

Tecnologia de *spray dryer* e microencapsulação – uma breve revisão

Spray dryer technology and microencapsulation: a brief review

Igor Kohn Lanciote Concilio¹ , Mário Luís Zocatelli² , Beatriz C. Barros de Silveira Mello¹ 

Citação: Concilio, I. K. L.; Zocatelli, M. L.; Mello, B. C. B. S. (2025). Tecnologia de *spray dryer* e microencapsulação – uma breve revisão. *Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação*, 10, e025010 <https://doi.org/10.18554/rbcti.v10i00.6826>

Recebido: 27 abr. 2023


Aceito: 22 set. 2025


Publicado: 30 dez. 2025



Copyright: este é um artigo de acesso aberto distribuído sob os termos da Licença de atribuição Creative Commons, que permite uso irrestrito, distribuição, e reprodução em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.



1. Universidade Federal de São Carlos , Curso de Engenharia de Alimentos, Lagoa do Sino (SP), Brasil.

2. Universidade Federal de Santa Catarina , Centro de Ciências Agrárias, Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos. Florianópolis (SC), Brasil.

*Autor correspondente: igorlanciote@estudante.ufscar.br

RESUMO: A microencapsulação consiste em revestir substâncias por um agente encapsulante, resultando em pequenas partículas, sendo o *spray dryer* uma das tecnologias empregadas. O presente trabalho teve como objetivo revisar o processo de secagem por atomização via *spray dryer*, destacando os principais parâmetros operacionais e suas correlações com as características do produto. O levantamento bibliográfico foi realizado no Google Scholar, utilizando palavras-chave como *spray dryer*, *microencapsulação*, *agentes encapsulantes*, *transição vítrea*, entre outras. Foram selecionadas obras que abordassem os parâmetros do processo e seus efeitos no produto. Observou-se que variáveis como temperatura, pressão, vazão e características do fluido de alimentação (viscosidade, teor de sólidos e temperatura de transição vítrea) influenciam diretamente na qualidade e estabilidade do pó. Problemas como *stickiness* que é a aderência na câmara, e *Caking*, fenômeno que pode ocorrer durante o armazenamento por influência de fatores como umidade, temperatura, pressão e forças eletrostáticas das partículas, podendo evoluir para liquefação do produto. Conclui-se que conhecer o material a ser atomizado é essencial para definir os parâmetros, visando a eficiência da microencapsulação.

Palavras-chave: Transição vítrea. Agentes encapsulantes. Parâmetros de processo.

ABSTRACT: Microencapsulation consists of coating substances with an encapsulating agent, resulting in small particles, with the *spray dryer* being one of the technologies employed. The objective of this study was to review the *spray dryer* atomization drying process, highlighting the main operating parameters and their correlations with product characteristics. The bibliographic survey was conducted on Google Scholar, using keywords such as *spray dryer*, *microencapsulation*, *encapsulating agents*, *glass transition*, among others. Works that addressed the process parameters and their effects on the product were selected. It was observed that variables such as temperature, pressure, flow rate, and feed fluid characteristics (viscosity, solids content, and glass transition temperature) directly influence the quality and stability of the powder. Problems such as *stickiness*, which is adhesion in the chamber, and *caking*, a phenomenon that can occur during storage due to factors such as humidity, temperature, pressure, and electrostatic forces of the particles, can lead to liquefaction of the product. It was concluded that knowledge of the material to be atomized is essential for defining the parameters, aiming at microencapsulation efficiency.

Keywords: Glass transition. Carriers. Process parameters.

1. Introdução

O processo de encapsulação é um método que reveste substâncias, como compostos bioativos, em uma membrana denominada de encapsulante, melhorando a estabilidade química e biológica, além de proteger de fatores extrínsecos (Mudalip et al., 2021; Rezvankhah et al., 2020). Tal proteção proporciona resistência e sobrevivência aos compostos encapsulados, o que pode contribuir para que o conteúdo seja liberado no organismo, majoritariamente, apenas no momento de interesse (Moser et al., 2017).

Atualmente, a secagem por atomização via *Spray Dryer* é o método mais utilizado nas indústrias alimentícias, farmacêuticas, cosméticas e de aromas, com o objetivo de encapsulação de compostos de interesse, como os bioativos (Coimbra, 2020).

Essa tecnologia pode ser aplicada em produtos que sejam passíveis de bombeamento, como emulsões, pastas, soluções, suspensões, extratos líquidos dentre outros. Seu princípio de funcionamento é por meio da pulverização de uma solução, já contendo o agente encapsulante, no interior da câmara de secagem, onde, por meio de correntes de ar controlada sob elevada temperatura, há a evaporação dos solventes e rápida separação dos sólidos. Dessa forma, promove-se a minimização da degradação dos compostos de interesse e a recuperação do produto já em pó (Keshani et al., 2015).

O agente encapsulante deve apresentar uma série de fatores a fim de ser considerado viável para utilização industrial, como termorresistência em processos de esterilização, possuir estabilidade físico-química, fornecer resistência mecânica ao material encapsulado, resistência ao oxigênio, luz, umidade e variações térmicas, além de apresentar baixo custo (Coimbra, 2020; Tolve et al., 2016).

Diante disso, o presente artigo traz uma descrição do processo de *spray drying*, uma revisão sobre os principais parâmetros e suas correlações na secagem por atomização via *spray dryer*.

2. Metodologia

O levantamento bibliográfico foi realizado por meio do mecanismo de busca Google Scholar, com o objetivo de reunir literaturas clássicas e contemporâneas sobre o tema, incluindo livros e artigos científicos. As palavras-chave utilizadas na busca foram: “*spray dryer*”, “microencapsulação”, “agentes encapsulantes” e “transição vítrea”, bem como os correspondentes termos em inglês “*microencapsulation*”, “*carriers*” e “*glass transition*”. O principal critério de seleção dos materiais foi a abordagem dos parâmetros de processo e suas correlações com as características do produto final.

Foram priorizados trabalhos publicados entre 2013 e 2023, a fim de refletir os avanços mais recentes na área. No entanto, publicações anteriores a esse período, especialmente da década de 1990 e dos anos 2000, foram incluídas quando consideradas fundamentais para a compreensão de conceitos clássicos. A base de dados mais utilizada foi a Science Direct, embora outros repositórios científicos também tenham sido consultados.

