento da qualidade do produto segue o fluxograma de monitoramento da Figura 3.

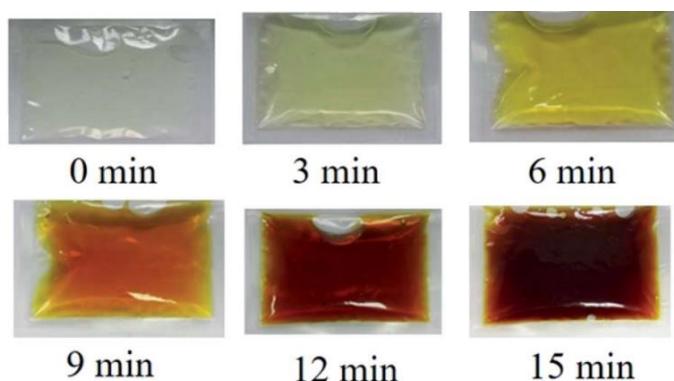
Figura 3 – Representação esquemática do procedimento para aplicação do ITT como monitor da qualidade do alimento



Fonte: Adaptado de Taoukis et. al, 1991

A alimentos que contém gorduras e proteínas, como laticínios e leite de soja, a partir da interação com açúcares, podem produzir quantidades significativas de glicotoxinas, compostos que estão associados com o desenvolvimento de doenças crônicas como diabetes. Sua produção está diretamente ligada à reação de Maillard, que tem como um dos fatores principais a temperatura. Então, indicadores de tempo-temperatura baseados na reação de Maillard podem ser produzidos a partir de aminoácidos e açúcares redutores, e seus parâmetros cinéticos determinados experimentalmente, para serem utilizados como indicadores de produção de glicotoxinas de alimentos reaquecidos (HU et al, 2020). A Figura 4 ilustra o funcionamento de um ITT baseado na reação de Maillard, produzido a partir da lisina e da xilose, em uma condição de alta temperatura.

Figura 4 – Mudanças de cor de um ITT de Lisina e Xilose durante 15 minutos de incubação, a 80°C



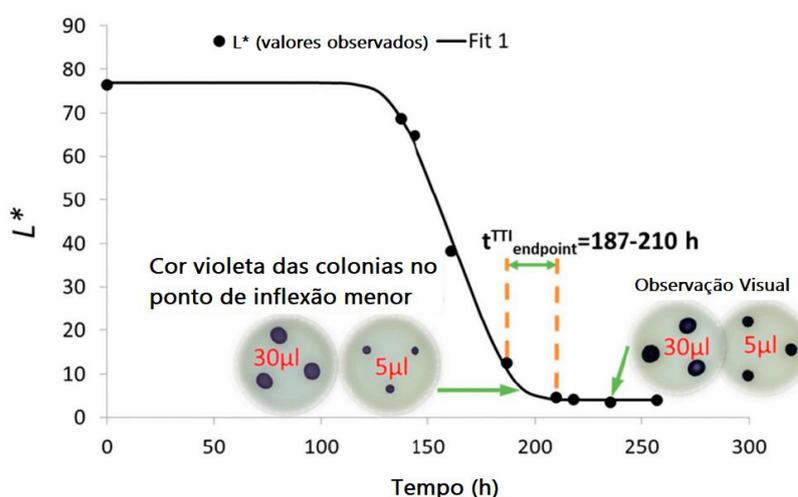
Fonte: Hu et. al., 2020, usada sob licença Creative Commons CC-BY-NC.

A taxa de crescimento microbiológico das bactérias que decompõem os alimentos é diretamente dependente da ação da temperatura, tendo taxas mais acentuadas em temperaturas maiores até a sua temperatura ótima de crescimento, tornando a utilização de ITTs com funcionamento microbiológico viável, relacionando a cinética de crescimento do ITT com a cinética de crescimento dos microrganismos no alimento. Para monitoramento de alimentos refrigerados, microrganismos psicrotóxicos produtoras de metabólitos secundários cromogênicos podem ser

utilizadas, e seus parâmetros cinéticos definidos, como é o caso da *Janthinobacterium sp.*, que produz como metabólito secundário a violaceína, de cor violeta (MATARAGAS et al, 2019).

A Figura 5 ilustra a curva de luminosidade das colônias de *Janthinobacterium sp.* como meio para definição do tempo crítico do ITT, servindo como parâmetro para dimensionamento do sistema. Conforme o tempo corre na cadeia de suprimentos, a produção de violaceína muda a cor da colônia, alcançando um ponto de inflexão colorimétrico, observável à olho nu, que é definido como o ponto crítico do ITT.

Figura 5 – Curva de luminosidade (L^*) do sistema ITT baseado na observação visual da mudança de cor de colônias de *Janthinobacterium sp* e o tempo crítico do ITT

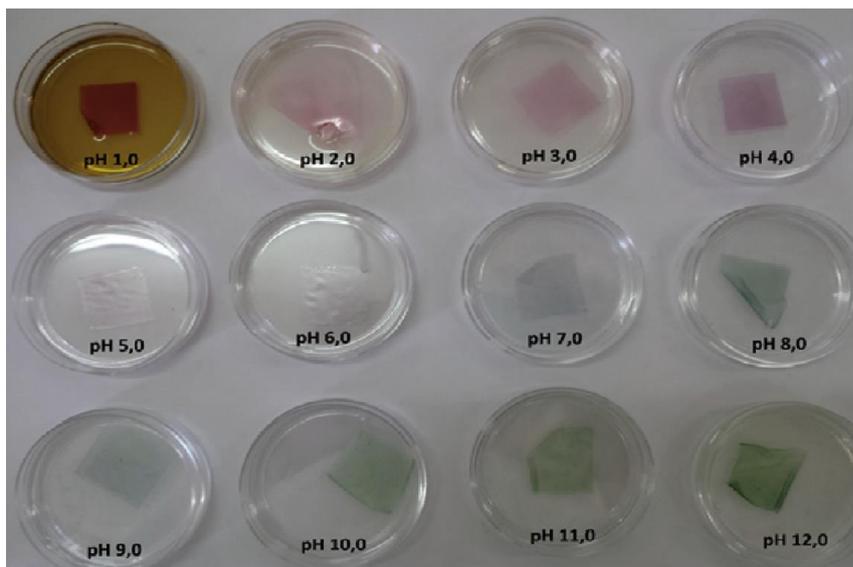


Fonte: Mataragas et. al, 2019. Elsevier, usada com permissão.

ITTs baseados em compostos naturais também podem ser dimensionados, utilizando sua interação com o meio ou com o produto para indicar mudanças na condição do alimento. Uma das formas de interação é a determinação colorimétrica por mudança de pH, utilizando-se de pigmentos naturais de compostos fenólicos ou substâncias conjugadas. O extrato de repolho roxo associado a polímeros naturais como embalagem, por exemplo, pode ser utilizado como um ITT para indicador de qualidade de produtos com mudanças expressivas no pH em diferentes níveis de frescor, como é o caso do leite, por conter antocianinas (PEREIRA JR. et al, 2015). As variações no pH do alimento em contato com o indicador mudam a sua cor,

servindo como um ITT de funcionamento simples e eficiente, como pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 – Resposta colorimétrica do ITT de extrato de repolho roxo em diferentes condições de pH



Fonte: Pereira Jr. Et. al., 2015. Elsevier, usada com permissão.

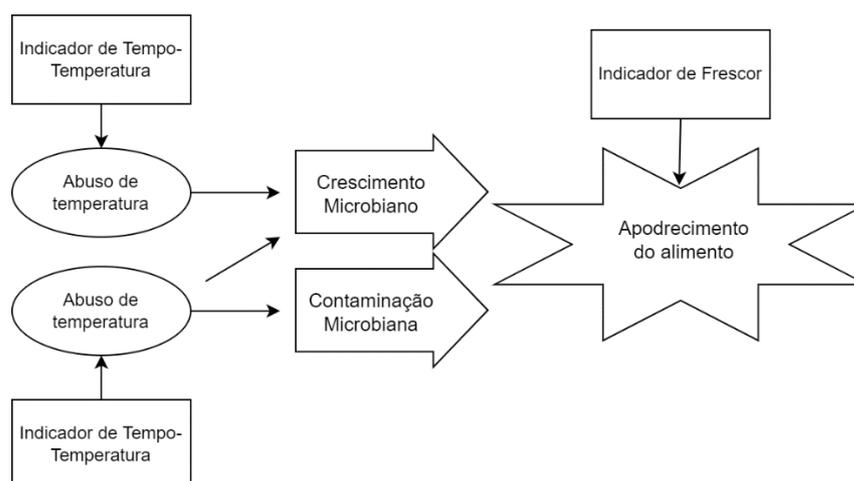
Algumas reações enzimáticas sensíveis à temperatura também podem ser aproveitadas como mecanismo de funcionamento de ITTs, caso as variações na temperatura durante a cadeia de suprimentos não alcancem a temperatura de desnaturação, utilizando compostos que interagem com o produto da reação como indicadores visuais. Por exemplo, Yan et al. desenvolveram um ITT a partir de uma mistura de amilase, amido e iodo, onde a reação entre o amido e o iodo gera a resposta do ITT. Conforme a reação de hidrólise enzimática do amido ocorre, o ITT muda de cor, passando de uma cor azul intensa para incolor. Os parâmetros cinéticos podem ser ajustados modificando as proporções de amilase e amido, o que permite a adaptação do ITT a diferentes tipos de alimento. (YAN et al, 2008)

2.2.2. Indicadores de Frescor

Os Indicadores de Frescor (IFs) são indicadores que monitoram a deterioração e perda do frescor dos alimentos a partir da interação com o ambiente interno da embalagem (SHARROCK, 2012). Diferente dos ITTs e de indicadores de vazamento,

os IFs são indicadores diretos da qualidade, monitorando as reações químicas, enzimáticas e microbiológicas que regem os processos de perda de frescor nos alimentos, reagindo com os metabólitos voláteis e produtos das reações de deterioração, assim dando respostas visuais sobre a qualidade do produto (KALPANA et al, 2019; GHAANI et al, 2016; SMOLANDER, 2003). Uma representação dos diferentes tipos de indicadores pode ser observada na Figura 7, onde os ITTs interagem indiretamente com os fenômenos do alimento, medindo a exposição do alimento à temperatura, e os IFs relacionam-se diretamente, ao interagir com os metabólitos do alimento.

Figura 7 - Relações diretas e indiretas das embalagens inteligentes indicadoras para avaliação da qualidade do alimento



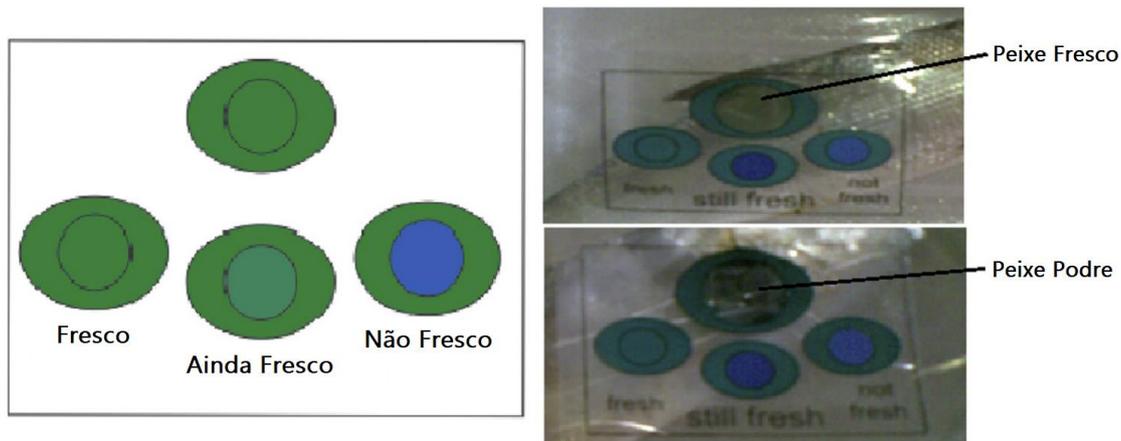
Fonte: adaptado de: Smolander, 2003

Os processos de decomposição dos alimentos resultam em uma ampla variedade de compostos. Por exemplo, a oxidação lipídica em alimentos expostos ao oxigênio pode produzir compostos voláteis, como álcoois, cetonas, ácidos e aldeídos. A atividade bacteriana pode gerar compostos voláteis nitrogenados e sulfurados, como amônia e sulfeto de hidrogênio. O dióxido de carbono é um produto comum da atividade microbiana. Aminas biogênicas, como cadaverina e putrescina, são formadas através da descarboxilação enzimática dos alimentos, enquanto o etanol, o ácido lático e o ácido acético são resultados da fermentação bacteriana. (SMOLANDER, 2003; LABUZA, 1984)

A formação dos diferentes metabólitos exemplificados depende diretamente da natureza do alimento embalado, da flora que contém e do tipo de embalagem. Por isso, o entendimento dos processos que regem os alimentos é essencial para a definição do tipo de IF a ser utilizado, visto que a gama de metabólitos envolvidos na perda de qualidade necessitam de diferentes mecanismos de funcionamento da embalagem inteligente (SMOLANDER, 2003).

