

CAPÍTULO 9

TECNOLOGIAS EMERGENTES EM EMBALAGENS INTELIGENTES PARA MONITORAMENTO, SEGURANÇA E QUALIDADE DOS ALIMENTOS



<https://doi.org/10.22533/at.ed.361112504049>

Data da submissão: 17/09/2025

Data de aceite: 26/09/2025

Henrique Soares Silva

Universidade do Estado de Minas Gerais
– UEMG
Ituiutaba – MG
<http://lattes.cnpq.br/3830970540406270>

Hellen Franciane Gonçalves Barbosa

Universidade do Estado de Minas Gerais
– UEMG
Ituiutaba – MG
<http://lattes.cnpq.br/8799063050335983>

Rafael de Oliveira Pedro

Universidade do Estado de Minas Gerais
– UEMG
<http://lattes.cnpq.br/8138341335413386>

RESUMO: O desperdício de alimentos representa um dos grandes desafios globais, impactando não apenas a segurança alimentar, mas também a economia e a sustentabilidade ambiental. Estima-se que milhões de toneladas de alimentos sejam perdidas ao longo da cadeia produtiva devido a falhas no armazenamento, transporte e conservação. Nesse cenário, as embalagens inteligentes surgem como uma alternativa inovadora, oferecendo ferramentas capazes de preservar e monitorar a qualidade dos alimentos de forma mais eficiente.

Três principais categorias de tecnologias podem ser empregadas nesse tipo de embalagem: os indicadores de tempo e temperatura, que permitem acompanhar as condições de armazenamento e transporte; os indicadores de frescor, que fornecem informações sobre a qualidade sensorial e o estado de conservação dos produtos; e os biossensores, capazes de detectar alterações microbiológicas e químicas de maneira precisa. Essas soluções têm potencial para prolongar a vida útil dos alimentos, reduzir perdas, minimizar riscos à saúde e ainda contribuir para práticas mais sustentáveis, alinhadas aos princípios da economia circular. No entanto, desafios como o alto custo de produção, a complexidade tecnológica e a dificuldade de escalonamento industrial ainda limitam sua ampla aplicação na indústria alimentícia. Desse modo, o objetivo desse trabalho foi verificar os últimos avanços na literatura na área de embalagens inteligentes.

PALAVRAS-CHAVE: embalagens inteligentes; segurança alimentar; indicadores.

EMERGING TECHNOLOGIES IN SMART PACKAGING FOR FOOD MONITORING, SAFETY AND QUALITY

ABSTRACT: Food waste represents one of the greatest global challenges, impacting not only on food safety but also the economy and environmental sustainability. It is estimated that millions of tons of food are lost throughout the production chain due to storage, transportation, and preservation failures. In this scenario, smart packaging emerges as an innovative alternative, offering tools capable of more efficiently monitoring and preserving food quality. Three main categories of technologies can be employed in this type of packaging: time and temperature indicators, which allow monitoring of storage and transportation conditions; freshness indicators, which provide information on the sensory quality and conservation status of products; and biosensors, capable of accurately detecting microbiological and chemical changes. These solutions have the potential to extend the shelf life of food, reduce losses, minimize health risks, and even contribute to more sustainable practices, aligned with the principles of the circular economy. However, challenges such as high production costs, technological complexity, and the difficulty of industrial scaling still limit their widespread application in the food industry. Therefore, the objective of this study was to review the latest advances in the literature on smart packaging.

KEYWORDS: smart packaging; food safety; indicators.

INTRODUÇÃO

A procura por produções sustentáveis de alimentos tem sido um desafio global importante, impulsionado pelo crescimento das taxas de insegurança alimentar. De acordo com dados do Banco Mundial, só em 2017 mais de 83 milhões de pessoas enfrentaram a fome em cerca de 45 países (Prosekov; Ivanova, 2018). Desde então, o cenário tem piorado e em 2023 as estimativas foram que 733 milhões de pessoas sofreram com a fome (UN, 2023).

As principais razões para essa expansão da fome global devem-se a mudanças climáticas, crises econômicas e geopolíticas, além de conflitos como a guerra da Ucrânia (El Bilali; Ben Hassen, 2024). De acordo com dados da ONU, até 2030 cerca de 582 milhões de pessoas poderão ser afetadas pela fome (Task Force for Global Alliance against Hunger and Poverty., 2024; UN, 2023).