A seleção das referências priorizou estudos aplicados à tecnologia de alimentos, considerando a formação e atuação profissional dos autores nesta área. Além disso, buscou-se identificar trabalhos que abordassem os desafios práticos enfrentados em processos de secagem, com o intuito de construir uma base de dados crítica e aplicada.

Importante destacar que os resultados e interpretações apresentados nesta revisão foram validados por meio de discussões acerca do tema e da experiência prática dos autores com o uso de *spray dryer* em escala industrial, em aplicações com diferentes tipos de produtos alimentícios. A variação dos parâmetros operacionais — como temperatura de entrada e saída, vazão da bomba, vácuo, rotação ou pressão do atomizador, vazão do ar de entrada e formulação — foi observada diretamente em rotina de secagem, permitindo uma análise crítica e aplicada dos conceitos discutidos na literatura. Assim, a discussão resultante integra fundamentos teóricos com evidências empíricas, reforçando a relevância prática dos temas abordados.

3. Resultados e discussão

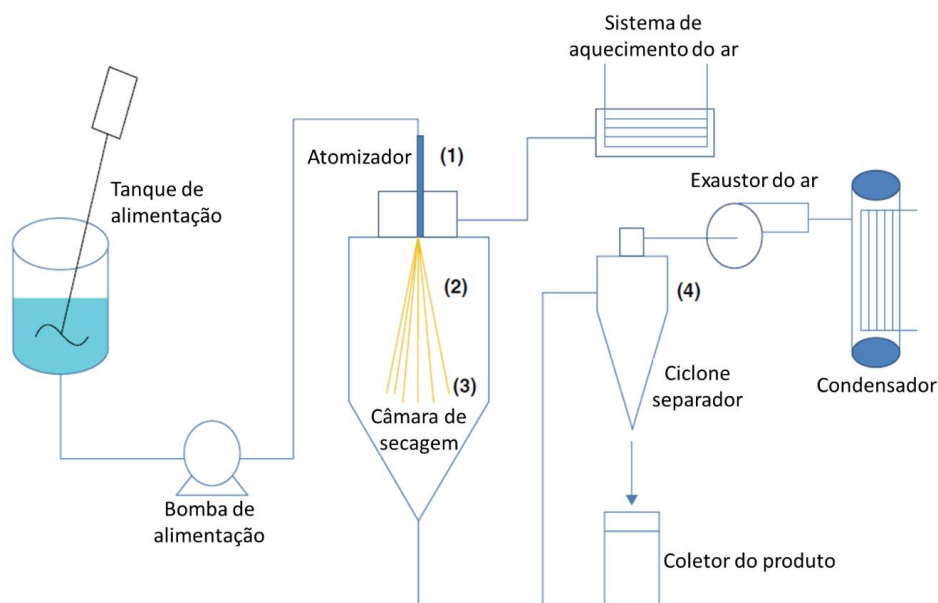
3.1 Microencapsulação

As tecnologias de microencapsulação possuem o objetivo de separar compostos reativos, controlar a liberação do conteúdo interno no meio, reduzir a perda de compostos voláteis, minimizar reações oxidativas, prolongar o *shelf-life*, proteger de fatores externos como luz, umidade e calor, mantendo assim as características nutricionais do produto (Silva et al., 2015). Na indústria de alimentos, a microencapsulação visa conservar compostos instáveis como antioxidantes, vitaminas, ácidos graxos e probióticos, além de mascarar sabores, cores e odores indesejáveis em toda cadeia produtiva. Além disso, as técnicas de microencapsulação não são excludentes, ou seja, a união de uma ou mais tecnologias podem resultar em melhorias ao processo, como por exemplo, o preparo de uma emulsão previamente à secagem por atomização via *spray dryer* (Griesang et al., 2019).

3.2 Tecnologia de Microencapsulação via Atomização por *Spray Dryer*

O processo de atomização por *spray dryer* poder ser dividido em quatro estágios (Figura 1).

Figura 1 - Diagrama simplificado das etapas do processo de atomização via *spray dryer*: Atomização (1); Contato das partículas com o gás quente (2); Evaporação da umidade (3); Separação das partículas (4)



Fonte: Adaptado de Anandharamakrishnan e Ishwarya (2015).

3.3 Estágio 1 – Atomização

O estágio de atomização é a principal fase de secagem por *spray dryer*, visto que é a etapa de transformação da solução em pequenas partículas. A divisão do líquido em uma matriz particulada impulsiona o processo de secagem através do aumento da área de superfície em contato com o ar de aquecimento, minimizando a resistência interna de transferência de massa da gotícula (umidade) para o meio circundante (Pignatello & Musumeci, 2018). O controle da vazão, velocidade e consequente distribuição do tamanho das partículas, é fundamental para morfologia do produto, assim como o tempo de processo, uma vez que este parâmetro é proporcional ao quadrado da dimensão da partícula (Anandharamakrishnan & Ishwarya, 2015).

Os atomizadores convencionais mais aplicados nas indústrias são os classificados como rotativo e bico de pressão ou hidráulico.

O princípio de funcionamento do atomizador rotativo se dá através da descarga de alta velocidade do fluido por meio da borda de um disco. O fluido de alimentação é acelerado pela força centrífuga gerada com a rotação de um disco a alta velocidade, dispersando o fluido na câmara de secagem e se desintegrando em partículas (Santos et al., 2018).

O diâmetro das partículas é diretamente proporcional a taxa de alimentação e viscosidade do fluido, e inversamente proporcional a velocidade de rotação e diâmetro do disco (Anandharamakrishnan & Ishwarya, 2015). Rosa et al. (2006) apresentaram faixas de diâmetro de partículas representativas para a equipamentos *spray dryer* comerciais de 1 μm a 600 μm para disco rotativo. Adaptações nos projetos de *spray dryer*, devem ser de acordo com a necessidade de cada usuário, possibilitam o *design* apropriado dos atomizadores para a faixa de diâmetro de partícula pretendida.

A vantagem da utilização de atomizadores rotativos é justificada por não gerarem obstrução e entupimento durante o processo de secagem, além do tamanho das partículas ser uniforme. Somado a isto, a bomba de alimentação do equipamento pode operar a baixas pressões, uma vez que a energia necessária para a atomização é centralizada no disco rotativo (Santos et al., 2018).