A proteólise bacteriana é considerada um dos indicadores primários de deterioração dos alimentos, gerando como produtos aminoácidos livres e compostos nitrogenados, como a amônia (NH_3), gerando odores pútridos (CVEK et al, 2022). O desenvolvimento de IFs que interagem com a amônia é produzido a partir do princípio da mudança de pH na interface do indicador induzido à uma resposta colorimétrica (SMOLANDER et al 2012). Indicadores de amônia a partir de biofilmes com curcumina têm se mostrado promissores, monitorando o frescor de camarões ao mudar a sua cor de amarelo para laranja (CVEK et al, 2022). Filmes de polianilina também foram desenvolvidos como indicadores de amônia para monitoramento do frescor de peixes, ao gerar uma resposta colorimétrica de verde para azul ao mudar seu pH com a concentração de amônia, ilustrado na Figura 8 (KUSWANDI et al, 2012).

Figura 8 – Indicador de amônia (esquerda) e sua aplicação como embalagem inteligente para peixes (direita)



Fonte: KUSWANDI et al., 2012. Elsevier, usada com permissão

O Sulfeto de Hidrogênio (H_2S) é outro composto relacionado à deterioração de alimentos no qual é utilizado para desenvolvimento de IFs. O H_2S é um produto derivado da degradação enzimática de aminoácidos com enxofre e da atividade

microbiana, com odor característico a baixas concentrações (KWON et al. 2022). Sondas fluorescentes a partir de naftalimida como detectores de H₂S adaptadas para monitoramento de frescor em peixes obtêm respostas na fluorescência e na cor perceptíveis ao olho nu, sendo promissora devido à sua alta portabilidade e seletividade ao gás H₂S (XIAO et al, 2021). Indicadores colorimétricos de H₂S a partir de filmes criados a partir de nanocristais de celulose e nanopartículas de prata também foram desenvolvidos para monitoramento de carnes, devido à alta seletividade e sensibilidade à detecção de gases das nanopartículas metálicas (KWON et al., 2022).

O CO₂ também pode ser utilizado como composto para monitoramento da qualidade e do frescor de alimentos ricos em carboidratos, devido à processos fermentativos dos açúcares redutores nos alimentos (SMOLANDER, 2003). Em embalagens que não há ambiente modificado pela adição de CO₂ para redução de deterioração envolvendo oxigênio, o aumento do gás CO₂ pela perda de frescor no alimento pode ser utilizado como mecanismo para desenvolvimento de IFs (SMOLANDER, 2003). Por exemplo, indicadores desenvolvidos utilizando azul de bromotimol ou outros compostos, como o vermelho de clorofenol, podem ser utilizados como princípio ativo dos indicadores de CO₂, tendo respostas colorimétricas às mudanças de pH do ambiente interno da embalagem conforme aumento da concentração de CO₂ (NOPWINYUWONG et al, 2010; ZHANG et al, 2010). Uma embalagem contendo doces tailandeses “Golden Drop”, com um indicador de frescor a partir da concentração de CO₂ pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Doces “Golden Drop” embalados com etiquetas indicadoras de apodrecimento. (Legenda: verde = fresco; laranja = atenção, vermelho = podre)



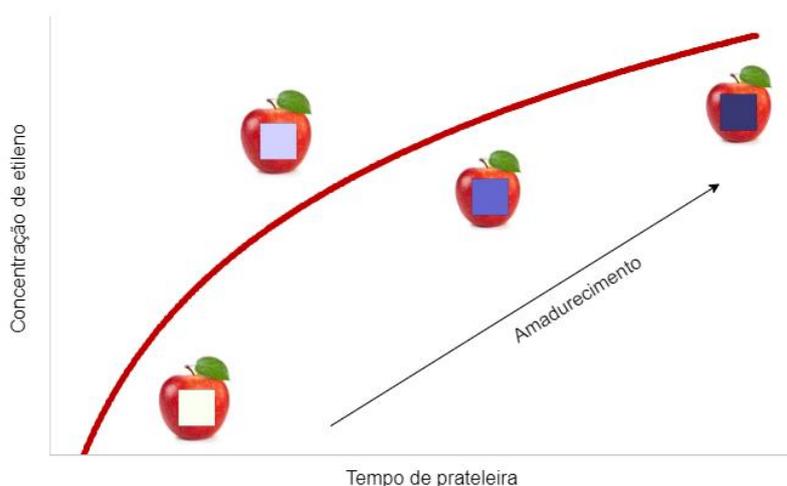
Fonte: Nopwinyuwong et. al., 2010. Elsevier, usada com permissão

Diferente dos indicadores anteriormente citados, os indicadores de frescor baseados em interações com oxigênio não partem do princípio da detecção direta de um metabólito produzido na deterioração do alimento. O oxigênio está diretamente envolvido nas reações oxidativas do processo de deterioração, como a oxidação lipídica, além de promover crescimento de fungos e bactérias aeróbicas (PEREIRA DE ABREU et, al. 2012). Devido a isso, em embalagens seladas, indicadores que monitoram o nível de oxigênio da embalagem são uma estratégia para assegurar que não está ocorrendo vazamento ou para monitorar a difusão do ar da embalagem para o ambiente externo (WON et al, 2016). Vários compostos podem ser utilizados como indicadores de oxigênio, contanto que a resposta seja colorimétrica visível para o consumidor. Indicadores compostos de ácido gálico e acetato de celulose monitoram eficientemente o aumento da presença de oxigênio, ao mudar sua cor de azul para amarelo conforme o aumento da alcalinidade na embalagem (AKHILA et al, 2022). IFs desenvolvidas com mecanismos enzimáticos também podem ser utilizadas. Por exemplo, reações catalisadas por lacases, uma oxidase, podem gerar mudanças colorimétricas, de incolor para marrom, conforme aumento das concentrações de O₂, sendo possível serem utilizadas como IFs (WON et al, 2016).

Os IFs podem ser utilizados não somente como indicadores de frescor de alimentos, mas também como indicadores de amadurecimento em frutas climatéricas. O molibdato de amônia costuma ser utilizado como indicador para amadurecimento,

ao interagir com etileno emitido por frutas climatéricas, formando isopolimolibdatos de cor azul (LANG et al, 2012; WARSIKI, et al, 2017). Então, conforme a fruta amadurece, a concentração de etileno na embalagem acentua, fazendo o indicador mudar de incolor para azul escuro, como pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Processo de amadurecimento de maçãs durante, indicado pela concentração de etileno e a cor do indicador de etileno



Fonte: Adaptado de Lang et. al., 2012.

2.3. Embalagens Ativas

As embalagens ativas são outras das principais áreas emergentes no campo das embalagens alimentícias. Embalagens ativas são definidas como sistemas de embalagem que utilizam ferramentas para aumento do tempo de prateleira, da qualidade, da segurança e da integridade dos alimentos. Os sistemas de embalagem ativas são desenvolvidos para interagir ativamente com os componentes ou o ambiente da embalagem, removendo ou emitindo compostos, retardando o apodrecimento dos alimentos. (AHVENAINEN, 2003; PEREIRA DE ABREU et al, 2012; RODRIGUEZ-AGUILERA et al, 2009; YILDIRIM et al, 2017; WYRNA et al, 2017)

Ao se utilizar uma embalagem ativa, algumas condições devem ser satisfeitas para que se tenha maior clareza de informações para o consumidor (PEREIRA DE ABREU et al, 2012):

- A embalagem deve ser efetiva no seu uso proposto;

- Em condições normais de uso, os materiais envolvidos não devem transferir seus constituintes ao alimento de forma que possa mudar de forma inaceitável a composição ou propriedades organolépticas do alimento ou trazer riscos à saúde humana;
- A embalagem ativa não deve enganar o consumidor mascarando o apodrecimento do alimento;
- A embalagem deve conter todas as informações sobre os usos permitidos, substâncias envolvidas e riscos.

Para o desenvolvimento de embalagens ativas, é necessário conhecer os processos que afetam a atmosfera interna da embalagem, modelando-os matematicamente para adequação do problema. O dimensionamento da embalagem requer a otimização das variáveis que as envolvem, o produto e as suas dimensões (RODRIGUEZ-AGUILERA et al, 2009).

As embalagens ativas geralmente são desenvolvidas com a utilização de filmes poliméricos. Os filmes agem como barreiras de proteção entre o ambiente externo e o produto, controlando os processos de transferência de massa entre o espaço livre da embalagem e a atmosfera externa (RODRIGUEZ-AGUILERA et al, 2009). A difusão dos gases no filme pode ser dimensionada utilizando diferentes abordagens matemáticas para explicar a transferência de massa. Uma das abordagens é a combinação entre a equação de Fick, que se aplica à difusão dos gases através do filme, e a abordagem de Stephan-Maxwell, que se aplica ao transporte de gases através de microfuros no filme. A difusão de gases é descrita pela Equação 4, enquanto o transporte de gases através dos microfuros é descrito pela Equação 5.

$$J_{fi} = -D_{fi} \cdot \frac{\partial C_i}{\partial x} \quad (4)$$

$$-\frac{P}{RT} \cdot \frac{\partial Y_i}{\partial x} = \sum_{i \neq j}^x \frac{J_j \cdot y_j - J_p \cdot y_i}{D_{ij}} \quad (5)$$

Aonde D_{fi} é a difusividade do gás, C_i a concentração do gás i , x a posição do gás na espessura do filme, R a constante universal dos gases, P a pressão atmosférica, T a temperatura de armazenamento, y_i a concentração do gás i , J_{fi} o fluxo de transferência dos gases no filme, J_j a troca de gás através do filme polimérico, J_p a troca de gás através do microfuro e D_{ij} a difusividade do gás i no gás j (RODRIGUEZ-

AGUILERA et al, 2009). O comportamento dos gases então pode ser explicado por meio da composição do fenômeno de difusão através do filme e através dos poros do filme.

Os processos que envolve a produção de compostos na atmosfera interna da embalagem também devem ser modelados matematicamente. Por exemplo, a respiração aeróbica nos alimentos consome O_2 através de uma série de processos enzimáticos, produzindo moléculas simples através da quebra oxidativa de substratos orgânicos, como carboidratos, e produzindo gás carbônico. A respiração aeróbica é dependente da temperatura e pode ser modelada através da equação de Arrhenius (Equação 6). A composição dos gases também influencia a respiração aeróbica, e modelos cinéticos enzimáticos também podem ser aplicados para explicar o fenômeno, como o modelo cinético com inibição competitiva (Equação 7) (RODRIGUEZ-AGUILERA et al, 2009).

$$R_i = R_{ref} \cdot \exp \left[-\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (6)$$

$$R_{O_2} = \frac{V_m \cdot y_{O_2}}{K_m \left(1 + \frac{y_{CO_2}}{K_c} \right) + y_{O_2}} \quad (7)$$

Onde R_i é a taxa de respiração, T a temperatura de armazenamento, R_{ref} a taxa de respiração em uma temperatura de referência T_{ref} , E_a a energia de ativação, R a constante universal dos gases, R_{O_2} a taxa de produção de O_2 na respiração, y_{O_2} a concentração de O_2 na atmosfera da embalagem, y_{CO_2} a concentração de CO_2 na atmosfera da embalagem, e V_m , K_m e K_c parâmetros cinéticos da reação.