Além do crescimento populacional intensificar a demanda por alimentos, fatores como o desperdício e perdas pós-colheita reduzem a disponibilidade de produtos para a população e acentuam as desigualdades sociais no mundo. Relatórios da Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação (FAO) indicam que em média 14% dos alimentos são perdidos antes da comercialização, além de varejistas e consumidores desperdiçarem outros 17% (FAO, 2022).

Diante dessa realidade, a preservação de alimentos é uma preocupação legítima que leva a esforços contínuos para melhorar a vida útil de frutas e vegetais e reduzir desperdícios pós-colheita. Tecnologias de preservação de alimentos como aquecimento

(Zia et al., 2024), congelamento (Hu et al., 2022), secagem (Pu; Sun, 2017) e fermentação (Augustin et al., 2024) têm sido continuamente desenvolvidas e aprimoradas. Outras técnicas também têm sido alvo de pesquisadores que buscam reduzir as perdas oriundas de embalagens inadequadas. Esses tipos de embalagens têm como função principal garantir a qualidade dos alimentos, além manter o frescor e segurança alimentar.

As abordagens tradicionais de armazenamento e embalagem de produtos tem se mostrado inadequadas em muitos casos, sobretudo quando se busca prevenir a deterioração precoce do alimento. Além disso, desafios como conformidade regulatória, acessibilidade, impacto ambiental e desperdício também impulsionam o setor em busca de novas alternativas. Embalagens tradicionais, embora bem conhecidas e consolidadas no mercado, podem não ser a melhor alternativa no armazenamento de alimentos, especialmente aqueles mais suscetíveis a senescência ou degradação natural.

Nesse contexto, surgiram as embalagens inteligentes, capazes de fornecer informações dinâmicas sobre o estado do produto. Diferentemente dos rótulos convencionais, que apresentam apenas uma data de validade estática, essas tecnologias permitem monitorar as condições de transporte e armazenamento, assegurando maior confiabilidade quanto à qualidade do alimento (Baneshi et al., 2024; Guruprasath et al., 2024; Sari et al., 2023). A Figura 1 mostra um exemplo de indicador de qualidade utilizado em embalagens alimentícias.



Figura 1: Esquema de um indicador de qualidade de alimentos embalados.

Esse tipo de sistema permite identificar de forma rápida e intuitiva alterações na qualidade do produto, reduzindo riscos de consumo inadequado e contribuindo para a diminuição do desperdício alimentar. Além disso, ao fornecer um feedback imediato sobre a condição do alimento, tais indicadores também podem agregar valor comercial às embalagens, aumentando a confiança do consumidor e promovendo maior transparência na cadeia de suprimentos.

Essas informações são geradas por meio da avaliação de níveis de oxidação, redução ou decomposição dos alimentos. Fatores como mudanças de temperatura, crescimento microbiano e frescor pode ser analisado diretamente pelo consumidor, reduzindo assim o desperdício e aumentando a segurança alimentar, mitigando riscos como reações alérgicas e contaminação.

Portanto, esta revisão tem como objetivo fornecer uma visão geral dos avanços mais recentes na fabricação de sistemas de embalagens inteligentes, com foco em sua aplicação no monitoramento da qualidade e conservação de alimentos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados apresentados neste estudo foram coletados e apresentados por meio de uma revisão narrativa da literatura, cujo intuito é fornecer uma análise crítica, abrangente e contextualizada. A revisão narrativa foi escolhida devido a necessidade de integrar e discutir resultados científicos, tecnológicos e aplicados, comumente dispersos em diferentes áreas do conhecimento. Esse tipo de revisão permite construir uma abordagem mais flexível, estabelecendo um panorama abrangente sobre o tema.

A busca por publicações foi realizada em bases de dados científicas amplamente conhecidas como Scopus, Web of Science, ScienceDirect e Google Scholar. Foram utilizados descritores em inglês, tais como *intelligent packaging*, *smart packaging*, *time-temperature indicators*, *freshness indicators*, *gas sensors*, *ethylene scavengers*, *antimicrobial packaging* e *biopolymeric films*. A seleção dos artigos foi realizada com base nas publicações dos últimos dez anos, tendo sido priorizados estudos que apresentassem inovações, aplicações, potencial de escalabilidade industrial, além de artigos de revisão.