As limitações associadas aos atomizadores rotativos estão relacionadas a dificuldades de operação com fluidos viscosos. Por operar majoritariamente com fluidos não viscosos, a densidade da partícula é baixa, gerando assim particulado leve que não se deposita no fundo do ciclone. Dessa forma, há o arraste de partículas finas para fora do equipamento, reduzindo assim o rendimento do processo (Mujumdar, 2014).

O funcionamento do atomizador de bico de pressão ou atomizador hidráulico ocorre por meio da descarga do fluido de processo sob pressão através de um orifício. O princípio do processo está atrelado a conversão da energia na forma de pressão em energia cinética, proporcionando com que o fluido de trabalho passe pelo orifício e desintegre rapidamente em um *spray* de gotículas (Zbicinski et al., 2022).

O diâmetro das partículas é diretamente proporcional a taxa de alimentação e viscosidade do fluido, e inversamente proporcional a pressão do bico (Anandharamakrishnan & Ishwarya, 2015). Rosa et al. (2006) apresentaram faixas de diâmetro de partículas representativas para a equipamentos *spray dryer* comerciais de 10 μm a 800 μm para bico de pressão. Os projetos de *spray dryer* devem ser desenvolvidos de acordo com a necessidade de cada usuário, possibilitando o *design* apropriado dos atomizadores para a faixa de diâmetro de partícula pretendida.

As vantagens associadas a utilização de atomizadores por bicos de pressão é o fato de resultarem em produtos com baixa concentração de ar no interior das partículas, o que acarreta uma maior densidade e boa fluidez (Mujumdar, 2014).

As limitações associadas são atreladas a elevada taxa de alimentação, o que resulta em pulverizações menos homogêneas e, conseqüentemente, partículas mais grosseiras em relação aos atomizadores rotativos (Mujumdar, 2014).

3.4 Estágio 2 – Contato das Partículas com o Gás Quente

A etapa seguinte ao processo de atomização é a formação das partículas através do contato com o ar quente, o que provoca a rápida evaporação da umidade da superfície de todas as gotículas de forma uniforme. Nesse momento, o requisito crítico de secagem é o fluxo de ar uniforme em contato com toda a superfície da câmara de secagem, podendo ser caracterizado pelo fluxo cocorrente ou fluxo contracorrente (Ali et al., 2017).

Na configuração cocorrente, as partículas atomizadas que entram na câmara de secagem estão em contato direto com a entrada de ar quente, contudo, a temperatura no interior da partícula é mantida baixa devido a elevada taxa de evaporação, o que aproxima da temperatura de bulbo úmido, sendo essa a configuração mais adequada a se trabalhar com compostos bioativos termossensíveis (Selvamuthukumaran et al., 2019).

Conforme ocorre a transferência de energia por meio do calor sensível e transformação em calor latente, há a evaporação da umidade na superfície da partícula, atingindo assim a temperatura de bulbo úmido, na qual permanece durante a secagem, e promove o arrefecimento ao longo do processo. Este fenômeno é denominado de arrefecimento evaporativo, o que permite que a partícula seja mantida a temperaturas abaixo da temperatura de secagem (Lisboa et al., 2018).

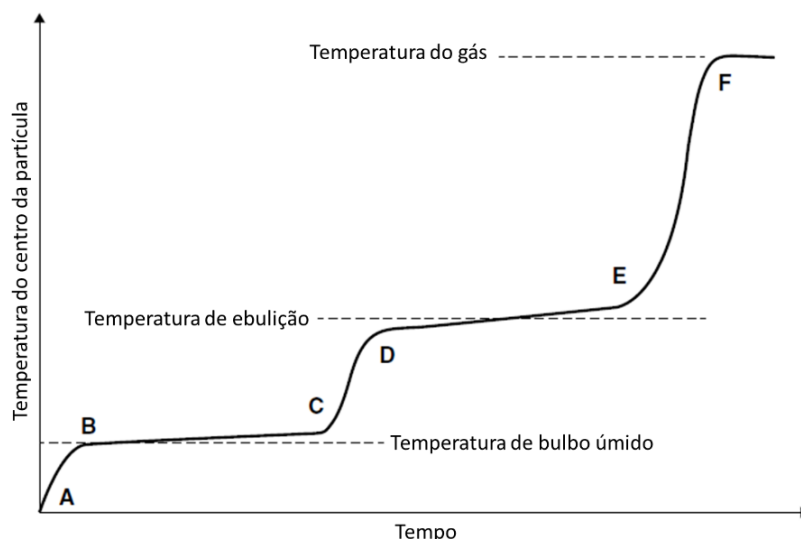
O tempo de contato do ar quente com as partículas é de apenas alguns segundos durante a secagem, contudo, é suficiente para reduzir rapidamente a temperatura do ar ao redor das partículas, aumentando a umidade relativa ao seu redor (Lisboa et al., 2018). Isso resulta em vantagens como o baixo tempo de residência e baixas temperaturas, o que minimiza a perda de compostos voláteis (Selvamuthukumaran et al., 2019).

Na configuração contracorrente, o fluido atomizado e o ar de aquecimento entram na câmara de secagem por extremidades opostas. Por conta disso, a temperatura do produto de saída tende a ser próxima a temperatura do ar de entrada, devido ao contato direto das partículas de baixa umidade com o ar de entrada, o que promove a elevação da temperatura até próximo a de bulbo seco. Sendo assim, há a necessidade trabalhar com partículas maiores, promovendo o aumento da umidade no interior da esfera e consequente arrefecimento do ar circundante. Devido a suas características, essa configuração resulta na aplicação de produtos resistentes ao calor (Wawrzyniak et al., 2020).

3.5 Estágio 3 - Evaporação da Umidade

Por meio da Figura 2, pode-se observar todos os estágios de remoção da umidade de uma partícula exposta ao ar quente em um processo de secagem por *spray dryer*, onde ocorre a transferência de energia térmica por meio da convecção (Santos et al., 2018).

Figura 2 - Estágios da temperatura e umidade ao longo do tempo em um processo de secagem por *spray dryer*



Fonte: Adaptado de Santos et al. (2018).

Durante a exposição de uma partícula em um meio aquecido, sua temperatura é elevada desde seu valor inicial até a temperatura de evaporação de equilíbrio (curva A-B da Figura 2) (Santos et al., 2018).