Como várias reações fazem parte do processo de apodrecimento dos alimentos, como a oxidação lipídica ou o crescimento microbológico (SMOLANDER, 2003; LABUZA, 1984), diferentes soluções são propostas e desenvolvidas baseado no processo a ser atacado. Por exemplo, em alimentos que a oxidação seja um grande problema, embalagens ativas que removam o oxigênio da atmosfera interna retardaria o processo de apodrecimento (DEY et al, 2019); caso o problema seja crescimento microbiano, embalagens ativas com emissão de agentes bioativos antimicrobianos podem ser utilizadas (IRKIN et al, 2015).

As embalagens ativas, então, podem ser divididas em embalagens absorvedoras e embalagens emissoras.

2.3.1. Embalagens absorvedoras

As embalagens absorvedoras são embalagens ativas desenvolvidas com o objetivo de remover compostos indesejáveis de dentro do ambiente da embalagem, melhorando as condições internas da embalagem prolongando o tempo de prateleira do alimento. As embalagens absorvedoras, então, não interagem diretamente com o alimento, e sim com o espaço-livre da embalagem, realizando a manutenção dos gases existentes. (WYRNA et al, 2017)

A cinética de funcionamento dos absorvedores está diretamente ligada à composição da embalagem ativa, do composto que deseja ser absorvido e das reações que regem o sistema embalagem-atmosfera. Por exemplo, absorvedores de O₂ contém compostos ferrosos que são oxidados, retirando o O₂ da atmosfera interna da embalagem, seguindo uma reação de absorção de primeira ordem (PEREIRA DE ABREU et al, 2012; CHARLES et al, 2006). No entanto, a estrutura e funcionamento complexo dos fenômenos que regem o apodrecimento dos alimentos podem afetar o funcionamento previsto da embalagem absorvedora (YILDIRIM et al, 2017).

A ordem cinética da reação de adsorção e os parâmetros cinéticos dos sistemas absorvedores podem ser modelados e definidos experimentalmente através do estudo do comportamento da concentração do composto a ser absorvido em função do tempo, através de um gráfico do logaritmo natural da concentração em função do tempo (TEWARI et al, 2002; CHARLES et al, 2006). Para uma reação de primeira ordem, por exemplo, a constante cinética de absorção do sistema absorvedor pode ser calculada a partir da regressão linear da Equação 8, e a reação segue um modelo de Arrhenius, de acordo com a Equação 9, aonde a energia de ativação e a constante A podem ser calculadas (TEWARI et al, 2002; CHARLES et al, 2006; GAONA-FORERO et al, 2018).

$$\ln[A]_t = -kt + \ln[A]_0 \quad (8)$$

$$\ln(k) = \left(\frac{-E_a}{R}\right)\left(\frac{1}{T}\right) + \ln(A) \quad (8)$$

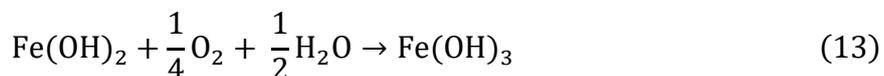
Uma ampla variedade de sistemas absorvedores foi desenvolvida até o momento, e dependendo da aplicação, ela está associada à absorção de oxigênio, etileno, dióxido de carbono ou umidade (WYRNA et al, 2017).

2.3.1.1 Embalagens absorvedoras de Oxigênio

O oxigênio (O₂) na atmosfera interna da embalagem é, na maior parte das vezes, indesejável. A sua presença acelera o apodrecimento de alimentos, aumentando a respiração aeróbica do alimento, a oxidação lipídica e o crescimento de microrganismos aeróbicos (PEREIRA DE ABREU et al, 2012; FIROUZ et al, 2021; LABUZA, 1984).

A presença de O₂ nas embalagens está associada ao processo de embalamento do produto. Fatores como a presença do alimento, a evacuação insuficiente ou inadequada, o material da embalagem, a entrada de ar devido à má vedação e a difusão pelo filme que envolve a embalagem podem levar a níveis indesejáveis para o produto (PEREIRA DE ABREU et al, 2012).

Os absorvedores de O₂ possuem diversos mecanismos de ação. Os mais comuns no mercado são os absorvedores de O₂ por sachês contendo pós de compostos ferrosos (DEY et al, 2019). Por exemplo, absorvedores à base de ferro foram testados para conservação de maçãs recém cortadas, mostrando-se efetivos em comparação às embalagens sem a embalagem ativa (DI MAIO et al, 2015). O seu princípio de funcionamento é a oxidação do ferro a partir de um ácido de Lewis, reagindo irreversivelmente em hidróxido de ferro (III), seguindo o mecanismo reacional a seguir (CHARLES et al, 2006; DEY et al, 2019):



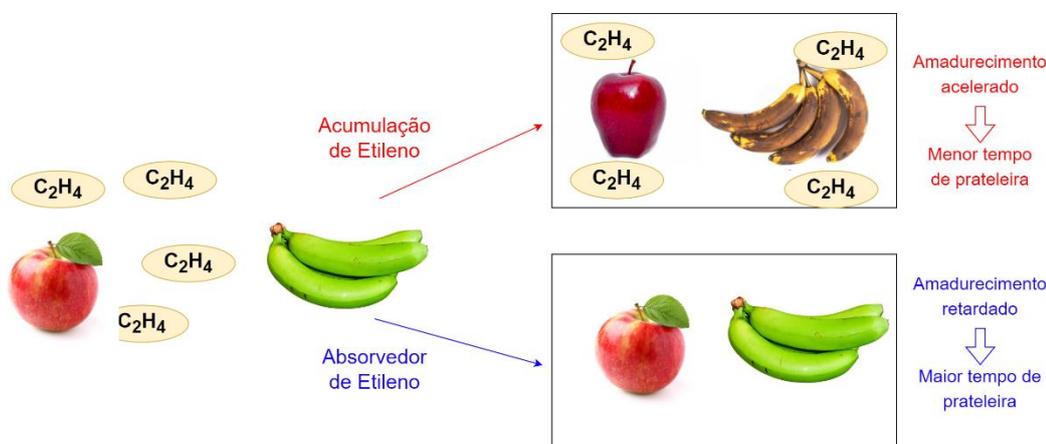
Reações enzimáticas também podem ser utilizadas como mecanismo para a absorção de O₂. Por exemplo, a lacase é uma enzima que catalisa reações de oxidação de vários substratos orgânicos, por meio da captura de 1 elétron. Absorvedores de oxigênio a partir de uma mistura de lacase e de derivados da lignina, como substrato, foram desenvolvidos e as suas taxas de absorção de O₂ medidas, com resultados favoráveis para a utilização na conservação de alimentos. (JOHANSSON et al, 2014)

Polímeros com atividade oxidativa podem ser utilizados como absorvedores de O₂. O polibutadieno é um polímero sintético com alta capacidade de oxidação, ocorrendo diversos mecanismos reacionais simultâneos em contato com o oxigênio (LI et al, 2012). Propriedades de absorção de O₂ do polibutadieno foram estudadas, após processos de retirada de antioxidantes do polímero obtido de forma comercial, e o polímero tem se mostrando uma alternativa simples para o desenvolvimento de absorvedores de O₂, obtendo rendimentos de 15% wt de absorção de O₂, com o processo oxidativo ocorrendo em cerca de uma semana (LI et al, 2012).

2.3.1.2 Embalagens absorvedoras de Etileno

O etileno (C₂H₄) é um hidrocarboneto volátil com enorme significância na fisiologia vegetal. O etileno é um hormônio vegetal que produz respostas fisiológicas nas plantas, como o geotropismo, senescência, amadurecimento, dormência e floração (GAIKWAD et al, 2020). O controle do etileno na atmosfera, então, é essencial para o prolongamento do tempo de prateleira pós colheita de frutas. Absorvedores de etileno podem ser utilizados para esse objetivo, como apresentado na Figura 11 (GAIKWAD et al, 2020).

Figura 11 – Efeitos da acumulação de etileno pós colheita e o uso de absorvedores de etileno no tempo de prateleira de frutas frescas



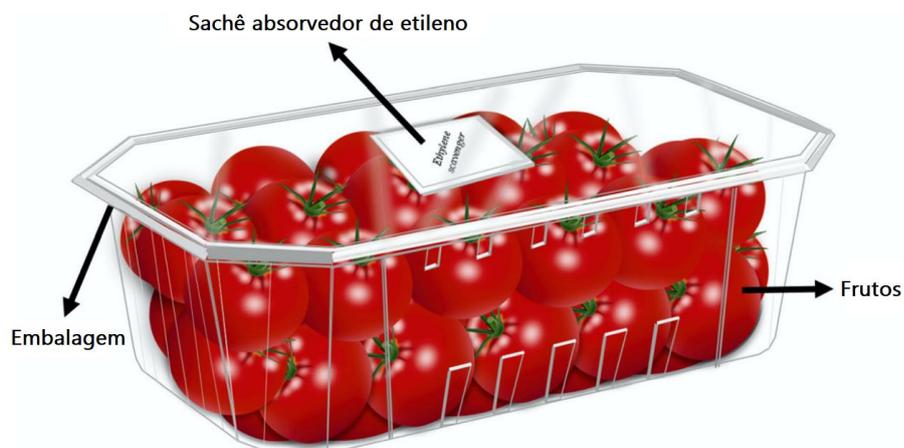
Fonte: Adaptado de Gaikwad et. al, 2020

A tecnologia mais utilizada como absorvedora de etileno em embalagens ativas é o uso de permanganato de potássio (KMnO_4), um agente que oxida o etileno, transformando-o em CO_2 e água (FIROUZ et al, 2021; PEREIRA DE ABREU et al, 2012; GAIKWAD et al, 2020). A reação de oxidação do etileno pelo KMnO_4 está descrita a seguir:



O permanganato de potássio tem apresentado alta eficiência no aumento do tempo de prateleira de frutas climatéricas (que amadurecem após colheita por meio da ação do etileno) ao retardar seu amadurecimento, sendo geralmente utilizados em forma de sachês (ALVAREZ-HERNANDEZ, et al, 2019), como pode ser visto na Figura 12. O uso de sachês de KMnO_4 para absorção de etileno em embalagens contendo tomates-cereja aumentou o tempo de prateleira de 6 para cerca de 28 dias, armazenado a 11°C (ALVAREZ-HERNANDEZ, et al, 2021). A utilização de absorvedores de etileno em embalagens com goiabas também se mostrou eficiente, estendendo o tempo de prateleira em até 32 dias (MURMU et al, 2018).

Figura 12 – Representação esquemática de um sachê absorvedor de etileno usado em embalagens para produção horticultural



Fonte: Adaptado de Alvarez-Hernandez et. a., 2021

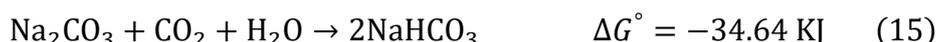
Outros sistemas de absorção de etileno podem ser utilizados com base na capacidade de adsorção física do etileno pelo material utilizado no absorvedor. Materiais como carvão ativo, zeólitos e argilas contém estruturas microporosas com capacidade acentuada de adsorção de etileno, então sistemas absorvedores as contendo isoladamente ou com agentes oxidantes auxiliares podem ser utilizados (FIROUZ et al, 2021; PEREIRA DE ABREU et al, 2012; GAIKWAD et al, 2020). Por exemplo, argilas sepiolitas incorporadas em biopolímeros foram utilizadas como absorvedor de etileno em brócolis embalado, aumentando o tempo de prateleira do produto ao reduzir a perda de massa e conservando a firmeza dos brócolis (UPAHYAY et al, 2022).

