

Eficiência da técnica de *electrospraying* na encapsulação de compostos lipídicos aplicados a alimentos: uma revisão sistemática

Efficiency of the electrospraying technique in the encapsulation of lipid compounds applied to foods: a systematic review

Eficiencia de la técnica de electropulverización en la encapsulación de compuestos lipídicos aplicada a alimentos: una revisión sistemática

Recebido: 06/12/2021 | Revisado: 11/12/2021 | Aceito: 15/12/2021 | Publicado: 22/12/2021

Beatriz Lopes da Costa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0482-2832>
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará, Brasil
E-mail: costabialopes1705@gmail.com

Pedro Abreu da Silva Neto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6916-8712>
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará, Brasil
E-mail: pabreunt@gmail.com

Magnólia Carneiro de Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3741-0076>
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará, Brasil
E-mail: magnoliacarneirooliveira@gmail.com

Maria Juciene Lima Chaves

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8825-0594>
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará, Brasil
E-mail: jucienelima.juju@gmail.com

Renata Chastinet Braga

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6630-2835>
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará, Brasil
E-mail: rchastinet@ifce.edu.br

Virna Luiza de Farias

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1459-7525>
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará, Brasil
E-mail: virna@ifce.edu.br

Resumo

Técnicas de encapsulamento têm sido utilizadas a fim de superar problemas como instabilidade e degradação de compostos sensíveis às condições de processo na produção de alimentos. *Electrospraying* é um método atual, que possibilita a produção de micro e nanocápsulas de compostos, que podem ser incorporadas a alimentos. Esta revisão traz aos leitores uma visão geral sobre a aplicação do *electrospraying* em lipídeos naturais voltados para aplicação alimentícia. O objetivo desta revisão foi reunir artigos publicados sobre produção de microcápsulas de compostos lipídicos via *electrospraying* e verificar a eficiência da aplicação dessa técnica em compostos lipídicos de importância na área de alimentos. O presente estudo consiste em uma revisão sistemática usando como base de pesquisa as bases de dados Periódicos CAPES e *Science Direct*. Foram encontrados cerca de 139 estudos, sendo selecionados 9 para compor o presente estudo. Diante dos resultados dos estudos, constatou-se que a técnica de *electrospraying* para a microencapsulação de compostos lipídicos propicia a obtenção de cápsulas uniformes e de estrutura regular, que são características desejáveis. Essa técnica auxiliou na proteção de compostos bioativos e termossensíveis, como o β -caroteno e o ômega-3. A aplicação do método conferiu estabilidade oxidativa a óleos durante o período de armazenamento das cápsulas. Conclui-se que o *electrospraying* é uma técnica eficiente para microencapsulação de compostos lipídicos, com vantagens, frente a outros métodos, de promover a formação de micro ou nano cápsulas, com formato regular, de forma rápida e sem necessidade de altas temperaturas.

Palavras-chave: Microencapsulação; Electrospraying; Óleos; Estabilidade; Alimentos.

Abstract

Encapsulation techniques have been used to overcome problems such as instability and degradation of compounds sensitive to process conditions in food production. Electrospraying is a current method, which enables the production of micro and nanocapsules of compounds, which can be incorporated into food. This review provides readers with an overview of the application of electrospraying to natural lipids intended for food application. The objective of this review was to gather articles published on the production of lipid compounds microcapsules via electrospraying and

to verify the efficiency of the application of this technique in lipid compounds of importance in the food field. The present study consists of a systematic review using the *Periódicos CAPES* and the Science Direct databases as research bases. About 139 studies were found, being selected 9 to compose the present study. Based on the results of the studies, it was found that the electrospraying technique for the microencapsulation of lipid compounds provides for obtaining uniform capsules with a regular structure, which are desirable characteristics. This technique helped in the protection of bioactive and thermosensitive compounds, such as β -carotene and omega-3. The application of the method provided oxidative stability to oils during the storage period of the capsules. It was concluded that electrospraying is an efficient technique for microencapsulation of lipid compounds, with advantages, compared to other methods, of promoting the formation of micro or nanocapsules, with regular shape, quickly and without the need for high temperatures.

Keywords: Microencapsulation; Electrospraying; Oil; Stability; Food.

Resumen

Se han utilizado técnicas de encapsulación para superar problemas como la inestabilidad y degradación de compuestos sensibles a las condiciones del proceso en la producción de alimentos. Electropulverización es un método actual, que permite la producción de micro y nanocápsulas de compuestos, que pueden incorporarse a los alimentos. Esta revisión proporciona una descripción general de la aplicación de la pulverización eléctrica a los lípidos naturales destinados a la aplicación alimentaria. El objetivo de esta revisión fue recopilar artículos publicados sobre la producción de microcápsulas de compuestos lipídicos mediante electropulverización y verificar la eficacia de su aplicación en compuestos lipídicos de importancia en el campo de la alimentación. El presente estudio consiste en una revisión sistemática utilizando las bases de datos *Periodicos CAPES* y *Science Direct* como base de investigación. Se encontraron alrededor de 139 estudios, siendo seleccionados 9 para componer el presente estudio. Con base en los resultados de los estudios, se encontró que la técnica de electropulverización para la microencapsulación de compuestos lipídicos permite obtener cápsulas uniformes con una estructura regular, que son características deseables. Esta técnica ayudó en la protección de compuestos bioactivos y termosensibles, como el β -caroteno y el omega-3. El método proporcionó estabilidad oxidativa a los aceites durante el período de almacenamiento de las cápsulas. Se concluye que la electropulverización es una técnica eficaz para la microencapsulación de compuestos lipídicos, con ventajas, frente a otros métodos, de favorecer la formación de micro o nanocápsulas, con forma regular, de forma rápida y sin necesidad de altas temperaturas.