Ao atingir este estado, a taxa de remoção de umidade da superfície da partícula segue para um período constante, pois sua superfície torna-se saturada de umidade e sua temperatura se estabiliza na temperatura de bulbo úmido. Dessa forma, há uma redução no volume da gotícula devido a transferência de massa e arrefecimento devido a evaporação provocada pelo calor latente do ar circundante,

removendo assim as partículas de maior energia do sistema e mantendo constante sua temperatura (curva B-C da Figura 2) (Anandharamakrishnan & Ishwarya, 2015).

Conforme ocorre a remoção da umidade da gotícula, o soluto é concentrado para além da saturação, provocando assim o desenvolvimento de uma fina casca/crosta na superfície da partícula (Santos et al., 2018).

O processo de formação de casca durante a secagem por *spray dryer* representa o início da elevação da temperatura na partícula. O processo de remoção de umidade agora é controlado pela difusão, e a taxa de evaporação é dependente da taxa de difusão do vapor de água através da casca (Wawrzyniak et al., 2020). Dessa forma, há uma queda na taxa de remoção de umidade, podendo pela curva C-D da Figura 2 (Santos et al., 2018).

Embora a formação de casca represente o aumento da temperatura, a partícula está exposta a uma das partes mais frias do *spray dryer*, uma vez que o ar de aquecimento se encontra próximo da temperatura de saída do secador. Dessa forma, não há tendência das partículas se aproximarem da temperatura do ar de entrada, mas sim limitar seu valor próximo a temperatura de saída (Woo et al., 2017).

Conforme a partícula aumenta a temperatura, há a tendência de o equilíbrio termodinâmico em seu interior ceder e a pressão de vapor interna superar a pressão externa, o que promove o surgimento de partículas com bolhas em seus núcleos (curva D-E da Figura 2) (Santos et al., 2018). Ao eliminar a bolha através do rompimento da casca, gera-se a irregularidade no formato do produto. Além disso, por conta da baixa umidade, a temperatura da gota atinge a temperatura de bulbo seco do ar de saída, representada pela curva E-F da Figura 2 (Anandharamakrishnan & Ishwarya, 2015).

3.6 Estágio 4 – Separação das Partículas

A separação das partículas é usualmente realizada por meio de um ciclone de separação, sendo este um dispositivo estacionário que utiliza força centrífuga para separar partículas sólidas de um gás transportador, promovendo a formação de um vórtex rente a parede interna (contendo as partículas) e um central contendo apenas o gás quente (Poozesh & Bilgili, 2019).

3.7 Morfologia das Partículas

A morfologia das partículas secas é associada diretamente com as matérias-primas, assim como os parâmetros de processo. Tal aspecto influencia em características de qualidade do produto, como granulometria, fluidez, teor de umidade, massa e densidade (Lintingre et al., 2016).

Após a formação da crosta, a partícula tende a seguir, principalmente, dois caminhos morfológicos, sendo as partículas pequenas e sólidas ou partículas grandes e ocas. As partículas pequenas e sólidas são caracterizadas por apresentarem baixa umidade em seu interior e pela facilidade de estilhaçar quando secas a elevadas temperaturas. Já as partículas grandes e ocas apresentam maior umidade em seu interior, podendo inflar quando expostas a temperatura, potencializando o colapso da estrutura e tornando-se enrugada ou com bolhas (Both et al., 2020).

3.8 Temperatura de Entrada e Saída

O controle da temperatura de entrada no processo de secagem tem o objetivo de aumentar ou reduzir a temperatura do ar que entra em contato com as partículas atomizadas, fornecendo calor latente e promovendo valores de bulbo úmido ao redor da gotícula. Este parâmetro é controlado pelo dispersor de ar através de um ventilador / exaustor, com sua temperatura variando de acordo com o queimador que fornece energia direta ou indireta (Piñón-Balderrama et al., 2020).

A temperatura de entrada é associada a capacidade evaporativa do secador, assim como sua eficiência térmica. Dessa forma, com o incremento deste parâmetro há um maior rendimento no processo, contudo, há maior perda de compostos voláteis. Já com a redução da temperatura de entrada,

há o decréscimo na eficiência e uma maior preservação de compostos voláteis (Lechanteur & Evrard, 2020).

A temperatura de saída é inferior a temperatura de entrada, sendo composta pela umidade adquirida ao longo do processo de evaporação das partículas. Este parâmetro pode ser controlado através da modificação de algumas variáveis, como a temperatura de entrada, vazão do ar que entra na câmara de secagem, taxa de alimentação da solução (vazão da bomba) e concentração do produto (Piñón-Balderrama et al., 2020).

Para controlar a umidade do produto, a temperatura de saída deve ser modificada. Mantendo a temperatura de entrada constante e aumentando a taxa de alimentação da solução (variáveis manipuladas), potencializa-se a taxa de evaporação das partículas no início do processo, o que promove uma maior dispersão de umidade e consequente redução da temperatura de saída (variável controlada). Dessa forma, as partículas são coletadas com um maior teor de umidade, uma vez que permanecem menos tempo sob elevada temperatura. Caso o oposto seja feito, mantendo-se a temperatura de entrada constante e reduzindo-se a taxa de alimentação da solução, atenua-se a taxa de evaporação, eleva-se a temperatura de saída, o que reduz a umidade da partícula (Tontul & Topuz, 2017).

3.9 Rotação do Disco ou Pressão do Bico

O controle da rotação do disco ou pressão do bico, a depender do *design* do *spray dryer*, tem o objetivo de controlar a dimensão da partícula. Com o aumento da rotação do disco ou pressão do bico, as partículas tendem a ficar menores, o que acelera a remoção de água e reduz a umidade da gotícula. Por conta disso, há a tendência de ocorrer a redução de densidade, o que promove maiores perdas na etapa de separação do ciclone (Villegas Santiago et al., 2020).

Com a redução da rotação do disco ou pressão do bico, o tamanho das partículas tende a aumentar, o que promove o aumento da densidade e menor perda na etapa de separação do ciclone. Contudo, há o aumento da umidade, a qual deve ser controlada junto da temperatura de saída para não haver erros tecnológicos como o *Caking* (Villegas Santiago et al., 2020).

