

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO  
INSTITUTO DE QUÍMICA DE ARARAQUARA**

**Gabriel Garcia Mazzon**

**Trabalho de Conclusão de Curso  
Aplicações do Spray Dryer: Uma Revisão**

**ARARAQUARA**

**2024**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO  
INSTITUTO DE QUÍMICA DE ARARAQUARA**

**Gabriel Garcia Mazzon**

**Trabalho de Conclusão de Curso  
Aplicações do Spray Dryer: Uma Revisão**

**Trabalho de conclusão de curso  
apresentado à Universidade Estadual  
Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como  
parte dos requisitos para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Química.**

**Prof. Orientador: Prof. Dr. Arnaldo Sarti**

**ARARAQUARA**

**2024**

M478a	Mazzon, Gabriel Garcia Aplicações do spray dryer : uma revisão / Gabriel Garcia Mazzon. -- Araraquara, 2024 53 f. : il.  Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Química) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Química, Araraquara Orientador: Arnaldo Sarti  1. Equipamento de secagem. 2. Engenharia química - Equipamento e acessórios. 3. Alimentos - Indústria. 4. Tecnologia farmacêutica. 5. Corantes. I. Título.
-------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da  
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Química, Araraquara. Dados  
fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**Gabriel Garcia Mazzon**

**Aplicações do Spray Dryer: Uma Revisão**

**Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.**

**Araraquara, 1 de julho de 2024.**

**Banca Examinadora**

---

**Prof. Dr. Arnaldo Sarti**



## RESUMO

O *Spray Drying* é uma técnica amplamente utilizada na indústria em geral para a secagem de uma solução líquida a fim de obter partículas secas. O processo consiste na atomização de uma suspensão em uma corrente de ar quente, resultando na rápida evaporação do solvente e na formação de partículas secas. Haja vista que o processo oferece uma produção a baixo custo financeiro e de forma contínua, diferentes áreas da indústria, especialmente a alimentícia e a farmacêutica, vêm cada vez mais utilizando esse processo para a elaboração de novos produtos.

Foi realizado neste trabalho, uma revisão bibliográfica sobre a operação de secagem, na qual será destacada a abrangência do processo e sua presença nos diversos segmentos da indústria química, detalhada as operações unitárias e, por fim, apresentando os principais fatores que afetam o processo de secagem por *Spray Drying*. Posteriormente, serão abordados o estado da arte, em termos de pesquisa e inovação, do processo de *Spray Drying* nas indústrias alimentícia e farmacêutica. Serão discutidas suas idealizações, concepções, importância e ampla gama de aplicações. A seguir serão observadas as principais conclusões acerca dos avanços em pesquisa e desenvolvimento nas áreas da indústria supracitadas.

Palavras-chave: *Spray Drying*, Indústria Química, Indústria Farmacêutica, Vacinas em Pó, Indústria Alimentícia, Microencapsulação.

## **ABSTRACT**

Spray Drying is a widely used technique in the industry for drying a liquid solution to obtain dry particles. The process involves atomizing a suspension into a stream of hot air, resulting in rapid solvent evaporation and the formation of dry particles. Given that the process offers low-cost production and continuous operation, various industries, especially the food and pharmaceutical sectors, are increasingly employing this procedure for developing new products.

In this work, a literature review was conducted on the drying operation, highlighting the scope of the process and its presence in various segments of the chemical industry, detailing the unit operations, and finally presenting the main factors affecting the spray drying process. Subsequently, the state of the art in terms of research and innovation in the spray drying process in the food and pharmaceutical industries will be addressed. Its conceptualizations, designs, importance, and wide range of applications will be discussed. Following this, the main conclusions regarding advances in research and development in the industry sectors will be examined.

**Keywords:** Spray Drying, Chemical Industry, Pharmaceutical Industry, Powder Vaccines, Food Industry, Microencapsulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama esquemático do processo de <i>Spray Drying</i>	19
Figura 2 – <i>Spray-dryer</i> em escala laboratorial	19
Figura 3 – Tipos de atomizadores.	21
Figura 4 – Tipos de configuração de corrente no <i>Spray-dryer</i> .	23
Figura 5 – Processo de encapsulação de um agente ativo	37



## SUMÁRIO

1	Introdução	13
1.1	Contextualização Histórica e Atual	13
1.2	Objetivos	15
2	Revisão Bibliográfica	17
2.1	Contextualização	17
2.2	Etapas do Processo de Spray Drying	19
2.2.1	Atomização	20
2.2.2	Ar quente	21
2.2.3	Secagem	23
2.2.4	Separação	25
2.3	Fatores que Afetam o Processo de Spray Drying	26
2.3.1	Efeito da Taxa de Alimentação	26
2.3.2	Pressão de Atomização	27
2.3.3	Efeito dos Sólidos na Alimentação	27
2.3.4	Efeito da Temperatura de Alimentação de Produto	27
2.3.5	Viscosidade e Densidade da Alimentação de Produto	27
2.3.6	Efeito da Tensão Superficial no Produto Alimentado	28
2.3.7	Efeito da Temperatura de Secagem na Entrada	28
2.3.8	Efeito da Velocidade de Contato entre Spray e Ar	29
2.3.9	Efeito da Temperatura de Secagem na Saída	29
2.3.10	Tempo de Residência na Câmara de Secagem	29
2.3.11	Formação de Partículas Ocas	29
2.4	Considerações Finais	30
3	Aplicações do Spray Drying	33
3.1	Produção na Indústria Tradicional	33
3.2	Indústria de Alimentos: Encapsulação de Aromas, Sabores e Corantes	35
3.3	Indústria Farmacêutica: Desenvolvimento de Vacinas Secas	42
4	Conclusão	47
5	Referências	49



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização Histórica e Atual

Em 1872, Samuel Percy conduziu experimentos de secagem de soluções de dextrina, amido e gelatina, na qual alegou que o método empregado permitia obter pós com redução de mudanças químicas e redução do teor de umidade. Essa foi a primeira menção ao processo de *Spray Drying*. Percy desenvolveu uma patente nos Estados Unidos, e nela descreveu a técnica de *Spray Drying* sendo um processo que envolve a exposição de partículas atomizadas a uma corrente de ar ou outros gases (PERCY, 1872).

Apesar do primeiro registro ocorrer no século XIX, a aplicação industrial foi observada pela primeira vez no século XX. Robert Stauf, em 1901, inventou o bico de pulverização que serviu de base para os bicos de pressão utilizados atualmente para o processo de atomização e teve grande importância para a preservação de sangue, leite e outros líquidos. Merrell-Soule adquiriu a descoberta de Stauf e a melhorou com o uso no processo de secagem por pulverização do leite em pó, permitindo a extração de mais de 98% da umidade do leite líquido. Soule enfatizava que seu leite em pó era idealmente preservado, solúvel, que oferecia um ambiente desfavorável para a proliferação de bactérias e livre de sabor forte notável. Os produtos e patentes da Merrill-Soule foram dominantes no mercado até a década de 1920 (MERRELL-SOULE COMPANY, 1919).

O grande avanço na tecnologia de secadores por *spray* ocorreu após a Segunda Guerra Mundial devido à necessidade da redução do peso e do volume de alimentos e outros materiais para transporte, do prolongamento da validade de alimentos e da facilidade e praticidade de alimentação para os soldados. Os principais avanços na técnica de *Spray Drying* ocorreram devido ao excesso de produção de leite e à demanda da indústria de laticínios, visto que o leite apresenta uma alta capacidade nutricional. Além disso, o equipamento utilizado, denominado *spray-dryer* foi utilizado para produção de outros alimentos em pó, como ovos, sopas, sucos. Não somente alimentos foram produzidos em pó, mas também medicamentos e produtos farmacêuticos, especialmente antibióticos e vitaminas, muito utilizados para o tratamento de soldados feridos (SAMBORSKA et al, 2022).

Atualmente, o *spray-dryer* é amplamente aplicado em três principais áreas da indústria. Na indústria alimentícia, com a produção de leite em pó, café, chá, ovos, cereais, especiarias, aromatizantes, sangue, amido e derivados de amido, vitaminas, enzimas, estévia, nutracêuticos, corantes, ração animal, etc. Na indústria farmacêutica, com a produção de antibióticos, ingredientes médicos e aditivos. Na indústria química, com a produção de

pigmentos de tintas, materiais cerâmicos, suportes de catalisadores e microalgas (ÇELIK et al, 2021).

Além disso, a técnica de *Spray Drying* também se destaca pela presença na concepção de produtos tecnológicos. O estado da arte da pesquisa se encontra em diversas frentes nos diversos ramos da indústria, especialmente na indústria alimentícia com a produção de alimentos microencapsulados e na indústria farmacêutica com a produção de vacinas secas.

A produção de microcápsulas, atualmente, é de grande importância na indústria alimentícia. Estas unidades são pequenas partículas encapsuladas que contêm ingredientes ativos, como aromas, cores, nutrientes, conservantes ou outros aditivos alimentares. Elas protegem ingredientes sensíveis, permitem controle de liberação e melhoram a estabilidade de produtos. A fim de suprir uma necessidade de melhora na dieta da população, os alimentos beneficiados com vitaminas e outros ingredientes ativos estão cada vez mais presentes. Por fim, a produção de microcápsulas para adição de sabor ou aromas oferece maiores possibilidades na elaboração de alimentos para a culinária, bem como a adição de conservantes oferece alternativas para o prolongamento da vida útil dos alimentos.

Como nova aplicação as vacinas tradicionais na indústria farmacêutica, por requisitarem uma infraestrutura complexa e custosa para o armazenamento e para sua logística a frio, apresentam uma alta taxa de descarte e muitos países subdesenvolvidos possuem seu acesso restrito. A fim de ganhar escalabilidade na produção e reduzir custo, a concepção de vacinas secas via *Spray Drying*, se mostram uma alternativa significativamente viável, e não só trazem esses benefícios, mas também adicionam uma maior adaptabilidade na elaboração de vacinas e uma maior gama de vias para administração.

Estas novas perspectivas de aplicação da secagem por *spray-dryer* fomentaram a realização dessa revisão bibliográfica desde a concepção até seus usos atuais com novas abordagens para geração de novos produtos.

## 1.2 Objetivos

O trabalho tem como objetivo principal apresentar o estado da arte da utilização do processo de *Spray Drying* nas indústrias alimentícia e farmacêutica, bem como seu fundamento, sua importância e sua utilização ou potencial de utilização na sociedade.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Contextualização

O processo de secagem por pulverização (*Spray Drying*) é uma técnica de transformação de uma corrente de alimentação líquida em partículas secas por meio de sua pulverização em um meio de secagem quente. Esse processo é continuamente realizado em uma única etapa e pode ser aplicado a diversas matérias-primas, como soluções, suspensões ou pastas. O resultado é a obtenção de produtos secos na forma de pós, grânulos ou aglomerados, dependendo das propriedades químicas e físicas da alimentação, bem como das características do secador utilizado e das características da corrente de secagem (MASTERS, 1979).