Palabras clave: Microencapsulación; Electropulverización; Aceite; Estabilidad; Alimentos.

1. Introdução

Nas últimas décadas, o interesse por alimentos funcionais tem crescido consideravelmente, com a proposta de melhoria de saúde por todas as partes envolvidas: a indústria de alimentos, a ciência e os consumidores (Alves et al., 2020). Entretanto, durante a produção de alimentos vários processos podem ocasionar degradação significativa de diversos componentes importantes, como os compostos bioativos, tais como lipídeos, antioxidantes, vitaminas, assim como probióticos. Diversas técnicas têm sido desenvolvidas ao longo dos anos para proteger estes compostos ultrasensíveis, como a microencapsulação. Além de proteger tais compostos, a microencapsulação oferece a oportunidade de controlar a liberação de compostos bioativos no trato gastrointestinal, elevando a sua bioeficiência e oferecendo mais nutrientes para o organismo do consumidor (Alehosseini et al., 2019)

A microencapsulação é definida como um conjunto de tecnologias envolvendo materiais gasosos, líquidos ou sólidos, com uma fina estrutura polimérica, com a capacidade de estruturar pequenas partículas conhecidas como microcápsulas. Este polímero funciona como filme protetivo de um núcleo interno, para que este não sofra danos com exposições indevidas. Esta estrutura só será afetada quando aplicada o estímulo correto, liberando o núcleo no ambiente e tempo propício (Ferreira et al., 2021; Pereira et al., 2018).

Dessa forma, a utilização da microencapsulação surge com a finalidade de auxiliar na estabilização oxidativa de componentes lipídicos, como ácidos graxos essenciais de importância para a saúde humana, visto que os processos degradativos são prejudiciais, podendo gerar grupamentos tóxicos e reduzir as propriedades funcionais dos compostos bioativos presentes nos óleos (Copado et al., 2019).

É possível encontrar na literatura científica várias técnicas e materiais utilizados como encapsulantes, conhecidos também como paredes, para realização do processo de microencapsulação (Ledo et al., 2021). A técnica a ser aplicada depende

das características físicas e químicas do núcleo que se deseja proteger, assim como da adequação do material de parede. As técnicas mais utilizadas para esse processo são *spray drying*, *spray cooling*, extrusão, coacervação, liofilização e emulsificação (Antigo, Silva, Bergamasco & Madrona, 2020). Um método recente tem ganhado espaço nas pesquisas científicas devido à sua capacidade tecnológica, o *electrospraying*, que em português é conhecido por eletropulverização.

A técnica *electrospraying* é realizada a partir de ações eletro-hidrodinâmicas, onde soluções de polímeros são concentradas e pulverizadas através de campo elétrico de alto potencial, com intuito de se obter fibras ou partículas. Comumente, a realização do processo necessita de componentes essenciais para o seu desenvolvimento: fonte de alta tensão, agulha ou capilar de aço inoxidável, bomba de seringa e coletor aterrado ou placa plana. Assim, esta técnica tem por propósito atomizar líquidos por meio de forças elétricas (Bhushani et al., 2017).

O *electrospraying* é uma resposta potencial às demandas de produção de nanopartículas, como escalabilidade, reprodutibilidade e encapsulamento eficaz em nanotecnologia alimentar. O *electrospraying* (e o processo relacionado de *electrospinning*) mostram-se promissores como um novo veículo de entrega para compostos alimentares suplementares, uma vez que o processo pode ser realizado a partir de uma solução aquosa, à temperatura ambiente e sem coagulação química para produzir matrizes em escala de micro ou nano partículas (Evangelho et al., 2019).

A adoção da tecnologia de pulverização por *electrospraying* vem se tornando a cada vez mais um processo atrativo, com potencial para a indústria de alimentos, especialmente na melhoria dos processos de encapsulação de substâncias susceptíveis a deterioração, como é o caso dos compostos lipídicos, além da capacidade promissora para uso em alimentos funcionais (Rentería-Ortega et al., 2021).

Este artigo apresenta uma revisão sobre os princípios de *electrospraying* para produzir micro e nanopartículas de lipídios adequadas para aplicação em tecnologia de alimentos, particularmente para uso em encapsulamento e como nanocarreadores. Portanto, o objetivo desta revisão foi enfeixar artigos publicados com temas referente a microcápsulas de compostos lipídicos via *electrospraying* e verificar a eficiência da aplicação da técnica em compostos lipídicos importantes na área de alimentos na microencapsulação.

2. Metodologia

2.1 Caracterização do estudo

No presente trabalho foram recrutados artigos para uma revisão sistemática com base em um conjunto de pesquisas, com o propósito de comparar estudos e apresentar a eficiência do método de encapsulação de compostos lipídicos em alimentos utilizando a técnica de *electrospraying*. Neste artigo foi utilizado o método PRISMA (principais itens para relatar revisões sistemáticas e meta-análise) (Galvão et al.,).

As revisões sistemáticas estão baseadas em questões claras e bem definidas, estando pautadas em evidências relevantes de uma investigação científica. Esses tipos de revisões são abrangentes e são considerados estudos secundários por serem baseados em estudos primários de sua fonte de dados (Galvão & Pereira, 2014).

2.2 Critérios de seleção

Houve um interesse em pesquisas voltadas para micro e nanoencapsulação por *electrospraying* em ácidos graxos, aplicados à área alimentícia. Além disso, buscou-se estudos que abordassem sobre a estabilidade das cápsulas obtidas, visto que os compostos observados são sensíveis à alguns fatores externos, como luz e oxigênio.

Para verificação do atendimento aos critérios de seleção estabelecidos, foi levado em consideração o título, sendo realizada a leitura dos resumos de alguns trabalhos.

