

# FIBRAS ELETROFIADAS APLICADAS EM EMBALAGENS ATIVAS E INTELIGENTES PARA ALIMENTOS

DOI: 10.22533/at.ed.52823131214

### **Estefani Tavares Jansen**

Departamento de Ciência e Tecnologia Agroindustrial, Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Capão do Leão – RS

### **Igor Henrique de Lima Costa**

Departamento de Ciência e Tecnologia Agroindustrial, Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Capão do Leão – RS

### **Alvaro Renato Guerra Dias**

Departamento de Ciência e Tecnologia Agroindustrial, Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Capão do Leão – RS

### **Elessandra da Rosa Zavareze**

Departamento de Ciência e Tecnologia Agroindustrial, Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Capão do Leão – RS

tem se dado ao papel da embalagem nesse processo. A embalagem, que já apresentava uma série de finalidades como conter, proteger, vender e informar, passou a desempenhar outras funções como monitorar e interagir com o produto e/ou consumidor. Nessa nova perspectiva, surgiram as embalagens ativas e as embalagens inteligentes. As embalagens ativas são aquelas que possuem agentes capazes de interagir com o alimento ou com o espaço livre no interior da embalagem, desencadeando um mecanismo para aumentar as funções de proteção da embalagem, como inibir o crescimento de microrganismos, retardar o amadurecimento de frutos, prevenir a oxidação de lipídios, entre outras funções.<sup>1</sup> Já as embalagens inteligentes são capazes de comunicar ao consumidor as reais condições de um produto ou do ambiente em que ele se encontra,<sup>2</sup> podendo ser aplicadas as mais diferentes técnicas de monitoramento e detecção, que normalmente são simples, mas com o avanço da pesquisa e de ciências como

## 14.1 INTRODUÇÃO

A produção e a conservação de alimentos são temas recorrentes nas políticas públicas para a segurança alimentar e o desenvolvimento sustentável da humanidade. Nos últimos anos, visando melhorar a conservação e a redução de perdas dos alimentos, grande importância

eletrônica, computação e nanotecnologia, embalagens mais elaboradas com melhor espectro de detecção e maior sensibilidade já são uma realidade, apresentando o custo como fator limitante.<sup>2</sup>

As fibras eletrofiadas apresentam características interessantes para aplicação em embalagem ativas e inteligentes para alimentos, como alta eficiência de encapsulamento de compostos ativos, alta porosidade e área superficial e podem ser elaboradas a partir de vários polímeros, tanto sintéticos quanto naturais.<sup>3</sup> Os compostos que apresentam bioatividade normalmente são sensíveis a condições do meio como calor, umidade entre outros. Além disso, a sua liberação deve ser controlada, para que quantidades suficientes de bioativos sejam fornecidas ao longo do tempo no interior da embalagem, mantendo-se assim a qualidade e aumentando-se o período de conservação dos produtos alimentícios.

Nesse capítulo, abordaremos os polímeros mais utilizados para produção de fibras eletrofiadas para aplicações em embalagens ativas e inteligentes para alimentos, dando ênfase aos agentes bioativos e outros compostos utilizados, assim como, os mecanismos de atuação e os resultados obtidos pela aplicação dessa tecnologia em diferentes matrizes alimentares.

## 14.2 SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA EMBALAGENS ATIVAS E INTELIGENTES

Fibras eletrofiadas para aplicação em embalagens ativas e/ou inteligentes podem ser produzidas com polímeros sintéticos ou naturais. No processo de eletrofição, os principais biopolímeros utilizados são polissacarídeos (alginato, amido, pululano, acetato de celulose, quitosana e xantana) e proteínas (zeína, proteína de soro de leite, proteína de soja e gelatina), que são macromoléculas de alto peso molecular).<sup>3,4,5</sup> Polímeros de alto peso molecular não são um pré-requisito para eletrofição, considerando que moléculas de baixo peso molecular podem se reunir em estruturas supramoleculares de forma a aumentar substancialmente a viscoelasticidade da solução polimérica.<sup>6</sup> Exemplos dessas moléculas são as ciclodextrinas, que são oligossacarídeos cíclicos constituídos por seis, sete ou oito unidades de glicose unidas por meio de ligações  $\alpha$ -(1-4), denominadas de  $\alpha$ -,  $\beta$ -, e  $\gamma$ -ciclodextrina, respectivamente. As ciclodextrinas são comumente utilizadas em conjunto com outros polímeros na produção de fibras eletrofiadas para embalagens ativas visando à proteção/encapsulamento de compostos ativos, como os óleos essenciais.<sup>7</sup> As ciclodextrinas formam um complexo de inclusão, estabilizando os compostos bioativos e permitindo uma liberação gradual na embalagem.

A eletrofição de polissacarídeos (maiores detalhes no Capítulo 5) é extremamente dependente de seu peso molecular, grupos funcionais, grau de modificação, entre outros fatores.<sup>8</sup> De modo geral, a concentração da solução polimérica é frequentemente aumentada a um nível onde os raios hidrodinâmicos moleculares começam a se sobrepor para induzir emaranhamentos suficientes de cadeias de polímero para estabilizar o jato de polímero.<sup>9</sup>

Souza *et al.*<sup>4</sup> realizaram uma extensa revisão sobre o uso de polissacarídeos para proteção de óleos essenciais e aplicações direta em alimentos ou como embalagens ativas. Os autores reportaram que um fator crucial é a escolha do polissacarídeo, uma vez que este deve ser compatível, química e estruturalmente, com as propriedades estruturais do carreador, sendo muitas vezes necessária uma modificação química, física ou enzimática no polímero. Outro fator que deve ser considerado na escolha do polímero é o tempo de liberação dos agentes bioativos, considerando que deve ser compatível com o tempo de armazenamento de um alimento perecível.

As proteínas possuem várias propriedades conformacionais, físico-químicas e biológicas únicas, que podem ser exploradas para a encapsulação de compostos bioativos utilizando a técnica de eletrofiação. No entanto, soluções poliméricas elaboradas com proteínas têm alta tensão superficial.<sup>10</sup> Além disso, os polipeptídeos são polieletrólitos e têm emaranhados de cadeia limitados em soluções aquosas. Essas propriedades tendem a dificultar a formação do jato, formando fibras frisadas e gotículas ao invés de fibras contínuas.<sup>11</sup> A desnaturação das proteínas e a adição de um polímero auxiliar de fiação são estratégias comuns para viabilizar os processos eletrohidrodinâmico.<sup>11</sup> A eletrofiação das proteínas globulares, tais como, proteínas do soro de leite e proteínas de soja, é bastante desafiador, devido às estruturas globulares das proteínas e à alta condutividade elétrica das soluções poliméricas.<sup>6</sup> Outros desafios encontrados no desenvolvimento de fibras a base de proteínas são as características como baixa resistência mecânica e instabilidade em meio aquoso, no entanto, essas propriedades são dependentes da aplicação das fibras eletrofiadas. Se as fibras eletrofiadas forem utilizadas na forma de um sachê, contendo um composto volátil com ação antimicrobiana, estas fibras não necessitam de uma alta resistência mecânica. No entanto, se as fibras bioativas forem utilizadas como parte integrante da embalagem, por exemplo, como membranas entre fatias de queijos ou cobertura de um alimento, precisam ter uma maior resistência mecânica, a fim de evitar sua desintegração. Além da adição de polímeros à matriz das fibras a base de proteínas, a resistência mecânica e a estabilidade dessas fibras podem ser melhoradas por reticulação,<sup>8</sup> utilizando reagentes como glutaraldeído. No entanto, a maioria dos reticulantes são tóxicos, dificultando o uso para aplicações em embalagens de alimentos.

Polímeros com ação bioativa também têm sido investigados para aplicação como embalagens ativas, como é o caso da quitosana, que possui propriedade bactericida.<sup>12</sup> Outros polímeros, tais como as poliamidas (Nylon-6, Nylon-11), também têm sido utilizados na produção de fibras eletrofiadas para aplicação em embalagens ativas. Agarwal *et al.*<sup>13</sup> utilizaram a técnica de eletrofiação para depositar nanofibras de Nylon-6 e montmorilonita sobre filmes de polipropileno e aplicaram essas embalagens para proteção de batatas fritas e pães. Os autores reportaram que o uso desses filmes melhorou as propriedades de barreira ao oxigênio e à umidade. No armazenamento de batatas fritas, a redução da peroxidação lipídica foi mais acentuada do que a redução da absorção de umidade.

Também foi observada uma redução da deterioração microbiana do pão, que pode ser atribuída à redução da transferência de oxigênio.

### 14.3 FIBRAS ELETROFIADAS EM EMBALAGENS ATIVAS PARA ALIMENTOS

A embalagem ativa é um sistema alternativo ao modelo de embalagem convencional, uma vez que ela é constituída de agentes ativos que interagem, de forma desejável, com o produto embalado e o ambiente interno da embalagem. Essa interação permite uma maior proteção ao alimento, prolonga, ainda mais, sua vida útil, preserva suas características sensoriais (aparência, aroma e textura) e mantém sua integridade e qualidade.<sup>14</sup>

As embalagens ativas podem ser classificadas de duas formas, de acordo com sua ação ativa: i) como absorvedora, na qual remove substâncias que irão promover alterações indesejáveis no produto e ii) emissora, na qual incorpora substâncias que irão ser liberadas gradativamente e promover alterações desejáveis no produto.<sup>14</sup> A nanotecnologia é uma estratégia que vem sendo adotada como tecnologia emergente no campo de estudo de embalagens para alimentos.<sup>15</sup> Essa tecnologia vem sendo adotada na elaboração de fibras obtidas por eletrofição. Esses materiais possuem uma relação superfície/massa ou superfície/volume superior, que permitem uma maior eficácia no encapsulamento de agentes ativos. Uma vez encapsulado, esses agentes podem ser liberados gradativamente, possibilitando uma ampla variedade de aplicações.<sup>16</sup> Os agentes ativos podem: apresentar natureza antioxidante, inibindo radicais livres e evitando a oxidação dos alimentos; propriedade antimicrobiana, para combater microrganismos indesejáveis, como bactérias, bolores e leveduras, que podem deteriorar e infectar os produtos alimentícios, ocasionando perdas econômicas e doenças nos consumidores; absorver etileno, para retardar o amadurecimento de frutos; produzir aromas, entre outras ações. Um esquema ilustrativo com as possibilidades de aplicações de fibras eletrofiadas em embalagens ativas está apresentada na Figura 14.1.

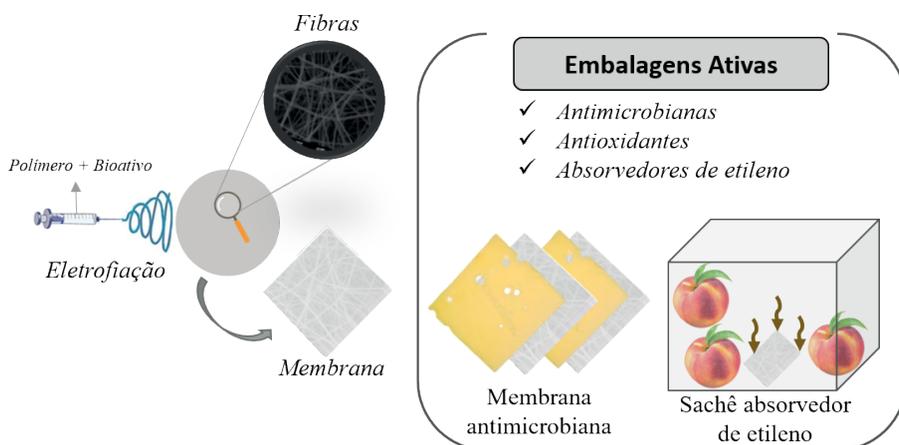


Figura 14.1. Representação gráfica da aplicação de fibras eletrofiadas em embalagens ativas.