O processo de *Spray Drying* é um procedimento amplamente adotado em várias indústrias, uma vez que é capaz de produzir produtos secos que atendem a diferentes especificações e requisitos de processamento subsequente ou uso direto pelo consumidor. Nas últimas décadas, intensas pesquisas e desenvolvimentos nessa área transformaram o uso de *spray-dryer* em um método altamente competitivo para a obtenção de uma ampla gama de produtos, se tornando assim, um processo indispensável em vários setores da indústria. Sua aplicabilidade se estendeu à diversas áreas da vida cotidiana, estabelecendo conexões com diversos produtos que usamos regularmente (MUJUMDAR, 2006).

Como mencionado, o processo de *Spray Drying* é adaptável para várias indústrias, e está presente desde a produção de alimentos duráveis e convenientes e produtos farmacêuticos de diversas complexidades e condições delicadas até a fabricação de produtos químicos leves e pesados. Na indústria alimentícia, produtos como leite e frutas em pó, café instantâneo, alimentos para bebês e sopas desidratadas são produzidos usando essa técnica. Nas indústrias têxtil e de papel, a secagem por pulverização contribui para a obtenção de corantes e adesivos.

Já na indústria eletrônica, ela desempenha um papel crucial na produção de dispositivos eletrônicos e componentes. Além disso, tintas, detergentes, cosméticos e revestimentos também são obtidos por meio desse processo. A secagem por pulverização está presente em nosso cotidiano de maneira que frequentemente passam despercebidas, como em alimentos, produtos de higiene pessoal e utensílios domésticos (MUJUMDAR, 2006).

Destaca-se que apesar da técnica parecer simples visto sua amplitude de utilização e alta adaptabilidade, ela é uma técnica que requer cuidado, atenção e expertise do operador. A indústria farmacêutica serve como exemplo enfático pois requer a manipulação cuidadosa de

variáveis como temperatura e pressão para garantir a integridade dos ingredientes ativos e controlar a estabilidade e eficácia dos medicamentos (HANSEN et al, 2015).

Há também variações mais fundamentais do processo tradicional, como a secagem por pulverização de baixa temperatura, cujo processo é responsável pela produção do café solúvel visto sua sensibilidade ao calor. Há também a secagem por pulverização de congelamento, cujo processo é responsável pela produção de frutas liofilizadas a fim de manter maior qualidade de textura e sabor. Por fim, a reação por pulverização, cujo processo é de extrema importância na produção de catalisadores altamente dispersos. Essas variações também possuem elevada importância ao permitirem a adaptação do processo a diferentes requisitos e tipos de produtos (FRASCARELI et al, 2012).

O método de *Spray Drying* pode ser resumido como um processo que envolve a atomização do líquido em pequenas gotículas, que são rapidamente expostas a um meio de secagem quente, resultando na evaporação da umidade das gotículas e na formação de partículas secas suspensas no ar de secagem. Os principais fatores a serem controlados, para a indústria ou na pesquisa para se obterem produtos com propriedades desejadas, são as condições de temperatura e umidade do ar de secagem. Esses fatores são essenciais para controlar a quantidade e qualidade da evaporação do solvente da corrente de entrada. Quando não controlados, eles podem gerar danos irreparáveis e irreversíveis para o produto e para o equipamento.

Seguem alguns exemplos de possíveis problemas que podem ocorrer em alguns dos processos industriais supramencionados (MASTERS, 1979).

- i) Temperaturas excessivas na produção de leite em pó podem causar a caramelização do açúcar, causando alterações no aroma, na coloração e no sabor.
- ii) Temperaturas mal controladas na produção de pesticidas podem causar sua aglomeração, resultando em uma distribuição desigual e diminuindo a eficiência na aplicação.
- iii) Instabilidade no controle de temperatura podem afetar a estabilidade de produtos farmacêuticos, como vacinas e remédios, afetando sua eficácia e principalmente sua segurança.

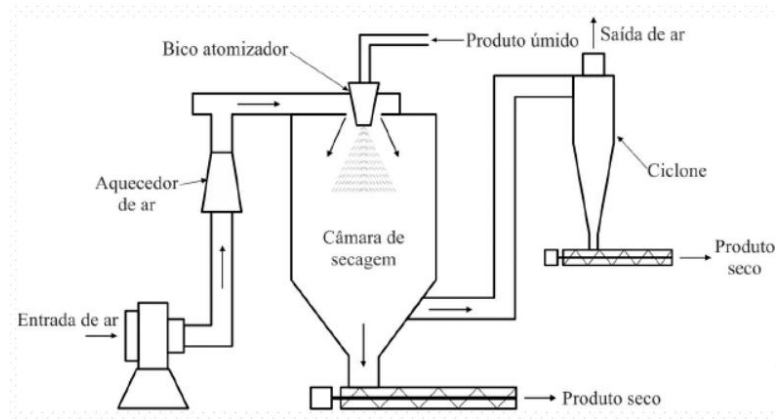
Em suma, o método de *Spray Drying* é um processo versátil e contínuo que desempenha um papel essencial em diversas indústrias, permitindo a produção de uma ampla variedade de produtos secos com propriedades específicas. Sua capacidade de se adaptar a diferentes materiais e atender a várias especificações tornou-a uma técnica amplamente adotada, com impacto direto em produtos que fazem parte de nossas vidas diárias. No entanto, sua implementação exige não apenas a infraestrutura adequada, mas também investimentos

substanciais em equipamentos de alta precisão, a fim de corroborar para um controle de qualidade assertivo, reduzindo perdas de matéria prima e atingindo especificações do produto.

## 2.2 Etapas do Processo de *Spray Drying*

O processo de *Spray Drying* consiste em quatro etapas: atomização, contato com ar quente ou de secagem, formação de partículas (secagem) e separação do produto seco do ar. Basicamente, uma fase líquida a ser secada, seja na forma de solução, suspensão, dispersão ou emulsão, é atomizada em uma câmara de secagem e entra em contato com uma corrente gasosa de gás quente. A fase líquida é então seca, produzindo materiais na forma de pó, e que posteriormente, passam por uma seguinte operação unitária de separação do ar quente com o produto desejado. A Figura 1 apresenta um diagrama esquemático da operação, bem como a Figura 2 mostra o *spray-dryer* de escala laboratorial (DE LA HABA et al, 2023).

**Figura 1 – Diagrama esquemático do processo de *Spray Drying***



Fonte: PETRI, 2019.

**Figura 2 – *Spray-dryer* em escala laboratorial**



Fonte: CHANGZHOU, 2024.

### 2.2.1 Atomização

O atomizador é um componente crucial no processo de secagem por *Spray Drying*, sendo responsável por transformar o material de alimentação líquido em pequenas gotículas, por controlar o tamanho das gotículas formadas e por garantir uma distribuição uniforme dentro do secador. Dessa forma, a seleção adequada do tipo de atomizador é crucial para otimizar a secagem e obter um produto de alta qualidade e de acordo com as características requeridas (MASTERS, 1979).

A transformação do líquido em pequenas gotículas tem por finalidade aumentar, consideravelmente, a área de superfície de contato entre o líquido e o ar quente do secador, o que permite uma transferência de calor e massa mais eficiente durante o processo de secagem. É necessário também, controlar o tamanho das gotículas formadas. Elas não devem ser muito grandes, pois isso levaria a uma secagem incompleta, e nem muito pequenas, o que dificultaria a recuperação do produto. Gotículas muito pequenas também têm o risco de superaquecimento e queima durante o processo de secagem. Além de sua função de dispersar o líquido em gotículas, o atomizador também deve garantir que essas gotículas estejam bem distribuídas dentro do secador e se misturem uniformemente com o ar quente. Isso é fundamental para garantir uma secagem homogênea e evitar problemas como aglomeração ou formação de pontos secos no produto (PERRY, GREEN e MALONEY, 1997).

Portanto, o atomizador age como um dispositivo de alimentação e de medição, controlando a taxa de alimentação e a forma de alimentação no que se refere ao tamanho da gotícula e a dispersão do material líquido no secador. A seleção adequada do tipo de atomizador é essencial para atender às necessidades específicas do material de alimentação, considerando sua natureza, viscosidade e as características desejadas do produto seco (SELVAMUTHUKUMARAN, 2019).

Existem diferentes tipos de atomizadores disponíveis, cada um com suas vantagens e aplicações específicas, sendo eles o atomizador rotativo e o atomizador por pressão. Na Figura 3 estão apresentados os dois tipos de atomizadores citados.

No atomizador rotativo (ou bico de disco), o material de alimentação é introduzido centralmente em um disco que gira em alta velocidade. O material flui para fora sobre a superfície, acelerando em direção à periferia, e ao atingir a superfície periférica, o material se pulveriza facilmente em gotículas (SANTOS et al, 2017).

Os atomizadores rotativos formam um sistema de baixa pressão, no qual uma ampla variedade de características de pulverização pode ser obtida através de combinações de taxa de alimentação, velocidade do atomizador e design do atomizador. Os discos do atomizador

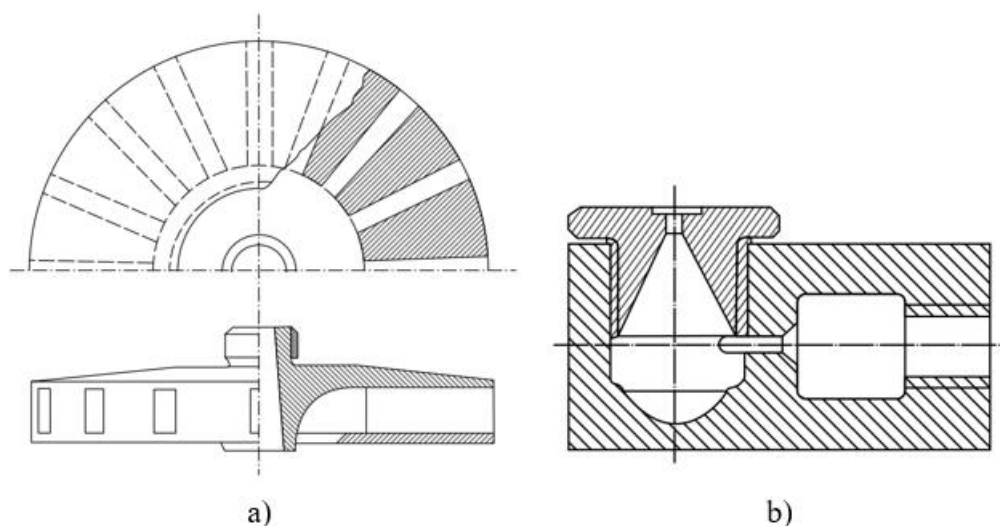
possuem palhetas ou buchas, as quais podem ser altas, largas, retas ou curvas, e circulares ou quadradas, respectivamente. Os discos de atomizador com palhetas são usados em muitas indústrias diferentes, produzindo sprays de alta homogeneidade. Por outro lado, os discos de atomizador com buchas são utilizados em campos mais especializados, para lidar com materiais abrasivos (SANTOS et al, 2017).