2.3 Estratégia de busca e critério de elegibilidade

Foram utilizados como critérios de seleção para a elaboração da referida revisão sistemática estudos que envolvessem a temática sobre microencapsulação de compostos lipídicos pela técnica de *electrospraying* nos últimos sete anos (2014-2021). Foram pesquisados, somente em inglês, os termos “Oil”, “Encapsulation” e “Electrospraying”. Foram encontrados cerca de 1.065 artigos, nos buscadores Periódicos CAPES e *Science Direct*. Também foi realizada a pesquisa no Scielo, porém nenhum resultado foi encontrado com esses termos. Como a quantidade de artigos era muito abrangente, foi necessário reformular as expressões para pesquisa.

Para realização da nova busca, houve um enfoque na microencapsulação de ácidos graxos, em especial substâncias bioativas incrementadas com óleos e ácidos graxos essenciais. No momento da pesquisa utilizou-se termos envolvendo componentes como, “Ômega-3” e “Ômega-6”, além de incluir expressões sobre suas propriedades. As buscas ocorreram em inglês e incluíram aspectos sobre técnica de eletropulverização na encapsulação dos lipídeos, utilizando sinônimos e termos derivados. As bases usadas para seleção dos trabalhos foram Periódicos CAPES e *Science Direct*, adicionando-se o limite “and” entre cada expressão.

As palavras adicionadas na bases de dados foram: “Ômega-3 and Lipid oxidation and Electrospraying nano-microencapsulation”; “Ômega n-6 polyunsaturated and Encapsulated oil and Electrospray”; “Oxidative stability and Capsule-enriched of oil-loaded”; “Fatty acids and Electrospraying”; “Fatty acids and Electrospraying nanoencapsulation and Bioactive nutraceuticals”; “Microencapsulation and Lipid electrospraying and Emulsion and Stabilize”; e “Sardine oil encapsulated and Electrospray and Wall materials stability”.

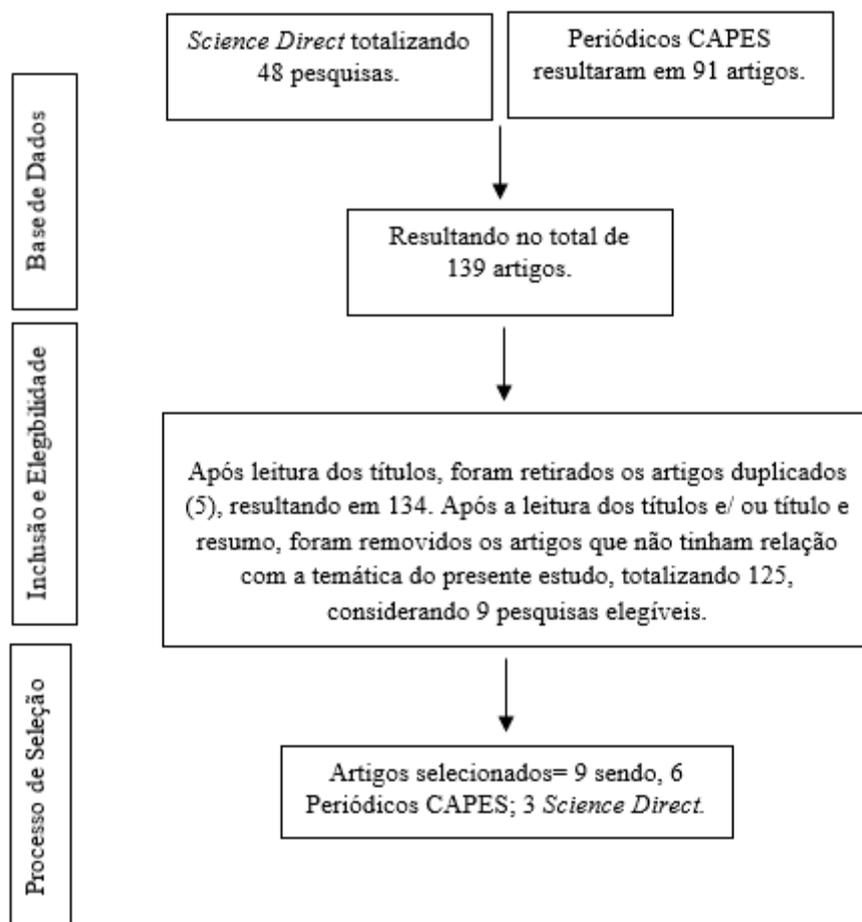
2.4 Critérios de exclusão

Por sua vez, os critérios utilizados para a exclusão dos trabalhos durante as buscas e coletas de dados envolveram pesquisas duplicadas e demais artigos (revisões de literatura/sistemáticas e capítulos de livro), bem como a remoção de estudos que, pelo título e/ou resumo, não apresentavam relação direta com o assunto em pauta, tais como pesquisas da área da saúde, artigos que não envolviam o uso da técnica de *electrospraying* para microencapsulação de compostos lipídicos no setor de alimentos ou para uso em produtos alimentícios.

2.5 Processo de seleção dos artigos e coleta de dados

Como resultado, 9 artigos foram selecionados de forma objetiva e criteriosa, sendo estes avaliados de forma integral, levando em consideração as informações apresentadas para compor a base para elaboração do presente artigo (Figura 1).

Figura 1. Fluxograma com as etapas de seleção das pesquisas encontradas, Limoeiro do Norte- CE, 2021.



Fonte: Autores (2021).

Após o processo de seleção, foram descritas as informações dos estudos para esta revisão sistemática, destacando a fonte (base de dados) de onde os artigos foram obtidos, o tipo de lipídio encapsulado e o título dos artigos, detalhados no Quadro 1, e identificados através da autoria das pesquisas.

Quadro 1. Identificação e caracterização dos artigos.