Os títulos dos trabalhos foram previamente analisados para verificar se o tema abordado estava adequado ao assunto. No segundo momento, a relevância dos artigos foi avaliada após a leitura completa do texto. Trabalhos com baixa aderência ao assunto, repetitivos ou com baixa relevância direta com o assunto foram descartados.

As informações obtidas dos trabalhos selecionados foram sistematicamente dispostas, permitindo a comparação entre diferentes abordagens. Os conteúdos foram agrupados em categorias temáticas, como indicadores de tempo e temperatura, indicadores de frescor e biossensores. Essa organização permitiu a síntese das evidências disponíveis, identificação de tendências e lacunas nas pesquisas científicas.

A metodologia buscou elaborar uma narrativa coesa e informativa, capaz de integrar perspectivas e avanços sobre o tema. A revisão permitiu produzir um material de referência sólido, capaz de subsidiar pesquisadores e profissionais do setor de alimentos no desenvolvimento de soluções inovadoras em embalagens inteligentes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Embalagens inteligentes com indicadores de tempo e temperatura

As variações de temperatura em um produto alimentício podem levar a alterações na sua segurança e qualidade. Indicadores de tempo e temperatura são dispositivos simples e baratos que podem mostrar mudanças facilmente mensuráveis, dependente do tempo e da temperatura (Mkhari; Adeyemi; Fawole, 2025).

Esses sensores podem ser divididos em duas categorias principais: os indicadores de temperatura e os indicadores de tempo-temperatura (ITTs). Os primeiros funcionam como marcadores simples, revelando se o alimento foi submetido a temperaturas fora do limite estabelecido, geralmente por meio de uma mudança de cor irreversível (Biji et al., 2015; Wang et al., 2015). Sua função principal é sinalizar aos consumidores a sobrevivência potencial de microrganismos patogênicos e a ocorrência de desnaturação de proteínas devido a procedimentos como congelamento ou descongelamento.

O indicador desenvolvido por Adiani e colaboradores (Adiani; Gupta; Variyar, 2021) é um exemplo desse tipo de dispositivo indicador de temperatura. Nesse trabalho, o indicador muda de incolor para marrom por meio da oxidação do fenol em temperaturas inadequadas de armazenamento. Os dados foram obtidos a partir de testes com abacaxi, romã e jaca minimamente processadas.

Já os indicadores tempo-temperatura (ITTs) vão além, pois não apenas detectam desvios, mas registram o histórico térmico do produto ao longo do tempo, permitindo avaliar se a exposição foi breve ou prolongada, fator determinante para a deterioração (Upadhyay et al., 2024). Esse monitoramento garante que o produto chegue ao consumidor em ótimas condições de consumo.

Os ITTs são classificados com base no seu princípio de funcionamento que pode ser químico, físico, biológico ou enzimático. Os ITTs com princípios químicos indicam mudanças de coloração que acontecem por meio de reações químicas que podem ser de polimerização, fotoquímica ou oxidação (Girardeau et al., 2020).

Uma estratégia para utilização desses indicadores é o emprego de nanofilmes poliméricos capazes de registrar irreversivelmente mudanças de temperatura. O trabalho realizado por Kashem (Kashem et al., 2024) desenvolveu um ITT capaz de responder ao intervalo de temperatura de -30 a 23°C rapidamente com mudanças de cor. Os pesquisadores demonstraram que o dispositivo pode ser ajustado de forma precisa para detectar as temperaturas de interesse.

Liu e colaboradores (Liu et al., 2024) desenvolveram um indicador ITT capaz de mudar de cor em respostas às alterações de pH causadas pelo crescimento de *Carnobacterium maltaromaticum* em cortes de cordeiros embalados a vácuo. Os resultados mostraram que o armazenamento em temperaturas inadequadas promove o crescimento bacteriano que é facilmente detectado pelo indicador ITT.