Compostos bioativos como óleos essenciais e compostos isolados (por exemplo, curcumina, carvarol, eugenol, ácido gálico) têm sido encapsulados em nanofibras para o desenvolvimento de embalagens ativas de alimentos, com os objetivos de proteger suas ações bioativas (antimicrobiana, antifúngica e/ou antioxidante), aumentar a estabilidade térmica e permitir uma liberação gradual.<sup>17-20</sup> Para aplicação dos compostos que possuem alta volatilidade muitas vezes é necessária a obtenção de um complexo de inclusão do agente ativo com ciclodextrinas, antes do processo de eletrofiação, visando aumentar a proteção desses compostos e garantir uma liberação gradual na embalagem. A encapsulação de um complexo de inclusão de ciclodextrina e eugenol em nanofibras de poli(vinil álcool) (PVA) foi estudada por Kayaci *et al.*,<sup>21</sup> a fim de alcançar alta estabilidade térmica e liberação lenta do eugenol com potencial aplicação em embalagens ativas de alimentos. O eugenol é um composto com propriedades antimicrobianas que pode ser facilmente oxidado quando exposto ao oxigênio, luz ou calor e, por esse motivo, a encapsulação em fibras eletrofiadas permitem sua proteção contra a degradação e, conseqüentemente, a preservação de sua ação antimicrobiana.

A incorporação de dióxido de titânio em nanofibras eletrofiadas tem sido utilizada como agente ativo visando a absorção de etileno em embalagens de frutas na forma de sachê fixado na parede da embalagem.<sup>22</sup> Compostos aromáticos também têm sido encapsulados em fibras eletrofiadas, permitindo a liberação gradual do aroma no interior da embalagem.<sup>23</sup>

### 14.3.1 Ação antimicrobiana

Os estudos que reportam a encapsulação de agentes ativos com ação antimicrobiana via eletrofiação para aplicação como embalagem ativa em alimentos, no geral, realizam a aplicação *in vitro*, com microrganismos, ou *in situ*, com o alimento. Na Tabela 14.1 são apresentados alguns estudos sobre o encapsulamento via eletrofiação de agentes ativos antimicrobianos para aplicação como embalagem ativa de alimentos.

Tabela 14.1. Fibras eletrofiadas com atividade antimicrobiana para embalagens ativas em alimentos.

Agente encapsulante	Agente ativo	Aplicação <i>in vitro</i>	Aplicação <i>in situ</i>	Referência
Zeína	Antocianina	<i>E. coli</i>	-	24
Pululano e quitina	Antocianina e curcumina	<i>E. coli</i> e <i>S. aureus</i>	Filé de <i>Plectorhynchus cinctus</i>	25
Gelatina	Curcumina	<i>E. coli</i> e <i>S. aureus</i>	-	26
Amido	Carvacrol	<i>Penicillium sp.</i> e <i>A. flavus</i>	Pão / massa de pão	18
Poli(ácido láctico) e poli(vinil álcool)/poli(etilenoglicol)	Óleo essencial de tomilho	<i>E. coli</i> e <i>S. aureus</i>	Morangos	27
Zeína e $\beta$ -ciclodextrina	Óleo essencial de eucalipto	<i>S. aureus</i> e <i>L. monocytogenes</i>	-	7
Poli(óxido de etileno), zeína e proteína isolada de soja	Óleo essencial de gengibre	<i>L. monocytogenes</i>	Queijo tipo Minas	28

*E. coli*: *Escherichia coli*; *S. aureus*: *Staphylococcus aureus*; *A. flavus*: *Aspergillus flavus*; *L. monocytogenes*: *Listeria monocytogenes*.

As antocianinas têm sido muito utilizadas em embalagens ativas, uma vez que demonstram atividade antimicrobiana ao estimular danos celulares através de uma série de mecanismos e, como consequência, desencadeiam a destruição celular.<sup>29</sup> É importante mencionar que esses compostos possuem atividade frente à bactérias Gram positivas e Gram negativas e, quanto menor o peso molecular das antocianinas, mais fácil será sua penetração na célula bacteriana.<sup>30</sup> Esses pigmentos pertencem ao grupo dos compostos fenólicos e, em geral, possuem algum efeito significativo contra células microbianas, o qual é dependente da concentração. Quando em baixas concentrações, estes compostos afetam a atividade enzimática, em especial, as que promovem a produção de adenosina trifosfato (ATP). Seu efeito inibitório no crescimento microbiano e produção de toxinas é associado à sua capacidade de reagir com as proteínas de membrana e alterar suas funções. Esses compostos podem afetar a resposta fisiológica de microrganismos, causar distúrbios em enzimas responsáveis pelo crescimento de esporos e interferir em aminoácidos necessários ao crescimento celular.<sup>31</sup>

As antocianinas podem inibir a expressão de genes de virulência das bactérias, afetando sua estabilidade e adaptação ao ambiente e promover o rompimento da parede celular. Como consequência disso, ocorre a perda de íons, como sódio ( $\text{Na}^+$ ) e potássio ( $\text{K}^+$ ), inibição do crescimento e destruição da estrutura celular.<sup>32,33</sup> Em bolores, as antocianinas têm ação significativa contra o crescimento de hifas e germinação de conídios, ocasionando modificações estruturais, como perda de integridade e ruptura da parede celular, e tem sua função básica de reprodução inibida, contudo, essa ação depende da dose e tempo de exposição.<sup>34</sup>

Avila *et al.*<sup>24</sup> encapsularam cianidina-3-glicosídeo, uma antocianina glicosilada, extraída da casca de jabuticaba (*Plinia cauliflora*), em fibras ultrafinas de zeína via eletrofiação. Os autores avaliaram a atividade antibacteriana desses materiais frente a *E. coli* (bactéria Gram negativa) e constataram uma inibição de 22,21% do crescimento dessa bactéria na concentração de extrato da casca de jabuticaba de 50 mg mL<sup>-1</sup>. Este resultado indica que o extrato de jabuticaba encapsulado em fibras eletrofiadas tem potencial ser aplicado em embalagens ativas com ação antimicrobiana.

A curcumina possui ação antimicrobiana frente a bactérias Gram positivas e Gram negativas. Tratamentos de isolados bacterianos com esse polifenol restringem o crescimento de bactérias ao ocasionar peroxidação lipídica e fragmentação de ácido desoxirribonucleico (DNA), características essas de indícios de estresse oxidativo. A geração de espécies reativas de oxigênio intracelular, em função da peroxidação lipídica, pode ocasionar danos aos componentes da célula, como ácidos nucleicos, proteínas e lipídeos e, conseqüentemente, induz à apoptose (morte celular programada). As bactérias Gram positivas não possuem a parede celular externa de lipopolissacarídeo das bactérias Gram negativas e, devido a isso, parecem demonstrar maior sensibilidade ao estresse oxidativo induzido pela curcumina. Outro fator limitante ao crescimento de bactérias é a diminuição da concentração do aminoácido L-triptofano, um nutriente essencial para esses microrganismos.<sup>35</sup> Em bolores, a curcumina possui efeito inibitório significativo. Sua ação na membrana celular ocasiona perda de íons intracelular essenciais para a homeostase da célula, como o K<sup>+</sup>. A perda desse componente compromete as funções da membrana e pode ocasionar a morte da célula. O dano à membrana também promove a dissipação do potencial de membrana da célula e perturba sua integridade. Foi sugerido que a curcumina interage com a bicamada de fosfolipídios da célula, resultando na ruptura da organização da membrana e causando danos físicos e inibição de genes relacionados a membrana de bolores.<sup>36</sup> Nas leveduras, a curcumina penetra nas células, concentrando-se nas membranas do retículo endoplasmático e atuando na redução de ferro intracelular, ocasionando um atraso no crescimento desses microrganismos.<sup>37</sup>

A curcumina também tem sido muito utilizada como agente antimicrobiano em embalagens ativas, inclusive podem ser utilizadas combinadas, conforme o estudo de Duan *et al.*,<sup>25</sup> que encapsularam antocianinas e curcumina comerciais em pululano e quitina pela técnica de eletrofiação, obtendo nanofibras bioativas com potencial para aplicação como embalagem ativa e inteligente. A ação antibacteriana das nanofibras foi avaliada pelo método de disco difusão frente às bactérias *E. coli* e *S. aureus* (Gram positiva). As zonas de inibição obtidas com as fibras puras (ausentes de agente bioativo) foram de 16,17 e 14,5 mm de diâmetro para *E. coli* e *S. aureus*, respectivamente. Com a adição de curcumina, os diâmetros aumentaram para 22,83 e 23,67 mm, respectivamente. Quando compararam a ação antibacteriana das fibras puras com as fibras contendo antocianinas, a atividade destas últimas foi maior, apresentando zona de inibição com diâmetros de

17,83 e 20,33 mm, respectivamente. Em outra etapa do estudo, as fibras contendo os dois agentes bioativos apresentaram diâmetros da zona de inibição de 22,83 e 22,67 mm, respectivamente. *In situ*, as nanofibras apresentaram mudança de coloração em função da mudança de pH resultante da decomposição de filé de pescado (*Plectorhynchus cinctus*) que ocorreu, em parte, pela atividade de microrganismos que elevou a quantidade de nitrogênio volátil e, conseqüentemente, aumentou o pH do ambiente (ver seção 14.4.1). Os resultados indicaram que a adição de curcumina melhorou a atividade antimicrobiana das fibras e, portanto, esses materiais podem ser utilizados para inibir o desenvolvimento de microrganismos indesejáveis em embalagens de alimentos e estender a vida útil dos produtos.

Deng *et al.*<sup>26</sup> também estudaram o potencial de aplicação da curcumina como agente antimicrobiano em embalagens de alimentos, através de sua encapsulação em nanofibras eletrofiadas de gelatina. Os autores avaliaram a influência de surfactantes (Tween 80, dodecilsulfonato de sódio aniônico (SDS) e brometo de cetiltrimetil amônio catiônico (CTAB)) na ação antimicrobiana da curcumina encapsulada contra *E. coli* e *S. aureus*. Como resultado, obteve-se uma zona de inibição para *E. coli* com diâmetro de 11,99 mm apenas com as nanofibras contendo curcumina/CTAB. Frente à *S. aureus*, foram obtidas zonas de inibição de 11,30 mm, 14,96 mm e 20,73 mm para nanofibras contendo curcumina e Tween 80, SDS e CTAB, respectivamente. Portanto, esses materiais foram mais efetivos em inibir o crescimento de *S. aureus*, principalmente com o uso do CTAB.

A ação dos óleos essenciais é dependente de sua composição química, arranjo espacial e cepa microbiana ao qual é exposto. Vários estudos demonstraram que as bactérias Gram positivas são mais susceptíveis aos óleos essenciais comparadas as Gram negativas, pois esses microrganismos não possuem a membrana externa, rígida e mais complexa (rica em lipopolissacarídeo) das bactérias Gram negativas. As Gram positivas possuem uma parede espessa, composta por peptidoglicano, mas, não o suficiente para impedir que pequenas moléculas antimicrobianas tenham acesso à membrana celular. Outro fator que contribui para a maior susceptibilidade dessa classe de bactérias aos óleos essenciais é a presença de extremidades lipofílicas do ácido lipoteicoico na membrana celular.<sup>38-40</sup>

Além disso, a ação antibacteriana parece estar intrinsecamente relacionada com a hidrofobicidade do óleo essencial. Essa característica permite com que o óleo essencial interaja com a membrana celular lipofílica, induzindo à sua perda de integridade e aumento da permeabilidade, penetre as cadeias de ácidos graxos da bicamada lipídica da célula e ocasione lesões intracelulares. Com a quebra da membrana ocorre a interrupção de várias atividades da célula, incluindo a produção de ATP (acoplado à membrana), o transporte da membrana e outras funções regulatórias relacionadas ao metabolismo. Além disso, reduz o potencial de membrana, afeta a comunicação com outras bactérias (*quorum sensing*), causa distúrbios nas bombas de prótons e íons até interromper sua função e ocasiona

o esgotamento de ATP. Pode gerar ainda um efeito cascata que afeta várias organelas da célula.<sup>40,41</sup> Nos bolores, ocorre basicamente o mesmo. Em geral, os óleos essenciais penetram e rompem a parede celular fúngica e as membranas citoplasmáticas, lesionando as mitocôndrias ao desintegrar suas membranas, ocasionado por alterações no fluxo de elétrons dentro da cadeia transportadora de elétrons e, conseqüentemente, diminuindo o potencial de membrana, afetando a produção de ATP na célula, o funcionamento dos canais iônicos e bombas de prótons. As alterações na fluidez da membrana ocasionam perda de eletrólitos e inviabiliza as vias do citocromo C e metabolismo das proteínas. Por fim, o processo de permeabilização das membranas mitocondriais pode induzir a célula fúngica a apoptose ou necrose celular (morte celular em decorrência de uma lesão), e também pode ser observada a inibição de esporos.<sup>40,42,43</sup>

Os óleos essenciais encapsulados em fibras eletrofiadas possuem diversos efeitos antimicrobianos, tais como: ação contra *Clostridium perfringens* quando aplicado em embutidos de carne bovina;<sup>44</sup> como material de embalagem para champignon (*Agaricus bisporus*) fresco, prolongando a vida útil dos cogumelos e mantendo sua propriedade sensorial durante o armazenamento;<sup>45</sup> eficácia antimicrobiana em carne fresca contaminada com *Listeria monocytogenes*;<sup>46</sup> atividade antifúngica contra *Alternaria alternata*, isolada de maçãs infectadas;<sup>1</sup> *Origanum vulgare* L. e atividade antifúngica contra o patógeno *Botrytis* da romã, minimizando as perdas pós-colheita na fruta,<sup>47</sup> entre outras.