2.3.1.3 Embalagens absorvedoras de CO₂

Os absorvedores de dióxido de carbono (CO₂) são sistemas de embalagens ativas menos utilizados no mercado comparado aos outros descritos, como os de O₂. O CO₂ costuma ser um composto desejável para atmosferas modificadas de embalagens, inibindo o crescimento de microrganismos e retardando a respiração aeróbica do alimento. No entanto, devido à algumas categorias de alimentos, reações com produção de CO₂, como a fermentação láctica e alcoólica, podem gerar um

aumento da pressão interna da embalagem, causando aumento de pressão em embalagens rígidas e aumento de volume em embalagens flexíveis, com risco na integridade da embalagem e do produto. As embalagens absorvedoras de CO₂ podem ser desenvolvidas a partir de dois mecanismos, por meio de absorventes químicos ou absorventes físicos. (SHIN et al, 2002; LEE, 2016; CHARLES et al, 2006).

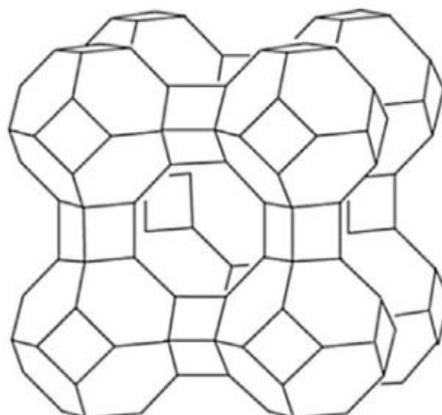
Muitas soluções e sais alcalinos possuem potencial para remoção do CO₂. Essas reações contêm energias livre de Gibbs negativas, evidenciando potencial para remoção espontânea de CO₂. Alguns dos sais e óxidos absorventes são o óxido de cálcio (CaO), carbonato de sódio (NaCO₃), hidróxido de magnésio (Mg(OH)₂) e hidróxido de Cálcio (Ca(OH)₂) (SHIN et al, 2002). As reações de absorção de CO₂, e suas respectivas energias livre de Gibbs estão representadas abaixo.



Desses compostos, o mais utilizado em embalagens alimentícias é o hidróxido de cálcio, pois na forma sólida o composto é seguro em contato com alimentos e a reação é altamente espontânea, com uma taxa de absorção desejável (LEE, 2016).

Adsorvedores físicos também podem ser utilizados como mecanismo primário de absorção de CO₂ ou como auxiliares dos absorvedores químicos. Zeólitas podem ser utilizados na composição da embalagem ativa para esse fim. Zeólitas são aluminossilicatos cristalinos com estrutura tridimensional contendo cavidades no meio da estrutura com capacidade de absorver moléculas de gás, e sua capacidade de absorção é definida pelo tipo de zeólito e a temperatura de armazenamento (LEE, 2016). A estrutura de um zeólito tipo 4A, assim como as suas cavidades na estrutura, estão representadas na Figura 13.

Figura 13 – Estrutura de um zeólito do tipo 4A



Fonte: Lee, 2016. Elsevier, usada com permissão

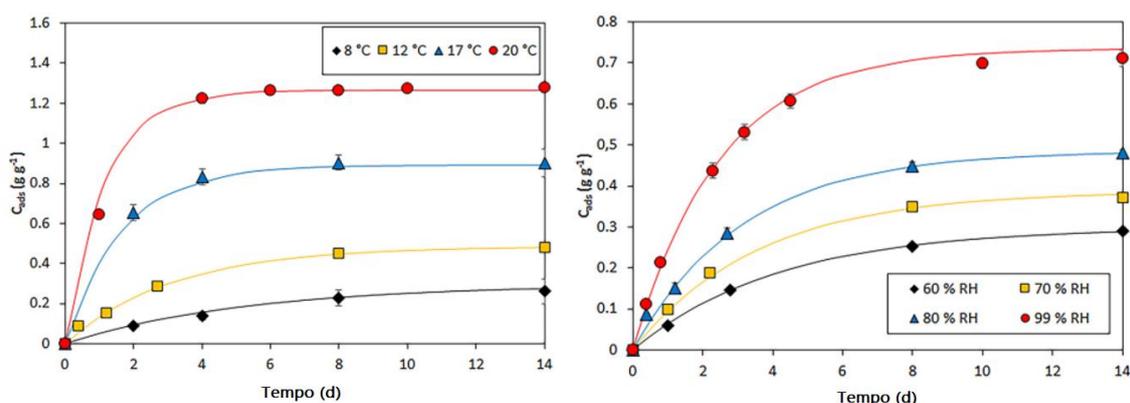
A união de mecanismos químicos e físicos de absorção no desenvolvimento de embalagens absorvedoras de CO₂ tem se mostrado promissora. Por exemplo, o Kimchi é um alimento a base de repolho chinês temperado, no qual é fermentado laticamente por meio de ação bacteriana natural. O produto é embalado em sacos plásticos ou jarras de vidro, e a produção de CO₂ atrelada à fermentação reduz o tempo de prateleira devido à integridade física do pacote. Por isso, foram desenvolvidos absorvedores de CO₂ a partir da mistura de Ca(OH)₂ e zeólitos do tipo 4A para essa finalidade, apresentando boas reduções na pressão parcial do CO₂ na embalagem (SHIN et al, 2002).

2.3.1.4 Embalagens absorvedoras de umidade

A umidade é um dos parâmetros mais críticos para a conservação de alimentos, podendo reduzir drasticamente a qualidade do produto. Umidade relativa excessiva na embalagem pode aumentar a atividade metabólica de alimentos como carnes, frutas e vegetais, e acelerar o crescimento e atividade microbiológica dentro da embalagem, causando uma redução do tempo de prateleira por apodrecimento do produto (FIROUZ et al, 2021). Além disso, altos níveis de umidade podem trazer o amolecimento ou perda de textura de alimentos secos ou crocantes, como biscoitos, e a aglomeração e endurecimento de produtos em pó, como o leite em pó (PEREIRA DE ABREU et al, 2012).

O mecanismo de ação dos sistemas absorvedores de umidade é baseado no processo de adsorção física, por meio de agentes altamente higroscópicos e desidratantes, reduzindo o excesso de líquido ou controlando a umidade da embalagem (PEREIRA DE ABREU et al, 2012). A escolha do material absorvedor deve ser adequada para cada tipo de alimento a ser embalado, aonde o sistema absorvedor deve ter taxas de adsorção moderadas, para evitar a redução excessiva da umidade relativa, e alta capacidade de adsorção. Depois disso, o desempenho do material deve ser avaliada para diferentes níveis de umidade relativa e temperatura, fatores que influenciam nas taxas e na capacidade de adsorção (GAONA-FORERO et al, 2018). O efeito da temperatura e da umidade relativa nos sistemas absorvedores de umidade podem ser vistos a partir dos gráficos na Figura 14; maiores temperaturas e maiores umidades relativas aumentam a capacidade adsorvedora do material, tornando-os os parâmetros chave para dimensionamento e escolha do sistema.

Figura 14 – Concentração de água absorvida pelo absorvedor em função do tempo em diferentes temperaturas a 80% RH (esquerda) e diferentes RH a 12°C (direita)



Fonte: Gaona-Forero et. al., 2018. Elsevier, usada com permissão

Os materiais que podem ser utilizados como sistemas absorvedores de umidade são vários. Dessecantes como sílica gel, argilas e sais umectantes podem ser utilizados, sendo escolhidos a partir dos parâmetros explicados. Por exemplo, sachês de gel sílica foram utilizados para manutenção da umidade de embalagens

contendo goiabas (MURMU, 2018) e saches contendo solução de sais saturados podem ser utilizados para manter a umidade relativa de embalagens contendo queijos (PANTALEÃO et al, 2007). Materiais orgânicos, também podem ser utilizados. A frutose e a celulose, por exemplo, são materiais que podem ser utilizados como absorvedores de umidade, devido sua alta capacidade higroscópica (GAIKWAD et al, 2019).

2.3.2. Embalagens emissoras

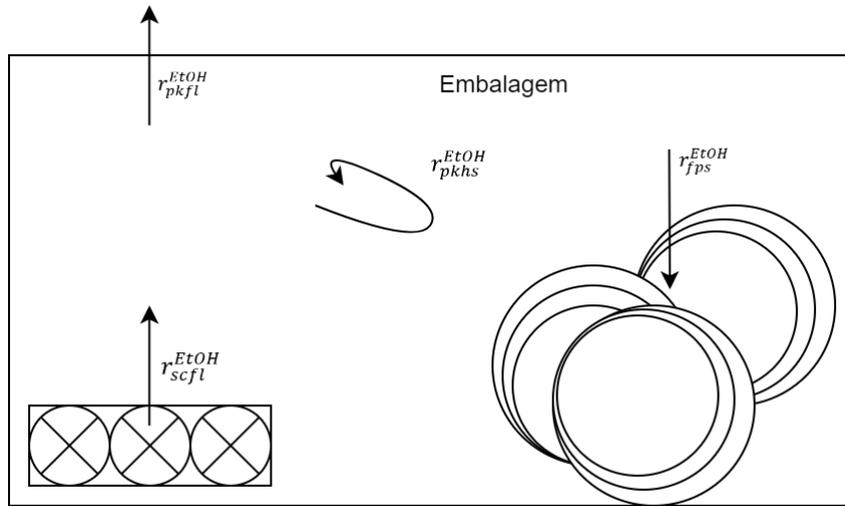
As embalagens emissoras são embalagens ativas desenvolvidas com o objetivo de liberar compostos desejáveis que presentes ao ambiente da embalagem, melhorando as condições internas e o tempo de prateleira do alimento. Os compostos liberados geram sempre impacto positivo no alimento, ao manter condições estáveis na atmosfera interna da embalagem, retardando ou inibindo processos indesejáveis para o alimento, como o metabolismo do alimento e o crescimento microbiológico (WYRNA et al, 2017).

Da mesma forma que as embalagens absorvedoras, a cinética de emissão dos compostos dos sistemas emissores está diretamente ligada ao mecanismo reacional do material que o sistema é feito. Por exemplo, emissores de CO₂ podem ser desenvolvidos a partir de bicarbonato de sódio (NaHCO₃) e ácido cítrico, onde reagem com o líquido do produto, liberando CO₂ na atmosfera da embalagem e formando citrato de sódio (FIROUZ et al, 2021). Da mesma forma, as dimensões da embalagem, do sistema emissor e do alimento, assim como a complexidade de fenômenos simultâneos que regem o apodrecimento do alimento pode afetar na sua performance.

Para os sistemas emissores, a ordem de reação pode ser definida analogamente aos sistemas absorvedores. As curvas cinéticas das reações de emissão são dependentes da temperatura seguindo a equação de Arrhenius (MU et al, 2017; VILAS et al, 2020; CERISUELO et al, 2012). Dentro da atmosfera da embalagem e no filme em que o alimento é embalado, a difusão do material emitido pode ser modelada a partir da equação de Fick, utilizando as premissas e hipóteses pertinentes para a embalagem e o sistema emissor utilizado (VILAS et al, 2020; CERISUELO et al, 2012). Um modelo conceitual e o modelo matemático de uma embalagem ativa com sistema emissor de etanol pode ser visto na Figura 15, onde

estão representados os fenômenos de emissão, absorção do composto ativo pelo alimento, a difusão do etanol na atmosfera interna da embalagem e a difusão do etanol no filme. O modelo matemático global prediz a concentração de vapor de etanol acumulado na embalagem (UTTO et al, 2018).