3.10 Taxa de Alimentação da Solução

Por meio do controle da taxa de alimentação da solução no interior da câmara (vazão da bomba), é possível manipular a variação da temperatura de saída. Dessa forma, com o aumento da vazão da bomba, há a redução da temperatura de saída e consequente aumento de umidade do produto, além de promover o aumento do tamanho da partícula. Este incremento na dimensão da gotícula reduz a taxa de evaporação em contato com o ar quente, potencializando o acúmulo de material nas paredes internas do equipamento e reduzindo a eficiência do processo (Verma & Singh, 2015).

3.11 Umidade do Ar

O controle da umidade do ar de aquecimento do *spray dryer* tem o objetivo de aumentar a eficiência do processo e reduzir custos energéticos (Verma & Singh, 2015).

Para secar uma solução por meio de um ar de aquecimento com alta carga de umidade, é necessário utilizar de um elevado fluxo de ar na entrada, junto a uma baixa vazão da bomba de alimentação do produto. Desse modo, há um maior tempo de exposição das partículas ao ar de aquecimento, permitindo assim a remoção correta da umidade. Contudo, este cenário não é vantajoso, uma vez que o consumo de energia e tempo do processo são aumentados (Santos et al., 2018).

A fim de minimizar o gasto energético e maximizar a eficiência do processo, controlar a umidade do ar de entrada é fundamental, uma vez que é aumentado o gradiente de umidade. Com isso, é possível trabalhar com menores temperaturas e manter o fluxo de alimentação da solução constante (Jedlińska et al., 2019).

3.12 Concentração de Sólidos da Solução

O controle da concentração de sólidos na solução está relacionado com a eficiência do processo, uma vez que o alto teor de sólidos, superior a 40% de concentração, minimiza a necessidade de remoção de grandes quantidades de solvente, além de aumentar a densidade da partícula, o que minimiza sua perda durante a secagem e aumenta o rendimento do envase. Portanto, o baixo teor de sólidos, além de não otimizar o custo energético do processo, pode afetar o rendimento com elevada perda de partículas (Mohammed et al., 2020).

3.13 Viscosidade da Solução

O controle da viscosidade é considerado durante a formulação da solução, pois pode afetar o surgimento de partículas esféricas durante o processo de atomização. Elevada viscosidade dificulta a formação adequada de gotas nas dimensões corretas, o que pode promover o surgimento de partículas maiores com alta concentração de umidade e adesão às paredes internas do equipamento. Sendo assim, deve-se trabalhar com o tipo de agente encapsulante e sua concentração, sendo este diretamente proporcional a viscosidade. Soluções com baixa viscosidade otimizam o processo por meio do menor gasto energético de secagem, pressão para a atomização e rendimento (Alpizar-Reyes et al., 2018).

3.14 Temperatura de Transição Vítrea

Para um alimento desidratado ser considerado estável, deve apresentar baixa umidade e temperatura de transição vítrea (T_g) acima da temperatura de armazenamento. A temperatura de transição vítrea é caracterizada pela mudança de um estado vítreo, na qual as moléculas da matriz amorfa não possuem mobilidade devido à alta viscosidade, para um estado gomoso, adquirindo mobilidade sem modificação estrutural (Shrestha et al., 2007).

Se houver um aumento significativo da umidade, ocorrerá a redução da temperatura de transição vítrea, podendo atingir um valor próximo da temperatura ambiente, sendo este o valor máximo em que o produto armazenado não irá sofrer alterações. Todavia, caso a T_g atinja um valor igual ou inferior a temperatura ambiente, a matriz amorfa se tornará suscetível a alterações indesejáveis como *Stickness*, *Caking* e cristalização (Zotarelli, 2014).

A matriz amorfa do extrato seco pode apresentar características de material vítreo (alta viscosidade e estrutura imobilizada) ou gomosa (baixa viscosidade e estrutura móvel). Ao atingir a temperatura de transição vítrea, a matriz sai do estado vítreo e passa para o estado gomoso, promovendo assim o aumento da pegajosidade (*Stickness*) entre as partículas (Silalai & Roos, 2011).

Durante o processo de secagem, o produto aspergido na câmara encontra-se em estado líquido ou gomoso. Conforme ocorre a remoção da água (agente plastificante), o líquido é convertido para o estado vítreo. Contudo, caso a temperatura do processo esteja 10°C acima da T_g , as matrizes amorfas das partículas tendem a tornar as gotículas macias e com superfícies pegajosas, formando assim um produto pastoso ao invés de um pó. Sendo assim, devido a uma eventual temperatura baixa de transição vítrea, gera-se problemas como o *Stickness* (Juliano & Barbosa-Cánovas, 2010).

Com o objetivo de reduzir os problemas de *Stickness* (perda de qualidade do produto devido a adesão a câmara e alterações sensoriais; redução da eficiência do processo pela perda do produto aderido), pode-se adicionar agentes encapsulantes de alto peso molecular durante a etapa de formulação da solução, o que promove o aumento da temperatura de transição vítrea. Além disso, deve-se garantir a baixa temperatura da T_g ao longo da cadeia, otimização do fluxo de ar de aquecimento, rápido resfriamento e baixa umidade nas correntes de ar (Palzer, 2005).

O empedramento do produto (*Caking*) pode ocorrer durante o armazenamento ao longo do tempo, quando submetido a temperatura, pressão e umidade. Mesmo apresentando características vítreas e sofrendo baixa pressão por compactação, o tempo de contato entre as partículas é suficiente para o desenvolvimento de forças de adesão significativas (Fitzpatrick et al., 2010).

Os fatores que podem levar ao *Caking* são as atrações eletrostáticas entre as partículas, temperatura, ganho de umidade na superfície e recristalização por fusão de cristais de açúcares, o que está atrelado às condições de processamento, manuseio, tempo de estocagem e distribuição ao consumidor final (Muzaffar et al., 2015).