No atomizador por pressão ou bico atomizador pneumático, o material de alimentação é adicionado no bico sob pressão. A energia de pressão é convertida em energia cinética e o material sai do orifício do bico como um filme de alta velocidade que se desintegra facilmente em uma pulverização. Essa pulverização ocorre em formato de cone, visto que o material de alimentação é feito para girar dentro do bico (MUJUMDAR, 2006).

Os bicos atomizadores são utilizados para produzir pós de partículas grossas com boa fluidez. No entanto, a duplicação dos bicos permite obter pulverizações mais finas. Em geral, quando comparamos bicos atomizadores com discos rotativos com palhetas, em altas taxas de alimentação, os bicos atomizadores produzem pós menos homogêneas e mais grossos do que os discos com palhetas. Por outro lado, em baixas taxas de alimentação, as características das pulverizações de bicos e discos são comparáveis (MUJUMDAR, 2006).

**Figura 3 – Tipos de atomizadores.**

a) Atomizador Rotativo, b) Bico Atomizador



**Fonte: MUJUMDAR, 2006.**

### 2.2.2 Ar quente

Gotículas atomizadas são expostas a um gás quente dentro da câmara de secagem, resultando em uma rápida evaporação inicial da umidade. A forma e a condição com que a corrente de material de alimentação atomizado entra em contato com o gás quente é essencial

para o comportamento da gotícula durante a secagem e, portanto, o design da câmara de secagem, as propriedades físicas do gás quente que proporcionará a secagem e a posição do atomizador relativo ao fluxo do gás quente são os principais fatores para garantir a eficiência e o resultado desejado nessa etapa (MASTERS, 1979).

Geralmente, esse gás de secagem é o ar atmosférico aquecido e filtrado, embora, em alguns casos, seja necessário usar outros gases inertes para evitar instabilidades eventualmente surgidas entre o gás e as gotículas. O tamanho e formato da câmara de secagem (geralmente cilíndricas com um cone invertido em sua base) devem ser consistentes com o arranjo do secador por pulverização, ou seja, estar de acordo com o atomizador e as propriedades pretendidas das partículas. A câmara de secagem deve ser grande o suficiente para garantir o tempo necessário da secagem das gotículas antes que atinjam as paredes da câmara, evitando assim, seu depósito nelas (SELVAMUTHUKUMARAN, 2019).

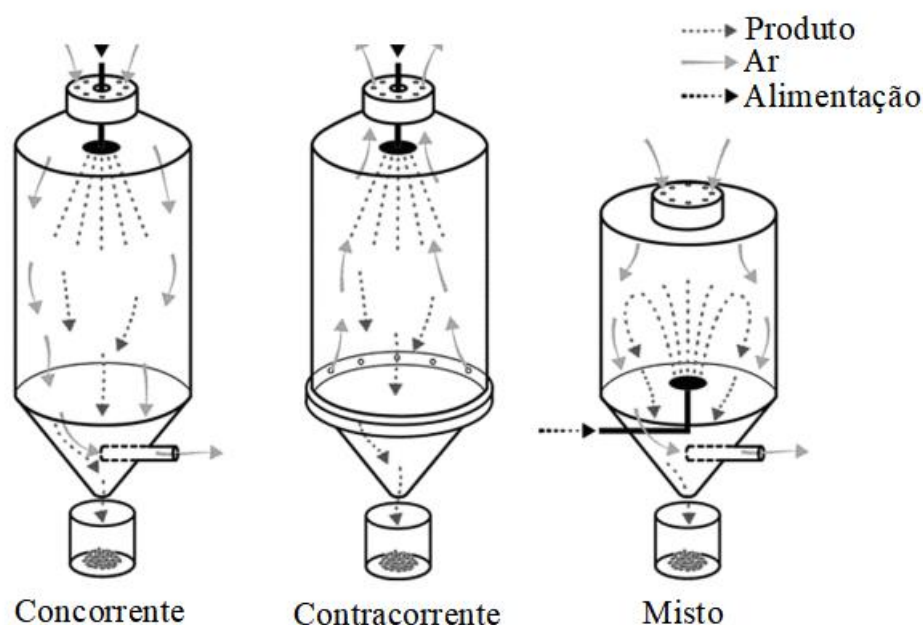
Existem três configurações distintas de câmaras de secagem com relação ao padrão de fluxo entre o gás quente e a pulverização de gotículas: fluxo concorrente, fluxo contracorrente e fluxo misto. A Figura 4 representa um *Spray Drying* nas três condições. No fluxo concorrente, tanto a pulverização atomizada quanto o gás aquecido são introduzidos no topo da câmara de secagem, fluindo através dela na mesma direção. As partículas secas são então depositadas na parte inferior da câmara, sendo liberadas juntamente com o gás (PERRY, GREEN e MALONEY, 1997).

No design de contracorrente, a pulverização é posicionada no topo e o ar quente é fornecido a partir da parte inferior, ou seja, são introduzidos em extremidades opostas da câmara. As partículas secas também são depositadas na parte inferior da câmara. O secador de fluxo misto combina tanto o fluxo concorrente quanto o fluxo contracorrente, ou seja, as gotículas atomizadas são alimentadas a partir da parte inferior da câmara em contracorrente em relação ao fluxo descendente do gás de secagem que é fornecido a partir do topo. Primeiramente, a pulverização atomizada experimenta um fluxo ascendente e, devido ao impacto do fluxo descendente do meio de secagem, ocorre uma reversão em seu trajeto, caindo finalmente na parte inferior da câmara (SANTOS et al, 2017).

Na configuração concorrente, não há tempo para que o gás de secagem troque parte de seu calor com o ambiente, o que implica em uma taxa instantânea de evaporação do solvente. As gotículas atomizadas (ao topo) alcançam as temperaturas mais altas dentro da câmara de secagem, enquanto partículas secas (ao meio e ao fundo) permanecem em contato com temperaturas moderadas, o que evita a degradação térmica indesejável.

**Figura 4 – Tipos de configuração de corrente no Spray Dryer.**

a) Concorrente, b) Contracorrente, c) Misto



Fonte: Adaptado de SELVAMUTHUKUMARAN, 2019.

A configuração contracorrente é considerado a mais eficiente em relação ao uso do calor da câmara, pois o fluxo ascendente do gás quente reduz a velocidade descendente da pulverização atomizada, submetendo-a a um período mais longo dentro da câmara. No entanto, em contraste com o que acontece no fluxo concorrente, durante o fluxo ascendente do gás quente, parte do seu calor é liberado para o ambiente. Assim, as gotículas atomizadas com grandes quantidades de solvente atingirão o gás a temperaturas mais baixas, enquanto as partículas mais secas entrarão em contato com as temperaturas mais altas do meio de secagem na parte inferior da câmara, limitando a aplicação desse processo a materiais resistentes ao calor (MUJUMDAR, 2006).

O secador de fluxo misto, ao combinar tanto o fluxo concorrente quanto o fluxo contracorrente, oferece o máximo tempo de residência da pulverização dentro da câmara, tornando esse método preferencial para secar gotículas grandes, mesmo em câmaras pequenas. Essa disposição também é apropriada apenas para materiais resistentes ao calor (PERRY, GREEN e MALONEY, 1997).

### 2.2.3 Secagem

No processo de secagem ao realizar o contato entre as partículas do *spray* (gotículas) e o ar quente ocorre a evaporação e a condensação do soluto e, portanto, a remoção do solvente

das gotículas. Esse fenômeno é fundamentado pelos temas de balanço de massa e energia e de cinética de secagem.

O fenômeno de secagem é regido tanto pelo balanço de massa, visto que a diferença de pressão de vapor do solvente nas duas correntes resulta na transferência desse solvente na direção das gotículas para o gás quente, como pelo balanço de energia, visto que a diferença de temperatura das duas correntes resulta na transferência de calor da corrente de gás quente na direção da corrente com as gotículas. Por outro lado, a cinética rege a rapidez do processo de secagem, sendo dividido em, basicamente, dois períodos predominantes. O primeiro período se relaciona com a gotícula saturada de solvente, enquanto o segundo período relaciona-se com a gotícula saturada de soluto (MCCABE, SMITH e HARRIOTT, 1993).

Inicialmente no contato gás-gotícula, há um aumento da temperatura da gotícula, indo de sua temperatura inicial para um valor constante, ou seja, a temperatura de evaporação de equilíbrio. Na temperatura de equilíbrio, o processo de secagem ocorre em uma taxa de evaporação constante, visto que há uma rápida taxa de difusão da água do núcleo da gotícula para sua superfície. Dessa forma, a superfície da gotícula permanece saturada de umidade, mantendo sua temperatura constante à temperatura de bulbo úmido (temperatura do gás quando ele fica saturado com vapor do líquido). Essa fase de intensa evaporação de umidade é marcada pela contração da gotícula (CHEN e MUJUMDAR, 2008).

A evaporação da umidade ocorre a uma taxa constante até que um valor crítico de conteúdo de água da gotícula seja atingido. Esse valor crítico ocorre quando o soluto dissolvido no líquido atinge quase a saturação, e com isso, há a formação de uma fina crosta superficial. A evaporação, então, desacelera e passa a depender da taxa de difusão da água por meio dessa camada superficial. Isso marca o início do período da taxa de secagem decrescente da cinética de secagem, sendo imediatamente perceptível um aumento da temperatura da partícula. Esse aumento de temperatura ocorre até o ponto de ebulição da umidade (FOUST et al, 1982).

Neste caso, quando a temperatura da gotícula atinge o ponto de ebulição, ocorre a vaporização, uma transição que requer uma grande quantidade de energia, na qual não há mais aquecimento sensível das partículas e, assim, o processo de secagem continua impulsionado pela transferência de calor externo do ar para a partícula (PERRY, GREEN e MALONEY, 1997).

Por fim, ocorre um aumento da temperatura da partícula até que ela se iguale a do gás circundante, marcando o final do processo de secagem. Ao longo do período da taxa de secagem decrescente, quando a pressão parcial do vapor de umidade no núcleo da gotícula supera a pressão ambiente, pode ocorrer a formação de bolhas dentro das gotículas.

Para alcançar uma conversão bem-sucedida das gotículas em partículas, é necessário otimizar as condições do processo, em especial duas: a temperatura mínima que permite a remoção completa do solvente e o tempo de residência mínimo das partículas dentro da câmara que garante um tempo de secagem suficiente (FOUST et al, 1982).

#### 2.2.4 Separação

Ao final da conversão da gotícula em partícula, há a fase de separação e coleta, na qual é necessário a dissociação das partículas secas do gás de secagem. Ela ocorre geralmente em duas fases, denominadas separação primária e secundária. Na separação primária, as partículas mais densas, depositadas no fundo cônico da câmara de secagem, são recuperadas. Na segunda separação, as partículas menores ou mais finas são transferidas para dispositivos externos, onde são separadas do ar úmido. Os principais dispositivos de coleta são o separador tipo ciclone, o filtro de manga e o precipitador eletrostático. A escolha desses dispositivos depende do tamanho das partículas exauridas com o gás úmido, bem com as características desejadas do produto (MASTERS, 1979).