Dessa forma, enquanto os indicadores de temperatura são úteis em situações que exigem apenas a detecção de um evento crítico, os ITTs são essenciais em cadeias de frio mais complexas, fornecendo um panorama completo da conservação do alimento (Müller; Schmid, 2019). O Quadro 1 resume os tipos de indicadores de tempo e temperatura.

Tipo de indicador	Princípio	Aplicação	Exemplos
Indicador de temperatura	Físico, químico, colorimétrico e redox	Usado para verificar se o alimento foi mantido em uma faixa ideal de temperatura	(Adiani; Gupta; Variyar, 2021) (Karimi Alavijeh; Heli; Ajji, 2024)
Indicadores de tempo-temperatura (ITT)	Físico, químico, biológico e enzimático	Monitoramento do histórico da temperatura ao longo do tempo	(Liu et al., 2024) (Kashem et al., 2024) (Zhang et al., 2022)

Quadro 1: Tipos de indicadores de tempo e temperatura.

EMBALAGENS INTELIGENTES COM INDICADORES DE FRESCOR

Embalagens inteligentes podem incluir indicadores de frescor (IF) como estratégia para monitorar a qualidade de alimentos. Tais indicadores são classificados como cartões ou filmes indicadores. O princípio de funcionamento é baseado na alteração de coloração decorrente da liberação de compostos voláteis característicos do alimento, refletindo seu estado de frescor (Ghaani et al., 2016).

Desse modo, torna-se possível monitorar alterações na qualidade dos alimentos, sejam elas resultantes de processos fisiológicos ou do crescimento microbiano, sem que haja a necessidade de abertura da embalagem. Essa característica representa uma vantagem significativa para os consumidores, já que os indicadores de frescor permitem detectar mudanças na qualidade de produtos altamente perecíveis como pescados, laticínios, carnes, frutas e hortaliças, de forma prática, intuitiva e não destrutiva (Ghaani et al., 2016; Li et al., 2024).

Durante o armazenamento de alimentos, enzimas ou o crescimento de microrganismos podem causar a liberação característica de substâncias relacionadas ao frescor. Entre os principais compostos detectados destacam-se o dióxido de carbono, o nitrogênio, o sulfeto de hidrogênio, além das mudanças no pH, todos associados à perda de qualidade (Milzi; Diana; Panunzi, 2025).

O dióxido de carbono é o principal produto do metabolismo microbiano e a sua liberação pode estar associada ao crescimento de microrganismos no alimento armazenado

(Mohamed; El-Sakhawy; El-Sakhawy, 2020). Após a colheita, a taxa de respiração de frutas e vegetais aumenta, liberando grandes quantidades de dióxido de carbono. Assim, o frescor de diferentes alimentos pode ser diretamente correlacionado aos níveis de dióxido de carbono liberados durante o armazenamento (Osman et al., 2021).

A ação de microrganismos e enzimas degrada proteínas de alimentos, especialmente de origem animal, produzindo peptídeos e aminoácidos que são posteriormente degradados em compostos de como dióxido de carbono, amônia e aminas. Esses compostos de baixo peso molecular, ricos em nitrogênio, são altamente voláteis e possuem aromas marcantes. Assim, é possível utilizar indicadores que reagem com amônia, dimetilamina e trimetilamina que irão refletir o frescor de alimentos de origem animal (Zhang et al., 2022).

Compostos sulfurados também podem ser explorados com essa finalidade. A deterioração de alimentos de origem animal produz grandes quantidades de sulfeto. Por exemplo, Egan e colaboradores (Egan; Shay; Rogers, 1989) produziram um indicador colorimétrico para detectar o frescor de carne de aves. Nesse dispositivo, o sulfeto de hidrogênio liberado reage com a mioglobina do indicador formando um pigmento verde. Dessa forma, a simples mudança de cor permite ao consumidor identificar quando o produto não está mais próprio para consumo.

Lee e colaboradores (Lee; Shin, 2019) desenvolveram um indicador de frescor para carne bovina utilizando acetato de celulose e vermelho de metila. Segundo os autores, a decomposição da carne provoca mudanças no pH devido à liberação de amônia, sulfeto de hidrogênio e acumulação de ácido lático. Essas mudanças puderam ser observadas pelas alterações de cor do indicador.