Aspectos dos Artigos Selecionados			
Identificação	Título do Artigo	Óleo Encapsulado	Base de Dados
García-Moreno et al. (2018)	Physicochemical characterization and oxidative stability of fish oil loaded electrosprayed capsules: Combined use of whey protein and carbohydrates as wall materials	Ômega-3	Science Direct
Gómez-Mascaraque, Perez-Masiá, González-Barrio, Periago e López-Rubio (2017)	Potential of microencapsulation through emulsion-electrospraying to improve the bioaccessibility of β -carotene	Óleo de soja Enriquecido com β -caroteno	Periódicos CAPES
Hu, Chen, Song e He (2021)	Arachidonic acid-encapsulated microcapsules with core-shell structure prepared by coaxial electrospray	Ácido araquidônico	Periódicos CAPES
Dórame-Miranda et al. (2021)	Encapsulation of sardine oil by electrospraying with gliadins and pecan nutshell extracts for its stabilization	Ômega-3	Periódicos CAPES

Hermund et al. (2019)	Stabilization of fish oil-loaded electrospayed capsules with seaweed and commercial natural antioxidants: Effect on the oxidative stability of capsule-enriched mayonnaise	Ômega-3	Periódicos CAPES
Escobar-García, Prieto, Pardo-Figuere e Lagaron (2021)	Room temperature nanoencapsulation of bioactive eicosapentaenoic acid rich oil within whey protein microparticles	Ácido eicosapentaenoico	Periódicos CAPES
Gómez-Mascaraque e López-Rubio (2015)	Protein-based emulsion electrospayed micro- and submicroparticles for the encapsulation and stabilization of thermosensitive hydrophobic bioactives	Ácido alfa-linolênico	Science Direct
Prieto e Lagaron (2020)	Nanodroplets of docosahexaenoic acid-enriched algae oil encapsulated within microparticles of hydrocolloids by emulsion electrospaying assisted by pressurized gas	Ômega-3 Ácido eicosapentaenoico ou EPA	Periódicos CAPES
Busolo, Torres-Giner, Prieto e Lagaron (2019)	Electrospaying assisted by pressurized gas as an innovative high-throughput process for the microencapsulation and stabilization of docosahexaenoic acid-enriched fish oil in zein prolamine	Ômega-3 ácido docosahexaenoico ou DHA)	Science Direct

Fonte: Autores (2021).

3. Resultados

Buscou-se um grupo menor de artigos a fim de se obter uma descrição detalhada sobre a técnica de *electrospraying*, avaliando-se majoritariamente a metodologia, os resultados e a conclusão das pesquisas. Foram encontrados um total de 9 artigos sobre microencapsulação de compostos de ácidos graxos, componentes bioativos com óleo e lipídeos poli-insaturados voltados para a área de alimentos.

Dentre os trabalhos observados, dois artigos abordam sobre a técnica de *Electrospraying* Assistido por Gás Pressurizado (EAGP) na microencapsulação de ácido eicosapentaenóico (EPA), óleo de alga e óleo de peixe (ácido docosahexaenóico-DHA), em relação a seus benefícios sensoriais e uso das cápsulas para enriquecimento de produtos alimentares fortificados. Outra pesquisa voltou-se para o método de *electrospraying* coaxial na encapsulação ácido araquidônico (AA).

Dentre os nove, quatro artigos envolveram a encapsulação de óleo de peixe (Ômega-3) por *electrospraying*, investigando a estabilidade das cápsulas para aumentar as propriedades nutricionais de produtos alimentares ou destinados para uso no setor industrial de alimentos.

Uma pesquisa detalhou o uso da técnica de *electrospraying* em compostos susceptíveis a degradação (ácido alfa linolênico-ALA), elucidando seu potencial na indústria alimentícia. Outro estudo relatou o uso da técnica na encapsulação de óleos com compostos ativos como o β -caroteno.

3.1 Microencapsulação de ômega-3

3.1.1 Microencapsulação de óleos de peixes

O estudo de Busolo et al. (2019), empregou o processo de *Electrospraying* Assistido por Gás Pressurizado (EAGP) para a microencapsulação de óleo de peixe. As cápsulas foram obtidas em uma solução de etanol a 85% (p/p) contendo zeína a 4,5% (p/p) com adição de óleo de peixe enriquecido com ácido docosahexaenóico (DHA). Com o método EAGP, o equipamento apresenta uma unidade de injeção, câmara de secagem e um coletor de ciclone.

A solução contendo zeína e óleo de peixe enriquecido com DHA foi bombeada para o *spray* pneumático e as gotículas secaram no trajeto para a unidade coletora. O experimento ocorreu em condições ambientes a 25 °C. As cápsulas apresentaram diâmetro médio de 1,4 µm e eficiência de microencapsulação de 84%.

O DHA, que apresenta susceptibilidade à degradação oxidativa, apresentou estabilidade durante o armazenamento por 45 dias e nos tratamentos utilizados, em especial nas cápsulas armazenadas sob vácuo, bem como, nos testes sensoriais das cápsulas em leite reconstituído. Concluiu-se que a aplicação dessa nova técnica foi promissora e pode ser aplicada na indústria de alimentos para elaboração de produtos fortificados.

No trabalho de Dórame-Miranda et al. (2021), o *electrospraying* foi aplicado para produção de micro e nanocápsulas de óleo de sardinha (OS- material encapsulado), tendo gliadinas (proteína) e extrato da casca de noz-pecã (antioxidante) como material de parede. O estudo comparou a estabilidade de OS encapsulado com e sem extrato, bem como OS não encapsulado.

A concentração da gliadina para otimizar a morfologia foi ajustada para as soluções com OS e foram injetadas no aparelho de *electrospraying*, com ajuste da voltagem e distância entre a agulha da seringa (local de saída da solução) para o coletor. Os resultados mostraram que as micro e nanocápsulas apresentaram formato esférico, polidisperso e superfície lisa.