O separador tipo ciclone tem seu mecanismo de separação baseado na força centrífuga. Esse dispositivo apresenta uma parte superior cilíndrica, o barril, e uma parte cônica em sua parte inferior. A corrente de ar contendo as partículas provenientes da câmara de secagem é fornecido ao ciclone tangencialmente ao barril, transcorrendo uma trajetória espiralada e descendente. As altas velocidades desse vórtice cria uma força centrífuga nas partículas, e isso permite a separação delas do fluxo de ar. Ao chegar no cone, há a criação de um vórtice na direção oposta, expelindo o gás para a parte superior, enquanto as partículas se depositam em uma câmara de coleta na parte inferior (PERRY, GREEN e MALONEY, 1997).

O filtro de manga é amplamente utilizado no processo de secagem por pulverização. O mecanismo de funcionamento desse separador é o seguinte. O fluxo de ar com as partículas entra no filtro de saco sobre pressão positiva ou negativa e passa sobre um tecido que interrompe o caminho das partículas. As partículas, então, ficam retidas no tecido enquanto o fluxo de ar limpo atravessa ele, sendo expelido do equipamento. Para recuperar as partículas, é injetado pulsos de ar comprimido em fluxo contracorrente dentro dos sacos. Os filtros de manga apresentam alta eficiência de operação, especialmente quando estão dispostos em unidades de filtragem com diâmetro decrescente dos poros do tecido (SANTOS et al, 2017).

O precipitador eletrostático é um equipamento de coleta de partículas cujo princípio é baseado em forças eletrostáticas. Uma alta tensão é aplicada aos fios descarregados, formando

um campo elétrico entre eles e as placas coletoras que constituem o precipitador. Com isso, o gás ao redor dos fios é ionizado, e por consequência, as partículas no ar de secagem que percorrem ao redor dessa área. Devido às forças coulombianas, as partículas carregadas são atraídas para as placas coletoras, sendo separadas assim do fluxo de ar. Esse equipamento é muito eficiente, mas devido aos seus altos custos, são raramente utilizados (MUJUMDAR, 2006).

Por fim, visto que em um processo de secagem por pulverização é comum encontrar algumas partículas escapando na corrente de ar após a coleta a seco, muitas indústrias fazem o uso de lavadores úmidos após os coletores secos para realizar uma etapa adicional de limpeza do gás. Os lavadores úmidos tipo Venturi são os dispositivos mais utilizados no processo de secagem por pulverização visto sua facilidade de limpeza ou manutenção. Eles apresentam uma seção convergente (garganta) e uma seção divergente (difusor). O ar de entrada, carregando partículas finas, entra no lavador e é misturado com o líquido de lavagem (geralmente água). Essa mistura flui pela seção convergente, atingindo a garganta em alta velocidade. Como resultado, uma névoa de gotículas é formada com as partículas de poeira aprisionadas dentro delas e, então, o conteúdo líquido é separado do gás limpo, sendo o primeiro descarregado e o último liberado na atmosfera. Em conclusão, esses equipamentos são utilizados visto sua capacidade de minimizar o conteúdo de partículas ou até mesmo a intensidade de alguns odores antes de liberar o fluxo de gás na atmosfera (SELVAMUTHUKUMARAN, 2019).

### **2.3 Fatores que afetam o processo de *Spray Drying***

O processo de secagem por pulverização ou *Spray Drying* é influenciado, tanto pelas variáveis operacionais, como pelas características do material a ser seco, que afetam as propriedades do produto seco, sendo eles o tamanho das partículas e a densidade do produto. Neste caso é possível generalizar algumas conclusões acerca da influência dessas variáveis, no entanto a extensão de cada influência depende do produto específico.

#### **2.3.1 Efeito da taxa de alimentação**

Aumentar a taxa de alimentação em condições operacionais constantes do atomizador e secagem produzirá *sprays* e produtos secos mais grosseiros, ou seja, um tamanho de partícula maior e a uma maior densidade a granel do produto seco. No entanto, não deve haver mudança significativa na variação da distribuição do tamanho das partículas (LANGRISH, 2010).

### 2.3.2 Pressão de Atomização

Para atomizadores de bico, a etapa de atomização é realizada sob pressão. Dados as demais variáveis constantes, a relação do tamanho das gotículas é inversamente proporcional com a pressão exercida, ou seja, um aumento na pressão resulta em uma diminuição das gotículas. Para atomizadores rotativos, por sua vez, o tamanho das gotas exibe uma relação inversa com a velocidade de rotação e o diâmetro, ou seja, quanto maior a rotação ou o diâmetro menor é o tamanho das gotículas. O fator que rege tais efeitos está relacionado com o aumento da energia em termos da aplicação da pressão no bico atomizador ou a velocidade de rotação (atomizador rotativo) há um aumento das forças de cisalhamento, resultando em uma quebra mecânica das gotículas mais eficiente (PASSOS e BIRCHAL, 2010).

### 2.3.3 Efeito dos Sólidos na Alimentação

Uma maior quantidade de sólidos na alimentação resulta em um tamanho maior de partícula para o produto seco. Quando a concentração de sólidos na alimentação é aumentada, mantendo-se constante a temperatura de secagem e as taxas de alimentação, a carga de evaporação é menor, e isso reduz o teor de umidade no produto. Isso pode levar à formação de partículas secas ocas e densidades mais baixas. Entretanto, esse efeito pode ser relativamente mitigado por gotas de pulverização individuais maiores, mantendo peso semelhante de umidade por gota (PATEL, PATEL e SUTHAR, 2009).

### 2.3.4 Efeito da Temperatura de Alimentação de Produto

Para líquidos de baixa viscosidade à temperatura ambiente, não há impacto considerável no aumento da temperatura de alimentação. No entanto, um aumento na temperatura de alimentação afeta as propriedades do produto seco quando é necessária uma redução da viscosidade de uma corrente inicial para a bombeamento e para a atomização. (LANGRISH, 2010).

### 2.3.5 Viscosidade e Densidade da Alimentação de Produto

Se houver incremento na viscosidade do produto na alimentação, uma grande porcentagem da energia de atomização fornecida ao bico é usada para superar as grandes forças viscosas da solução. Portanto, uma pequena quantidade de energia é deixada para a fissão da gota, resultando em tamanhos de gota maiores.

No caso da variação da densidade do produto a ser secado na alimentação, um fenômeno semelhante ocorre. À medida que a densidade do produto de alimentação aumenta, uma significativa parcela da energia de atomização proveniente do bico é direcionada para vencer as forças densas presentes na solução. Isso leva a uma reserva reduzida de energia disponível para a fragmentação das gotas, resultando em gotículas de tamanho maior (PASSOS e BIRCHAL, 2010).

### 2.3.6 Efeito da Tensão Superficial no Produto Alimentado

De modo geral, os efeitos da tensão superficial não são pronunciados e, portanto, não interferem significativamente no resultado do produto seco. Isso se deve ao fato de que a maioria dos materiais de alimentação usados na secagem por pulverização possui valores de tensão superficial dentro de uma faixa estreita que não influencia significativamente as propriedades do produto seco. No entanto, para produtos cuja tensão superficial é superior ou inferior a essa faixa podem impactar os mecanismos de atomização e secagem. A alimentação com produtos de baixa tensão superficial produzem gotas de pulverização menores, resultando em amplas distribuições de pulverização. Isso pode gerar partículas ocas e com baixas densidades. Por outro lado, alimentações com maior tensão superficial produzem gotas maiores e com distribuições de tamanho restritos (PASSOS e BIRCHAL, 2010).

### 2.3.7 Efeito da Temperatura de Secagem na Entrada

O efeito da temperatura de secagem na entrada está relacionado com o comportamento do solvente nas gotículas pós atomização, ou seja, dependem das características de secagem dos produtos específicos. De modo geral, um aumento na temperatura de entrada aumenta a capacidade de evaporação do secador, em relação a uma taxa de ar constante. O resultado para com as partículas é, frequentemente, uma redução na sua densidade visto que as taxas maiores de evaporação secam os produtos em estruturas mais porosas. Além disso, para gotículas com característica de expansão durante a secagem, é comum que o produto seco apresente um maior tamanho com menor densidade. No entanto, para temperaturas muito elevadas, as gotículas podem expandir e romper-se, resultando em menores tamanhos com maiores densidades (PATEL, PATEL e SUTHAR, 2009).

### 2.3.8 Efeito da Velocidade de Contato entre *Spray* e Ar

A intenção de aumentar a velocidade de contato entre *spray* (produto atomizado) e o ar é favorecer a transferência de calor e massa visto a maior combinação entre eles. A tendência para velocidades muito altas está relacionada ao formato das partículas. Pode ocorrer a distorção na forma do produto seco, com fraturas ou aderência de várias partículas. Por outro lado, não há tendências para a densidade das partículas, sendo que ela dependerá do produto específico (OLIVEIRA, 2010).

### 2.3.9 Efeito da Temperatura de Secagem na Saída

Para a formação de um produto desejado de alta qualidade no processo de *Spray Drying* é necessário controlar indiretamente a temperatura de saída, seja pela vazão de entrada ou pela temperatura da corrente de secagem, a fim de controlar o empacotamento do pó. Considerando um menor teor de umidade e um mesmo design do secador, o aumento de temperatura de saída diminui o teor de umidade. Dessa forma, a operação em baixas temperaturas de saída produzem pós com alto teor de umidade é usada para formar pó aglomerados. (LANGRISH, 2010).

### 2.3.10 Tempo de Residência na Câmara de Secagem

O tempo de residência refere-se ao período de permanência das gotas atomizadas dentro da câmara de secagem, e é função das variáveis de entrada, como velocidade da corrente de entrada e o tamanho e arranjo físico da câmara de secagem. O tempo de residência é importante porque pode influenciar a qualidade do produto. Ele deve ser suficientemente alto para garantir o objetivo da secagem, ou seja, obter o produto seco, mas também deve ser suficientemente baixo de modo a não alterar as características do produto, como a degradação térmica para materiais termo sensíveis. Normalmente, o tempo de residência está na ordem de alguns segundos (por exemplo, em geral, partículas finas não devem permanecer mais do que 15 segundos dentro da câmara de secagem) (OLIVEIRA, 2010).

### 2.3.11 Formação de Partículas Ocas

A formação de partículas ocas afeta a qualidade do produto seco alterando significativamente sua densidade. Essa grandeza é função das variáveis de entrada, como velocidade da corrente de alimentação e a velocidade e temperatura do ar de secagem. Além

disso, e mais importante, ela está relacionada com as características físicas do material a ser separado. Partículas ocas podem se formar por meio dos seguintes mecanismos (OLIVEIRA, 2010).