Da mesma maneira, a qualidade de peixes pode ser monitorada por indicadores específicos (Kim; Park; Shin, 2023). No trabalho desenvolvido por Kim e colaboradores, um indicador que muda de cor pela reação com a amônia foi obtido. O indicador reage a mudanças de pH causadas pela decomposição da carne e liberação de amônia.

Existem alguns indicadores de frescor que estão estabelecidos na indústria. Por exemplo a marca Food Fresh™ produz uma etiqueta autoadesiva capaz de informar sobre o frescor de carnes. Outro item comercial é o RipeSense® utilizado para verificação do amadurecimento de frutas. Esse indicador identifica gases ou compostos voláteis característicos do amadurecimento, como o etileno. O indicador inicialmente é vermelho, mas muda para laranja e amarelo conforme a fruta amadurece.

EMBALAGENS INTELIGENTES COM BIOSSENSORES

Biossensores uma alternativa promissora para detectar alterações em alimentos embalados causadas por processos biológicos (Mkhari; Adeyemi; Fawole, 2025). Os principais componentes dos biossensores são os biorreceptores e os transdutores. Os biorreceptores são responsáveis por reconhecer especificamente a substância-alvo,

ligando-se seletivamente ao analito de interesse e gerando um sinal. Os transdutores, por sua vez, têm a função de converter esse sinal em uma resposta mensurável e, em muitos casos, quantificável, normalmente envolvendo mudanças de cor ou geração de corrente elétrica (Shi et al., 2022).

Os biossensores podem detectar dióxido de carbono, glicose, carboidratos, aminoácidos, álcoois, ácidos graxos, organismos patogênicos e outros analitos (Mohamed; El-Sakhawy; El-Sakhawy, 2020; Vanderroost et al., 2014; Yousefi et al., 2019). Esses dispositivos podem inclusive detectar metabólitos gerados durante a decomposição de alimentos, sendo muito úteis para verificar a qualidade do produto armazenado.

No entanto, o grande desafio desses indicadores é a imobilização dos materiais biológicos nos biorreceptores, já que pode ocorrer a desnaturação e instabilidade das substâncias utilizadas. Embora a nanotecnologia tenha contribuído para melhorar os mecanismos de transdução e aumentar a sensibilidade e especificidade frente a alvos como bactérias, alérgenos e toxinas, desafios relacionados à aplicação prática dos biossensores em embalagens ainda permanecem. A seletividade, a viabilidade de produção em larga escala e a complexidade da matriz alimentar são fatores limitantes consideráveis (Mustafa; Andreeescu, 2020).

Outra estratégia para monitorar alimentos embalados é a utilização de indicadores de gases como dióxido de carbono e etileno. O oxigênio pode causar a degradação de nutrientes por meio de processos químicos ou bioquímicos. Portanto, é essencial utilizar um detector para verificar a presença desse gás de maneira rápida e eficiente. Por exemplo, existem indicadores colorimétricos de oxigênio que alteram sua coloração em função da reação do gás com uma solução alcalina, um corante redox e um agente redutor (Kuswandi et al., 2011; Milzi; Diana; Panunzi, 2025; Won; Jang; Jeon, 2016).

Os sensores de dióxido de carbono constituem a segunda categoria mais explorada (Drago et al., 2020). Esse gás é produzido por meio de processos metabólicos de microrganismos, sendo impactado pelo tempo, temperatura e condições de armazenamento. A maioria dos sensores de CO₂ incluem rótulos colorimétricos que mudam de cor com base em variações de pH geradas pela dissolução do gás.

Alguns sensores de gases já estão disponíveis comercialmente na indústria alimentícia, representando a classe mais consolidada de embalagens inteligentes. Por exemplo, o produto Ageless Eye® (Mitsubishi Gas Chemical Company) permite monitorar o oxigênio de forma colorimétrica, mudando entre as cores azul e roxo em embalagens de carnes. Essa mudança visual é facilmente identificável por consumidores e funcionários de varejo, sendo amplamente utilizada em embalagens de carnes, café, castanhas e produtos farmacêuticos.

Já o sensor Tell-Tab™ pode ser utilizado para monitorar oxigênio em diferentes tipos de produtos embalados, ampliando a aplicabilidade da tecnologia. Quando o indicador é exposto a oxigênio, sua cor muda de rosa para azul ou roxo (Mohebi; Marquez, 2015).