Min *et al.*<sup>27</sup> encapsularam óleo essencial de tomilho em nanofibras de poli(ácido láctico) poroso eletrofiadas ou revestidas com misturas de poli(vinil álcool)/poli(etilenoglicol). Os autores avaliaram a taxa de inibição *in vitro* de *E. coli* e *S. aureus* ao produzir filmes contendo as nanofibras. Como resultado, foi obtido inibição superior a 99% de UFC/mL, indicando elevada atividade antibacteriana, mas, este resultado foi dependente do tempo de exposição às nanofibras. Ao aplicar o filme em bandejas contendo morangos, foi observado que os frutos recobertos com os filmes contendo nanofibras e óleo essencial preservaram bem o seu frescor, diferentemente do grupo controle (filme contendo nanofibras sem óleo essencial) que demonstraram deterioração fúngica após 3 dias de armazenamento. Por fim, esses materiais foram considerados eficazes contra bactérias e fungos deteriorantes.

Tavares *et al.*<sup>28</sup> aplicaram óleo essencial de gengibre (12% v/v) em fibras ultrafinas eletrofiadas de poli(óxido de etileno) (PEO), zeína e proteína isolada de soja. Os autores demonstraram o potencial de aplicação das nanofibras em embalagens ativas para armazenamento de queijo Minas frescal, uma vez que o óleo essencial de gengibre encapsulado nas fibras eletrofiadas reduziu significativamente a proliferação de *L. monocytogenes* durante o armazenamento refrigerado por 12 dias.

Compostos isolados de óleos essenciais também podem ser utilizados como compostos ativos para embalagem de alimentos, conforme estudado por Fosenca *et al.*,<sup>18</sup> que avaliaram a susceptibilidade *in vitro* de bolores (*Penicillium sp.* e *Aspergillus flavus*) às nanofibras eletrofiadas de amido contendo carvacrol (composto majoritário presente

em óleo essencial). Esses materiais foram incorporados à massa de pão e utilizados no desenvolvimento de sachês ativos com a finalidade de mitigar a deterioração do pão pela ação dos bolores. Em ensaios de difusão em ágar e micro-atmosfera, as nanofibras com diferentes concentrações de carvacrol (30% ou 40%, v/m) apresentaram zonas de inibição com baixo crescimento de bolores e foram eficazes em inibir ambos os fungos. Além disso, os autores avaliaram a Concentração Inibitória Mínima (MIC, sigla em inglês de *Minimum Inhibitory Concentration*) e a Concentração Fungicida Mínima (MFC, sigla em inglês de *Minimum Fungicidal Concentration*). Os MIC's para nanofibras com 30% de carvacrol foram de 0,098 e 9,8 mg.mL<sup>-1</sup> contra *Penicillium sp.* e *Aspergillus flavus*, respectivamente; e para nanofibras com 40% de carvacrol, o MIC foi de 19,6 mg.mL<sup>-1</sup> contra *Aspergillus flavus*. Para o MFC, apenas as nanofibras com 30% de carvacrol exerceram efeito fungicida significativo. Para as aplicações *in situ*, a massa de pão demonstrou baixa unidade formadora de colônias por grama de alimento (UFC/g) de 8,3, 13,0 e > 150,0 para os dias 0, 3 e 7 a 25 °C. As embalagens bioativas contendo sachê com 30% de carvacrol foram eficazes na prevenção da deterioração do pão. Portanto, essas nanofibras são uma excelente alternativa aos aditivos químicos utilizados na indústria de alimentos e uma alternativa para aplicação como embalagens ativas.

As fibras eletrofiadas representam um avanço na nanotecnologia aplicada a embalagem de alimentos. Esses materiais, como visto anteriormente, apresentam elevado potencial antimicrobiano, contribuindo para a preservação de produtos embalados e com alimentos seguros, evitando a veiculação de doenças de origem alimentar.

### 14.3.2 Ação antioxidante

Uma das principais causas de deterioração dos alimentos é a reação de oxidação, catalisada por fatores como calor, luz, enzimas, metais e microrganismos. Essa reação ocorre através da presença de radicais livres, que são moléculas que geralmente apresentam um átomo de oxigênio com elétron desemparelhado, sendo instáveis e altamente reativas. Assim, de modo a retornarem a um estado mais estável, essas moléculas capturam elétrons de moléculas vizinhas, formando outros radicais livres e propagando a reação em cadeia de oxidação.<sup>48,49</sup>

O processo de oxidação é responsável por alterações indesejadas em características sensoriais do alimento, como textura, cor, sabor e aroma. Adicionalmente, reduz o valor nutricional dos produtos, pois causa a perda de aminoácidos essenciais, vitaminas, ácidos graxos e outras moléculas bioativas.<sup>48,50</sup> A fim de limitar os efeitos prejudiciais da oxidação, a solução mais utilizada atualmente é a adição de agentes antioxidantes diretamente nos alimentos. Todavia, essa técnica apresenta consequências indesejáveis, como a redução da atividade antioxidante desses compostos devido a interação com o alimento e a rápida deterioração do mesmo após o consumo de todo o agente oxidante adicionado

durante o processamento.<sup>51</sup> À vista disso, diversos pesquisadores tem se dedicado ao desenvolvimento de embalagens ativas com agentes antioxidantes, pois esses sistemas são capazes de realizar, de forma controlada durante todo o armazenamento, a liberação ou absorção de substâncias ativas dos alimentos e do espaço interno da embalagem, inibindo ou retardando a ocorrência de oxidação e rancidez.<sup>52,53</sup>

Uma variedade de agentes antioxidantes já foi estudada para o desenvolvimento de embalagens ativas, como, por exemplo, os antioxidantes sintéticos BHT (*Butylated Hydroxytoluene*, em português, Butil Hidroxi Tolueno) e o BHA (*Butylated Hydroxyanisole*, em português, Butil Hidroxi Anisol). No entanto, devido aos possíveis prejuízos que essas substâncias podem causar à saúde humana, alternativas naturais estão sendo estudadas, como os óleos essenciais e os extratos aquosos e alcoólicos obtidos de diversas fontes biológicas.<sup>49,53</sup>

Embora, a capacidade antioxidante total desses extratos ou óleos essenciais seja dependente do método de extração utilizado e das características químicas de cada extrato obtido, eles são considerados eficazes para interagir com os alimentos e prevenir as reações de oxidação, evitando danos às moléculas do alimento, quando aplicados a embalagens de alimentos.<sup>53</sup> Os agentes antioxidantes utilizam dois mecanismos para interferir nas reações de oxidação, conforme a Figura 14.2.

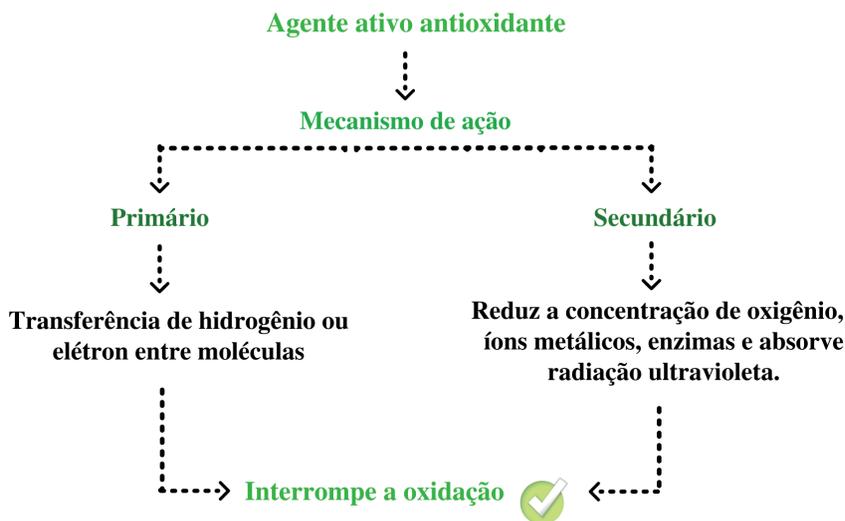


Figura 14.2. Mecanismos de interferência dos agentes ativos antioxidantes nas reações de oxidação.

No mecanismo denominado como primário, o antioxidante age transferindo um de seus hidrogênios para a molécula oxidante ou recebendo um elétron desemparelhado da mesma, que após essa reação se tornará um composto estável. Isso ocorre devido à possibilidade de ressonância na estrutura química das moléculas antioxidantes, que

conseguem se estabilizar mesmo após a reação com uma molécula instável e evitam a propagação da reação de oxidação e a formação de outros radicais livres.<sup>50,54</sup> No mecanismo secundário, os antioxidantes previnem ou retardam a oxidação por meio da eliminação de espécies promotoras de reação. Assim, agem reduzindo concentrações localizadas de oxigênio, de íons metálicos, de enzimas pró-oxidativas e de outras moléculas oxidantes. Os agentes antioxidantes podem também absorver a radiação ultravioleta, minimizando a foto-oxidação. Todas essas formas de interação dos dois mecanismos de ação dos antioxidantes impedem a formação ou a manutenção da reação em cadeia de oxidação e protegem o alimento.<sup>50,54</sup>

A avaliação da atividade antioxidante total desses agentes pode ser realizada por ensaios *in vitro*, que mensuram a capacidade dos mesmos de eliminarem radicais livres em análises padronizadas. São exemplos de métodos comumente empregados: eliminação do radical DPPH (1,1-difenil-2-picrihidrazil), capacidade antioxidante equivalente ao Trolox (TEAC, sigla em inglês de *Trolox equivalent antioxidant potential*), capacidade de absorção do radical oxigênio (ORAC, sigla em inglês de *Oxygen radical absorbance capacity*), determinação do poder redutor do íon férrico (FRAP, sigla em inglês de *Ferric reducing antioxidant power*) e capacidade de eliminação do radical hidroxila (HRSCA, sigla em inglês de *Hydroxyl radical scavenging capacity assay*). Ensaio *in situ* também são empregados para a avaliação direta em amostras de alimentos, como a análise de substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico (TBARS, sigla em inglês de *Thiobarbituric acid reactive substance*).<sup>54,55</sup>

Em virtude da sensibilidade dos agentes antioxidantes a fatores ambientais e da necessidade de uma liberação controlada ao longo de toda a vida útil do gênero alimentício embalado, a técnica de eletrofição se torna adequada para a produção de fibras eletrofiadas para embalagens ativas de alimentos com ação antioxidante.<sup>56</sup> A Tabela 14.2 apresenta alguns exemplos, abordando os compostos ativos encapsulados, a composição polimérica do material de parede e o método de avaliação utilizado (*in vitro* e/ou *in situ*) para mensurar a capacidade antioxidante das fibras eletrofiadas.

Tabela 14.2. Fibras eletrofiadas com ação antioxidante em embalagens ativas.