- 1) Quando ocorre a formação de uma camada semi-impermeável ao fluxo de vapor na superfície da gotícula, de modo que com o aumento da temperatura, há a sua expansão vista a formação de vapor internamente;
- 2) Quando o ar da alimentação contribui para criar espaços de ar dentro da gota;
- 3) Quando o transporte de líquido com sólidos do centro para a superfície da gota pela ação de capilaridade deixa o centro da gota como um vazio. Esse mecanismo ocorre principalmente em alimentações com lama de argila;
- 4) Quando a difusão dos sólidos em direção ao interior ocorre a uma taxa menor do que a evaporação da umidade. Esse mecanismo é observado especialmente em produtos cristalinos.

## 2.4 Considerações Finais

O *Spray Drying* é uma técnica muito utilizada na indústria em geral pelo fato de seu baixo custo operacional e da alta disponibilidade no mercado dos equipamentos tradicionais. Somam-se a isso, as vantagens técnicas do equipamento para este processo de secagem. Ele opera continuamente, o que oferece um alto dinamismo para a produção em média e grande escala. Há flexibilidade operacional nas variáveis de entrada, o que proporciona um controle satisfatório da operação e contribui para o atendimento de condições desejáveis da secagem. Vale ressaltar também, a flexibilidade no design/projeto do secador, o que contribui para a obtenção do produto seco nas condições desejadas, sendo adaptável ao processo de automação operacional.

O equipamento *spray-dryer* é aplicável em materiais sensíveis ou resistentes ao calor. Além disso, oferece sensibilidade na elaboração qualitativa do produto seco, seja no formato da partícula gerada na atomização como na formação do produto seco. Todas essas características fazem com que a técnica seja acessível a diversas indústrias, e seja uma das primeiras opções quando o objetivo seja secar uma solução para não alteração significativa de suas características químicas.

Por fim, haja vista o delineamento básico/teórico do funcionamento, dos fatores que regem o processo e das principais vantagens da utilização do método de *Spray Drying*, este trabalho apresenta compilado específico de produtos que são originados pela técnica nos mais diversos ramos da indústria, bem como aborda o estado da arte da utilização do equipamento

para a concepção de produtos e formulações especificamente nas indústrias de alimentos e farmacêutica.

Desta forma serão expostos e analisados inicialmente os dados operacionais da secagem por *Spray Drying* de produtos cuja produção já possui um padrão consolidado na indústria com um todo. São eles a temperatura de entrada, a temperatura do gás de secagem, as vazões de entrada, a pressão de atomização, etc. A seguir serão apresentados os trabalhos realizados como avanço no uso de *spray-dryer* na subárea da indústria a qual o equipamento será utilizado para desenvolvimento na elaboração de alimentos microencapsulados e vacinas secas. Será destacado ainda, as principais dificuldades para a concepção desses produtos e como a técnica contribui para o contorno dos obstáculos apresentados. Ao final, pontuam-se os destaques da concepção dos produtos com o referido equipamento, como temperatura de entrada, substâncias envolvidas e resultados.



### 3 APLICAÇÕES DO SPRAY DRYING

#### 3.1 Produção na indústria tradicional

O processo de *Spray Drying* é amplamente utilizado na indústria para a produção de pós secos a partir de soluções líquidas ou suspensões, e se destaca como uma das tecnologias mais importantes e versáteis na indústria moderna. A técnica permite a produção de partículas com tamanho controlado, pureza e uniformidade, características essenciais para atender às exigências de qualidade de diversos setores. Além disso, a eficiência do *spray-dryer* na remoção de umidade sem comprometer a integridade do material ativo garante que os produtos mantenham suas propriedades físicas, químicas e organolépticas, o que é particularmente crucial para produtos sensíveis ao calor ou à umidade.

A Tabela 1 apresenta alguns produtos das diversas áreas da indústria em geral, nos quais o uso do processo de *Spray Drying* é fundamental para sua concepção em larga escala e com a qualidade desejada. Além disso, são destacados os principais dados operacionais para a concepção dos devidos produtos.

**Tabela 1 – Destaques operacionais da secagem por *Spray Drying* de diversos produtos.**

<b>Produtos</b>	<b>Destaques</b>	<b>Referência</b>
Proteína do Leite	Temperatura do ar quente de 77 °C, temperatura de saída de 54 °C, vazão de entrada de 1,96 g/min, tamanho de partícula produzido de 201 µm.	(FANG et al, 2012)
Café	Spray-dryer de escalapiloto da Bowen Engineering Inc. (EUA) na configuração contracorrente, pressão de atomização de 392,27 kPa, solução de 40% m/m de café solúvel com água destilada, temperatura do ar quente de 150 °C, temperatura de saída de 100°C.	(ISHWARYA et al, 2015)
Ovo	Temperatura do ar quente de 230°C, pressão de atomização de 2.100 kPa, temperatura de saída de 85°C, temperatura de entrada da solução de material interno do ovo de 7°C.	(LI et al, 2023)
Chá (amora)	Spray-dryer da SM Scientech (Índia), temperatura do ar quente de 140°C, vazão de entrada do extrato de 4 mL/min, pressão de atomização de 200 kPa.	(SHARKHEL et al, 2022)
Amido (milho)	Spray-dryer do tipo H-Spray-Mini da Beijing HOLVES Biotechnology (China), temperatura do ar quente de 180 °C, vazão do ar quente de 400 L/h, suspensão de amido de 4% em água destilada.	(SHANG et al, 2023)

**Fonte: elaborado pelo autor.**

**Tabela1 (Continuação) –Destaques operacionais da secagem por *Spray Drying* de diversos produtos.**

<b>Produtos</b>	<b>Destaques</b>	<b>Referência</b>
Cereais	Spray-dryer de escala piloto do tipo APV FSD 55 da Källbergs Industri AB (Suécia) com volume de 3,0m <sup>3</sup> , temperatura do ar quente de 170 °C, temperatura de entrada da suspensão de 70 °C, temperatura de saída de 80 °C, velocidade de rotação do atomizador rotativo de 26.000 rpm.	(CHRONAKIS, TRIANTAFYLLOU e ÖSTE, 2044)
Sangue	Spray-dryer do modelo Büchi Mini B-191 da BüchiLabortechnik (Suíça), temperatura do ar quente de 140 °C, temperatura do ar quente de saída de 77 °C, vazão de entrada da solução de 670 mL/h, pressão de atomização de 500 kPa.	(TOLDRA et al, 2004)
Cerâmica (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> )	Spray-dryer do modelo Niro Mobile Minor, temperatura do ar quente de 190 °C, vazão do ar quente de 40 mL/min, tamanho de partículas produzidos entre 30 e 110 µm	(SCHRIJNEMAKERS et al, 2009)
Catalisadores	Catalisador do tipo Cu/ZnO/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ZrO <sub>2</sub> dissolvido em água destilada e sais, temperatura do ar quente de 300 °C, temperatura de saída de 200 °C, vazão de entrada de 150 mL/min, tamanho de partículas de 50 a 150 µm	(ZHANG et al, 2016)
Microalgas (corantes)	Espécies: <i>Nannochloropsis oculata</i> , <i>Porphyridium cruentum</i> e <i>Diacronemavlkianum</i> . Spray-dryer de escala piloto tipo B290 da Buchi (Inglaterra), temperatura de entrada de 170 °C, temperatura de saída de 95 °C, vazão de entrada de 8 mL/min, tempo de residência de 1,5 s.	(DURMAZ et al, 2020)
Estévia	Temperatura do ar quente de 170 °C, temperatura de saída de 100 °C, vazão de entrada de solução de 800 mL/h, emulsão preparada com 10% m/m de estévia com solução de maltodextrina-inulina (50:50) e água destilada de 5% m/m.	(OIKONOMOPOULOU et al, 2022)
Enzimas	Solução aquosa de lipase, Temperatura do ar quente de 100 °C, temperatura de saída do ar quente de 70°C, umidade residual entre 4,2% e 7%.	(MAARTEN et al, 2012)

**Fonte: elaborado pelo autor.**

Ao avaliar os trabalhos realizados com uso de *spray-dryers*, bem como seus dados operacionais, pode-se observar que para aumentar a eficiência térmica do processo de secagem, a temperatura do ar de entrada deve ser o mais elevada possível de modo a se obter produtos com baixo teor de umidade residual. Além disso, ao aumentar a taxa de fluxo do ar de secagem, há o aumento da temperatura do ar de saída o que resulta em pós menos úmidos e menos aglomerados, melhorando a separação do produto na etapa posterior. Esse fenômeno é de extrema importância na produção de alimentos, especialmente para a proteína do leite e o

café, de modo que é possível obter a máxima recuperação do produto e seu aumento do tempo de prateleira visto que o baixo teor de umidade retarda seu processo de deterioração.

O tempo de residência pode ser curto (cerca de 10–15 s) para a formação de gotículas finas ou longo (acima de 25 s) para a formação de gotículas mais grossas, variando pela necessidade do teor de umidade residual. Esse fenômeno é especialmente relevante para a indústria de materiais, como por exemplo, na produção de catalisadores, uma vez que o controle do tamanho de um catalisador apresenta um impacto crucial na reação na qual ele será utilizado. Por fim, uma maior concentração de sólidos solúveis totais na alimentação aumenta o tamanho das partículas e o rendimento da operação de secagem, ou seja, da recuperação do pó.

Diante o exposto, a ampla gama de aplicações da técnica de *Spray Drying* nas indústrias em geral está continuamente se expandindo devido à alta demanda por produtos convenientes, funcionais e que podem ser produzidos em larga escala. Destaca-se a utilização atual da técnica na indústria alimentícia com a encapsulação de aromas, sabores e corantes, bem como na indústria farmacêutica com a produção de vacinas secas. A seguir, será apresentado a concepção de uso e o emprego da técnica de nesses ramos.

### **3.2 Indústria de Alimentos – Encapsulação de Aromas, Sabores e Corantes**

A técnica de encapsulação consiste em aprisionar uma substância dentro de outra, resultando na formação de partículas em dimensões nanométricas (nanoencapsulação), micrométricas (microencapsulação) ou milimétricas com muitas propriedades úteis. Especificamente no campo alimentício, a encapsulação é uma técnica pela qual as gotículas líquidas, partículas sólidas ou compostos gasosos são aprisionados em filmes finos de um agente encapsulante de grau alimentício. O componente encapsulado pode receber diversos nomes, tais como agente ativo, núcleo, carga, ativo, fase interna ou carga útil. Já a substância que envolve o agente ativo é designada como revestimento, membrana, casca, cápsula, material transportador, fase externa ou matriz (GHARSALLAOUI, 2007).

Uma microcápsula, em sua forma mais simples, é uma pequena esfera com uma parede uniforme ao seu redor. No entanto, em diversas aplicações, a parede pode ter camada única ou dupla e apresentar irregularidades quanto a sua forma. O núcleo, em sua vez, pode ser composto por um ou vários ingredientes, podendo ser um material cristalino, uma partícula adsorvente irregular, uma emulsão, uma suspensão de sólidos ou uma suspensão de microcápsulas menores (GHARSALLAOUI, 2007).