Para pós alimentícios o *caking* por umidade (*humidity caking*) é o termo mais comum para o fenômeno (Barbosa-Cánovas et al., 2005). Inicialmente, têm-se a etapa de *bridging*, na qual uma adesão entre as partículas ocorre pela deformação nas superfícies e aderência em pontos de contato (Aguilera et al., 1995), sendo que, para partículas na ordem de 10 µm ou menos as forças de *van der Waals* e eletrostáticas promovem a adesão sem que haja pontes materiais (Adhikari et al., 2001). A aglomeração é o estágio seguinte, o sistema apresenta alta porosidade e as pontes formadas são consolidadas de modo irreversível, com a formação de aglomerados (Aguilera et al., 1995). Seguindo para a compactação, os espaços entre as partículas diminuem e a pressão sobre o sistema deforma os grumos, espessando as pontes formadas (Barbosa-Cánovas et al., 2005). No estágio final de liquefação, o alto teor de umidade leva ao desaparecimento das pontes, sendo que nesse momento moléculas de baixo peso molecular podem ser solubilizadas e o aspecto higroscópico é observado no produto (Aguilera et al., 1995; Barbosa-Cánovas et al., 2005).

3.15 Agentes Encapsulantes

Os agentes encapsulantes, também chamados de *Carriers*, possuem funções tecnológicas nos produtos secos por *spray dryer*, como proteger o núcleo contendo os compostos de interesse; auxiliar na morfologia da partícula, gerando gotículas esféricas; aumentar a temperatura de transição vítrea das partículas, reduzindo a viscosidade e adesividade da gotícula nas paredes internas do equipamento; reduzir a tendência de *Caking* do extrato seco durante o armazenamento; produzir um extrato mais estável (Santamaria-Echart et al., 2021).

As principais características desejáveis de um agente encapsulante é apresentar alto grau de solubilidade, baixa viscosidade na presença de soluções com alto teor de sólido (35% a 50%), boas propriedades de emulsificação, baixa higroscopicidade, sabor suave, não reativo e de baixo custo. Os agentes encapsulantes mais utilizados são os que apresentam alto peso molecular, como os maltodextrinas, amidos e gomas (Costa et al., 2015).

3.16 Estudos de Caso

Islam Shishir et al. (2016) tiveram como objetivo produzir extrato seco a partir de suco de goiaba concentrado com alto teor de licopeno, baixa umidade e pequeno tamanho de partículas. Utilizaram maltodextrina DE 10 como agente encapsulante, em concentrações entre 10% e 20%, temperatura de entrada de 150°C a 170 °C, vazão do ar de 47m³/h ± 2m³/h e vazão de alimentação entre 350mL/h e 500 mL/h.

Os autores observaram que quanto menor a temperatura de entrada, teor de sólidos da solução e taxa de alimentação da bomba, menor é o tamanho da partícula do produto. Sendo assim, o inverso também foi constatado.

Além disso, com o aumento da temperatura de entrada e teor de sólidos, menor foi a umidade do produto e houve o aumento do tamanho da partícula. Sendo que, o teor de licopeno caiu com tais variações. Já o incremento na vazão da bomba de alimentação promoveu o aumento da umidade do produto, assim como um maior tamanho de partículas (Islam Shishir et al., 2016).

Os autores concluíram que a obtenção de extrato seco de goiaba com maior teor de licopeno, baixa umidade e pequeno tamanho de partícula foi possível quando o equipamento foi operado com baixa temperatura de entrada, baixa vazão da bomba e médio teor de sólidos (Islam Shishir et al., 2016).

Bazaria e Kumar (2018) visaram otimizar os parâmetros de secagem para maximizar os rendimentos do processo e preservar as características organolépticas de concentrado de beterraba. Avaliaram os impactos utilizando maltodextrina DE 10 como agente encapsulante, em concentrações de

5% a 15%, temperatura de entrada de 160°C a 180 °C e vazão de alimentação entre 400mL/h e 600 mL/h.

Os autores observaram que para maximizar o rendimento do processo, foi preciso trabalhar com valores próximos aos limites máximos de teor de sólidos e temperatura de entrada. Isso foi justificado devido a maior eficiência de troca térmica do ar de secagem com a partícula, garantindo assim uma maior transferência de massa para o meio (umidade). Com o aumento da taxa de alimentação, foi constatado que houve o aumento da higroscopicidade do produto, sendo justificado pelo menor tempo de contato da partícula com o ar de aquecimento e decréscimo da remoção de umidade. (Bazaria & Kumar, 2018).

A retenção da coloração do produto foi alta no começo do processo, porém decaiu conforme a temperatura de entrada foi aumentada. Isso se justifica por conta da degradação do pigmento devido a exposição em altas temperaturas. Já com o aumento do teor de sólidos, houve maior preservação da pigmentação, justificado pela maior formação de crosta ao redor das partículas, minimizando assim a degradação térmica (Bazaria & Kumar, 2018).

Por fim, os autores concluíram que para otimizar o processo e preservar as características organolépticas do produto, foi preciso trabalhar com alto teor de sólidos, baixa vazão na bomba de alimentação e baixa temperatura de entrada (Bazaria & Kumar, 2018).

Muzaffar et al. (2015) buscaram otimizar os parâmetros de secagem para maximizar o rendimento na secagem de suco concentrado de tamarindo, avaliando também a qualidade do material obtido com base na umidade, higroscopicidade e solubilidade. Utilizaram proteína isolada de soja como agente encapsulante, em concentrações entre 15% e 25%, temperatura de entrada de 150°C a 170 °C e vazão de alimentação entre 400mL/h e 600 mL/h.

Os autores observaram que o aumento da temperatura de entrada resultou em maior rendimento, menor umidade do produto e maior eficiência na transferência de calor e massa, devido ao maior gradiente térmico entre a solução atomizada e o ar aquecido, o que intensifica a evaporação da água. O aumento da vazão da bomba, por sua vez, reduziu o rendimento e aumentou a umidade do produto, uma vez que o menor tempo de contato entre as partículas e o ar quente compromete a transferência de energia e a eficiência da secagem (Muzaffar et al., 2015).

Com o aumento do teor de sólidos, observou-se a elevação no rendimento e redução da higroscopicidade e da umidade das partículas. Isso se deve à formação de uma camada vítrea ao redor das partículas, que reduz a umidade superficial e a coalescência na câmara de secagem. No entanto, o aumento da viscosidade da solução favorece a aderência de partículas às paredes da câmara. Concluiu-se que, para otimizar a secagem do suco de tamarindo, os melhores resultados são obtidos com alto teor de sólidos, alta temperatura de entrada e baixa vazão de alimentação (Muzaffar et al., 2015).