Agente antioxidante	Material empregado	Avaliação	Referência
Ácido gálico	Hidroxipropilmetilcelulose e poli(óxido de etileno)	<i>In vitro</i> : DPPH <i>In situ</i> : TBARS em embalagem para nozes	57
Ácido gálico	Zeína	<i>In vitro</i> : DPPH	58
Antocianinas e curcumina	Pululano e quitina	<i>In vitro</i> : DPPH	25
Carvacrol	Zeína e poli(ácido láctico)	<i>In vitro</i> : DPPH	59
Extrato de <i>Aloe vera</i>	poli(óxido de etileno)	<i>In vitro</i> : DPPH, TEAC e FRAP	60
Óleo essencial de louro e de alecrim	Poli(vinil álcool)	<i>In situ</i> : TBARS em filé de peito de frango	55
Óleo essencial de zenian	Zeína, poli(ácido láctico) e hidroxipropilmetilcelulose	<i>In vitro</i> : DPPH	61

As fibras produzidas por eletrofiação podem ser utilizadas, por exemplo, para a encapsulação de ácido gálico, um composto fenólico que possui sabor amargo e adstringente, encontrado em diversas fontes botânicas e que apresenta atividades antimicrobiana, anti-inflamatória e antioxidante.<sup>57,58</sup> Os polímeros hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) e poli(óxido de etileno) (PEO) foram utilizados para a formação de fibras eletrofiadas visando à encapsulação de ácido gálico em concentrações iguais a 2, 5 e 10 % (p/p, em relação as fibras sólidas).<sup>57</sup> A maior concentração de ácido gálico na solução polimérica acarretou em uma queda na viscosidade (em razão de maior quantidade de solvente etanólico para garantir a concentração desejada de ácido gálico) e aumento da condutividade (devido a dissociação do ácido gálico em espécies iônicas). Em todas as concentrações encapsuladas, as fibras eletrofiadas de HPMC:PEO com ácido gálico apresentaram-se homogêneas, lisas, sem *beads* (desuniformidade na continuidade da fibra com formato arredondado) e com tamanho uniforme. No entanto, o diâmetro médio foi afetado pela presença do composto ativo. As fibras eletrofiadas com 10% (p/p) de ácido gálico tiveram o menor diâmetro (267 nm) e, em contraste, as fibras sem o composto ativo apresentaram o maior diâmetro (301 nm). As fibras com maior concentração de ácido gálico também demonstraram a melhor eficiência de encapsulação (69,0%) e a maior atividade antioxidante em relação ao radical DPPH (50,35% de inibição do radical), quando comparada ao ácido gálico livre. Os resultados da análise de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR, sigla em inglês de *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) indicaram que o ácido gálico e os polímeros interagiram em nível molecular, evidenciando a eficiência de encapsulação e a estabilidade do composto bioativo carregado nas fibras eletrofiadas.<sup>57</sup> Em uma avaliação *in situ*, as fibras de HPMC:PEO com ácido gálico (10%, p/p) foram utilizadas como embalagem para nozes inteiras. As análises que avaliaram a oxidação das amostras durante o armazenamento (40 °C por 21 dias) demonstraram diferença significativa entre as nozes embaladas com e sem a presença de fibras eletrofiadas ativas. Esse fato evidencia que as fibras de HPMC:PEO com ácido gálico podem ser utilizadas de forma eficaz como embalagem ativa antioxidante de alimentos com alto teor de lipídeos.<sup>57</sup>

O biopolímero zeína, uma proteína hidrofóbica derivada do milho, também foi utilizado para encapsular o ácido gálico pela técnica de eletrofiação em concentrações iguais a 5, 10 e 20% (p/p, teor de ácido gálico em relação às fibras sólidas).<sup>58</sup> A presença do composto ativo alterou as propriedades reológicas da solução polimérica, aumentando a viscosidade e reduzindo a condutividade da mesma. Também influenciou a morfologia das fibras formadas, pois os diâmetros médios aumentaram conforme o aumento da concentração de ácido gálico. Para as fibras eletrofiadas formadas apenas com polímero, o diâmetro médio foi igual a 290 nm e as fibras com 20% (p/p) de ácido gálico apresentaram diâmetro médio de 387 nm. A análise por FTIR do material apontou uma interação molecular entre a zeína e o ácido gálico, demonstrando que ambos são compatíveis e que o ácido gálico

se mantém estável nas fibras eletrofiadas. Os autores também reportaram que a eficiência de encapsulação do composto ativo nas fibras, para as três concentrações de ácido gálico, foi próxima a 100%, evidenciando que a eletrofiação é uma metodologia adequada para o encapsulamento deste agente ativo. As fibras eletrofiadas com 20% (p/p) de ácido gálico apresentaram a maior atividade antioxidante em relação ao radical DPPH com inibição de 88,6%. O ácido gálico livre na mesma concentração dessas fibras não apresentou diferença significativa em reação com o radical DPPH, sugerindo que a encapsulação em zeína por eletrofiação não afeta a atividade antioxidante do composto ativo, apesar de existirem interações entre o mesmo e o material de parede.<sup>58</sup>

Fibras eletrofiadas também podem ser produzidas a partir de blends, como a mistura de pululano e quitina. A adição desse último polímero se faz necessária para melhorar as propriedades mecânicas insatisfatórias do pululano puro, visto que a quitina é um agente de reforço que apresenta elevada resistência mecânica. Portanto, a união dos dois polímeros permitiu produzir fibras eletrofiadas mais estáveis em relação às propriedades mecânicas.<sup>25</sup> Assim, uma solução polimérica contendo pululano e quitina foi utilizada para encapsular antocianinas e curcumina em concentrações individuais iguais a 3,8 e 0,2 % (p/v), respectivamente. As fibras após encapsulação dos agentes ativos não apresentaram diferenças morfológicas significativas em relação às fibras sem os mesmos compostos. Todavia, o diâmetro médio das fibras aumentou devido à encapsulação dos compostos ativos. Para as fibras eletrofiadas puras, com antocianinas e com curcumina (encapsuladas individualmente), e com os dois compostos ativos encapsulados, os diâmetros médios foram iguais a 176, 271, 284 e 379 nm, respectivamente. A análise FTIR mostrou interações do tipo ligações de hidrogênio entre o pululano, a quitina e os compostos ativos, indicando que esses foram adequadamente encapsulados pelas fibras eletrofiadas.<sup>25</sup> Em relação à capacidade de eliminação do radical DPPH, as fibras com os compostos antocianinas e curcumina apresentaram resultados iguais a 49,06 e 51,29% de inibição, respectivamente, ou seja, as fibras com curcumina foram mais efetivas para eliminar radicais livres. Porém, a capacidade antioxidante das fibras que continham simultaneamente antocianinas e curcumina foi superior a esses dois valores, apresentando resultado igual a 61,72 %, sugerindo que há um sinergismo entre os dois agentes ativos que melhora a capacidade antioxidante das fibras eletrofiadas frente ao radical DPPH.<sup>25</sup>

Outro composto com atividade antioxidante que tem sido utilizado para embalagens ativas é o carvacrol, que foi encapsulado em fibras de zeína e de poli(ácido láctico) (PLA) em níveis de 5, 10 e 20% (p/p, em relação ao teor de polímero).<sup>59</sup> As fibras de zeína apresentaram morfologia na forma de fita e a adição de concentrações mais altas do composto ativo reduziu o diâmetro médio das mesmas. Assim, as fibras de zeína contendo carvacrol nas concentrações 0, 5, 10 e 20% (p/p) apresentaram diâmetros médios iguais a 604, 647, 539 e 553 nm, respectivamente. As fibras de PLA apresentaram morfologia lisa e uniforme. Em relação ao diâmetro médio, foi observado comportamento inverso ao da zeína, pois a adição

de carvacrol ao PLA aumentou o diâmetro médio das fibras, resultando em valores iguais a 1899, 822, 1914 e 2268 nm para as concentrações 0, 5, 10 e 20 % (p/p), respectivamente. Os espectros FTIR de ambos os materiais de parede indicam interações do tipo ligações de hidrogênio entre ambos os polímeros e o carvacrol e evidenciam uma encapsulação adequada do composto ativo nos materiais de parede.<sup>59</sup> No ensaio com DPPH, ambas as fibras eletrofiadas apresentaram capacidade de eliminar esse radical e a ação antioxidante das duas fibras foi maior para a concentração mais alta de carvacrol encapsulado. Assim, as fibras de zeína e PLA com 20% (p/p) de carvacrol apresentaram atividades antioxidantes frente ao radical DPPH iguais a 65 e 75% de inibição, respectivamente.<sup>59</sup>

Fibras eletrofiadas com morfologia lisa e sem *beads* foram obtidas com extrato de *Aloe vera* encapsulado pelo polímero PEO em concentrações de 0, 5, 10 e 20% (p/p, em relação ao teor de polímero na solução).<sup>60</sup> O diâmetro médio das fibras sem extrato foi maior em relação às fibras com 5% de extrato de *Aloe vera*, exibindo valores iguais a 234 e 185 nm, respectivamente. Esse decréscimo no diâmetro pode ser relacionado com a menor viscosidade e maior condutividade elétrica da solução polimérica com extrato. As fibras eletrofiadas com maiores teores de extrato (10 e 20%, p/p) apresentaram comportamento diferenciado, com distribuição de diâmetro bimodal, produzindo fibras mais finas e outras mais espessas em ambas as concentrações de extrato. Esse fenômeno pode ser explicado em relação à diferenças na eficiência de encapsulação do extrato, levando a formação de fibras com diferentes diâmetros.<sup>60</sup> Os resultados obtidos por FTIR demonstraram que o extrato interage com matriz polimérica por meio de ligações de hidrogênio e que o mesmo foi encapsulado eficientemente dentro das fibras eletrofiadas. Os resultados das três metodologias empregadas na avaliação *in vitro* da capacidade antioxidante (DPPH, TEAC e FRAP) mostraram resultados semelhantes entre si e apontam uma tendência crescente na ação antioxidante das fibras eletrofiadas com o aumento da quantidade de extrato encapsulado.<sup>60</sup>

Os óleos essenciais também podem ser empregados como agentes antioxidantes em fibras eletrofiadas. Um exemplo é a encapsulação dos óleos essenciais de especiarias como o louro (*Laurus nobilis*) e o alecrim (*Rosmarinus officinalis*) em fibras de PVA.<sup>55</sup> Devido à alta solubilidade desse polímero em água, o ácido cítrico foi adicionado à solução polimérica como agente de reticulação e as fibras eletrofiadas passaram por um processo térmico a 170 °C por 10 min para uma reticulação eficaz.<sup>55</sup> A adição do ácido cítrico não apresentou efeito significativo na viscosidade da solução polimérica, mas aumentou a condutividade elétrica da mesma, provavelmente devido à ionização do ácido em solução. Quando os óleos essenciais foram adicionados à solução polimérica, ocorreu um aumento da condutividade e da viscosidade da mesma. Em relação aos diâmetros médios das fibras, a adição simultânea de ácido cítrico e dos óleos essenciais reduziu o diâmetro das fibras puras de 235 nm para 171 e 210 nm para as fibras com os óleos essenciais de louro e alecrim, respectivamente.<sup>55</sup> Essas fibras eletrofiadas foram aplicadas em um ensaio *in*

*situ* com filés de peito de frango armazenados sob refrigeração (4 °C) por sete dias. Ao final desse período, as amostras embaladas com as fibras eletrofiadas demonstraram redução da oxidação dos lipídeos, segundo análise TBARS, em relação aos filés de peito de frango embalados sem as fibras. Os resultados foram iguais a 42,95 e 64,90% de inibição da oxidação para as amostras avaliadas com as fibras de óleos essenciais de alecrim e louro, respectivamente. Esses resultados demonstram que, embora o tratamento térmico com alta temperatura, empregado durante o processo de reticulação, tenha degradado os compostos presentes nos óleos essenciais, conforme demonstrado pela análise termogravimétrica (TGA, do inglês *thermogravimetric analysis*). Uma parte desses compostos ainda permaneceu nas fibras e foi capaz de apresentar atividade antioxidante quando aplicado a carne de frango como embalagem antioxidante.<sup>55</sup>