As principais razões para aplicar a microencapsulação na indústria alimentícia são (SHAHIDI e HAN, 1993):

- Redução da reatividade do agente ativo com fatores externos, como radicais livres, oxigênio, luz, calor, umidade, entre outros;
- Diminuição da perda de agente ativo por transferência para o ambiente;
- Controle da concentração do agente ativo por unidade;
- Controle a liberação do agente ativo, seja por quantidade ou por tempo;
- Realce ou disfarce do sabor e/ou do cheiro do agente ativo;
- Facilidade no manuseio.

Numerosos métodos de encapsulação foram propostos e desenvolvidos. Contudo, até o momento, nenhum deles pode ser considerado universalmente aplicável para componentes alimentares bioativos. A singularidade de cada componente bioativo, incluindo sua estrutura molecular, implica que os procedimentos de encapsulação devem ser distintos e específicos para cada caso. Para isso, foram desenvolvidas e descritas diversas técnicas para encapsulação e suas aplicações em setores como alimentício, farmacêutico, agrícola, têxtil, papel e outras indústrias relacionadas. Algumas das principais técnicas são *spray drying*, *spray cooling*, *spray chilling*, revestimento por suspensão de ar, extrusão, extrusão centrífuga, liofilização, coacervação, separação rotativa por suspensão, co-cristalização, encapsulamento em lipossomas, polimerização interfacial, inclusão molecular, entre outros (TIMILSENA, HAQUE e ADHIKARI, 2020; RAY, RAYCHAUDHURI e CHAKRABORTY, 2016; GIBBS et al, 1999).

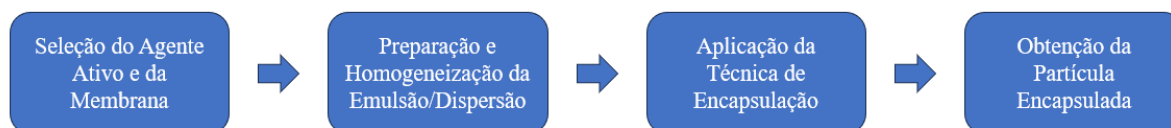
Visto que os compostos encapsulantes frequentemente são líquidos, muitas tecnologias são baseadas em processos de secagem, como *Spray Drying* e seus derivados. O processo de *Spray Drying* é a mais antiga e mais utilizada na indústria alimentícia uma vez que ela ocorre em operação contínua, econômica e flexível para as unicidades dos agentes ativos, apesar de ser uma das técnicas que menos aproveitam a totalidade da energia presente na câmara. Como exemplo, pode-se citar que a técnica de *Spray Drying* é pelo menos 30 vezes mais barata que a técnica de *Freeze Drying* (DESOBRY, NETTO e LABUZA, 1997).

Devido à técnica de encapsulação, diversos produtos que previamente eram considerados inviáveis visto que sua degradação frente a fatores ambientais como oxigênio, luz, calor, radicais livres, etc, inviabilizava sua produção, mas agora são possíveis. Essas substâncias, na forma líquida ou sólida, ao serem envolvidas em um material de revestimento, permitem o estabelecimento das propriedades úteis e/ou a eliminação de propriedades indesejadas do ingrediente original. Como resultado, a atuação de fenômenos ambientais sobre o produto de interesse é atenuada, estendendo o prazo de prateleira de um produto

alimentício, ou desacelerando a degradação de um princípio ativo farmacêutico, entre outros exemplos que podem ser citados. (BETZ e KULOZIK, 2011)

A Figura 5 mostra o esquema resumido do processo de encapsulação, no qual é dividido na seleção do agente ativo e da membrana como primeira etapa, para posterior preparação da emulsão do agente ativo com a membrana e seguida da técnica de encapsulação para a obtenção do encapsulado estável.

**Figura 5 – Processo de encapsulação de um agente ativo**



**Fonte: elaborado pelo autor.**

Diferentes tipos de agentes ativos e agentes encapsulantes têm sido utilizados para a formação de núcleos encapsulados. Agentes ativos como vitaminas, minerais e gordura/óleo, devido suas propriedades de solubilidade, polaridade e, principalmente, funcionalidade química apresentam alta eficiência na formação e estabilização de encapsulados por meio da técnica de *Spray Drying*. Por outro lado, os agentes encapsulantes têm sido utilizados no processo de *Spray Drying* a fim de obter propriedades de proteção, estabilização, solubilidade e liberação controlada dos compostos. Estes incluem polissacarídeos (amidos, maltodextrinas e goma arábica), lipídios (ácido esteárico, mono e diglicerídeos) e proteínas (caseína, soro de leite, soja e trigo) (NEDOVIC et al, 2011).

Óleos essenciais da laranja, devido sua alta facilidade de oxidação e volatilidade, devem ser protegidos com uma membrana. Agentes encapsulantes como polissacarídeos, em especial o amido de arroz em conjunto com a maltodextrina, trouxe bons resultados na preservação da quantidade e da funcionalidade química dos óleos da laranja, bem como na formação de uma cápsula resistente e com alta eficiência em retenção do agente ativo. Tendo em vista que o amido de arroz e os óleos essenciais da laranja são substâncias sensíveis ao calor, a técnica de *Spray Drying* foi a mais eficiente na formação do encapsulado bem como na preservação da integridade e qualidade do agente ativo, aumentando seu tempo de prateleira (KIM e MORR, 1996).

Óleos provenientes do café, muito utilizado para intensificar o aroma de cafés solúveis e outras bebidas derivadas do café e como aroma em doces e bolos, também são encapsulados a fim de oferecer uma diminuição de sua volatilidade e redução em seu potencial oxidativo. Uma mistura de óleos do café (agente ativo) com goma arábica (agente encapsulante) em água destilada na concentração de 30% de sólidos totais, sendo 15% desse valor a concentração de óleos do café, proporcionou uma cápsula que na temperatura de 60°C reduziu

pela metade a oxidação dos óleos em um período de oito semanas, comparado com o óleo em natura (FRASCARELI et al, 2012).

Compostos fenólicos extraídos de plantas foram encapsulados via *Spray Drying* utilizando, como membrana, polissacarídeos como maltodextrina e goma arábica, xarope de glicose e proteína de soja isolada. O mirtilo apresenta grandes concentrações de compostos fenólicos, como a antocianina, que oferece uma gama de atividades biológicas como antiinflamatório, antioxidante, anticarcinogênico, entre outros. No entanto, sua aplicação como aditivo alimentar é restrita uma vez que depois de sua extração, as antocianinas são altamente suscetíveis a degradação por meio da oxidação. A microencapsulação da antocianina é uma das formas mais apropriadas de estabilizá-la.

Tendo em vista que a maioria dos alimentos possui água em sua composição, a emulsificação da antocianina é adequada quando o agente encapsulante é hidrofóbico, de modo que a microcápsula, insolúvel em água, ao ser adicionada em alimentos, a desintegração de seu revestimento é retardada, e por consequência, a exposição do composto a luz e oxigênio é reduzida. Igualmente, a fim de contribuir na preservação da antocianina, é adequado que a emulsão e o processo de encapsulação ocorram em meio ácido, uma vez que a forma flavílica (catiônica) é sua forma mais estável. Dessa forma, a secagem via *Spray Drying* na presença de material antioxidante e resistente a ambientes ácidos (câmara de secagem), bem como realizar a atomização em baixas pressões a fim de preservar a emulsão, é uma das técnicas com maior potencial de sucesso ao atingir o objetivo de preservar a integridade das antocianinas durante armazenamento a seco (BETZ e KULOZIK, 2011).

A opúncia, gênero botânico da família *cactaceae* representada pelos cactos, é nativa do continente americano e produzem frutas tropicais de colorações verde, vermelho, amarelo ou roxo devido a presença de vários pigmentos, como betalaínas e carotenoides. O estudo dessa planta é de grande interesse, pois vem como opção para produção de diversos pigmentos de cores naturais e seu consumo traz benefícios para a saúde, como ação antioxidante e ação anticarcinogênica. No entanto, visto sua a facilidade de degradação das betalaínas frente a temperatura, oxigênio e luz, a microencapsulação desse composto, a fim de garantir sua estabilidade, se mostra necessária para sua utilização como antioxidante e corante. Uma mistura da polpa de opúncia com a maltodextrina na proporção de peso de 3:1, respectivamente, ao ser encapsulado em um processo de *Spray Drying* com corrente de ar quente a uma temperatura de 140°C, mostrou-se de grande eficiência na armazenagem de betalaínas, uma vez que no teste de retenção a 60°C, em um período de 45 dias, houve uma redução do agente ativo da microcápsula inferior à 10% (SAENZ et al, 2009).

O óleo extraído da semente de girassol, comumente utilizado na cozinha, apresenta propriedades como a antiinflamatória e a antioxidante, sendo benéfico para a saúde do coração, da circulação e do cérebro, bem como para os cabelos e a pele. O preparo de emulsões, contendo 5% do peso em óleo de girassol e 50% do peso uma mistura de maltodextrina e goma acácia (proporção de 3:2) foi secada em um *spray-dryer*, a uma temperatura do gás de secagem de 220°C. O resultado da secagem foi satisfatório à medida que o pó microencapsulado tornou-se resistente a oxidação, especialmente pela alta retenção do óleo no conteúdo externo, e por consequência, baixa disponibilidade em sua superfície, mas também pela eficiência da membrana em inibir ou retardar o contato de agentes oxidantes externos com o conteúdo interno da cápsula.

Os pós obtidos apresentaram boa fluidez em água e excelente resistência mecânica, características cruciais para o processo de aglomeração pós *Spray Drying*. Nesse caso a aglomeração se faz essencial, pois o produto obtido do *spray-dryer* apresenta dimensões na ordem de dezenas de micrômetros, o que dificulta seu armazenamento, e com a aglomeração em leito fluidizado à 45°C, as dimensões das partículas atingiram a ordem de centenas de micrômetros (TURCHIULI et al, 2005).

Ácidos graxos de ômega 3, especialmente o ácido eicosapentaenoico e docosaenoico (EPA e DHA, respectivamente) apresentam importantes benefícios para a saúde como a melhora na memória de longo prazo e a diminuição de sintomas cardiovasculares. Suas principais fontes na natureza são de peixes, algas e frutos do mar. A adição de óleos de ômega 3 em alimentos é problemática visto sua facilidade de oxidação e pelo impacto negativo da adição de sabores e cheiros nos alimentos. No entanto, é possível contornar essas duas barreiras com a técnica de microencapsulação.

Emulsões de óleo de peixe oriundo de fígado de bacalhau com maltodextrina e quitosana, utilizadas como agente encapsulantes, na proporção de 1,5% e emulsificadas com ultrassom foram usadas para obter microcápsulas de ômega 3, via secagem pelo processo de *Spray Drying*, sendo obtidas características desejáveis para adição em alimentos ou para administração de medicamentos por via oral. A principal característica obtida foi a distribuição das partículas em tamanho entre 10 e 40 micrômetros, o que facilita a bioacessibilidade desses óleos no corpo humano uma vez que a maior parcela do conteúdo de ácidos graxos das microcápsulas fica concentrado na parte interna da partícula, evitando a exposição às condições oxidantes. Por fim, em testes de digestão *in vitro*, simulando uma digestão intestinal, foi observado uma liberação de 75% do DHA e 45% do EPA. Tais porcentagens foram consideradas satisfatórias (DE LA HABA et al, 2023).