Essa alteração colorimétrica é facilmente observada a olho nu, auxiliando no controle de qualidade durante a cadeia logística, embora sua aplicação direta pelo consumidor final seja menos comum..

O fluxograma elaborado na Figura 2 apresenta de forma resumida os principais tipos de tecnologias aplicadas em embalagens inteligentes, organizando-as em três grandes categorias: sensores de tempo e temperatura, indicadores de frescor e biossensores.

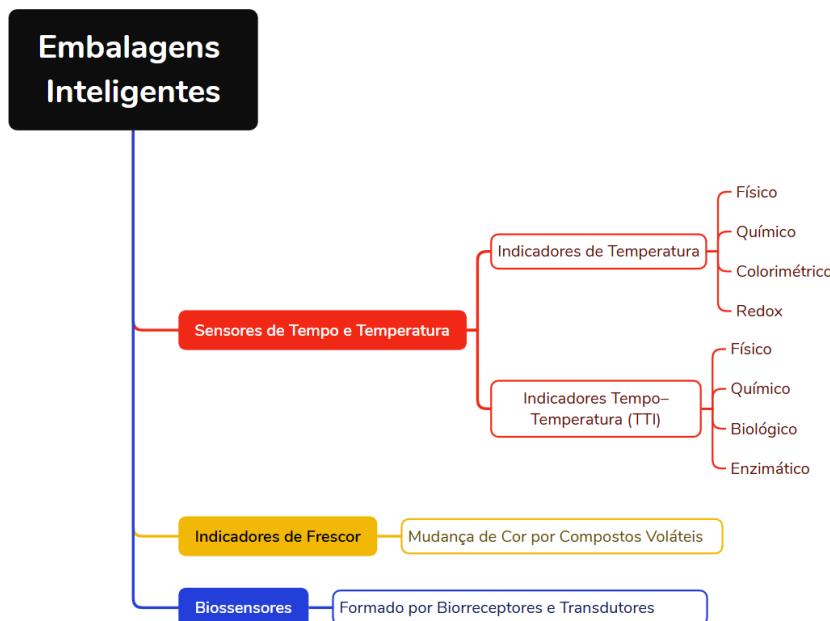


Figura 2: Fluxograma com os tipos de embalagens inteligentes usadas em alimentos.

CONCLUSÕES

A presente revisão destacou os avanços mais recentes na utilização de embalagens inteligentes para enfrentar os desafios globais de segurança alimentar. Vários estudos evidenciam o potencial de novas tecnologias empregadas no monitoramento e preservação de alimentos embalados, contribuindo para prolongar sua vida útil e reduzir perdas ao longo da cadeia produtiva.

Entre as inovações mais promissoras estão as embalagens inteligentes integradas a sensores de tempo e temperatura, indicadores de frescor e biossensores, que permitem acompanhar, de forma prática e confiável, a qualidade dos alimentos. Esses avanços também consideram a sustentabilidade, ao propor soluções que minimizam o desperdício de alimentos e reduzem o impacto ambiental.

Apesar dos importantes desafios, o alto custo de produção, complexidade e dificuldade de escalonamento industrial ainda são barreiras significativas para a popularização desses

dispositivos na indústria alimentícia. Nesse sentido, a continuidade das pesquisas é essencial para o desenvolvimento de soluções mais acessíveis, sustentáveis e baseadas em materiais recicláveis ou biodegradáveis, capazes de atender às demandas da indústria e da sociedade.

Portanto, o desenvolvimento de embalagens inteligentes configura-se como um caminho estratégico para a indústria alimentícia, em consonância com os princípios da economia circular, visando à minimização de desperdícios, à conservação de recursos e à oferta de benefícios diretos ao consumidor. Além disso, esses dispositivos apresentam potencial de aplicação em outras áreas, como a farmacêutica, na qual há elevada demanda por monitoramento das condições de refrigeração de vacinas e medicamentos sensíveis.

AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG (BIP-00196-24 e APQ-03402-22).

REFERÊNCIAS

ADIANI, Vanshika; GUPTA, Sumit; VARIYAR, Prasad S. A simple time temperature indicator for real time microbial assessment in minimally processed fruits. **Journal of Food Engineering**, v. 311, p. 110731, dez. 2021.