4. Conclusão

As variações dos parâmetros de secagem e formulações dos produtos, devem ser constantemente correlacionados a fim de assegurar a qualidade e otimizar o rendimento.

A temperatura de entrada está correlacionada com a temperatura de saída, além de afetar a umidade das partículas, coalescência e rendimento. Já a temperatura de saída está correlacionada com o tempo de exposição da partícula a temperaturas de bulbo seco, uma vez que grande parte da umidade já foi removida próxima à exaustão do equipamento.

O aumento da vazão da bomba de alimentação está correlacionado com o tempo de contato da partícula com o meio de aquecimento, umidade e rendimento. A variação na pressão do bico ou na rotação do disco, com o tamanho das partículas, o que promove a variação na umidade do produto e potencial adesão na câmara de secagem.

Parâmetros como viscosidade, teor de sólidos, insumos e agentes encapsulantes utilizados na formulação, ativos de interesse, características físico-químicas e organolépticas desejáveis, são os pontos que norteiam as parametrizações de cada variável. Além disso, o *design* do equipamento e o *layout* de periféricos também conferem variabilidade ao processo, performando diferente em um *spray*

dryer a bico e a disco, com um ciclone de separação ou com dois, com desumidificador para a entrada do ar ou sem etc.

Sendo assim, há diversos parâmetros e características de interesse que devem ser estabelecidas e estudadas em cada processo de secagem e encapsulação via *spray dryer*, assegurando assim a qualidade e estabilidade ao longo do armazenamento e entrega ao consumidor.

Referências

Adhikari, B., Howes, T., Bhandari, B., & Truong, V. (2001). Stickiness in foods: a review of mechanisms and test methods. *International Journal of Food Properties*, 4(1), 1-33.

Aguilera, J., del Valle, J., & Karel, M. (1995). Caking phenomena in amorphous food powders. *Trends in Food Science & Technology*, 6(5), 149-155.

Ali, M., Mahmud, T., Heggs, P. J., Ghadiri, M., Bayly, A., Ahmadian, H., & Martin de Juan, L. (2017). CFD modeling of a pilot-scale countercurrent spray drying tower for the manufacture of detergent powder. *Drying Technology*, 35(3), 281-299. <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1163576>

Alpizar-Reyes, E., Román-Guerrero, A., Gallardo-Rivera, R., Varela-Guerrero, V., Cruz-Olivares, J., & Perez-Alonso, C. (2018). Rheological properties of tamarind (*Tamarindus indica* L.) seed mucilage obtained by spray-drying as a novel source of hydrocolloid. *International Journal of Biological Macromolecules*, 107, 817-824. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.09.048>

Anandharamakrishnan, C., & Ishwarya, S. P. (2015). *Spray drying techniques for food ingredient encapsulation*. John Wiley & Sons.

Barbosa-Cánovas, G. V., Ortega-Rivas, E., Juliano, P., & Yan, H. (2005). *Food powders: physical properties, processing, and functionality*. Springer.

Bazaria, B., & Kumar, P. (2018). Optimization of spray drying parameters for beetroot juice powder using response surface methodology (RSM). *Journal of the Saudi society of agricultural sciences*, 17(4), 408-415. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.09.007>

Both, E., Boom, R., & Schutyser, M. (2020). Particle morphology and powder properties during spray drying of maltodextrin and whey protein mixtures. *Powder Technology*, 363, 519-524.

Coimbra, P. P. S. (2020). *Extração hidroalcoólica, extração assistida por ultrassom e encapsulamento de bioativos de resíduos vegetais* Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro]. RJ.

Costa, S. S., Machado, B. A. S., Martin, A. R., Bagnara, F., Ragadalli, S. A., & Alves, A. R. C. (2015). Drying by spray drying in the food industry: Micro-encapsulation, process parameters and main carriers used. *African Journal of Food Science*, 9(9), 462-470. <https://doi.org/10.5897/AJFS2015.1279>

Fitzpatrick, J., Descamps, N., O'meara, K., Jones, C., Walsh, D., & Spitere, M. (2010). Comparing the caking behaviours of skim milk powder, amorphous maltodextrin and crystalline common salt. *Powder Technology*, 204(1), 131-137. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.07.029>

Griesang, J. I., Rosso, A. C., Kuzniewski, F. C., Bertoldo, V. C., dos Santos Oliveira, M., & Severo, J. (2019). Microencapsulação de compostos bioativos em alimentos. *Boletim Técnico-Científico*, 5(2). <https://doi.org/10.26669/2359-2664.2019.227>

Islam Shishir, M. R., Taip, F. S., Aziz, N. A., Talib, R. A., & Hossain Sarker, M. S. (2016). Optimization of spray drying parameters for pink guava powder using RSM. *Food science and biotechnology*, 25(2), 461-468. <https://doi.org/10.1007/s10068-016-0064-0>

Jedlińska, A., Samborska, K., Wieczorek, A., Wiktor, A., Ostrowska-Ligeza, E., Jamróz, W., Skwarczyńska-Maj, K., Kielczewski, D., Błazowski, Ł., & Tułodziecki, M. (2019). The application of dehumidified air in rapeseed and honeydew honey spray drying-Process performance and powders properties considerations. *Journal of Food Engineering*, 245, 80-87. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.10.017>