A eficiência da encapsulação com e sem extratos foi de 94% e 98%, respectivamente. O uso do extrato melhorou a estabilidade oxidativa do OS, mostrando o potencial da gliadina e do revestimento da casca de noz-pecã como encapsulante. Concluiu-se que OS encapsulado pelo método de *electrospraying* apresenta potencial como composto bioativo, e pode ser introduzido em alimentos para torná-los funcionais.

A pesquisa de Hermund et al. (2019), avaliou a estabilidade, em maionese, de micro e nanocápsulas de óleo de peixe (ômega-3) com diferentes antioxidantes e biopolímeros (dextrano e xarope de glicose) como encapsulantes. As formulações de núcleo ativo utilizadas em combinação com ômega-3 foram I: extrato de etanol - alga marinha *Fucus vesiculosus* e II: tocoferol- alecrim. A solução encapsulante com emulsão de óleo de peixe e antioxidante passou pelo processo de *electrospraying* assistido por ar pressurizado a 24 °C. A maionese foi enriquecida com ômega-3 encapsulado e na forma livre.

Foi observado que nas cápsulas com extrato de alga marinha a presença do dextrano (encapsulante) nas formulações de ômega-3 apresentou maior estabilidade oxidativa em comparação com o xarope de glicose, que em contato com o extrato de alga permitiu a ação de íons metálicos (reduzindo a estabilidade). O extrato de tocoferol-alecrim (ativo antioxidante) apresentou melhores resultados com xarope de glicose em comparação com ômega-3 puro durante 21 dias de armazenamento, porém esse comportamento não ocorreu quando adicionado na maionese.

Os autores concluíram que a encapsulação por *electrospraying* do ômega-3 com antioxidante foi eficiente, porém não apresentaram resultados promissores quanto à aplicação na maionese, pelo fato desta apresentar componentes pró-oxidantes.

García-Moreno et al. (2018), estudaram as características físico-químicas e a estabilidade oxidativa de ômega-3 micro e nano encapsulados pelo método de *electrospraying* utilizando como encapsulante uma combinação de diferentes concentrações de *whey protein* (WP) e carboidratos (xarope de glicose, pululano e dextrano). As soluções foram otimizadas e a técnica de *electrospraying* foi aplicada em planta piloto e laboratório.

As soluções que passaram por emulsificação em um rotor-estator (onde ocorre rápida secagem) apresentaram maior estabilidade oxidativa em todas as concentrações testadas em comparação a emulsificação em homogeneizador de alta pressão. Durante o armazenamento de 21 dias, as cápsulas de xarope de glicose (contendo óleo que passou pela emulsificação com o rotor-estator) apresentaram maior estabilidade a hidroperóxidos, com menor formação desses compostos devido a estabilização da oxidação.

Com a aplicação do *electrospraying* ocorreu uma maior eficiência de encapsulação e as cápsulas não apresentaram defeitos. Os autores concluíram que esse processo foi eficiente na microencapsulação de óleos de peixes utilizando os

diferentes tipos de biopolímero avaliados (*whey protein*, pululano e dextrano ou xarope de glicose), mostrando potencial na indústria de alimentos.

3.1.2 Encapsulação de óleo de algas

O estudo de Prieto e Lagaron (2020) avaliou a Eletropulverização Assistida por Gás Pressurizado (EAGP), que foi usada para avaliar a encapsulação de óleo de algas em temperatura ambiente em dois hidrocoloides alimentares, concentrado de proteína de soro de leite e maltodextrina, com o objetivo de minimizar a oxidação lipídica desses compostos. Além disso, testes sensoriais foram realizados com os encapsulados em um produto alimentar modelo, o leite em pó, para determinar o impacto da adição das partículas, em comparação com o óleo puro, ao leite reconstituído.

A partir do referido estudo, foi constatado que a encapsulação do óleo de alga foi eficiente, uma vez que o material a ser encapsulado não sofreu oxidação durante o processo realizado à temperatura ambiente, sendo a encapsulação com o concentrado proteico de soro de leite mais eficiente nesse quesito, uma vez que as partículas produzidas com maltodextrina foram mais susceptíveis a oxidação.

Segundo os testes sensoriais, não houve diferença significativa entre o produto alimentício fortificado e o de referência, o que sugere a estabilidade oxidativa obtida pelo processo de encapsulação. Os autores concluíram que a técnica EAGP é promissora para a microencapsulação de materiais sensíveis, podendo ser usada futuramente no desenvolvimento de produtos alimentícios funcionais.

Escobar-García et al. (2021) analisaram a microencapsulação de óleo de alga (ácido eicosapentaenoico-EPA) utilizando *whey protein* como material encapsulante pelo processo de Eletropulverização Assistida por Gás Pressurizado (EAGP). As soluções encapsulantes de WP foram preparadas com adição gradual de EPA, e para o tratamento controle foram formuladas partículas sem o ácido graxo.

A emulsão contendo o óleo de alga foi exposta a um borbulhamento contínuo de nitrogênio (a fim de resfriar e evitar a oxidação) e a solução foi bombeada para a unidade injeção. De acordo com os resultados, após o processo de eletropulverização as microcápsulas foram obtidas com sucesso.

Foi observado que a produção de microcápsulas contendo a proteína do leite como material de parede foi viável, e as microcápsulas, assim como o óleo encapsulado, composto de 80% de ácidos graxos poli-insaturados (PUFAs), apresentaram-se estáveis. Constatou-se que a bioatividade das microcápsulas não foi comprometida pelo uso da técnica de *electrospraying*. Concluiu-se que a técnica é vantajosa, e que a utilização da encapsulação promove a proteção do óleo quanto à degradação oxidativa e térmica, além de apresentar benefícios sensoriais.