Uma blenda formada por três polímeros, zeína, PLA e HPMC, foi utilizada para encapsulação de óleo essencial de zenian (*Carum copticum*).<sup>61</sup> A análise FTIR dessas fibras mostrou a interação entre os polímeros e a óleo essencial por ligações de hidrogênio. A proporção de cada polímero na solução polimérica influenciou o diâmetro médio das fibras obtidas. As fibras zeína:PLA:HPMC nas proporções de 40:50:10 e 50:40:10 apresentaram morfologia semelhante a fita, devido a rápida vaporização dos solventes, apresentando diâmetros médio iguais a 1213 e 1098 nm, respectivamente. Quando a concentração de zeína na solução polimérica aumentou, as fibras zeína:PLA:HPMC 60:30:10 exibiram morfologia uniformes e sem *beads*, provavelmente devido à maior condutividade dessa solução, levando à formação de fibras com menor diâmetro médio (718 nm). A adição do óleo essencial não afetou a morfologia e reduziu ainda mais o diâmetro médio das fibras eletrofiadas, sendo que as fibras zeína:PLA:HPMC 60:30:10 com 30% (p/p, em relação aos polímeros) de óleo essencial de zenian apresentaram diâmetro médio igual a 335 nm.<sup>61</sup> As fibras com 15 e 30% de óleo essencial de zenian exibiram alta capacidade de eliminação do radical DPPH iguais a 63,9 e 68,8%, respectivamente.<sup>61</sup>

Os exemplos supracitados demonstram que as fibras eletrofiadas com ação antioxidante são adequadas para compor embalagens ativas para gêneros alimentícios e inibir/retardar as reações de oxidação. Além disso, essas fibras eletrofiadas ativas proporcionam vantagens ao alimento, como redução da quantidade de aditivos sintéticos adicionados para conservação, prevenção de alterações nas características sensoriais, como cor e sabor, e desaceleração do metabolismo, propiciando extensão da vida útil, maior segurança e qualidade ao produto embalado.

### 14.3.3 Absorvedor de etileno

Absorvedores de etileno na forma de embalagens ativas têm sido utilizados para preservação de frutas e hortaliças. O etileno é um hormônio vegetal natural que desempenha um papel importante no amadurecimento e senescência de frutas e hortaliças. O acúmulo

desse vapor pode acelerar a deterioração e reduzir o tempo de armazenamento desses produtos. Uma vez que esses produtos são frequentemente expostos à luz fluorescente em supermercados e outros locais de comercialização, a energia da luz pode ser aproveitada para remover ativamente o vapor de etileno acumulado no *headspace* da embalagem por reação fotocatalítica.<sup>62</sup> Compostos fotocatalisadores de etileno, como o dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>), podem ser utilizados devido à sua atividade de fotodegradação frente ao etileno quando exposto à luz ultravioleta (UV) por meio da geração de elétrons. Esses elétrons reagem com o etileno, promovendo sua degradação completa em dióxido de carbono e água.<sup>63</sup> Ao contrário do sequestrador de etileno convencional, onde a capacidade de sequestro é limitada pelo carregamento do sequestrador, a abordagem catalítica de TiO<sub>2</sub> tem capacidade ilimitada<sup>1</sup>. A alta área superficial do TiO<sub>2</sub> em nanofibras eletrofiadas é crucial para promover as reações de fotocatalise do etileno em função da maior adsorção e decomposição do etileno e um maior número de fótons espalhados.<sup>64</sup>

Böhmer-Maas *et al.*<sup>22</sup> produziram nanofibras de zeína carregadas com dióxido de titânio para aplicação como absorvedor de etileno em embalagens de tomate cereja. Soluções de zeína com uma concentração de 30% (p/v) de polímero e 0, 1, 2, 3, 4 ou 5% (p/v) de TiO<sub>2</sub> foram eletrofiadas levando à formação de nanofibras com diâmetros na faixa de 63 a 95 nm. As nanofibras demonstraram atividade fotocatalítica frente ao etileno durante os 22 dias de armazenamento dos frutos, devido à sua elevada área superficial, que otimiza a fotocatalise do etileno, reduzindo sua concentração na embalagem.

## 14.4 FIBRAS ELETROFIADAS EM EMBALAGENS INTELIGENTES PARA ALIMENTOS

Embalagens inteligentes podem fornecer informações sobre o estado de qualidade e segurança dos alimentos por meio de suas capacidades de detecção e comunicação.<sup>65</sup> O monitoramento e a comunicação das informações sobre o conteúdo e o ambiente do interior da embalagem são transmitidos ao consumidor, varejista e/ou fabricante normalmente por uma etiqueta ou rótulo. Existem diversas categorias de embalagens inteligentes, tais como, indicadores de frescor, de gases (oxigênio e dióxido de carbônico), de temperatura, de temperatura-localização, de rastreabilidade, de tempo de uso, de umidade, de maturação, de presença de determinados microrganismos, de antiavolação, de antifurto, de antifalsificação, nariz eletrônico, entre outras.<sup>66</sup> Esses sistemas de embalagem podem proteger os consumidores contra potenciais doenças transmitidas por alimentos.

Para produção desses indicadores é necessário a incorporação de materiais responsivos, como exemplo de um corante sintético ou natural com propriedades ativas, no material de embalagem, no rótulo ou etiqueta. Este material responsivo deve ser acionado por uma influência externa (por exemplo, pH, temperatura, oxigênio, umidade) para liberar o composto bioativo e sinalizar possíveis alterações microbiológicas e bioquímicas.<sup>67</sup>

Dentre as categorias de embalagens inteligentes existentes, as fibras eletrofiadas têm sido empregadas na produção de indicadores colorimétricos, tais como, indicadores de mudança de pH, indicadores de oxigênio e indicadores de tempo-temperatura.<sup>68</sup> Na área de embalagens inteligentes, muitas substâncias químicas que possuem a ação ativa, são sensíveis ao calor, por isso a técnica de eletrofição apresenta vantagens na produção desses materiais, uma vez que não se faz necessário o uso de processos térmicos. Nanofibras com uma estrutura altamente porosa são importantes para produção de indicadores de embalagens inteligentes, uma vez que permite a difusão de compostos voláteis em um curto período de tempo, melhorando a interação entre o composto bioativo e o alimento e/ou a interação entre o ativo e o meio ambiente da embalagem.<sup>69</sup>

De acordo com Forghani *et al.*,<sup>70</sup> as principais vantagens do uso de nanofibras eletrofiadas para a obtenção de embalagens inteligentes são: (i) tamanho submicrométrico e nanométrico; (ii) alta porosidade e resposta rápida aos metabólitos alvo; (iii) alta razão área de superfície/volume e detecção eficiente de mudanças ambientais; (iv) morfologia customizável e alto nível de versatilidade; (v) produtos não processados termicamente; (vi) encapsulamento eficiente de corantes; (vii) estabilidade de agentes corantes; e (viii) polímeros/biopolímeros de grau alimentício. Como desvantagens, os autores citam: (i) solventes tóxicos frequentemente usados; (ii) propriedades autossustentáveis deficitárias; (iii) baixa resistência mecânica das nanofibras; e (iv) perda rápida de compostos bioativos voláteis. No entanto, algumas desvantagens citadas pelos autores, como a perda de voláteis nas nanofibras podem ser superadas pelo uso de complexos de inclusão, como a  $\beta$ -ciclodextrina, visando proteger compostos voláteis inseridos nas nanofibras.

Nas seções 14.4.1 a 14.4.3, serão detalhados os indicadores de mudança de pH, de oxigênio e de tempo-temperatura e estudos sobre o desenvolvimento de fibras eletrofiadas utilizando polímeros/biopolímeros com substâncias sintéticas e naturais aplicadas em embalagens inteligentes para alimentos. A representação gráfica da aplicação de fibras eletrofiadas em embalagens inteligentes está apresentada na Figura 14.3.

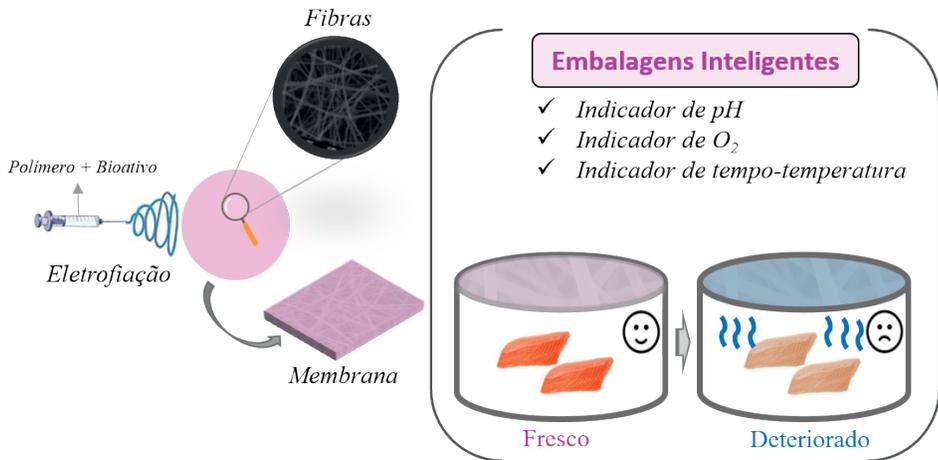


Figura 14.3. Representação gráfica da aplicação de fibras eletrofiadas em embalagens inteligentes.

#### 14.4.1 Indicador de mudança de pH

A deterioração de alimentos promovida por microrganismos presentes em produtos perecíveis produz substâncias em função de seu metabolismo que podem alterar a composição do *headspace* da embalagem. Os principais metabólitos utilizados como indicadores são: sulfeto de hidrogênio e dióxido de enxofre em carne vermelha e frango; amônia, dimetilamina e trimetilamina, em pescado; aminas biogênicas em carne vermelha, frango e pescado; gás carbônico em qualquer alimento deteriorado; e acetaldeídos e etileno em frutas e hortaliças.<sup>66</sup> Amônia, dimetilamina, trimetilamina e aminas biogênicas, como cadaverina e putrescina são compostos gerados durante a deterioração de carnes pelos microrganismos, aumentando o conteúdo de BNVT que causa uma mudança de pH, e essa mudança pode ser detectada por indicadores de pH.<sup>71</sup>

O pH pode ser usado como marcador de degradação para avaliar as mudanças na qualidade e no frescor dos alimentos embalados.<sup>72</sup> Os indicadores de mudança de pH são afixados no interior da embalagem do produto, pois deve estar em contato com os compostos liberados pelos alimentos. A maioria dos indicadores de embalagens de alimentos utilizando fibras eletrofiadas atualmente é baseada em corantes orgânicos projetados para medir as alterações de pH durante o armazenamento do produto embalado. Diversos corantes sintéticos têm sido utilizados na produção de indicadores colorimétricos para embalagens inteligentes, tais como roxo de bromocresol, vermelho de fenol, fenolftaleína e azul de metileno.<sup>73</sup> No entanto, corantes naturais, atóxicos, tais como antocianinas,<sup>74</sup> ficocianina, quercetina,<sup>75,76</sup> curcumina<sup>72</sup> e alizarina,<sup>77</sup> tem se destacado a fim de evitar possíveis riscos de contaminação dos alimentos. As antocianinas são pigmentos solúveis em água, normalmente extraídas de frutas, grãos, vegetais e flores. A curcumina é um composto polifenólico de natureza hidrofóbica, insolúvel em água, e solúvel em solventes orgânicos,

é normalmente isolada do rizoma de açafrão (*Curcuma Longa* L.) e a alizarina é extraído das raízes da planta garança (*Rubia tinctorum* L.).

Fibras halocrômicas sensíveis à mudança de pH utilizando pigmentos sintéticos foram estudadas por Tripathy *et al.*<sup>40</sup> Esses autores produziram nanofibras de Nylon-6 com uma combinação de roxo de bromocresol, vermelho de fenol e fenoltaleína. As nanofibras com diâmetro na faixa de 100–200 nm foram mergulhadas em leite cru com vários valores de pH na faixa de 4,8–9 para avaliar seu desempenho como indicador de qualidade do leite. As nanofibras halocrômicas exibiram cor púrpura em pH > 8, cor verde em pH 6,6-6,9 e cor amarela em pH < 5,2. O desempenho do indicador em três pHs diferentes indicou a capacidade das nanofibras em distinguir o leite fresco de um leite com alta acidez (leite deteriorado) e de um leite com baixa acidez (leite alcalino causado por adulteração de neutralizadores).