Figura 15: Fenômenos-chave de transporte de vapor de etanol dentro da embalagem ativa



Fonte: Adaptado de Utto et al, 2018.

$$\begin{aligned}
 V_{pkg} \frac{\partial C_{pkhs}^{EtOH}}{\partial t} = & \frac{P_{scfl,0}^{EtOH} A_{scfl} RT_{pkg}}{L_{scfl} b_{scfl}^{EtOH}} (\exp(C_{g,bed}^{EtOH} \cdot b_{scfl}^{EtOH}) \\
 & - \exp(C_{pkhs}^{EtOH} \cdot b_{scfl}^{EtOH})) - \frac{P_{pkfl,0}^{EtOH} A_{pkfl} RT_{pkg}}{L_{pkfl} b_{pkfl}^{EtOH}} (\exp(C_{pkhs}^{EtOH} \cdot b_{pkfl}^{EtOH}) \\
 & - \exp(C_{env}^{EtOH} \cdot b_{pkfl}^{EtOH})) - k_{fps,react}^{EtOH} \cdot C_{pkhs}^{EtOH} \cdot M_{fps} \quad (17)
 \end{aligned}$$

Aonde r_{pflk}^{EtOH} representa o fenômeno de transferência do etanol através do filme da embalagem, r_{scfl}^{EtOH} a emissão de etanol pelo emissor, r_{fps}^{EtOH} a absorção de etanol pelo alimento e r_{pkhs}^{EtOH} a convecção do etanol dentro da embalagem.

Visando o retardamento dos fenômenos de perda de qualidade e apodrecimento dos alimentos, as embalagens emissoras podem ser divididas em

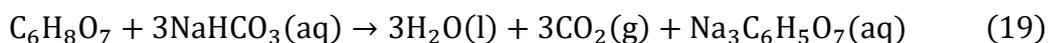
quatro soluções principais: os emissores de CO₂, os de etanol, os de antioxidantes e os de compostos antimicrobianos.

2.3.2.1. Embalagens emissoras de CO₂

Para controle da composição da atmosfera interna de embalagens com atmosfera modificada, emissores de CO₂ são empregados. Os tipos de alimento nos quais as embalagens emissoras de CO₂ são utilizadas são as com alta atividade aeróbica, sendo principalmente empregadas em embalagens com carnes vermelhas, de aves e de peixes (HANSEN et al, 2009; HOLCK et al, 2014; RODE et al, 2021; TSIRONI et al, 2019).

Atmosferas com alta concentração de CO₂, como visto anteriormente, são altamente efetivas para o controle microbiológico dos alimentos, reduzindo o crescimento de bactérias e fungos aeróbicos aumentando a fase *lag* da sua cinética de crescimento (FIROUZ et al, 2021). Por isso, emissores de CO₂ são utilizados para manter a atmosfera com níveis de CO₂ altos, visto que o potencial de inibição do crescimento microbiológico é proporcional a pressão parcial de CO₂ na embalagem, como pode ser visto na Equação 7 (RODRIGUEZ-AGUILERA et al, 2009).

O mecanismo principal dos emissores de CO₂ se baseia na utilização de sachês contendo bicarbonato de sódio (NaHCO₃) e Ácido cítrico. A reação ocorre de acordo com o princípio de Le Chatelier, aonde a mistura, em contato com líquidos da atmosfera interna da embalagem, reduz seu pH e a produção de CO₂ começa a partir da Reação a seguir (FIROUZ et al, 2021):



O uso dos emissores de CO₂ são altamente efetivos para o aumento do tempo de prateleira. Embalagens com alta pressão mantidas por emissores de CO₂ tem se mostrado eficientes no armazenamento de peixes reidratados, podendo-se armazená-los por mais de 49 dias (RODE, et al, 2021). Modelagens matemáticas de emissores de CO₂ também mostraram a eficiência da ferramenta para armazenamento de peixes frescos, aumentando significativamente o tempo de prateleira de peixes badejo (TSIRONI et al, 2019), conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Resultados da modelagem matemática do tempo de prateleira de peixes badejo embalados em atmosfera modificada e em atmosfera modificada mais emissor de CO₂, em temperaturas de 0, 5 e 10°C

Temperatura de Armazenamento	Tempo de Prateleira (d)		
	0°C	5°C	10°C
Atmosfera Modificada	18	10	6
Atm. Modificada + Emissor de CO₂	22	17	10

Fonte: Adaptado de Tsironi et al, 2019, usada sob licença Creative Commons CC-BY

2.3.2.2. Embalagens emissoras de Etanol

O etanol pode ser utilizado como material para aumento do tempo de prateleira de produtos propensos a ter atividade microbiana. O etanol consegue reduzir a atividade da água e agir como agente microbiano, afetando positivamente o alimento embalado (FIROUZ et al, 2021; UTTO et al, 2018).

O mecanismo de funcionamento parte não de um processo químico, mas físico. Sachês de gel sílica pré adsorvidos com etanol funcionam como emissores, com picos de emissão de etanol nas primeiras horas devido à sua saturação (UTTO et al, 2018; FRANKE et al, 2002). Outros métodos para emissão de etanol podem ser empregados, como etanol em gel pré encapsulado em sachês, permitindo a emissão gradual do vapor etanólico (HEMPEL et al, 2013).

O uso de emissores de etanol para alimentos tem se mostrado promissor. O uso de emissores de etanol para aplicação em pães embalados mostrou um retardo na ocorrência visual de mofo, aumentando o período de 5 para 30 dias (HEMPEL et al, 2013), enquanto seu uso para conservação de queijos mostrou um aumento de 8 a 8,5 semanas de tempo de prateleira (MEXIS et al, 2011).

2.3.2.3. Embalagens emissoras de Antioxidantes

A oxidação lipídica é um dos fenômenos mais importantes que geram apodrecimento de alimentos na cadeia de suprimento. A oxidação lipídica reduz o

tempo de prateleira do produto ao deteriorar a textura e funcionalidade de carnes, provocar redução da qualidade nutricional e de mudanças no sabor e no odor (PEREIRA DE ABREU et al, 2012).

Radicais livres altamente reativos são formados devido à presença do CO₂ e são reagentes para as reações de oxidação. Então, a oxidação lipídica pode ser evitada por meio de agentes que removem radicais livres de forma rápida e eficiente (antioxidantes) (PEREIRA DE ABREU et al, 2012).

Antioxidantes de extratos naturais, na maior parte das vezes, podem ser utilizados incorporados em filmes plásticos ou biofilmes em contato com o alimento, melhorando o tempo de prateleira ao retardar o mecanismo de oxidação dos alimentos. Evidências indicam que filmes de polietileno contendo resverastrol podem aumentar significativamente o tempo de prateleira de carnes (BUSOLO et al, 2015); filmes contendo extrato de chá verde testado em um período de 16 meses também se mostraram eficientes na redução da taxa de oxidação de vários alimentos, como amendoins e cereais cobertos com chocolate, mostrando o potencial da tecnologia (CARRIZO et al, 2015).

2.3.2.4. Emissores de Antimicrobianos

Durante a cadeia de suprimentos e o processo de embalagem dos alimentos, o processamento ou colheita inadequada do alimento ou processamento inadequado da embalagem trazem riscos de contatos com contaminantes externos que podem afetar a integridade do alimento, como o contato com bactérias e outros microrganismos patológicos ou que podem apodrecer os alimentos (PEREIRA DE ABREU et al, 2012; KHANEGHAH et al, 2018). Substâncias com atividade microbiana em sistemas de embalagens emissoras podem ser utilizadas para evitar o crescimento desses microrganismos, aumentando significativamente o tempo de prateleira dos alimentos.

Várias classes de compostos ou extratos podem ser utilizadas como mecanismo para emissão de antimicrobianos. A utilização de ácidos orgânicos, como o ácido sórbico, reduz o crescimento de fungos e bactérias, ao liberar prótons e ânions

que não se transportam na membrana plasmática desses microrganismos (KHANEGHAH et al, 2018).

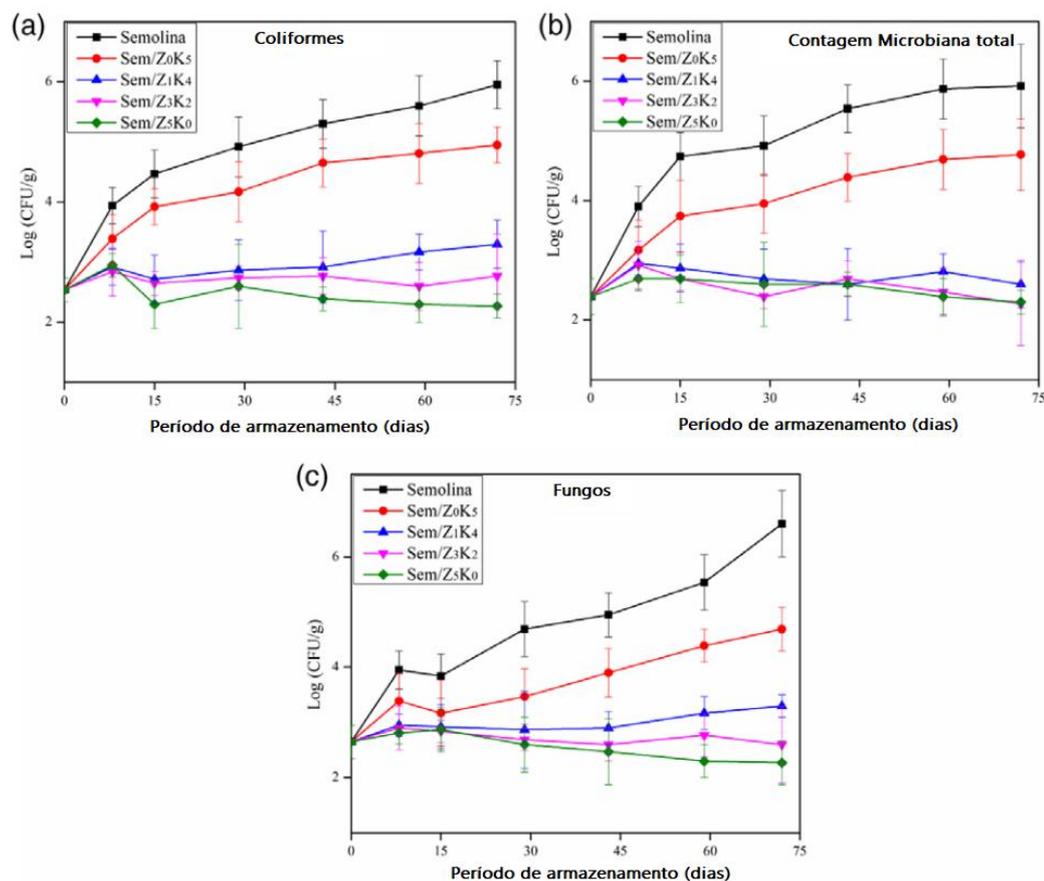
Óleos essenciais naturais podem ser utilizados como agentes antimicrobiológicos em embalagens emissoras. Terpenóides oxigenados, aldeídos e fenóis afetam negativamente o crescimento microbiológico, ao interagir com a membrana lipídica dos microrganismos, devido a hidrofobicidade (KHANEGHAH et al, 2018).

A quantidade de compostos que são englobados pelo conceito de antimicrobianos podem gerar também uma grande quantidade de tecnologias de embalagens emissoras desses compostos.

Compostos antimicrobianos, como o cinamaldeído, o carvacrol, o eugenol e o crital tem se mostrado eficientes nas aplicações em embalagens ativas, reduzindo a deterioração por microrganismos (CORTÉS et al, 2022). Por exemplo, um bioplástico formado a partir de proteínas do glúten foi desenvolvido incorporado com 10 compostos bioativos, compostos de 8 óleos essenciais e dois agentes ativos (o carvacrol e cinamaldeído). O bioplástico se mostrou efetivo, tendo atividade antimicrobiológica em bactérias gram positivas, gram negativas e fungos como o *C. albicans* e o *A. niger* (GÓMEZ-HEINCKE et al, 2015).