3.2 Microencapsulação de ômega-6

Hu et al. (2021) analisaram ácido araquidônico (AA) microencapsulado, utilizando-se zeína como encapsulante, pelo método de eletropulverização coaxial. A zeína, que consiste em uma proteína prolamina obtida do milho, apresenta características hidrofóbicas e se constitui em um bom filme. A concentração e o fluxo das soluções de zeína e do agente ativo foram determinadas e injetadas pelas seringas no equipamento. A distância e a voltagem de aplicação também foram determinadas.

No estudo, o processo de microencapsulação foi assistido por microscopia de varredura eletrônica e a laser. Com o uso da técnica de eletropulverização coaxial, o material de parede e o núcleo foram injetados em entradas diferentes com auxílio de bombeador com saída de material inoxidável (com agulha injetora interna e externa), em condições de alta voltagem. As cápsulas apresentaram boa distribuição do núcleo (AA) e encapsulante (zeína) devido ao ajuste das condições de encapsulação como a taxa de fluxo de alimentação das emulsões de material de parede e núcleo.

Então, com o uso dessa técnica foi observado que as cápsulas formadas eram uniformes e esféricas, com diâmetros na faixa de 1 a 7 µm. De acordo com a análise de peróxidos, a encapsulação de AA apresentou estabilidade oxidativa e os odores indesejáveis foram inibidos pelo material encapsulante.

Os autores concluíram que a aplicação da técnica de eletropulverização coaxial é eficaz para produção de cápsulas, e que pode, portanto, potencializar o uso de ácidos graxos poli-insaturados (PUFAs) na indústria de alimentos.

3.3 Microencapsulação de compostos ativos com óleo

Gómez-Mascaraque et al. (2017) avaliaram a microencapsulação de óleo de soja (OS) enriquecido com β-caroteno (BC) pelo processo de *electrospraying* usando materiais de parede de origem proteica e realizaram testes *in vitro*. Diferentes soluções foram preparadas com *whey protein* e água destilada, zeína e etanol em uma emulsão com OS enriquecido com BC.

A homogeneização foi realizada por duas técnicas: alta velocidade e ultrassom. Foi aplicado o processo de eletrofição-eletropulverização na emulsão com auxílio de uma seringa. As microcápsulas de *whey protein* foram degradadas termicamente, mostrando-se sensíveis aos dois métodos de homogeneização, enquanto as cápsulas de zeína apresentaram maior estabilidade e capacidade bioativa. Os autores concluíram que a aplicação do método de emulsão-eletropulverização apresentou resultados promissores para encapsulação de carotenoides, sendo uma importante alternativa à otimização do enriquecimento de formulações de alimentos.

Gómez-Mascaraque e López-Rubio (2015) investigaram o potencial da técnica de *electrospraying*. Três soluções foram elaboradas e combinadas em diferentes concentrações para microencapsulação e proteção de compostos bioativos, como ácido alfa-linolênico-ALA puro, utilizando os estabilizantes *whey protein*, gelatina e proteína de soja (PS) como encapsulantes. Com auxílio de uma seringa, as emulsões foram processadas pela ferramenta de eletrofição-eletropulverização. Também foi avaliada a microencapsulação das emulsões por *spray-drying* (com temperatura de entrada da solução a 90 °C) para comparação dos dados.

Dos resultados obtidos, este último método provocou a deterioração dos compostos bioativos, enquanto a técnica de *electrospraying* apresentou 70% de eficiência na microencapsulação. O ALA apresentou maior estabilidade quando encapsulado com WP e PS em comparação com a gelatina.

Os autores concluíram que o uso do *electrospraying* foi adequado para a microencapsulação dos compostos com *whey protein* e proteína de soja, porém os resultados não foram satisfatórios para a gelatina, verificando-se a necessidade de uma formulação mais adequada com gelatina.

4. Discussão

Os resultados obtidos na presente revisão sistemática mostraram-se promissores em relação ao uso da técnica de *electrospraying* na microencapsulação de compostos lipídicos, principalmente em óleos de peixe, como o ômega-3, em especial o DHA.

Com os dados obtidos da microencapsulação pelo método de Eletropulverização Assistida por Gás Pressurizado (EAGP), foi observado maior estabilidade dos agentes ativos possibilitando sua produção, em especial para cápsulas de DHA ou óleo de algas contendo zeína, maltodextrina ou proteína do leite (*whey protein*) como encapsulante, proporcionando a aplicação dessas cápsulas em alimentos para a produção de alimentos funcionais. Isso se deve às baixas temperaturas e rápida secagem das cápsulas durante o processo de microencapsulação por EAGP.

Observando as informações obtidas, o emprego da técnica de eletropulverização está associado à elevada eficiência na produção de microcápsulas com formatos esféricos, sem defeitos, polidispersas e com superfície lisa, bem como a obtenção de cápsulas com tamanhos menores, caracterizadas como nanocápsulas, devido ao ajuste do equipamento (seringa, agulha,

voltagem) e ao tipo e concentração do encapsulante. Essas características são desejáveis, uma vez que cápsulas com formato mais regular estão associadas a melhor proteção do agente ativo. Assim, a eletropulverização tem a mesma vantagem da liofilização quanto à não utilização de altas temperaturas, mas na liofilização não há formação de cápsulas esféricas e regulares, além de necessitar de longos tempos para obtenção do produto desidratado.

Notou-se que a taxa de fluxo da solução no momento da injeção, bem como a distância entre o coletor e a agulha interferem no diâmetro das cápsulas, influenciando nos resultados. Uma forma de otimizar as características das cápsulas a serem obtidas pela definição dos parâmetros de processo e concentração ótima da solução a ser encapsulada.

O uso desse método auxiliou na estabilidade de óleos microencapsulados em condições de armazenamento, evitando sua oxidação, visto que o método não emprega altas temperaturas, o que acelera a degradação desses compostos. Por exemplo, a encapsulação de ácido araquidônico proporcionou estabilidade oxidativa, comprovada pela menor concentração detectada de peróxidos e redução de odores indesejáveis provenientes de processos oxidativos do óleo.