As antocianinas, em solução aquosa, passam por diferentes transformações reversíveis dependentes do pH, marcadas por alterações de cor que podem variar do azul ao roxo, vermelho ao laranja e incolor a amarelo.<sup>65</sup> Isto ocorre porque as moléculas possuem em sua estrutura um núcleo básico flavílio (cátion 2-fenilbenzopirílio) que consiste de dois anéis aromáticos unidos por uma unidade de três carbonos e condensados por um oxigênio.<sup>78</sup> Essa característica das antocianinas permite seu uso como um indicador de pH. No entanto, esses pigmentos são extremamente instáveis, podendo alcançar 29,1% de degradação quando aquecidos a 70 °C.<sup>79</sup> Além disso, as antocianinas podem reagir com diferentes íons metálicos e a exposição à luz solar pode gerar degradação de até 30%, contribuindo para sua instabilidade.<sup>80</sup> Por essas razões se faz necessária a proteção desses compostos em nanofibras poliméricas para aplicação como embalagens ativas e/ou inteligentes para alimentos.

Existem vários estudos sobre fibras eletrofiadas como indicador de mudança de pH utilizando antocianinas como corante.<sup>25,74,81</sup> No estudo de Prietto *et al.*,<sup>74</sup> nanofibras sensíveis à mudança de pH foram produzidas a partir de uma solução de zeína (30% p/v) em 75% de etanol e antocianinas de extrato de repolho roxo (3, 4 e 5% p/v). Com base nas imagens de microscopia eletrônica de varredura, fibras contínuas com superfícies lisas foram obtidas e foi reportado que o diâmetro médio das fibras aumentou com o aumento da concentração de antocianinas, variando de 444 nm para fibras de zeína pura para 510 nm para fibras contendo 5% de antocianinas. As nanofibras contendo antocianinas exibiram uma ampla gama de cores, variando de rosa a verde, quando expostas aos diferentes meios de tampões com pH de 1 a 10, respectivamente (Fig. 14.4).

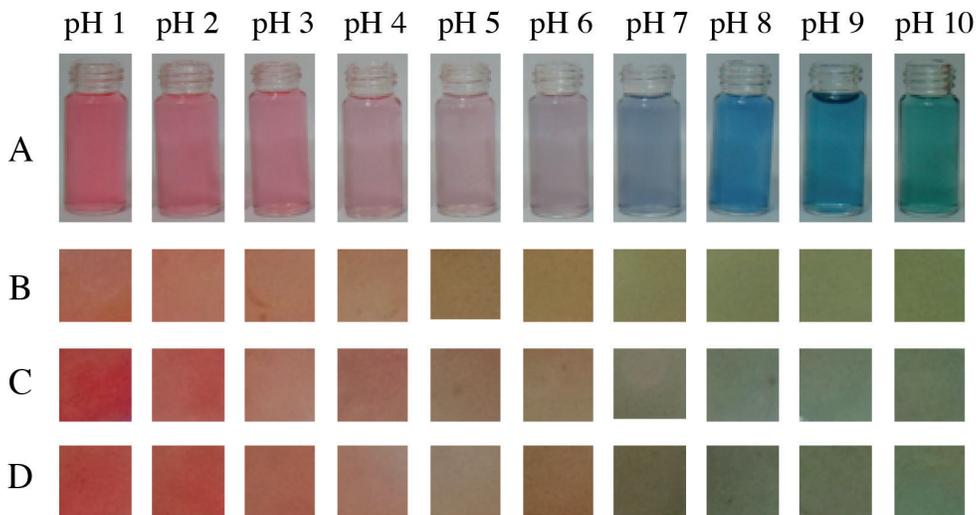


Figura 14.4. Fotografia do extrato de antocianina (A); fibras de zeína com 3% (B), 4% (C) e 5% (D) de antocianinas, na faixa de pH 1-10. Reimpressa com permissão da referência <sup>74</sup>. Copyright 2017 Society of Chemical Industry.

A adição de compostos responsáveis à mudança de pH, como corantes, altera as características das soluções poliméricas. Portanto, ao otimizar um processo de produção de fibras eletrofiadas para aplicação em embalagens inteligentes, deve-se considerar as propriedades desejáveis dos indicadores. Pakolpakçıl *et al.*,<sup>82</sup> que também usaram extrato de repolho roxo para extrair antocianinas, reportaram uma redução na viscosidade e condutividade elétrica da solução polimérica contendo antocianinas. Os autores utilizaram uma mistura de soluções poliméricas contendo 12% p/p de PVA e 1% p/p de alginato de sódio com a proporção de 2:1, e incorporaram 2-3% de extrato de repolho roxo. As fibras eletrofiadas apresentaram diâmetro médio de 263 nm. A redução na viscosidade e condutividade das soluções poliméricas com antocianinas contribuiu para a redução no diâmetro médio das fibras, que alcançaram valores menores que 234 nm. Ainda, as fibras com a maior concentração de extrato de repolho roxo (3%) foram avaliadas quanto a mudança de cor em pH de 4 a 10, exibindo cores distinguíveis nessa faixa. As fibras mostraram alterações de cor de rosa a rosa claro, para pH 4 e 5, lilás em pH 6, roxo em pH 7, azul claro a escuro em pH 8 e 9 e, finalmente, cor verde escura em pH 10. Demonstrando potencial para atuarem como sensor de mudança de pH do meio.

Embalagens inteligentes podem também ser combinadas com embalagens ativas, como reportado por Guo *et al.*,<sup>83</sup> que projetaram um material composto por dupla camada de fibras ativas e inteligentes, compreendendo uma camada de pululano e extrato de batata doce roxa e uma camada de zeína, glicerol e carvacrol, para monitoramento e preservação do frescor da carne de porco. O aumento da concentração de antocianinas levou à mudança na morfologia das fibras de formato cilíndrico para forma de fita com um aumento em

seu diâmetro médio. A eficácia do sensor no monitoramento do frescor da carne suína foi avaliada pela mudança de cor das nanofibras que variou de rosa escuro (0 h) a vermelho intenso (após 12 h), roxo (após 24 h), azul (após 36 h), verde escuro (após 48 h), verde claro (após 60 h) e, verde amarelado (após 72 h). O nível de Bases Nitrogenadas Voláteis Totais (BNVT) da carne de porco confirmou a deterioração desse alimento após 36 h.

Sun *et al.*<sup>81</sup> também produziram fibras eletrofiadas halocrômicas inteligentes baseadas em ácido poli-L-láctico e antocianinas de mirtilo para avaliar o frescor da carne de carneiro durante o tempo de armazenamento a 25 °C. A cor das nanofibras variou do rosa original ao rosa pálido após o primeiro dia e tornou-se incolor após três dias de armazenamento. Correlativamente o BNVT de carneiro fresco (7,2 mg/100 g) aumentou para 11,6 mg/100 g e 34 mg/100 g, após 1 e 3 dias de armazenamento, respectivamente, pela sua deterioração. As mudanças de cores dos indicadores demonstraram ser eficazes para uso como embalagens inteligentes.

A curcumina, pigmento natural de coloração amarelada, também vem sendo empregada como indicador natural de pH em embalagens. Sua estrutura é composta por bis- $\alpha$ ,  $\beta$ -insaturada,  $\beta$ -dicetona, que pode estar em equilíbrio com sua forma tautomérica enol.<sup>84</sup> Em pH entre 3 e 7, a curcumina apresenta coloração amarela e atua como um doador de átomos de hidrogênio por causa de sua estrutura bis-cetônica dominante. Em meio alcalino, sua estrutura está totalmente desprotonada, apresentando coloração alaranjada.<sup>85</sup> Deste modo, a curcumina possui potencial para aplicação como embalagens inteligentes quando encapsulada em fibras eletrofiadas.<sup>72,25</sup> Sensor de pH halocrômico foi desenvolvido por Yildiz *et al.*<sup>72</sup>, que incorporaram curcumina em nanofibras de quitosana e PEO para monitorar o frescor de frangos em tempo real. As fibras carregadas com curcumina foram avaliadas como indicador de tempo-temperatura no armazenamento de peito de frango embalado a 4 °C durante 8 dias. Os resultados colorimétricos mostraram que a cor do indicador de tempo-temperatura mudou de amarelo brilhante para uma cor laranja avermelhada durante a deterioração dos frangos.

A alizarina é outro corante que possui potencial para aplicação como embalagem inteligente. Este composto existe sob três formas, com coloração variando de amarelo a roxo, que são regidas pela sua estrutura química protonada (absorção máxima em 430 nm) e duas formas não protonadas, a monoaniônica (absorção máxima em 550 nm) e dianiônica (dois picos na faixa de 570 a 620 nm).<sup>86</sup> As mudanças de cor da alizarina ocorrem de acordo com o pH, uma vez que suas hidroxilas formam ligações de hidrogênio com átomos de oxigênio de carbonilas, permitindo a transferência de prótons. Como resultado tem-se que em pH ácido a alizarina torna-se amarela e em pH básico torna-se roxa.<sup>87</sup>

Aghaei *et al.*<sup>77</sup> desenvolveram nanofibras à base de acetato de celulose (12% m/v) contendo alizarina (4% m/m) para monitoramento em tempo real do frescor de pescado truta arco-íris durante 12 dias de armazenamento a 4 °C. Os autores relataram que a incorporação de alizarina aumentou o diâmetro médio das fibras de 249 nm (fibras sem

alizarina) para 262 nm (fibras com alizarina). As nanofibras inteligentes exibiram uma resposta de cor visível durante a deterioração do pescado, que foi correlacionada com as alterações de pH. As membranas de nanofibras revelaram uma variação de cor do amarelo para uma cor tijolo muito clara após o 4º dia. Além disso, a cor tornou-se mais escura no 6º dia e mudou para violeta no 12º dia. A deterioração dos frutos do mar resulta na produção de vários compostos voláteis, incluindo amônia, dimetilamina e trimetilamina, levando a um aumento no pH dos produtos, bem como no espaço livre da embalagem.

#### 14.4.2 Indicador de oxigênio

A detecção de oxigênio em embalagens a vácuo ou em embalagens com atmosfera modificada é essencial, uma vez que o oxigênio é responsável por uma série de processos de deterioração de alimentos, incluindo o crescimento microbiano, oxidação de lipídios e proteínas e despigmentação.<sup>88</sup> Muitas técnicas analíticas estabelecidas capazes de detectar oxigênio no *headspace* das embalagens, como cromatografia gasosa, são usadas para confirmar a remoção eficiente de oxigênio e a vedação efetiva da embalagem. No entanto, a maioria dessas técnicas possui custo elevado, precisa de um operador treinado e exige amostragem dos pacotes, e, portanto, impossibilita um alto nível de controle de qualidade nas embalagens de atmosfera modificada. Sendo assim, indicadores colorimétricos de oxigênio para aplicação em embalagens inteligentes que possuem baixo custo, alta confiabilidade, natureza irreversível e produzem uma mudança de cor perceptível, detectável por olhos destreinados, a fim de detectar a presença de níveis inaceitáveis de oxigênio dentro da embalagem são desejáveis. Esses indicadores são afixados no interior da embalagem, pois devem estar em contato com os gases presentes no *headspace* da embalagem para indicar a presença do gás oxigênio.

Indicadores de oxigênio na forma de membranas de fibras eletrofiadas para aplicação em embalagens ativas de alimentos foram desenvolvidos por Mihindikulasuriya e Lim<sup>89</sup> e Yilmaz e Altan.<sup>90</sup> Óxidos metálicos, como dióxido de titânio e óxido de zinco, possuem propriedades fotocatalíticas e potencial para uso no desenvolvimento de sensores de oxigênio. De acordo com Lee *et al.*,<sup>91</sup> indicadores de oxigênio a base de nanopartículas de TiO<sub>2</sub> (80:20 anatase: rutilo; 30 nm), trietanolamina (agente de redução suave), corante azul de metileno e carreador de hidroxietil celulose foram desenvolvidos. Esses indicadores são sensíveis a presença de oxigênio. Os autores relataram que ao expor a tinta do indicador à radiação ultravioleta A (UVA, 320–400 nm), as nanopartículas de TiO<sub>2</sub> fotocatalisam a redução do azul de metileno, convertendo o corante em uma forma incolor. Após a exposição ao oxigênio, o corante é oxidado e regenera sua coloração azul, cuja intensidade é proporcional à concentração de oxigênio no ar do *headspace*.