A partir da microcápsula obtida com o óleo de bacalhau, é possível obter pó microencapsulado de óleo de atum com maltodextrina e quitosana. A escolha da quitosana, em ambos os casos, é de extrema importância uma vez que ela é uma substância comestível, biodegradável e barata, com propriedades antibacterianas, além de produzir géis de alta firmeza e estabilidade, prevenindo vazamento do conteúdo interno da cápsula. Entretanto, ela apresenta a função antioxidante, contribuindo para a não oxidação dos ácidos graxos ômega 3.

Emulsões preparadas em proporções iguais de maltodextrina e quitosana com óleo de atum extraído diretamente do tecido do peixe por vaporização direta, nas concentrações de 30% (p: p) e 10% (p: p) respectivamente, ao serem secados por *spray-dryer* com uma corrente de entrada a uma temperatura de 180°C, produziram pós microencapsulado de óleo de peixe com alta eficiência de encapsulação, baixa molhabilidade, alta solubilidade e alta higroscopicidade. Igualmente, ao avaliar a oxidação dos ácidos graxos com a concentração de peróxido, a solução contendo os 10% apresentaram maior tempo de prateleira, ou seja, menor oxidação face as outras concentrações de 20%, 30% e 40% (KANWAL et al, 2021).

A vitamina D é um importante contribuinte para a saúde dos dentes e dos ossos, do sistema nervoso e do sistema imunológico e para o bom funcionamento do sistema respiratório e do sistema cardiovascular. Visto o aumento em doenças na população oriundo da deficiência em vitamina D, alimentos comumente utilizados no cotidiano, enriquecidos com vitaminas, são uma possível e adequada solução para o beneficiamento da qualidade de vida delas.

O preparo de emulsões de lipossomas contendo 0,4g de Vitamina D e 5g de lecitina, sendo o agente ativo, somado com goma arábica, amido modificado e maltodextrina, na proporção de, respectivamente, 1%, 3% e 15% (p:p), sendo o agente encapsulante e alimentada em um *spray-dryer* à 180°C para sua secagem, geraram microcápsulas com taxa de 63% de retenção do conteúdo alimentado. O pó final, adicionado em iogurte da marca iraniana *Pegah Colestan*, quando comparado ao iogurte original, não apresentaram alterações significativas quanto ao pH, coloração e solubilidade, se apresentando como um exemplo promissor de alimento enriquecido.

No entanto, ainda se faz necessário estudos quanto a otimização desse processo, sendo que os principais fatores que regem a qualidade do pó são: o primeiro, quanto maior a temperatura, maior o tamanho das partículas, o que afeta a solubilidade do pó no iogurte; e o segundo, quanto maior a concentração de maltodextrina, maior o tamanho das partículas, o que afeta tanto a solubilidade do pó no iogurte como a viscosidade do iogurte (JAFARI, VAKILI e DEHNAD, 2019).

A vitamina B12 é um importante micronutriente para processos metabólicos, neurológicos e hematológicos e sua deficiência pode causar anemia, paralisia, perda de memória, úlceras entre outros problemas. A inclusão dessa substância em alimentos do cotidiano se mostra uma válida opção para o beneficiamento da dieta das pessoas e, por consequência, da qualidade de vida delas. No entanto, a simples adição em leite, ou em derivados do leite como iogurte, não é adequada pela facilidade de decomposição dado a exposição ao calor, luz, oxigênio e água, liberando compostos que alteram negativamente o sabor e o cheiro dos alimentos.

A co-encapsulação de vitamina B12 com vitamina D3, emulsificada com goma acácia, amido modificado e maltodextrina na proporção de 38:60:2, e secas pelo processo de *Spray Drying* com a temperatura inicial da emulsão de 140°C, geraram um pó com propriedades funcionais satisfatória. Essa combinação resultou na melhor relação de eficiência de aprisionamento das vitaminas, com concentração total de vitaminas, com estabilidade no armazenamento e estabilidade anti oxidação, e com liberação satisfatória do produto em experimentos *in vitro* que simulam o ambiente de um estômago (BAJAJ, MARATHE e SINGHAL, 2021).

A cúrcuma, extraída da raiz do açafrão-da-índia, apresenta propriedades anti-inflamatória, antibactericida, antioxidante e anticarcinogênica. É um composto fenólico sendo praticamente insolúvel em água em pHs neutro e ácido, apresenta um forte amargor e é pungente para a administração oral, apesar de sua baixa biodisponibilidade. Sua adição em alimentos do cotidiano é uma estratégia promissora para auxiliar no balanceamento da dieta e na melhora da qualidade de vida de muitas pessoas.

A emulsão de cúrcuma em pó com amido modificado e maltodextrina na proporção de 50:50 e em meio aquoso, ao ser secado em *spray-dryer* cuja temperatura da corrente de entrada foi de 185°C, gerou microcápsulas com eficiência de encapsulação de até 85% mantendo, em sua maioria, a integridade química da cúrcuma. Além disso, as partículas apresentaram formato esférico, aumentando a estabilidade ao calor comparado com a cúrcuma em pó, e mantendo suas propriedades antioxidantes. Por fim, a adição do pó microencapsulado em leite, desde que em doses seletivamente baixas, não resulta em mudanças significativas na aparência, viscosidade, textura e cor, e principalmente, não altera o sabor e cheiro relevantemente do leite fortificado (PATEL et al, 2022).

### 3.3 Indústria Farmacêutica: Desenvolvimento de Vacinas Secas

Pandemias e epidemias têm se tornado mais frequentes e mais preocupantes para a humanidade. No entanto, a invenção de vacinas foi um dos grandes desenvolvimentos conquistados perante as doenças virais e bacterianas. Como exemplo, a Iniciativa Global de Erradicação da Poliomielite lançada em 1988 resultou na redução de 99% dos casos de poliomielite, de mais de 350 mil casos por ano para apenas 413 casos em 2014. Dessa forma, a vacinação é a abordagem mais ampla e eficaz para a proteção das pessoas e dos animais contra diversas enfermidades (GHAEMMAGHAMIAN et al, 2022).

Existem vários tipos de vacinas que foram desenvolvidas no presente momento. Alguns exemplos são vacinas virais ou bacterianas vivas, vacinas virais ou bacterianas inativadas e vacinas de polissacarídeos conjugados. Além do tipo, existem também alternativas quanto às vias de administração, sendo a forma mais comum, a dosagem por solução líquida injetável intramuscular. No entanto, há também as administradas por via oral e por via pulmonar (GOMEZ e VEHRING, 2022).

Tradicionalmente, as vacinas são preparadas com secagem pelo método de *Freeze Drying* (ou liofilização). O processo consiste na formulação de uma solução líquida, incorporando antígenos, estabilizadores, preservativos e outros componentes essenciais, e em seguida, a realização do congelamento controlado, a fim de evitar a formação de grandes cristais de gelo. Posteriormente, o produto congelado é transferido para uma câmara de vácuo, onde ocorre sublimação da água, que passa diretamente do estado sólido para o vapor, deixando para trás uma matriz composta dos componentes da vacina. Por fim, há uma segunda secagem, a fim de retirar qualquer umidade remanescente, na qual há um leve aumento na temperatura, e que somado ao ambiente de vácuo, esse processo assegura a completa eliminação da água e a preservação da estabilidade da vacina (HANSEN et al, 2015).

Essa técnica é a mais utilizada para a produção de vacinas uma vez que é extremamente eficiente na preservação de seus princípios ativos, estendendo a vida útil da vacina e mantendo a eficácia dos imunizantes. Para tanto, esse é um processo intrincado de várias etapas, o que dificulta sua escalabilidade para produção em massa, aumenta o custo de produção de uma unidade e restringe as características da solução que será secada (como exemplo, solução com baixa solubilidade e alta concentração).

Igualmente, para a preservação da eficiência da vacina, é necessário não somente um processo rigoroso na fabricação, mas também uma infraestrutura adequada e capaz de armazenar, transportar e distribuir as vacinas em baixa temperatura até a aplicação na

população. Estima-se que 80% do custo da vacina está na necessidade de manter a cadeia da vacina a frio, o que para países de baixa renda, sem instalações de armazenamento minimamente capacitados, a manutenção da cadeia a frio é improvável (HANSEN et al, 2015).

A secagem via *Spray Drying*, por ser um processo contínuo, foi implementado na indústria farmacêutica e biofarmacêutica, principalmente, por conta da necessidade de uma produção em escala haja vista uma população cada vez maior. Soma-se a isso, o *spray-dryer* apresenta uma capacidade significativa de formular agentes ativos de molécula pequenos, controlando o tamanho, as propriedades físico-químicas, a estrutura e a morfologia das partículas. Por fim, a técnica tem sido utilizada especialmente na entrega pulmonar de agentes terapêuticos, uma vez que proporciona uma melhora na taxa de dissolução de soluções de baixa solubilidade, estabiliza moléculas biológicas e apresenta baixa perda de reagente durante a produção (GOMEZ e VEHRING et al, 2022).

A aplicação do *spray-dryer* para secagem de vacinas apresenta várias vantagens em relação ao processo *Freeze Drying*. O primeiro apresenta operação contínua, trazendo a escalabilidade, enquanto o segundo é realizado em batelada. O primeiro é realizado em menor tempo, na ordem de segundos, enquanto o segundo é realizado na ordem de dias. Essas duas primeiras características somadas resultam em uma maior capacidade de produção. Além disso, os pós provenientes do *spray-dryer* apresentam maior estabilidade e doses mais personalizáveis (de acordo com a dispersão). Por fim, o *spray-dryer* é capaz de lidar com soluções de alta concentração e proporciona adaptabilidade na produção de vacinas, o que resulta em diferentes possibilidades de administração, seja oral, pulmonar ou transdérmica.

Por outro lado, o processo *Freeze Drying* ainda é a melhor técnica uma vez que a maioria dos princípios ativos são extremamente sensíveis e apresentam uma degradação acelerada. É observado na literatura que vacinas vivas liofilizadas (vacinas desenvolvidas por formulação líquida) podem apresentar taxa de degradação da ordem de 10% por hora, mesmo em condições refrigeradas. Porém, já foi observado no processo de descongelamento do material líquido congelado, taxas de degradação da ordem de 30%. Dessa forma, o *Freeze Drying* é uma abordagem viável e apropriada para fins de estabilização de vacinas. Por fim, o *spray-dryer*, por proporcionar a remoção da água, pode produzir vacinas secas que são menos sensíveis a degradação induzida por temperatura e degradação por vias que são facilitadas por água, e modo que, é também uma alternativa para produção de vacinas estáveis (GHAEMMAGHAMIAN et al, 2022).