No entanto, o uso de materiais encapsulantes com certos ativos, como o xarope de glicose e extrato de alga marinha, pode promover efeito contrário, reduzindo a estabilidade oxidativa das microcápsulas quando adicionadas em algumas matrizes alimentares, como o que ocorreu com maionese, mostrando a importância da escolha de um material de parede e ativos compatíveis com o alimento ao qual se pretende incorporar essas cápsulas.

Pesquisas com o uso de carboidratos como pululano, xarope de glicose e dextrano na microencapsulação de óleo de peixe por eletropulverização apresentaram resultados promissores, quando aplicado o uso de rotor-estator como forma de emulsificação, gerando melhores resultados em termos de estabilidade oxidativa das cápsulas, devido à eficiência da microencapsulação e o menor tempo de emulsificação e secagem das cápsulas.

Observou-se ainda que os materiais de parede, como o *whey protein* e a zeína, na encapsulação de ativos podem apresentar comportamentos diferentes dependendo da forma de homogeneização de alta velocidade aplicada (ultrassom), podendo apresentar efeitos negativos, como no caso do *whey protein*, devido à degradação térmica, diferente da zeína, que apresentou maior estabilidade ao aquecimento proveniente do homogeneizador. Por isso, faz-se necessário o uso de encapsulantes resistentes e compatíveis com o processo.

O xarope de glicose como encapsulante apresentou resultados distintos em pesquisas utilizando o método de *electrospraying*, ressaltando assim que o material de parede das microcápsulas pode apresentar comportamentos diferentes a depender do agente ativo, da presença de antioxidantes e do tipo de alimento no qual as cápsulas são adicionadas.

O método de eletropulverização coaxial apresentou resultados positivos em relação à microencapsulação de compostos imiscíveis. Foi observado nos estudos que abordaram esse procedimento a obtenção de cápsulas com uniformidade, estrutura regular e estabilidade oxidativa do núcleo. A adaptação de parâmetros como voltagem (que proporciona repulsão eletrostática) e distância do coletor para recepção, bem como fluxo das emulsões contribuíram para a obtenção de microcápsulas resistentes e com aspectos adequados nessa técnica.

Pode-se dizer que o *electrospraying* é mais eficiente para microencapsulação de compostos susceptíveis a deterioração térmica, como o ácido alfa-linolênico, que o *spray drying*, que é uma das técnicas mais utilizadas para obtenção de microcápsulas, pois pelo *electrospraying* o processo pode ocorrer em temperaturas mais brandas. Importante ainda destacar o fato de se poder obter partículas menores, caracterizadas como nanopartículas, por meio do *electrospraying*.

5. Conclusão

Diante dos resultados analisados nos estudos, constatou-se a eficiência da técnica de *electrospraying* na microencapsulação de compostos lipídicos, tendo em vista a proteção desses compostos, que são susceptíveis à degradação térmica em processo de microencapsulação utilizando temperaturas elevadas, como por *spray drying*. Além disso, o

electrospraying melhora a estabilidade oxidativa de óleos durante o período de armazenamento das cápsulas, retardando assim o processo de degradação lipídica.

A referida técnica proporciona ainda diversas outras vantagens, tais como a formação de microcápsulas esféricas, dotadas de superfície lisa e de menor tamanho (nanocápsulas), o que melhora a proteção do agente ativo, assim como o desempenho e a funcionalidade das cápsulas no organismo humano.

A respeito dos achados no presente estudo, foi observado que o emprego da técnica de *electrospraying* ainda é recente para produção de micropartículas de ácidos graxos importantes. Por isso, sugere-se para pesquisas futuras o uso do presente artigo como base para maior exploração da técnica de eletropulverização na microencapsulação de compostos lipídicos em matrizes alimentares.