Filmes nanocompostos também se mostram uma tecnologia promissora como emissores de antimicrobianos. Filmes nanocompostos de polímeros e argilas contendo carvacrol como agente ativo se mostraram uma embalagem emissora promissora, com emissão controlada de carvacrol, podendo ser utilizada em alimentos (CAMPOS-REQUENA et al, 2015). Filmes a base de farinha de semolina preparados com nanocaulim e nano-óxido de zinco se mostraram efetivos em embalagens com queijos, mantendo baixos níveis de atividade microbiana, aumentando o tempo de prateleira com propriedades organolépticas aceitáveis de 15-29 dias para até 43 dias (JAFARZADEH et al, 2019), como pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 – Efeitos da embalagem antimicrobiana a base de semolina no crescimento de: (a) bactérias, (b) total de micróbios, e (c) fungos no queijo a $4\pm 1^{\circ}\text{C}$



Fonte: Jafarzadeh et al, 2019. John Wiley and Sons, usada com permissão

3. DISCUSSÃO

3.1. Panorama das embalagens ativas e inteligentes no Brasil

Para compreender o atual potencial e tendências futuras das embalagens inteligentes e ativas no Brasil, é necessário ter uma noção da magnitude do mercado de alimentos no país, principalmente os que mais estão suscetíveis ao perecimento e desperdício, como as frutas e o de carnes.

A fruticultura no Brasil é um mercado de alta importância dentro do setor agropecuário e do setor alimentício, sendo o terceiro maior país produtor de frutas do mundo, perdendo apenas para a China e a Índia (ABRAFRUTAS, 2019). A produção de frutas no país, em 2020, alcançou o patamar de 41 milhões de toneladas de frutas

produzidas, gerando 49,8 bilhões de reais em faturamento (ANUARIO BRASILEIRO DE HORTI E FRUTI, 2022). No entanto, o mercado de exportação não é tão expressivo, sendo exportados cerca de 1 milhão de toneladas de frutas e 970 milhões de dólares, mostrando um forte mercado interno e um grande potencial para crescimento do mercado de exportação (ABRAFRUTAS, 2022).

O mercado frigorífico no Brasil também agrega grande relevância no mercado, sendo um dos principais setores agropecuários brasileiros. Em 2017, o setor de carnes no Brasil respondeu por 31% do PIB do agronegócio, gerando uma quantia de 433 bilhões de reais para o país (FGV, 2018). A exportação de carnes no país também é de grande importância, gerando cerca de 13 bilhões de dólares e 2,25 milhões de toneladas de carne bovina exportadas, por exemplo (ABIEC, 2023).

Durante a cadeia de suprimentos pós colheita e pós abate, os frutos e carnes, como fora apresentado, estão suscetíveis à fatores externos físicos, químicos e microbiológicos que podem afetar a integridade do produto, gerando desperdícios e lixo orgânico. Alimentos que não são consumidos representam um grande desperdício de recursos, não só de matéria-prima, mas também de mão de obra, água, solo e sementes. Isso, por sua vez, acarreta um aumento desnecessário das emissões de gases de efeito estufa. Estima-se que, no mundo, em 2019, 931 milhões de toneladas de desperdício alimentar foram geradas, e que no Brasil são desperdiçados, por ano, cerca de 60kg de alimento per capita (ONU, 2021).

A COVID-19 mostrou a fragilidade dos sistemas alimentares, com aumento da insegurança alimentar, da desnutrição e da pobreza, especialmente entre grupos mais vulneráveis. Essa insegurança alimentar entre adultos e crianças cresceu durante a pandemia de COVID-19, principalmente devido ao aumento nos níveis de desemprego, pobreza e acesso limitado a programas de nutrição escolar após o fechamento das escolas. O desemprego em massa e a súbita interrupção da produção de alimentos elevaram os custos de alimentação, ampliando os níveis de fome devido aos choques econômicos decorrentes da pandemia. Entre o final de 2020 e o início de 2022, houve um acréscimo de 14 milhões de brasileiros em situação de fome, passando a marca de 33 milhões de pessoas nessa realidade (PENSSAN, 2022). Muito além das demandas de um consumidor mais exigente, com a pandemia, avanços no comércio de alimentos tornaram-se ainda mais cruciais para erradicar tanto a fome epidêmica quanto a endêmica.

Formas convencionais de conservação, como a refrigeração ou o congelamento, cujo objetivo é retardar os processos de apodrecimento (MORGADO et al, 2022; CUSTÓDIO, 2017), passam por uma revisão quanto à eficácia no contexto atual. Pensando na geração de valor dos mercados agropecuários no Brasil e na demanda de oferta por produtos frescos, de alta qualidade e com maior tempo de prateleira (melhor controle de preço), o desenvolvimento de novas tecnologias de embalagens é essencial para alcançar patamares mais altos de oferta e demanda. Dentro desses setores, a utilização de embalagens inteligentes e ativas tem grande potencial de aumento, atuando nos seguintes pontos:

- A utilização de embalagens inteligentes dentro da cadeia de suprimentos é um meio com grande eficiência na comunicação das condições do produto no instante da leitura. Com sua utilização, torna-se possível saber as condições de qualidade de frutas e carnes em qualquer momento, gerando um produto com diferencial para o consumidor e uma forma de avaliarmos as condições da cadeia de suprimentos, visando a melhora das condições de transporte e armazenamento;
- Embalagens ativas podem ser utilizadas com grande potencial de aumento do tempo de prateleira e das condições do produto. As embalagens ativas retardam os processos de apodrecimento dos alimentos durante a cadeia de suprimento e o varejo, reduzindo a quantidade de desperdício e lixo orgânico gerado, ao ter um produto de boa qualidade por maior tempo. Com isso, temos também um produto diferencial no mercado, com maior valor relacionado ao aumento do tempo de prateleira.

Ambos os tipos de embalagens podem ser vistos como pequenas unidades individuais de processamento, compartilhando muitos dos fundamentos da engenharia química. Embora produzir mais comida seja importante, esse objetivo se torna inútil se o alimento estragar e o consumidor precisar descartá-lo. Como visto, o papel mais básico da preservação de alimentos é desacelerar, se não eliminar, a atuação de microrganismos na degradação do produto. Qualquer embalagem deve limitar a quantidade de oxigênio e de dióxido de carbono para diminuir o amadurecimento e a deterioração e aumentar a vida útil da comida. Esse controle que deve haver está dentro do domínio do engenheiro químico, que além do conhecimento

técnico-científico, tem também a habilidade prática de resolver problemas que esbarram na viabilidade econômica.

3.2. Embalagens ativas e inteligentes e a Engenharia Química

A pesquisa e desenvolvimento de embalagens ativas e inteligentes têm se mostrado uma área que integra uma grande variedade de mecanismos de funcionamento, atuando em diversos pontos relacionados aos processos de deterioração de alimentos. Ao projetar e dimensionar uma embalagem inteligente ou ativa, observa-se um grande empenho na determinação de modelos físicos que expliquem os fenômenos envolvidos, de forma a conseguir obter os parâmetros físico-químicos dependentes. Dentro desse escopo, há uma grande relação com as competências e habilidades atribuídas ao engenheiro químico.

Dentro do projeto pedagógico do curso da Engenharia Química, apresentado pelo DEQ-UFSCar, núcleos de conhecimento como Fenômenos de Transporte, Ciências dos Materiais e Análise e Simulação de processos Químicos se relacionam fortemente com os conceitos apresentados neste trabalho de graduação. Durante o levantamento da bibliografia sobre o desenvolvimento das embalagens ativas e inteligentes, foi possível constatar uma grande quantidade de conhecimento técnico relacionado ao curso de engenharia química, como:

- A maioria das reações que regem os processos de apodrecimento dos alimentos e os mecanismos das embalagens ativas e inteligentes podem ser modeladas cineticamente a partir da equação de Arrhenius, tornando possível a determinação de parâmetros como a energia de ativação e as condições de temperatura ótimas do alimento a ser embalado;
- No que tange a transferência de massa, observa-se as embalagens inteligentes interagem diretamente com o alimento, emitindo ou absorvendo compostos liberados nos processos de apodrecimento. Com isso, viu-se que é possível modelar matematicamente o funcionamento da difusão dos compostos envolvidos por meio de equações de difusão como a lei de Fick e a abordagem de Stephan-Maxwell;
- As reações bioquímicas que regem os processos de apodrecimento dos alimentos, em sua maioria, reações microbiológicas ou catalisadas por

enzimas, podendo ser modeladas por modelos cinéticos enzimáticos, como a equação de Michaelis-Menten;

- É possível ainda observar uma grande quantidade de categorias de embalagens e compostos utilizados, apresentando uma gama considerável de soluções para o problema da conservação de alimentos, mostrando um grande potencial na área da engenharia de materiais;
- A partir dos fenômenos modelados com as hipóteses de simplificação pertinentes para solução do problema, é possível montar problemas de otimização, obtendo as melhores condições de temperatura, pressão, composição da atmosfera interna da embalagem e formato das embalagens ativas e inteligentes.

Dentro das competências do Engenheiro Químico, também apresentadas no projeto pedagógico do curso, alguns pontos-chave se conectam diretamente com o escopo do desenvolvimento de embalagens ativas, como:

“5 - Absorver, produzir, aprimorar, implantar, avaliar e disseminar tecnologias em áreas como as de biotecnologia, materiais compostos, proteção ao meio ambiente, entre outras”

“12 - Operar com dados e formulações matemáticas e estatísticas presentes nas relações formais e causais entre fenômenos produtivos, administrativos e de controle, relacionados às indústrias químicas, petroquímicas, de alimentos e correlatas.”

“22 - Avaliar as possibilidades atuais e futuras da profissão; preparar-se para atender às exigências do mundo do trabalho em contínua transformação, com visão ética e humanitária; vislumbrar possibilidades de aperfeiçoar e ampliar as formas de atuação profissional, visando atender as necessidades sociais.”

A partir dos três pontos levantados, é claro o potencial da engenharia química no desenvolvimento de novas tecnologias de embalagem, utilizando-se de informações, princípios e conceitos vistos com afincamento dentro da graduação, e gerando novas possibilidades de contribuição profissional no comércio de alimentos.

4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este trabalho de graduação teve como objetivo a realização de uma revisão bibliográfica sobre as principais contribuições para o desenvolvimento de embalagens ativas e inteligentes, analisando os mecanismos de funcionamento que as englobam e relacionando-as com os princípios da engenharia química.

As embalagens inteligentes são a área da ciência e tecnologia que estudam sistemas que monitoram mudanças internas e externas do ambiente da embalagem, dando informações sobre a qualidade e a segurança do produto no momento da observação. A revisão identificou que elas se desenvolveram em duas categorias principais, a dos indicadores de tempo-temperatura (ITTs) e a dos indicadores de frescor (IFs).

Os ITTs são indicadores que monitoram o efeito cumulativo da temperatura de armazenamento no produto, durante toda a sua cadeia de suprimentos. Os IFs são indicadores que, por meio de interação com metabólitos voláteis produzidos pelo alimento, indicam a qualidade do produto. As embalagens inteligentes se revelaram uma tecnologia adequada para o monitoramento de alimentos embalados, dando meios para o consumidor identificar as condições da cadeia de suprimentos, indicando, também, se o alimento foi armazenado por muito tempo ou em condições adversas. Trata-se, pois, de uma possível alternativa para mitigar prejuízos com o desperdício de alimentos.

As embalagens ativas são outra área do ramo de embalagens que estudam sistemas que interagem ativamente com os metabólitos ou a atmosfera da embalagem, trazendo benefícios na qualidade e aumentando o tempo de prateleira dos alimentos. As embalagens ativas podem ser divididas em duas grandes categorias: as embalagens absorvedoras e as embalagens emissoras.

As embalagens absorvedoras são sistemas de embalagens que absorvem compostos indesejáveis no ambiente interno da embalagem, retardando processos de apodrecimento do alimento e aumentando o tempo de prateleira. As embalagens emissoras fazem o contrário, elas emitem compostos voláteis que aumentam a durabilidade do produto. Assim como as embalagens inteligentes, as embalagens ativas também se mostraram uma tecnologia promissora no ramo de embalagens, conseguindo reduzir perdas e desperdícios ao aumentar efetivamente o tempo de prateleira dos alimentos

Observa-se, então, que as embalagens inteligentes e ativas conseguem integrar, em uma única unidade, inúmeros mecanismos de funcionamento, contribuindo para melhorar as etapas de comercialização posteriores à produção. A decorrente inovação dentro das duas categorias de embalagens estudadas evidencia uma tendência atual para o desenvolvimento tecnológico no mercado alimentício do Século XXI. Novos processos de produção de embalagens surgem a medida em que se aprofunda o conhecimento sobre as técnicas de preservação e monitoramento, tornando mais comum o uso dessas novas tecnologias no varejo.