- Juliano, P., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2010). Food powders flowability characterization: theory, methods, and applications. *Annual review of food science and technology*, 1(1), 211-239. <https://doi.org/10.1146/annurev.food.102308.124155>
- Keshani, S., Daud, W. R. W., Nourouzi, M., Namvar, F., & Ghasemi, M. (2015). Spray drying: An overview on wall deposition, process and modeling. *Journal of Food Engineering*, 146, 152-162. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.09.004>
- Lechanteur, A., & Evrard, B. (2020). Influence of composition and spray-drying process parameters on carrier-free DPI properties and behaviors in the lung: A review. *Pharmaceutics*, 12(1), 55. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12010055>
- Lintingre, E., Lequeux, F., Talini, L., & Tsapis, N. (2016). Control of particle morphology in the spray drying of colloidal suspensions. *Soft Matter*, 12(36), 7435-7444. <https://doi.org/10.1039/C6SM01314G>
- Lisboa, H. M., Duarte, M. E., & Cavalcanti-Mata, M. E. (2018). Modeling of food drying processes in industrial spray dryers. *Food and Bioproducts Processing*, 107, 49-60. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.09.006>
- Mohammed, N. K., Tan, C. P., Manap, Y. A., Muhialdin, B. J., & Hussin, A. S. M. (2020). Spray drying for the encapsulation of oils—A review. *Molecules*, 25(17), 3873. <https://doi.org/10.3390/molecules25173873>
- Moser, P., Telis, V. R. N., de Andrade Neves, N., García-Romero, E., Gómez-Alonso, S., & Hermosín-Gutiérrez, I. (2017). Storage stability of phenolic compounds in powdered BRS Violeta grape juice microencapsulated with protein and maltodextrin blends. *Food chemistry*, 214, 308-318. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.081>
- Mudalip, S. A., Khatiman, M., Hashim, N., Man, R. C., & Arshad, Z. (2021). A short review on encapsulation of bioactive compounds using different drying techniques. *Materials Today: Proceedings*, 42, 288-296.
- Mujumdar, A. S. (2014). Handbook of Industrial Drying.
- Muzaffar, K., Nayik, G. A., & Kumar, P. (2015). Stickiness problem associated with spray drying of sugar and acid rich foods: a mini review. *Journal of Nutrition & Food Sciences*(S12), 1. <https://doi.org/10.4172/2155-9600.1000S12003>
- Palzer, S. (2005). The effect of glass transition on the desired and undesired agglomeration of amorphous food powders. *Chemical Engineering Science*, 60(14), 3959-3968. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2005.02.015>
- Pignatello, R., & Musumeci, T. (2018). *Biomaterials: Physics and Chemistry-New Edition*. BoD—Books on Demand.
- Piñón-Balderrama, C. I., Leyva-Porras, C., Terán-Figueroa, Y., Espinosa-Solís, V., Álvarez-Salas, C., & Saavedra-Leos, M. Z. (2020). Encapsulation of active ingredients in food industry by spray-drying and nano spray-drying technologies. *Processes*, 8(8), 889. <https://doi.org/10.3390/pr8080889>
- Poozesh, S., & Bilgili, E. (2019). Scale-up of pharmaceutical spray drying using scale-up rules: A review. *International Journal of Pharmaceutics*, 562, 271-292. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2019.03.047>
- Rezvankhah, A., Emam-Djomeh, Z., & Askari, G. (2020). Encapsulation and delivery of bioactive compounds using spray and freeze-drying techniques: A review. *Drying Technology*, 38(1-2), 235-258.
- Rosa, E., Tsukada, M., & Freitas, L. (2006). Secagem por atomização na indústria alimentícia: fundamentos e aplicações. *Jornada Científica da Fazu/Faculdades Associadas de Uberaba*, 5.
- Santamaria-Echart, A., Fernandes, I. P., Silva, S. C., Rezende, S. C., Colucci, G., Dias, M. M., & Barreiro, M. F. (2021). New trends in natural emulsifiers and emulsion technology for the food industry. In *Natural food additives*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99892>
- Santos, D., Maurício, A. C., Sencadas, V., Santos, J. D., Fernandes, M. H., & Gomes, P. S. (2018). Spray drying: an overview. *Biomaterials-physics and chemistry-new edition*, 9-35.
- Selvamuthukumar, M., Tranchant, C., & Shi, J. (2019). *Spraying Drying Concept, Application and Its Recent Advances in Food Processing*.

- Shrestha, A. K., Ua-Arak, T., Adhikari, B. P., Howes, T., & Bhandari, B. R. (2007). Glass transition behavior of spray dried orange juice powder measured by differential scanning calorimetry (DSC) and thermal mechanical compression test (TMCT). *International Journal of Food Properties*, 10(3), 661-673. <https://doi.org/10.1080/10942910601109218>
- Silalai, N., & Roos, Y. H. (2011). Mechanical α -relaxations and stickiness of milk solids/maltodextrin systems around glass transition. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(14), 2529-2536. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4379>
- Silva, T. M. d., Rodrigues, L. Z., Nunes, G. L., Codevilla, C. F., Silva, C. B. d., & Menezes, C. R. d. (2015). Encapsulação de compostos bioativos por coacervação complexa. *Ciência e Natura*, 37(5), 56-64. <https://doi.org/10.5902/2179460X19715>
- Tolve, R., Galgano, F., Caruso, M. C., Tchuénbou-Magaia, F. L., Condelli, N., Favati, F., & Zhang, Z. (2016). Encapsulation of health-promoting ingredients: applications in foodstuffs. *International journal of food sciences and nutrition*, 67(8), 888-918. <https://doi.org/10.1080/09637486.2016.1205552>
- Tontul, I., & Topuz, A. (2017). Spray-drying of fruit and vegetable juices: Effect of drying conditions on the product yield and physical properties. *Trends in Food Science & Technology*, 63, 91-102. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.03.009>
- Verma, A., & Singh, S. V. (2015). Spray drying of fruit and vegetable juices—a review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 55(5), 701-719. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.672939>
- Villegas Santiago, J., Gómez Navarro, F., Domínguez Niño, A., García Alvarado, M. A., Salgado Cervantes, M. A., & Luna Solano, G. (2020). Effect of spray-drying conditions on moisture content and particle size of coffee extract in a prototype dryer. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Proc767>
- Wawrzyniak, P., Jaskulski, M., Piatkowski, M., Sobulska, M., Zbicinski, I., & Egan, S. (2020). Experimental detergent drying analysis in a counter-current spray dryer with swirling air flow. *Drying Technology*. <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1626878>
- Woo, M. W., Lee, M. G., Shakiba, S., & Mansouri, S. (2017). Controlling in situ crystallization of pharmaceutical particles within the spray dryer. *Expert opinion on drug delivery*, 14(11), 1315-1324. <https://doi.org/10.1080/17425247.2017.1269077>
- Zbicinski, I., Ciesielski, K., & Ge, B. (2022). Mechanism of particle agglomeration for single and multi-nozzle atomization in spray drying: A review. *Processes*, 10(4), 727. <https://doi.org/10.3390/pr10040727>
- Zotarelli, M. F. (2014). *Produção e caracterização de manga desidratada em pó por diferentes processos de secagem* Universidade Federal de Santa Catarina]. SC.