Referências

- Alehosseini, A., Ghorani, B.; Sarabi-Jamab, M., & Tucker, N. (2019). Electro-encapsulation of *Lactobacillus casei* in high-resistant capsules of whey protein containing transglutaminase enzyme. *LWT - Food Science and Technology*, 102, 150-158. [10.1016/j.lwt.2018.12.022](https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.022).
- Alves, E. da S., Silva, L. A. da., Saquet, B. H. F., Artilha, C. A. F., Sousa, L. C. S. de., Silva, D. de. M. B. da., & Visentaine, J. V. (2020). Proteínas vegetais como alimentos funcionais - revisão. *Brazilian Journal of Development*, 6 (2). [10.34117/bjdv6n2-043](https://doi.org/10.34117/bjdv6n2-043).
- Antigo, J. L. D., Silva, J. M. da., Bergamasco, R. de C., & Madrona, G. S. (2020). Microencapsulation of beet dye (*Beta vulgaris* L.) using maltodextrin and xanthan gum as encapsulant agents and application in yogurt. *Research, Society and Development*, 9(12). [10.33448/rsd-v9i12.10896](https://doi.org/10.33448/rsd-v9i12.10896).
- Bhushani, J. A., Kurrey, N. K., & Anandharamkrishnan, C. E. (2017). Nanoencapsulation of green tea catechins by electrospraying technique and its effect on controlled release and in-vitro permeability. *Journal of Food Engineering*, 199, 82-92. [10.1016/j.jfoodeng.2016.12.010](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.12.010).
- Busolo, M. A., Torres- Giner, S., Prieto, C., & Lagaron, J. M. (2019). Electrospraying assisted by pressurized gas as an innovative high-throughput process for the microencapsulation and stabilization of docosahexaenoic acid-enriched fish oil in zein prolamine. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 51, 12-19. [10.1016/j.ifset.2018.04.007](https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.04.007).
- Copado, C. N., Diehl, B. W. K., Ixtaina, V. Y., & Tomás, M. C. (2019). Improvement of the oxidative stability of spray-dried microencapsulated chia seed oil using Maillard reaction products (MRPs). *European Journal of Lipid Science and Technology*, 121 (7). <https://doi.org/10.1002/ejlt.201800516>.
- Dórame-Miranda, R. F., Gámez-Meza, N., Ovando-Martínez, M., Medina-Juaréz, L.A., Cárdenas- López, J., Ramírez-Bon, R., & Barruel-Ibarra, S. E. (2021). Encapsulation of sardine oil by electrospraying with gliadins and pecan nutshell extracts for its stabilization. *Food and Bioprocess Technology*, 14, 457-470. [10.1007/s11947-020-02567-x](https://doi.org/10.1007/s11947-020-02567-x).
- Escobar-García, J. D., Prieto, C.; Figueres- Pardo, P., & Lagaron, J. M. (2021). Room temperature nanoencapsulation of bioactive eicosapentaenoic acid rich oil within whey protein microparticles. *Nanomaterials*, 11. 575. [10.3390/nano11030575](https://doi.org/10.3390/nano11030575).
- Evangelho, J. A. do., Crizel, R. S., Chaves, F. C., Prietto, L., Pinto, V. Z., Miranda, M. Z. de., & Zavareze, E. da S. (2019). Thermal and irradiation resistance of folic acid encapsulated in zein ultrafine fibers or nanocapsules produced by electrospinning and electrospraying. *Food Research International*, 124, 137-146. [10.1016/j.foodres.2018.08.019](https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.08.019).
- Ferreira, L. P. C., Xavier, A. C. R., Santos, J. dos., Wartha, E. R. S. de. A., & Pagani, A. A. C. (2021). Microencapsulação de extrato de beterraba (*Beta Vulgaris* L.) pelo processo de gelificação iônica. *Research Society and Development*. 10 (12). <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i12.20171>
- Galvão, T. F., Pansani, T. de S. A., & Harrad, D. (2015). Principais itens para relatar Revisões sistemáticas e Meta-análises: A recomendação PRISMA. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*. 24, (2). [10.5123/S1679-49742015000200017](https://doi.org/10.5123/S1679-49742015000200017).
- Galvão, T. F., & Pereira, M. G. (2014). Revisões sistemáticas da literatura: Passos para sua elaboração. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, 23(1), 183-184. [10.5123/S1679-49742014000100018](https://doi.org/10.5123/S1679-49742014000100018).
- García-Moreno, P. J., Pelayo, A., Yu, S., Busolo, M., Lagaron, J. M., Chroakis, I. S., & Jacobsen. C. (2018). Physicochemical characterization and oxidative stability of fish oil-loaded electrosprayed capsules: Combined use of whey protein and carbohydrates as wall materials. *Journal of Food Engineering*, 231, 42-53. [10.1016/j.jfoodeng.2018.03.005](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.03.005).
- Gómez-Mascaraque, L. G., & López-Rubio, A. (2015). Protein-based emulsion electrosprayed micro and sub microparticles for the encapsulation and stabilization of thermosensitive hydrophobic bioactives. *Food Quality and Preservation Department*, 465. 259-270. [10.1016/j.jcis.2015.11.061](https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.11.061).
- Gómez-Mascaraque, L. G., Perez-Masiá, R., González-Barrio, R., Periago, M. J., & López-Rubio, A. (2017). Potential of microencapsulation through emulsion-electrospraying to improve the bioaccessibility of β -carotene. *Food Hydrocolloids*, 73, 1- 12. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.06.019>.
- Hermund, D., Jacobsen, C., Chronakis, I.S., Pelayo, A., Yu, S. Busolo, M., & García-Moreno, P.J. (2019). Stabilization of fish oil-loaded electrosprayed capsules with seaweed and commercial natural antioxidants: effect on the oxidative stability of capsule-enriched mayonnaise. *European Journal of Lipid Science and Technology*. 121 (4). <https://doi.org/10.1002/ejlt.201800396>.
- Hu, M.- X., Chen, X.-L., Song, L.-J., & He, F. (2021). Arachidonic acid-encapsulated microcapsules with core-shell structure prepared by coaxial electrospray. *Journal of Applied Polymer Science*.138 (19). <https://doi.org/10.1002/app.50403>.

Ledo, C. M. L. de., Cunha, M. N. C. da., Oliveira, J. de. P., Duarte, J. M. W., N., Porto, A. L. F. (2021). Matrizes poliméricas para encapsulação de bioinseticidas. *Pesquisa Agropecuária Pernambucana*. 26 (.2). <https://doi.org/10.12661/pap.2021.015>.

Pereira, K. C., Ferreira, D. C. M., Alvarenga, G. F., Pereira, M. S. S., Barcelos, M. C. S., & Costa, J. M. G. da. (2018). Microencapsulação e liberação controlada por difusão de ingredientes alimentícios produzidos através da secagem por atomização: revisão. *Brazilian Journal of Food Technology*. 21. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.08317>.

Prieto, C., & Lagaron, J. M. (2020). Nanodroplets of docosahexaenoic acid-enriched algae oil encapsulated within microparticles of hydrocolloids by emulsion electrospaying assisted by pressurized gas. *Nanomaterials*. 10 (2). <https://doi.org/10.3390/nano10020270>.

Rentería-Ortega, M., Salgado-Cruz, M. de la. P., Morales-Sánchez, E., Alamilla-Beltrán, L., Valdespino-León, M., & Calderón-Domínguez, G. (2021). Glucose oxidase release of stressed chia mucilage-sodium alginate capsules prepared by electrospaying. *Journal of Food Processing and Preservation*. 45 (5). <https://doi.org/10.1002/ejlt.2018.00396>.