Mihindikulasuriya e Lim<sup>89</sup> desenvolveram uma membrana indicadora de oxigênio ativada por radiação ultravioleta (UV) pela técnica de eletrofiação. A solução polimérica

foi preparada dispersando PEO (5% p/p) em uma mistura água:etanol (30:70), juntamente com azul de metileno, glicerol e nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ . Os indicadores de oxigênio produzidos com membranas eletrofiadas foram 4-5 vezes mais sensíveis à radiação UV em comparação com os indicadores de filme preparado por *casting*, principalmente devido à grande relação área de superfície/volume da membrana produzida por eletrofiação, o que é favorável para aumentar a formação de elétrons excitados sob irradiação UV. O alto cisalhamento envolvido durante o processo de eletrofiação também pode favorecer uma dispersão eficaz de nanopartículas de  $\text{TiO}_2$ , evitando sua aglomeração. Os autores relataram que o indicador de oxigênio se mostrou promissor para detecção deste gás em embalagens de atmosfera modificada comprometidas.

#### 14.4.3 Indicador de tempo-temperatura

Os indicadores de tempo-temperatura (ITT) registram a história térmica do produto alimentício durante toda a cadeia de abastecimento, indicando sua qualidade e frescor durante as etapas de armazenamento e distribuição. Os indicadores de tempo-temperatura funcionam como uma etiqueta de prazo de validade dinâmico, ajudando o consumidor a avaliar a real qualidade do produto que ele está adquirindo. Esses indicadores estão fisicamente localizados na parte externa da embalagem para registrar as mudanças nas condições de armazenamento do produto (tempo e temperatura) e comunicar o *status* aos consumidores.<sup>92</sup> Mudanças de cor ou de outras propriedades provocadas por variações acumulativas de temperatura, ao longo da vida útil de alimentos e bebidas, permitem que alertas sejam fornecidos de maneira fácil e objetiva através de indicadores inteligentes.

Tsai *et al.*<sup>93</sup> relataram o uso de fibras eletrofiadas como indicadoras de tempo-temperatura em amostras de leite. Os autores desenvolveram um protótipo de ITT imobilizando a enzima lacase em nanofibras eletrofiadas à base de quitosana, PVA e tetraetilortossilicato para monitorar a deterioração do leite. As fibras contendo a enzima imobilizada apresentaram uma morfologia lisa e uniforme com distribuição de diâmetros de 500–550 nm. O ITT exibiu uma variação de cor de transparente a marrom claro, marrom escuro, marrom avermelhado, roxo avermelhado e, marrom arroxeadado, durante o armazenamento a 4 °C por 8 h. A quantidade de lacase 8–10 g/cm<sup>2</sup> foi relatada como uma dosagem de enzima imobilizada adequada para prever a presença de bactérias ácido-láticas, com uma contagem que poderia alcançar 10<sup>6</sup> UFC/mL no leite por meio da análise de resposta em relação à alteração de temperatura.

### 14.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS

Os consumidores estão cada vez mais conscientes e exigentes quanto à qualidade

e segurança dos alimentos, como premissa de uma melhora na qualidade de vida e de desenvolvimento social. A utilização de fibras eletrofiadas em embalagens para alimentos tem recebido muito interesse nos últimos anos, com a publicação de pesquisas comprovando a eficiência de sua utilização como encapsulante de compostos bioativos que apresentam alguma aplicação na indústria de alimentos.

O uso de fibras eletrofiadas para encapsulação de compostos apresenta como principal vantagem a não utilização de temperaturas elevadas, prevenindo a degradação de compostos sensíveis ao calor, uso de polímeros biodegradáveis, alta área superficial, entre outras. Essas fibras permitem a liberação gradual dos compostos encapsulados ao longo do tempo ou permitem que os mesmos sofram alterações nas propriedades ao reagirem com o ambiente, possibilitando suas aplicações como embalagens ativas e/ou inteligentes. Entretanto, algumas limitações ainda devem ser superadas, como a utilização de alguns solventes tóxicos para solubilização de alguns polímeros e o elevado custo da embalagem.

A eletrofição de fibras e sua aplicação em embalagens ativas e inteligentes é um campo promissor na tecnologia de alimentos. No entanto, mais estudos são necessários para viabilizar sua aplicação em escala industrial, bem como na detecção e identificação de compostos que apresentem bioatividade, de forma isolada ou conjugada.

## REFERÊNCIAS

1. Yilmaz, M. T.; Yilmaz, A.; Akman, P. K.; Bozkurt, F.; Dertli, E.; Basahel, A.; Al-Sasi, B.; Taylan, O.; Sagdic, O. ;*Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **2019**, *52*, 166.
2. Doderio, A.; Escher, A.; Bertucci, S.; Castellano, M.; Lova, P. ;*Appl. Sci.* **2021**, *11*, 3532.
3. dos Santos, F. N.; de Souza, E. J. D.; Jéssica Siebeneichler, T.; Buchveitz Pires, J.; Hüttner Kringel, D.; Dillenburg Meinhart, A.; Renato Guerra Dias, A.; da Rosa Zavareze, E. ;*Food Anal. Methods* **2022**, *15*, 2524.
4. Dierings de Souza, E. J.; Kringel, D. H.; Guerra Dias, A. R.; da Rosa Zavareze, E. ;*Carbohydr. Polym.* **2021**, *265*, 118068.
5. Dajic Stevanovic, Z.; Sieniawska, E.; Glowniak, K.; Obradovic, N.; Pajic-Lijakovic, I. ;*Front. Bioeng. Biotechnol.* **2020**, *8*, 563.
6. Lim, L.-T. In *Electrospun Polymers and Composites*; Elsevier, 2021; pp. 217–259.
7. Dias Antunes, M.; da Silva Dannenberg, G.; Fiorentini, Â. M.; Pinto, V. Z.; Lim, L.-T.; da Rosa Zavareze, E.; Dias, A. R. G. ;*Int. J. Biol. Macromol.* **2017**, *104*, 874.
8. Mendes, A. C.; Stephansen, K.; Chronakis, I. S. ;*Food Hydrocoll.* **2017**, *68*, 53.
9. Stijnman, A. C.; Bodnar, I.; Hans Tromp, R. ;*Food Hydrocoll.* **2011**, *25*, 1393.
10. Akhmetova, A.; Heinz, A. ;*Pharmaceutics* **2020**, *13*, 4.

11. Lim, L.-T.; Mendes, A. C.; Chronakis, I. S. In *Advances in Food and Nutrition Research*; Academic Press, 2019; Vol. 88, pp. 167–234.
12. Wang, Y.; Zhang, Q.; Zhang, C.; Li, P. ;*Food Chem.* **2012**, *132*, 419.
13. Agarwal, A.; Raheja, A.; Natarajan, T. S.; Chandra, T. S. ;*Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **2014**, *26*, 424.
14. Braga, L. R.; Silva, F. M. ;*Brazilian J. Food Res.* **2017**, *8*, 170.
15. Tabarestani, H. S.; Jafari, S. M. In *Nanoencapsulation of Food Ingredients by Specialized Equipment*; Elsevier, 2019; pp. 31–105.
16. Augustin, M. A.; Sanguansri, P. In *Advances in Food and Nutrition Research*; Elsevier Inc., 2009; Vol. 58, pp. 183–213.
17. Snetkov, P.; Rogacheva, E.; Kremleva, A.; Morozkina, S.; Uspenskaya, M.; Kraeva, L. ;*Pharmaceutics* **2022**, *14*, 1186.
18. Fonseca, L. M.; Souza, E. J. D.; Radünz, M.; Gandra, E. A.; Zavareze, E. da R.; Dias, A. R. G. ;*Carbohydr. Polym.* **2021**, *252*, 117166.
19. Chuysinuan, P.; Thanyacharoen, T.; Techasakul, S.; Ummartyotin, S. ;*J. Sci. Adv. Mater. Devices* **2018**, *3*, 175.
20. Radünz, M.; Mota Camargo, T.; Santos Hackbart, H. C. dos; Inchauspe Correa Alves, P.; Radünz, A. L.; Avila Gandra, E.; da Rosa Zavareze, E. ;*LWT* **2021**, *138*, 110632.
21. Kayaci, F.; Ertas, Y.; Uyar, T. ;*J. Agric. Food Chem.* **2013**, *61*, 8156.
22. Böhmer-Maas, B. W.; Fonseca, L. M.; Otero, D. M.; da Rosa Zavareze, E.; Zambiasi, R. C. ;*Food Packag. Shelf Life* **2020**, *24*, 100508.
23. Kringel, D. H.; Silva, W. M. F.; Biduski, B.; Waller, S. B.; Lim, L.; Dias, A. R. G.; Zavareze, E. da R. ;*J. Food Process. Preserv.* **2020**, *44*, e14411.
24. Avila, L. B.; Fontes, M. R. V.; Zavareze, E. da R.; Moraes, C. C.; Morais, M. M.; Rosa, G. S. da ;*Polymers (Basel)*. **2020**, *12*, 2916.
25. Duan, M.; Yu, S.; Sun, J.; Jiang, H.; Zhao, J.; Tong, C.; Hu, Y.; Pang, J.; Wu, C. ;*Int. J. Biol. Macromol.* **2021**, *187*, 332.
26. Deng, L.; Kang, X.; Liu, Y.; Feng, F.; Zhang, H. ;*Food Chem.* **2017**, *231*, 70.
27. Min, T.; Sun, X.; Yuan, Z.; Zhou, L.; Jiao, X.; Zha, J.; Zhu, Z.; Wen, Y. ;*LWT* **2021**, *135*, 110034.
28. Silva, F. T. da; Cunha, K. F. da; Fonseca, L. M.; Antunes, M. D.; Halal, S. L. M. El; Fiorentini, Â. M.; Zavareze, E. da R.; Dias, A. R. G. ;*Int. J. Biol. Macromol.* **2018**, *118*, 107.