Ao analisar a alta produção do mercado agropecuário brasileiro, ficou claro haver uma demanda por embalagens mais tecnologicamente avançadas. Segurança alimentar e nutricional, embalagens ativas e inteligentes e sustentabilidade são três temas que atualmente ditam tendências no comércio de alimentos. Mesmo sendo ainda uma área em pleno desenvolvimento, o uso de embalagens ativas e inteligentes tornou-se mais e mais atrativo em face da conjuntura e de perspectivas mais exigentes com relação à disponibilidade e consumo de alimentos produzidos em larga escala.

Dentro das duas categorias de embalagens, diversos mecanismos puderam ser elencados, envolvendo processos químicos, bioquímicos e enzimáticos. No levantamento bibliográfico, o dimensionamento das embalagens ativas e inteligentes está relacionado diretamente com modelagens matemáticas a partir de conceitos vistos constantemente na engenharia química, como fenômenos de transporte e cinética química. A partir da revisão bibliográfica, foi possível ver uma relação direta entre o escopo do setor de embalagens ativas e inteligentes e as competências da profissão do engenheiro químico, elencadas no projeto pedagógico do curso, revelando assim mais uma área do conhecimento com grande potencial para atuação profissional em processos químicos.

Trabalhos futuros podem analisar o desempenho de embalagens ativas e inteligentes por meio de ensaios experimentais e por simulação, buscando melhorias nas tecnologias existentes, assim como estudar as oportunidades de melhora da sua utilização envolvendo a cadeia de suprimentos, como a gestão de resíduos e reciclagem. Por fim, análises econômicas também podem ser desenvolvidas, buscando entender a viabilidade das tecnologias desenvolvidas no mercado.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIEC. **Série histórica das exportações de carne bovina**. 2023. Disponível em: <<https://www.abiec.com.br/exportacoes/>> Acesso em: 20 fev. 2023.

ABRAFRUTAS. **Brasil é o terceiro maior produtor de frutas do mundo, diz Abrafrutas**. 2019. Disponível em: <<https://abrafrutas.org/2019/03/brasil-e-o-terceiro-maior-produtor-de-frutas-do-mundo-diz-abrafrutas/>>. Acesso em: 20 fev. 2023.

ABRAFRUTAS. **DADOS DE EXPORTAÇÃO DE 2022**. 2022. Disponível em: <<https://abrafrutas.org/2023/02/dados-de-exportacao-de-2022/>>. Acesso em: 20 fev. 2023.

ABRE; FGV-IBRE. **ESTUDO ABRE MACROECONÔMICO DA EMBALAGEM E CADEIA DE CONSUMO**. 2022. Disponível em: <<https://www.abre.org.br/dados-do-setor/2021-2/>> Acesso em: 15 dez. 2022.

AHVENAINEN, R.; **Active and intelligent packaging**. In: AHVENAINEN, R.; Novel food packaging techniques. Cambridge, Woodhead Publishing Limited. 2003.

AKHILA, K.; RAMAKANTH, D.; GAIKWAD, K.K.; **Development of novel gallic acid and cellulose acetate-coated paper as pH-responsive oxygen indicator for intelligent food packaging**. J. Coat. Technol. Res. Vol 5. 2022.

ÁLVAREZ-HERNÁNDEZ, M. H.; MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, G. B.; CASTILLEJO, N.; MARTÍNEZ, J.A.; ARTÉS-HERNÁNDEZ, F.; **Development of an antifungal active packaging containing thymol and an ethylene scavenger. Validation during storage of cherry tomatoes**. Food Packaging and Shelf Life. Vol 29. 2021.

ÁLVAREZ-HERNÁNDEZ, M.; MARTINEZ-HERNÁNDEZ, G.B.; AVALOS-BELMONTES, F.; CASTILLO-CAMPOHERMOSO, M.A.; CONTRERAS-ESQUIVEL, J.C.; ARTÉS-HERNÁNDEZ, F.; **Potassium Permanganate-Based Ethylene Scavengers for Fresh Horticultural Produce as an Active Packaging**. Food Engineering Reviews. Vol 11. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9198: EMBALAGEM E ACONDICIONAMENTO: TERMINOLOGIA**. Rio de Janeiro, ABNT, 1985.

BANCO MUNDIAL. **GDP (Current US\$)**. 2023. Disponível em: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD?most_recent_value_desc=true&year_high_desc=true> Acesso em: 15 dez. 2022.

BARSKA, A.; WYRNA, J. **Innovations in the Food Packaging Market – Intelligent Packaging – a Review**. Czech J. Food Sci. Vol 35. 2017.

BERGER, K. R.; WELT, B.; **A Brief History of Packaging: ABE321/AE206, 12/2002**. EDIS Vol. 2003 n° 17. 2002.

BRODY, A. L.; **A chronicle of intelligent packaging**. In: WILSON, C. L.; Intelligent and Active packaging for fruits and vegetables. Florida, Taylor & Francis Group, LLC. 2007.

BUSOLO, M.A.; LAGARON, J.M.; **Antioxidant polyethylene films based on a resveratrol containing Clay of Interest in Food Packaging Applications**. Food Packaging and Shelf Life. Vol 6. 2015.

CAMPOS-REQUENA, V.H.; RIVAS, B.L.; PÉREZ, M.A.; GARRIDO-MIRANDA, K.A.; PEREIRA, E.D.; **Polymer/clay nanocomposite films as active packaging material: Modeling of antimicrobial release**. European Polymer Journal. Vol 71. 2015.

CARRIZO, D.; TABORDA, G.; NERÍN C; BOSETTI, O.; **Extension of shelf life of two fatty foods using a new antioxidant multilayer packaging containing green tea extract**. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2015.

CERISUELO, J.P.; MURIEL-GALET, V.; BERMÚDEZ, J.M.; AUCEJO, S.; CATALÁ, R.; GAVARA, R.; HERNÁNDEZ-MUÑOZ, P.; **Mathematical model to describe the release of an antimicrobial agent from an active package constituted by carvacrol in a hydrophilic EVOH coating on a PP film**. Journal of Food Engineering. Vol 110. 2012.

CHARLES, F.; SANCHEZ, J.; GONTARD, N.; **Absorption kinetics of oxygen and carbon dioxide scavengers as part of active modified atmosphere packaging**. Journal of Food Engineering. Vol 72. 2006.

COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA. **Projeto Pedagógico do Curso de Graduação em Engenharia Química**. São Carlos, 2017.

CORTÉS, L.A.; HERRERA, A.O.; CASTELLANOS, D.A.; **Natural plant-based compounds applied in antimicrobial active packaging and storage of berries.** Journal of Food Processing and Preservation. Vol 46. 2022.

CUSTÓDIO, L.G.; **INFLUÊNCIA DO CONGELAMENTO, TEMPERATURA E TEMPO DE ESTOCAGEM NA QUALIDADE DA CARNE BOVINA.** Dissertação (Mestrado em Ciência Animal) - Escola de Veterinária e Zootecnia, Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2017.

CVEK, M.; PAUL, U.C.; ZIA, J.; MANCINI, G.; SEDLARİK, V.; ATHANASSIOU, A.; **Biodegradable Films of PLA/PPM and Curcumin as Packaging Materials and Smart Indicators of Food Spoilage.** ACS Appl. Mater. Interfaces. Vol 14. 2022.

DEY, A.; NEOGI, S.; **Oxygen scavengers for food packaging applications: A review.** Trends in Food Science & Technology. Vol 90. 2019.

DI MAIO, L.; SCARFATO, P.; GALDI, M.R.; INCARNATO, L.; **Development and Oxygen Scavenging Performance of Three-Layer Active PET Films for Food Packaging.** Journal of Applied Polymer Science. 2015.

EDITORA GAZETA. **Anuário Brasileiro de Horti e Fruti. 2022.** Disponível em: <https://www.editoragazeta.com.br/sitewp/wp-content/uploads/2022/04/HORTIFRUTI_2022.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2023.

FGV. **O SETOR DE CARNES NO BRASIL E SUAS INTERAÇÕES COM O COMÉRCIO INTERNACIONAL. 2018.** 2018. Disponível em: <https://gvagro.fgv.br/sites/gvagro.fgv.br/files/u115/03_Setor_Carnes_Brasil_PT.pdf> Acesso em: 20 fev. 2023.

FIROUZ, M. S.; MOHI-ALDEN, K.; OMID, M. **A critical review on intelligent and active packaging in the food industry: Research and development.** Food Research International. Vol 141. 2021.

FRANKE, I.; WIJIMA, E.; BOUMA, K.; **Shelf life extension of pre-baked buns by an ACTIVE PACKAGING ethanol emitter.** Food Additives and Contaminantes. Vol 19. 2002.

GAIKWAD, K.K.; SINGH, S.; AIJI, A.; **Moisture absorbers for food packaging applications.** Environmental Chemistry Letters. Vol 17. 2019.

GAIKWAD, K.K.; SINGH, S.; NEGI, Y.S.; **Ethylene scavengers for active packaging of fresh food produce**. Environmental Chemistry Letters. Vol 18. 2020.

GAONA-FORERO, A.; AGUDELO-RODRÍGUEZ, G.; HERRERA, A.O.; CASTELLANOS, D.A.; **Modeling and simulation of an active packaging system with moisture adsorption for fresh produce. Application in 'Hass' avocado**. Food Packaging and Shelf Life. Vol 17. 2018.

GHAANI, M.; COZZOLINO, C.A.; CASTELLI, G.; FARRIS, S. **An overview of the intelligent packaging technologies in the food sector**. Trends in Food Science & Technology, Vol 51. 2016

GÓMEZ-HEINCKE, D.; MARTÍNEZ, I.; PARTAL, P.; GUERRERO, A.; GALLEGOS, C.; **Development of antimicrobial active packaging materials based on gluten proteins**. J Sci Food Agric. Vol 96. 2016.

GORANSSON, M.; NILSSON, F.; JEVINGER, A.; **Temperature performance and food shelf-life accuracy in cold food supply chains - Insights from multiple field studies**. Food Control. Vol 86. 2018.

HANLON, J.F.; KELSEY, R.J.; FORCINIO, H.E.; **Elements of Packaging**. In: HANLON, J.F.; KELSEY, R.J.; FORCINIO, H.E.; Handbook of Package Engineering. Pennsylvania, Technomic Publishing Company, Inc. 1998

HANSEN, A.A.; HOY, M.; PETTERSEN, M.K.; **Prediction of Optimal CO₂ Emitter Capacity Developed of Modified Atmosphere Packaging of Fresh Salmon Fillets (*Salmo salar* L.)**. Packaging Technology and Science. Vol 22. 2009.

HELLSTROM, D.; OLSSON, A.; **Introduction to packaging**. In: HELLSTROM, D.; OLSSON, A.; Managing Packaging Design for Sustainable Development: A Compass for Strategic Directions. John Wiley & Sons, 2017.

HEMPEL, A.W.; O'SULLIVAN, M.G.; PAPKOVSKY, D.B.; KERRY, J.P.; **Use of smart packaging technologies for monitoring and extending the shelf-life quality of modified atmosphere packaged (MAP) bread: application of intelligent oxygen sensors and active ethanol emitters**. Eur Food Res Technol. Vol 237. 2013.

HOLCK, A.L.; PETTERSEN, M.L.; MOEN, M.H.; SORHEIM, O.; **Prolonged Shelf Life and Reduced Drip Loss of Chicken Filets by the Use of Carbon Dioxide Emitters and Modified Atmosphere Packaging**. Journal of Food Protection. Vol 77. 2014.

HU, B.; LI, L.; HU, Y.; ZHAO, D.; LI, Y.; YANG, M.; JIA, A.; CHEN, S.; LI, B.; ZHANG, X.; **Development of a novel Maillard reaction-based time-temperature indicator for monitoring the fluorescent AGE content in reheated foods**. RSC Adv. Vol 10. 2020.