AUGUSTIN, Mary Ann *et al.* Innovation in precision fermentation for food ingredients. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 64, n. 18, p. 6218–6238, 14 jul. 2024.

BANESHI, Marzieh *et al.* Designing Plant-Based Smart Food Packaging Solutions for Prolonging Consumable Life of Perishable Foods. **Food Chemistry Advances**, v. 5, p. 100769, dez. 2024.

BIJI, K. B. *et al.* Smart packaging systems for food applications: a review. **Journal of Food Science and Technology**, v. 52, n. 10, p. 6125–6135, 17 out. 2015.

DRAGO, Emanuela *et al.* Innovations in Smart Packaging Concepts for Food: An Extensive Review. **Foods**, v. 9, n. 11, p. 1628, 7 nov. 2020.

EGAN, A. F.; SHAY, B. J.; ROGERS, P. J. Factors affecting the production of hydrogen sulphide by *Lactobacillus sake* L13 growing on vacuum-packaged beef. **Journal of Applied Bacteriology**, v. 67, n. 3, p. 255–262, 11 set. 1989.

EL BILALI, Hamid; BEN HASSEN, Tarek. Disrupted harvests: how Ukraine – Russia war influences global food systems – a systematic review. **Policy Studies**, v. 45, n. 3–4, p. 310–335, 3 maio 2024.

FAO, Organização das Nações Unidas. **FAO combate desperdício de frutas e hortaliças**. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/201527-fao-combate-desperdicio-de-frutas-e-hortalicas>>. Acesso em: 24 jan. 2025.

GHAANI, Masoud *et al.* An overview of the intelligent packaging technologies in the food sector. **Trends in Food Science & Technology**, v. 51, p. 1–11, maio 2016.

GIRARDEAU, A. et al. **Lactic Acid Bacteria**. 1st. ed. Boca Raton : CRC Press, Taylor & Francis Group, [2020]: CRC Press, 2020.

GURUPRASATH, N. et al. Review on emerging applications of nanobiosensor in food safety. **Journal of Food Science**, v. 89, n. 7, p. 3950–3972, 7 jul. 2024.

HU, Rui et al. Novel synergistic freezing methods and technologies for enhanced food product quality: A critical review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 21, n. 2, p. 1979–2001, 18 mar. 2022.

KARIMI ALAVIJEH, Dariush; HELI, Bentolhoda; AJJI, Abdellah. Development of a Sensitive Colorimetric Indicator for Detecting Beef Spoilage in Smart Packaging. **Sensors**, v. 24, n. 12, p. 3939, 18 jun. 2024.

KASHEM, Md Nayeem Hasan et al. Colorimetric polymer nanofilm-based time-temperature indicators for recording irreversible changes of temperatures in cold chain. **Applied Materials Today**, v. 41, p. 102432, dez. 2024.

KIM, Do-Yeong; PARK, Sung-Woo; SHIN, Han-Seung. Fish Freshness Indicator for Sensing Fish Quality during Storage. **Foods**, v. 12, n. 9, p. 1801, 26 abr. 2023.

KUSWANDI, Bambang et al. Smart packaging: sensors for monitoring of food quality and safety. **Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety**, v. 5, n. 3–4, p. 137–146, 30 dez. 2011.

LEE, Eun-Joo; SHIN, Han-Seung. Development of a freshness indicator for monitoring the quality of beef during storage. **Food Science and Biotechnology**, v. 28, n. 6, p. 1899–1906, 7 dez. 2019.

LI, Yuechun et al. Machine learning-assisted nanosensor arrays: An efficiently high-throughput food detection analysis. **Trends in Food Science & Technology**, v. 149, p. 104564, jul. 2024.

LIU, Chongyue et al. Development of a microbial time-temperature indicator for real-time monitoring the quality of Australian vacuum-packed lamb. **International Journal of Food Microbiology**, v. 412, p. 110559, fev. 2024.

MILZI, Ludovica; DIANA, Rosita; PANUNZI, Barbara. Visual food sensing: The state-of-the-art through strategies, tools, analytes, and actual applications. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 139, p. 107096, mar. 2025.