29. Deng, H.; Zhu, J.; Tong, Y.; Kong, Y.; Tan, C.; Wang, M.; Wan, M.; Meng, X. ;*LWT* **2021**, *150*, 112018.
30. Salamon, I.; Şimşek Sezer, E. N.; Kryvtsova, M.; Labun, P. ;*Appl. Sci.* **2021**, *11*, 2096.
31. Rajaei, A.; Salarbashi, D.; Asrari, N.; Fazly Bazzaz, B. S.; Aboutorabzade, S. M.; Shaddel, R. ;*Food Sci. Nutr.* **2021**, *9*, 682.
32. Ma, Y.; Ding, S.; Fei, Y.; Liu, G.; Jang, H.; Fang, J. ;*Food Control* **2019**, *106*, 106712.
33. Doughari, J. H.; Ndakidemi, P. A.; Human, I. S.; Benade, S. ;*J. Ethnopharmacol.* **2012**, *141*, 1041.
34. Leong, C.-R.; Kamarul Azizi, M. A.; Taher, M. A.; Wahidin, S.; Lee, K.-C.; Tan, W.-N.; Tong, W.-Y. ;*Nat. Prod. Sci.* **2017**, *23*, 125.
35. Adeyemi, O. S.; Obeme-Imom, J. I.; Akpor, B. O.; Rotimi, D.; Batiha, G. E.; Owolabi, A. ;*Heliyon* **2020**, *6*, e03495.
36. Lee, W.; Lee, D. G. ;*IUBMB Life* **2014**, *66*, 780.
37. Minear, S.; O'Donnell, A. F.; Ballew, A.; Giaever, G.; Nislow, C.; Stearns, T.; Cyert, M. S. ;*Eukaryot. Cell* **2011**, *10*, 1574.
38. Hyldgaard, M.; Mygind, T.; Meyer, R. L. ;*Front. Microbiol.* **2012**, *3*, 1.
39. Chouhan, S.; Sharma, K.; Guleria, S. ;*Medicines* **2017**, *4*, 58.
40. Swamy, M. K.; Akhtar, M. S.; Sinniah, U. R. ;*Evidence-Based Complement. Altern. Med.* **2016**, *2016*, 1.
41. Karami, N.; Kamkar, A.; Shahbazi, Y.; Misaghi, A. ;*LWT* **2021**, *140*, 110812.
42. Aleksic, V.; Knezevic, P. ;*Microbiol. Res.* **2014**, *169*, 240.
43. Grande-Tovar, C. D.; Chaves-Lopez, C.; Serio, A.; Rossi, C.; Paparella, A. ;*Trends Food Sci. Technol.* **2018**, *78*, 61.
44. Vafania, B.; Fathi, M.; Soleimani-Zad, S. ;*Food Bioprod. Process.* **2019**, *116*, 240.
45. Niu, B.; Zhan, L.; Shao, P.; Xiang, N.; Sun, P.; Chen, H.; Gao, H. ;*Int. J. Biol. Macromol.* **2020**, *142*, 592.
46. Lin, L.; Mao, X.; Sun, Y.; Rajivgandhi, G.; Cui, H. ;*Int. J. Food Microbiol.* **2019**, *292*, 21.
47. Munhuweyi, K.; Caleb, O. J.; van Reenen, A. J.; Opara, U. L. ;*LWT* **2018**, *87*, 413.
48. Umaraw, P.; Munezata, P. E. S.; Verma, A. K.; Barba, F. J.; Singh, V. P.; Kumar, P.; Lorenzo, J. M. ;*Trends Food Sci. Technol.* **2020**, *98*, 10.

49. Bulus, E.; Bulus, G. S.; Yucel, N.; Altintas, C. M.; Yakuphanoglu, F. ;*J. Mater. Electron. Devices* **2020**, *5*, 29.
50. Shahidi, F.; Zhong, Y. ;*J. Funct. Foods* **2015**, *18*, 757.
51. Mastromatteo, M.; Mastromatteo, M.; Conte, A.; Del Nobile, M. A. ;*Trends Food Sci. Technol.* **2010**, *21*, 591.
52. Kuai, L.; Liu, F.; Chiou, B.-S.; Avena-Bustillos, R. J.; McHugh, T. H.; Zhong, F. ;*Food Hydrocoll.* **2021**, *120*, 106992.
53. M. Rangaraj, V.; Rambabu, K.; Banat, F.; Mittal, V. ;*Food Biosci.* **2021**, *43*, 101251.
54. Oroian, M.; Escriche, I. ;*Food Res. Int.* **2015**, *74*, 10.
55. Göksen, G.; Fabra, M. J.; Pérez-Cataluña, A.; Ekiz, H. I.; Sanchez, G.; López-Rubio, A. ;*Food Packag. Shelf Life* **2021**, *27*, 100613.
56. Li, M.; Yu, H.; Xie, Y.; Guo, Y.; Cheng, Y.; Qian, H.; Yao, W. ;*LWT* **2021**, *139*, 110800.
57. Aydogdu, A.; Sumnu, G.; Sahin, S. ;*Carbohydr. Polym.* **2019**, *208*, 241.
58. Neo, Y. P.; Ray, S.; Jin, J.; Gizdavic-Nikolaidis, M.; Nieuwoudt, M. K.; Liu, D.; Quek, S. Y. ;*Food Chem.* **2013**, *136*, 1013.
59. Altan, A.; Aytac, Z.; Uyar, T. ;*Food Hydrocoll.* **2018**, *81*, 48.
60. Solaberrieta, I.; Jiménez, A.; Cacciotti, I.; Garrigós, M. C. ;*Polymers (Basel)*. **2020**, *12*, 1323.
61. Aman Mohammadi, M.; Ramezani, S.; Hosseini, H.; Mortazavian, A. M.; Hosseini, S. M.; Ghorbani, M. ;*Food Bioprocess Technol.* **2021**, *14*, 1529.
62. Lim, L.-T. In *Comprehensive Biotechnology*; Elsevier, 2011; Vol. 4, pp. 629–644.
63. Varshosaz, J.; Arbabi, B.; Pestehchian, N.; Saberi, S.; Delavari, M. ;*Int. J. Biol. Macromol.* **2018**, *107*, 212.
64. Karthikeyan, K.; Guhathakarta, S.; Rajaram, R.; Korrapati, P. S. ;*Int. J. Pharm.* **2012**, *438*, 117.
65. Chen, M.; Yan, T.; Huang, J.; Zhou, Y.; Hu, Y. ;*Int. J. Biol. Macromol.* **2021**, *179*, 90.
66. Sarantopoulos, C. ;*Bol. Tecnol. e Desenvolv. Embalagens - ITAL* **2015**, *27*, 1.
67. Cerqueira, M. A.; Vicente, A. A.; Pastrana, L. M. In *Nanomaterials for Food Packaging*; Elsevier, 2018; pp. 1–11.
68. Zhao, L.; Duan, G.; Zhang, G.; Yang, H.; He, S.; Jiang, S. ;*Nanomaterials* **2020**, *10*, 150.
69. Liu, L.; Xu, W.; Ding, Y.; Agarwal, S.; Greiner, A.; Duan, G. ;*Compos. Commun.* **2020**, *22*, 100506.

70. Forghani, S.; Almasi, H.; Moradi, M. ;*Innov. Food Sci. Emerg. Technol.* **2021**, *73*, 102804.
71. Andre, R. S.; Mercante, L. A.; Facure, M. H. M.; Sanfelice, R. C.; Fugikawa-Santos, L.; Swager, T. M.; Correa, D. S. ;*ACS Sensors* **2022**, *7*, 2104.
72. Yildiz, E.; Sumnu, G.; Kahyaoglu, L. N. ;*Int. J. Biol. Macromol.* **2021**, *170*, 437.
73. Agarwal, A.; Raheja, A.; Natarajan, T. S.; Chandra, T. S. ;*Sensors Actuators B Chem.* **2012**, *161*, 1097.
74. Prietto, L.; Pinto, V. Z.; El Halal, S. L. M.; de Morais, M. G.; Costa, J. A. V.; Lim, L.; Dias, A. R. G.; Zavareze, E. da R. ;*J. Sci. Food Agric.* **2018**, *98*, 2735.
75. Terra, A. L. M.; Moreira, J. B.; Costa, J. A. V.; Morais, M. G. de ;*Food Biosci.* **2021**, *44*, 101387.
76. Terra, A. L. M.; Moreira, J. B.; Costa, J. A. V.; Morais, M. G. de ;*LWT* **2021**, *142*, 111020.
77. Aghaei, Z.; Emadzadeh, B.; Ghorani, B.; Kadkhodae, R. ;*Food Bioprocess Technol.* **2018**, *11*, 1087.
78. Ockermann, P.; Headley, L.; Lizio, R.; Hansmann, J. ;*Nutrients* **2021**, *13*, 2831.
79. Wu, H.; Yang, K.; Chiang, P. ;*Molecules* **2018**, *23*, 1357.
80. Lee, J.; Skinkis, P. A. ;*Food Chem.* **2013**, *139*, 893.
81. Sun, W.; Liu, Y.; Jia, L.; Saldaña, M. D. A.; Dong, T.; Jin, Y.; Sun, W. ;*Int. J. Food Sci. Technol.* **2021**, *56*, 342.
82. Pakolpakçıl, A.; Karaca, E.; Becerir, B. ;*IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2018**, *460*, 012020.
83. Guo, M.; Wang, H.; Wang, Q.; Chen, M.; Li, L.; Li, X.; Jiang, S. ;*Food Hydrocoll.* **2020**, *101*, 105468.
84. Pourreza, N.; Golmohammadi, H. ;*Talanta* **2015**, *131*, 136.
85. Musso, Y. S.; Salgado, P. R.; Mauri, A. N. ;*Food Hydrocoll.* **2017**, *66*, 8.
86. Jeliński, T.; Cysewski, P.; Makarewicz, E. ;*Springerplus* **2013**, *2*, 593.
87. Ezati, P.; Tajik, H.; Moradi, M.; Molaei, R. ;*Int. J. Biol. Macromol.* **2019**, *132*, 157.
88. Li, H.; Wei, J.; Jin, M.; Yu, Y.; Bu, J.; Chen, Q.; Hao, Z. ;*Compos. Commun.* **2022**, *35*, 101321.
89. Mihindukulasuriya, S. D. F.; Lim, L.-T. ;*J. Mater. Sci.* **2013**, *48*, 5489.
90. Yılmaz, M.; Altan, A. ;*Food Packag. Shelf Life* **2021**, *28*, 100651.
91. Lee, S.; Sheridan, M.; Mills, A. ;*Chem. Mater.* **2005**, *17*, 2744.

92. Soltani Firouz, M.; Mohi-Alden, K.; Omid, M. ;*Food Res. Int.* **2021**, *141*, 110113.

93. Tsai, T.; Chen, S.-H.; Chen, L.-C.; Lin, S.; Lou, S.; Chen, Y.-H.; Chen, H. ;*Nanomaterials* **2021**, *11*, 1160.

## SOBRE OS AUTORES



**ESTEFANI TAVARES JANSEN:** Técnica em Química pelo Instituto Federal Sul-rio-grandense/Campus Pelotas (2014). Graduada em Engenharia Química pela mesma instituição de ensino (2019). Mestra em Ciência e Tecnologia de Alimentos pela Universidade Federal de Pelotas (2022). Atualmente é aluna do curso de Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal de Pelotas, na linha de pesquisa de Frutas e Hortaliças. Tem experiências nas áreas de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Engenharia Química e Química e, nos últimos anos, tem atuado em temas relacionados a biopolímeros, compostos bioativos, enzimas, nanotecnologia e desenvolvimento de embalagens ativas e inteligentes para alimentos.

<http://lattes.cnpq.br/1559500132667402>



**IGOR HENRIQUE DE LIMA COSTA:** Graduado em Engenharia de Alimentos pela Universidade Federal da Paraíba (2021) e Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos pela Universidade Federal de Pelotas (2022) e atualmente cursa Especialização em Segurança Alimentar e Agroecologia pela Universidade Estadual do Rio Grande do Sul e é Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos pela Universidade Federal de Pelotas na linha de pesquisa: Ciência e Tecnologia de Frutas e Hortaliças. Tem experiência na área de Ciência e Tecnologia de Alimentos, atuando principalmente nos seguintes temas, aplicados a frutas: pós-colheita, métodos de conservação, sistemas de embalagens e nanotecnologia.

<http://lattes.cnpq.br/663197069057029>



**ALVARO RENATO GUERRA DIAS:** Possui graduação em Agronomia pela Universidade Federal de Pelotas (1988), Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial pela Universidade Federal de Pelotas (1993) e Doutorado em Tecnologia de Alimentos pela Universidade Estadual de Campinas (2001). Atualmente é professor Titular da Universidade Federal de Pelotas na Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel e Pesquisador Produtividade do CNPq, nível 1B. Atua na área de Ciência e Tecnologia de Alimentos, com ênfase em industrialização de grãos, processamento de outros produtos amiláceos e nanofibras obtidas pela técnica electrospinning, atuando principalmente nos seguintes temas: industrialização de arroz, estudos de farinhas e aplicação em panificação, amidos e féculas nativas e modificadas para aplicação em alimentos e indústria de transformação, nanofibras, aerogéis e hidrogéis a partir de biopolímeros, encapsulação de compostos e filmes biodegradáveis a partir de amido e celulose.

<http://lattes.cnpq.br/9370386307411916>



**ELESSANDRA DA ROSA ZAVAREZE:** Possui Graduação em Engenharia de Alimentos pela Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial pela Universidade Federal de Pelotas (UFPel) e Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos pela Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Atualmente é Professora Associada, Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da UFPel e Pesquisadora Produtividade do CNPq nível 1D. Tem experiência principalmente na área biopolímeros e nanofibras.

<http://lattes.cnpq.br/4195477425513111>