INNS, G.R. THE PACKAGING SUPPLY CHAIN. In: EMBLEM, A.; EMBLEM H. **Packaging technology: Fundamentals, materials, and processes**. Oxford, Woodhead Publishing Limited, 2012.

IRKIN, R. ESMER, O.K. **Novel food packaging systems with natural antimicrobial agents**. J. Food Sci Technol. Vol 52. 2015.

JAFARZADEH, S.; RHIM, J.; ALIAS, A.K.; ARIFFIN, F.; MAHMUD, S.; **Application of antimicrobial active packaging film made of semolina flour, nano zinc oxide and nano-kaolin to maintain the quality of low-moisture mozzarella cheese during low-temperature storage**. J Sci Food Agric. Vol 99. 2019.

JOHANSSON, K.; GILLGREN, T.; WINESTRAND, S.; JARNSTROM, L.; JONSSON, L. J. **Comparison of lignin derivatives as substrates for laccase-catalyzed scavenging of oxygen in coatings and films**. Journal of Bioloical Engineering. Vol 8. 2014.

KALPANA, S.; PRIYADARSHINI, S.R.; LEENA, M.M.; MOSES, J.A.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C.; **Intelligent Packaging: Trends and applications in food systems**. Trends in Food Science & Technology. Vol. 93. 2019.

KHANEGHAN, A.M.; HASHEMI, S.M.B; LIMBO, S.; **Antimicrobial agents and packaging systems in antimicrobial active food packaging: An overview of approaches and interactions**. Food and Bioproducts Processing. Vol 111. 2018.

KUSWANDI, B.; JAYUS; RESTYANA, A.; ABDULLAH, A.; HENG, L.Y.; AHMAD, M.; **A novel colorimetric food package label for fish spoilage based on polyaniline film**. Food Control. Vol. 25. 2012.

KWON, S.; KO, S.; **Colorimetric Freshness Indicator Based on Cellulose Nanocrystal-Silver Nanoparticle Composite for Intelligent Food Packaging.** Polymers. Vol. 14. 2022.

LABUZA, T.P.; **Application of Chemical Kinetics to Deterioration of Foods.** J. Chem. Educ. Vol 61. 1984.

LANG, C.; HUBERT, T.; **A Colour Ripeness Indicator for Apples.** Food Bioprocess Technol. Vol 5. 2012.

LEE, D.S.; **Carbon dioxide absorbers for food packaging applications.** Trends in Food Science & Technology. Vol 57. 2016.

LI, H.; TUNG, K.K.; PAUL, D.R.; FREEMAN, B.D.; STEWART, M.E.; JENKINS, J.C.; **Characterization of Oxygen Scavenging Filmes Based on 1,4-Polybutadiene.** Ind. Eng. Chem. Res. Vol 51. 2012.

LING, B.; TANG, J.; KONG, F.; MITCHAM, E.J.; WANG, S.; **Kinetics of Food Quality Changes During Thermal Processing: a Review.** Food Bioprocess Technol. Vol 8. 2015.

MATARAGAS, M.; BIKOULI, V.C.; KORRE, M.; STERIOTI, A.; **Development of a microbial Time Temperature Indicator for monitoring the shelf life of meat.** Innovative Food Science and Emerging Technologies. Vol 52. 2019.

MEXIS, S.F.; CHOULIARA, E.; KONTOMINAS, M.G.; **Quality Evaluation of Grated Graviera Cheese Stored at 4 and 12°C using Active and Modified Atmosphere Packaging.** Packaging Technology and Science. Vol 24. 2011.

MORGADO, C.M.A; DA SILVA, L.R.; CORRÊA, T.O.; DOS SANTOS, A.P.; JUNIOR, L.C.C.; DE CAMPOS, A.J.; **REFRIGERAÇÃO E ATMOSFERA MODIFICADA NA CONSERVAÇÃO DE FRUTAS: UMA BREVE REVISÃO.** Sci. Elec. Arch. Vol 15. 2022.

MU, H.; GAO, H.; CHEN, H.; FANG, X.; HAN, Q.; **A novel controlled release of ethanol emitter: preparation and effect on some postharvest quality parameters of Chinese bayberry during storage.** J. Sci Food Agric. Vol 97. 2017.

MURMU, S.B.; MISHRA, H.N.; **Selection of the best active modified atmosphere packaging with ethylene and moisture scavengers to maintain quality of guava during low-temperature storage.** Food Chemistry. Vol 253. 2018.

NOPWINYUWONG, A.; TREVANICH, S.; SUPPAKUL, P.; **Development of a novel colorimetric indicator label for monitoring freshness of intermediate-moisture dessert spoilage.** Talanta. Vol 81. 2010.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Day of Eight Billion.** 2022. Disponível em: <<https://www.un.org/en/dayof8billion>> Acesso em: 15 dez. 2022.

PAINE F.A.; **Fundamentals of Packaging.** Leicester, Brookside Press. 1981.

PAINE, F. A.; PAINE, H. Y. **Introduction to Packaging.** in: PAINE, F. A.; PAINE, H. Y.; A Handbook of Food Packaging. Berlim, Springer Science+Business Media Dordrecht, 1992

PAL, M.; DEVRANI, M.; HADUSH, A. **Recent developments in food packaging technologies.** Beverage & Food World, Vol 46, nº1. 2019.

PANTALEÃO, I.; PINTADO, M.M.E.; POÇAS, M.F.F.; **Evaluation of two packaging systems for regional cheese.** Food Chemistry. Vol 102. 2007.

PENSSAN - REDE BRASILEIRA DE PESQUISA EM SOBERANIA E SEGURANÇA ALIMENTAR; **Inquérito Nacional sobre Insegurança Alimentar no Contexto da Pandemia da COVID-19 no Brasil.** II VIGISAN, São Paulo, Fundação Friedrich Ebert. 2022.

PEREIRA DE ABREU, D.A.; CRUZ, J.M.; LOSADA, P.P. **Active and Intelligent Packaging for the Food Industry.** Food Reviews International. Vol 28. 2012.

PEREIRA JR., V.A.; QUEIROZ DE ARRUDA, I.N.; STEFANI, R.; **Active chitosan/PVA films with anthocyanins from Brassica oleraceae (Red Cabbage) as Time-Temperature Indicators for application in intelligent food packaging.** Food Hydrocolloids. Vol 43. 2015.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O AMBIENTE. **Food Waste Index Report 2021.** Nairobi, 2021.

RISCH, S. J.; **Food Packaging History and Innovations**. J. Agric. Food Chem. Vol 57. 2009.

RODE, T.M.; ROTABAKK, B.T.; **Extending shelf life of desalted cod by high pressure processing**. Innovative Food Science and Emerging Technologies. Vol 69. 2021.

RODRIGUEZ-AGUILERA, R.; OLIVEIRA, J.C.; **Review of Design Engineering Methods and Applications of Active and Modified Atmosphere Packaging Systems**. Food Eng Rev. Vol. 1. 2009.

SHAO, P.; LIU, L.; YU, J.; LIN, Y.; GAO, H.; CHEN, H.; SUN, P.; **An overview of intelligent freshness indicator packaging for food quality and safety monitoring**. Trends in Food Science & Technology. Vol 118. 2021.

SHARROCK, K.R.; **Advances in freshness and safety indicators in food and beverage packaging**. In: YAM, K.L. Emerging food packaging technologies: Principles and practice. Cambridge, Woodhead Publishing Limited. 2012.

SHIN, D.H.; CHEIGH, H.S.; LEE, D.S.; **The use of Na₂CO₃-based CO₂ absorbent systems to alleviate pressure buildup and volume expansion of kimchi packages**. Journal of Food Engineering. Vol 53. 2002.

SMITHERS. **World packaging demand to break \$1-trillion-mark in 2021 and reach \$1.22 trillion in 2025, according to latest Smithers analysis**. 2021. Disponível em: <[https://www.smithers.com/resources/2021/november/world-packaging-demand-to-break-\\$1-trillion-mark](https://www.smithers.com/resources/2021/november/world-packaging-demand-to-break-$1-trillion-mark)> Acesso em: 15 dez. 2022.

SMOLANDER, M.; **The use of freshness indicators in packaging**. In: AHVENAINEN, R. Novel Food Packaging Techniques. Cambridge, Woodhead Publishing Limited. 2003.

TAOUKIS, P.S.; LABUZA, T. P.; FRANCIS, R.C.; **Time-Temperature Indicators as Food Quality Monitors**. Food Packaging Technology, ASTM STP 1113. 1991

TEWARI, G.; JAYAS, D.S.; JEREMIAH, L. E.; HOLLEY, R.A.; **Absorption kinetics of oxygen scavengers**. International Journal of Food Science and Technology. Vol 37. 2002.

TSIRONI, T.; NTZIMANI, A.; GOGOU, E.; TSEVDU, M.; SEMENOGLOU, I.; DERMESONLOUOGLOU, E.; TAOUKIS, P.; **Modeling the Effect of Active Modified Atmosphere Packaging on the Microbial Stability and Shelf Life of Gutted Sea Bass**. App. Sci. Vol 9. 2019.

UPADHYAY, A.; KUMAR, P.; KARDAM, S.K.; GAIKWAD, K.K.; **Ethylene scavenging film based on corn starch-gum acacia impregnated with sepiolite clay and its effect on quality of fresh broccoli florets**. Food Bioscience. Vol 46. 2022.

UTTO, W. NOOMHORM, A.; BRONLUND. J.E.; **MODELING OF ETHANOL VAPOR CONTROLLED RELEASE ACTIVE PACKAGING FOR FRESH PEELED SHALLOTS**. Italian Journal of Food Science. Vol 30. 2018.

VILAS, C.; MAURICIO-IGLESIAS, M.; GARCÍA, M.R.; **Model-based design of smart active packaging systems with antimicrobial activity**. Food Packaging and Shelf Life. Vol 24. 2020.

WANG, S.; LIU, X.; YANG, M; ZHANG, Y.; XIANG, K.; TANG, R.; **Review of Time Temperature Indicators as Quality Monitors in Food Packaging**. Packag. Technol. Sci. Vol 28. 2015.

WARSIKI, E.; ISKANDAR, A.; GHIYAS, H.M.; **Theoretical calculation and experimental validation of ammonium molybdate concentration for fruit ripeness indicator label**. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. Vol 472. 2020.

WON, K.; JANG, N.Y.; JEON, J.; **A Natural Component-Based Oxygen Indicator with In-Pack Activation for Intelligent Food Packaging**. Journal of Agricultural and Food Chemistry. Vol 64. 2016.

WYRNA, J.; BARSKA, A.; **Innovations in the food packaging market: Active Packaging**. Eur Food Res Technol. Vol. 243. 2017.

XIAO, P.; LIU, J.; WANG, Z.; TAO, F.; YANG, L.; YUAN, G.; SUN, W.; ZHANG, X.; **A color turn-on fluorescent probe for real-time detection of hydrogen sulfide and identification of food spoilage**. RSC Chemical Communications. Vol 57. 2021.

YAM, K.L. **Intelligent packaging to enhance food safety and quality**. In: YAM, K.L. Emerging food packaging technologies: Principles and practice. Cambridge, Woodhead Publishing Limited. 2012.

YAN, S.; HUAWEI, C.; LIMIN, Z.; FAZHENG, R.; LUDA, Z.; HENGTAO, Z.; **Development and characterization of a new amylase type time-temperature indicator**. Food Control. Vol 19. 2008.

YILDIRIM, S.; ROCKER, B.; PETTERSEN, M.K.; NILSEN-NYGAARD, J.; AYHAN, Z.; RUTKAITE, R.; RADUSIN, T.; SUMINSKA, P.; MARCOS, B.; COMA, V.; **Active Packaging Applications for Food**. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, Vol 00. 2017.

ZHANG, Y. LIM, L.; **Inkjet-printed CO₂ colorimetric indicators**. Talanta. Vol 161. 2016.