MKHARI, Tshamisane; ADEYEMI, Jerry O.; FAWOLE, Olaniyi A. Recent Advances in the Fabrication of Intelligent Packaging for Food Preservation: A Review. **Processes**, v. 13, n. 2, p. 539, 14 fev. 2025.

MOHAMED, Salah A. A.; EL-SAKHAWY, Mohamed; EL-SAKHAWY, Mohamed Abdel-Monem. Polysaccharides, Protein and Lipid -Based Natural Edible Films in Food Packaging: A Review. **Carbohydrate Polymers**, v. 238, p. 116178, jun. 2020.

MOHEBI, Ehsan; MARQUEZ, Leorey. Intelligent packaging in meat industry: An overview of existing solutions. **Journal of Food Science and Technology**, v. 52, n. 7, p. 3947–3964, 30 jul. 2015.

MÜLLER, Patricia; SCHMID, Markus. Intelligent Packaging in the Food Sector: A Brief Overview. **Foods**, v. 8, n. 1, p. 16, 7 jan. 2019.

MUSTAFA, Fatima; ANDREESCU, Silvana. Nanotechnology-based approaches for food sensing and packaging applications. **RSC Advances**, v. 10, n. 33, p. 19309–19336, 2020.

OSMAN, Ahmed I. *et al.* Recent advances in carbon capture storage and utilisation technologies: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 19, n. 2, p. 797–849, 22 abr. 2021.

PROSEKOV, Alexander Y.; IVANOVA, Svetlana A. Food security: The challenge of the present. **Geoforum**, v. 91, p. 73–77, maio 2018.

PU, Yuan-Yuan; SUN, Da-Wen. Combined hot-air and microwave-vacuum drying for improving drying uniformity of mango slices based on hyperspectral imaging visualisation of moisture content distribution. **Biosystems Engineering**, v. 156, p. 108–119, abr. 2017.

SARI, Vonny Indah *et al.* Smart Labels as Indicators of Tomato Freshness Using Mangosteen Peel Extract. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1177, n. 1, p. 012049, 1 maio 2023.

SHI, Sanyuan *et al.* Metabolite-based biosensors for natural product discovery and overproduction. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 75, p. 102699, jun. 2022.

TASK FORCE FOR GLOBAL ALLIANCE AGAINST HUNGER AND POVERTY. **Social Protection and the Way Forward to Eliminate Poverty and Ensure Human Dignity and Adequate Nutritious Food for All**; Disponível em: <<https://www.gov.br/g20/en/tracks/sherpa-track/hunger-and-poverty>>. Acesso em: 14 set. 2025.

UN. Hunger numbers stubbornly high for three consecutive years as global crises deepen: UN report.

UPADHYAY, Aakash *et al.* Bio-based smart packaging: Fundamentals and functions in sustainable food systems. **Trends in Food Science & Technology**, v. 145, p. 104369, mar. 2024.

VANDERROOST, Mike *et al.* Intelligent food packaging: The next generation. **Trends in Food Science & Technology**, v. 39, n. 1, p. 47–62, set. 2014.

WANG, Shaodong *et al.* Review of Time Temperature Indicators as Quality Monitors in Food Packaging. **Packaging Technology and Science**, v. 28, n. 10, p. 839–867, out. 2015.

WON, Keehoon; JANG, Nan Young; JEON, Junsu. A Natural Component-Based Oxygen Indicator with In-Pack Activation for Intelligent Food Packaging. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 64, n. 51, p. 9675–9679, 28 dez. 2016.

YOUSEFI, Hanie *et al.* Intelligent Food Packaging: A Review of Smart Sensing Technologies for Monitoring Food Quality. **ACS Sensors**, v. 4, n. 4, p. 808–821, 26 abr. 2019.

ZHANG, Wenyang *et al.* A volatile basic nitrogen-responsive tag based on aggregation-induced emission luminogen for real-time monitoring and in situ visualization of salmon freshness. **Analytica Chimica Acta**, v. 1221, p. 340122, ago. 2022.

ZIA, Hassan *et al.* A review study on the effects of thermal and non-thermal processing techniques on the sensory properties of fruit juices and beverages. **Frontiers in Food Science and Technology**, v. 4, 2 ago. 2024.