A tuberculose é uma doença infecciosa causada pela bactéria *Mycobacterium tuberculosis* e transmitida pelo ar. Seus sintomas incluem tosse persistente, febre, perda de

peso e sudorese noturna. A vacina BacilleCalmette-Guerin (BCG) é a mais comumente utilizada para a imunização da população humana contra tuberculose. No entanto, ela apresenta algumas inconveniências como ineficiência contra todas as formas de tuberculose, imunidade que enfraquece ao longo do tempo, entre outras. Com isso, surgem algumas alternativas a fim de sanar ou reduzir as devidas inconveniências. A formulação de uma vacina a fim de servir como um promissor adjuvante a vacina BCG, cujo sistema é o ID93 + GLA-SE (uma recombinação de quatro antígenos da bactéria), o estabilizante principal é a trealose e o agente dispersante é a trileucina foi secada em um *spray-dryer* customizado e de escala laboratorial a uma temperatura do ar de entrada de 65°C.

A vacina em pó resultante se mostrou uma promitente alternativa uma vez que ao realizar testes de controle de armazenamento, enquanto a solução controle, cuja formulação é a mesma, mas não foi realizado o processo de secagem por *Spray Drying*, teve o antígeno 100% degradado ao armazenamento a 40°C em sete meses. Já a vacina em pó teve uma degradação de apenas 45% do antígeno ao ser armazenada a 50°C em doze meses. Pode-se comparar ainda que uma solução contendo apenas o antígeno teve sua degradação total em apenas um mês. A seguir determinou-se que as características morfológicas das partículas secas, como tamanho, estrutura interna e externa e a aglomeração, sendo que estas permaneceram relativamente idênticas após armazenamento em 40°C após um ano, com exceção do efeito de aglomeração, onde foi observado a maior conexão entre as partículas. Tais características observadas corroboram para a manutenção da eficiência da vacina em pó ao serem administradas por via oral após um longo prazo e armazenamento em temperatura próxima a temperatura ambiente ou maior (GOMEZ et al, 2021).

A influenza, popularmente conhecida como gripe, é uma enfermidade respiratória contagiosa provocada pelos vírus influenza A e B, manifestando-se predominantemente nas estações de outono e inverno. Seus sintomas característicos envolvem febre, tosse e dores musculares. A vacinação anual é essencial para a prevenção, sendo ajustada a cada ano devido à variabilidade genética do vírus. Essa adaptação garante uma eficácia contínua, alinhando-se com as cepas predominantes e proporcionando uma proteção mais robusta contra as variantes circulantes. A formulação de uma vacina com vírus da Influenza totalmente inativado (WIV) com trealose di-hidratada foi secada pelo processo de *Spray Drying* com nitrogênio, visto sua natureza inerte, a pressão fixa de 5 bar.

Parâmetros como temperatura de entrada e vazão de entrada foram variados durante os experimentos a fim de maximizar as condições para a obtenção da vacina, sendo que as melhores condições foram obtidas a uma temperatura de entrada de ar a 135°C e uma vazão de entrada próximo de 13 L/min, dado que o *spray-dryer* era do tipo mini Buchi B-290. De

modo geral, quanto maior foi a vazão de entrada e a temperatura de entrada, maior foi a retenção do agente ativo e menor foi sua degradação durante o processo de secagem. Por fim, os princípios ativos das formulações obtidas mantiveram sua atividade mesmo depois de armazenadas a 60°C durante três meses (KANOJIA et al, 2016).

A poliomielite, também conhecida como paralisia infantil, é uma patologia altamente contagiosa e ocasionada pelo poliovírus. É transmitida principalmente por água contaminada e seus sintomas incluem febre, dor muscular e, em casos graves, paralisia. Em crianças, a poliomielite pode acarretar sequelas graves, fundamentando a ênfase global na vacinação como medida profilática. A formulação de uma vacina contendo três sorotipos da vacina de poliomielite inativada do Sabin (sIPV) com trealose di-hidratada foi secada por um processo de *Spray Drying* utilizando nitrogênio à 110°C como corrente de secagem.

A concentração da formulação e as combinações dos sorotipos foram otimizadas de modo a maximizar a atividade dos antígenos durante armazenamento por sete dias a uma temperatura de 40°C. Para o sorotipo do tipo 1, a recuperação pós secagem via *Spray Drying* foi de 98% e pós armazenamento permaneceu em 71%. Para os sorotipos do tipo 2 e 3, a recuperação pós *Spray Drying* foi de 97% e 56% e pós armazenamento foi de 71% e 37%, respectivamente. Contudo, a estabilidade durante processo de armazenagem a 40°C variou pelo sorotipo, sendo que a termo estabilidade do sorotipo 1 foi maior que a do sorotipo 2, e que por sua vez, foi maior que a do sorotipo 3. Entretanto, a produção dessa vacina é uma promissora alternativa para países em desenvolvimentos, uma vez que a infraestrutura necessária para a armazenagem e a distribuição é menor haja vista o não requisito da infraestrutura de cadeia fria (KANOJIA et al, 2018)

A COVID-19, originada pelo coronavírus SARS-CoV-2, é uma infecção respiratória que se disseminou globalmente. Seus sintomas, como febre, tosse e dificuldade respiratória, destacam a importância da vacinação para prevenção. As vacinas são continuamente desenvolvidas e atualizadas para enfrentar as variantes emergentes do vírus, fortalecendo a proteção da comunidade. A formulação de uma vacina de mRNA (da marca TriLinkBiotechnologies) com uma nanopartícula lipídica catiônica do tipo 306O<sub>i10</sub>, com a trealose hidratada como agente estabilizante e diluída em água, foi secada por um processo de *Spray Drying* cujo equipamento era de escala laboratorial, a temperatura de entrada era de 90°C e a temperatura de saída era de 54°C.

Como resultado, a vacina é uma promissora e adequada alternativa para vacinas inaláveis de COVID-19, apresentando tanto a preservação do agente ativo da vacina de mRNA como uma alta liberação dele. Por fim, dentro dos testes para averiguação de imunidade, houve a verificação de uma grande quantidade de células que carregam os mRNA,

indicando um grande potencial para a atividade imunológica adaptativa em seres humanos (FRIIS et al, 2023).

A mastite bovina, uma inflamação das glândulas mamárias em vacas, manifesta-se com uma diversidade de sintomas, como inchaço, calor e sensibilidade nas glândulas afetadas. Além disso, pode ocorrer alteração na consistência e no odor do leite. A prevenção da mastite bovina é crucial para a saúde do rebanho e a qualidade do leite, destacando a importância de práticas de higiene adequadas, manejo adequado e vacinação para proteger contra esta condição que pode afetar significativamente a produção leiteira. Os principais agentes causadores de mastite bovina incluem bactérias como *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Streptococcus agalactiae* e *Streptococcus uberis*. A vacina mais comum utilizada na imunização do rebanho consiste nesses principais agentes atenuados, e sua efetividade é dependente de condições climáticas e de infraestrutura. Para sua produção é necessário a adição de adjuvantes para a imunogenicidade, e o mais comum é a adição de sais de alumínio.

Como resultado, há uma vacina com alta capacidade de produzir imunidade humoral, mas baixa capacidade de produzir imunidade celular. Como alternativa, a adição dos óleos essenciais da peperina trazem uma alta resposta imune nas glândulas mamárias das vacas. Emulsões de óleos essenciais da peperina com hidroxipropilmetilcelulose em meio aquoso, ao serem secadas em *spray-dryer* a uma temperatura de entrada de 160°C, geraram microcápsulas que trouxeram significativa melhora nas produções dos tipos de imunoglobulina, especialmente as do tipo G, em testes laboratoriais, se tornando assim uma promitente adição para as vacinas contra a mastite bovina (CAMPRA et al, 2022).

## 4 CONCLUSÃO

É notório que a técnica de *Spray Drying* é de extrema importância para diversas indústrias químicas, haja vista sua capacidade de operação contínua, sua flexibilidade na elaboração do equipamento e no controle das variáveis, além da sua amplitude de aplicação nos mais diversos tipos de materiais. O presente trabalho explorou detalhadamente o processo de secagem via *Spray Drying* e seus impactos na indústria em geral e seus impactos no estado da arte de pesquisa e aplicação nas indústrias alimentícia e farmacêutica. Essa técnica tem sido fundamental para a produção, tanto de alimentos do cotidiano, como café, leite e cereais, bem como para a produção de alimentos fortificados, aromatizantes, e até mesmo na criação de produtos dietéticos. Neste caso, a elaboração de vacinas secas, pela indústria farmacêutica, se mostra um grande avanço para o acesso ampliado à imunização, haja vista a diminuição acentuada dos custos de produção, armazenamento e transporte, bem como o aumento da vida útil das vacinas e a variedade das formas de administração dos agentes imunizantes.

No contexto da indústria alimentícia, produtos cuja elaboração era inviável no passado visto sua rápida degradação, agora são viáveis graças à técnica de encapsulação. Os exemplos abordados de óleos e vitaminas elucidam que a microencapsulação dessas substâncias proporciona a proteção dos ingredientes ativos, de modo a aumentar o tempo de prateleira dos produtos e mantendo suas propriedades. Os alimentos microencapsulados permitem também, a criação de ingredientes funcionais com propriedades aprimoradas, como estabilidade, solubilidade e liberação controlada. As duas últimas características estão diretamente relacionadas com inovações na criação de produtos dietéticos, especialmente com a adição das vitaminas do complexo B e a vitamina D.

No contexto da indústria farmacêutica, a elaboração de vacinas secas para doenças como poliomielite, COVID-19, influenza e outras incluem a eficiência na preservação da estabilidade das vacinas, a redução dos custos logísticos e de armazenamento e, como consequência, o aumento da acessibilidade e distribuição global. Os exemplos de vacina seca de tuberculose e influenza, abordados no presente trabalho, mostraram a evidente redução de custos de armazenagem e logística, haja vista que nos testes de stress realizados em temperaturas próximas ou superior a temperatura ambiente, não houve sequer degradação do agente ativo, ou então, degradação parcial dele.



## 5 REFERÊNCIAS

BAJAJ, S. R.; MARATHE, S. J.; SINGHAL, R. S. Co-encapsulation of vitamins B12 and D3 using spray drying: Wall material optimization, product characterization, and release kinetics, *Food Chemistry*, Volume 335, 2021, 127642, ISSN 0308-8146. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.127642.

BETZ, M.; KULOZIK, U. Microencapsulation of bioactive bilberry anthocyanins by means of whey protein gels. *Procedia Food Science*, Volume 1, 2011, Páginas 2047–2056.

CAMPRA, N. A. et al. Spray-drying-microencapsulated *Minthostachysverticillata* essential oil and limonene as innovative adjuvant strategy to bovine mastitis vaccines. *Res VetSci*. Dezembro de 2022. Páginas 136-150. DOI: 10.1016/j.rvsc.2022.04.014. Epub 2022. PMID: 35792419.

ÇELIK, M. et al. Spray Drying and Pharmaceutical Applications from: Handbook of Pharmaceutical Granulation Technology. Quarta Edição. Editora India, 2021.

CHANGZHOU. Maierdun: Spraydryermachine, 2024. Centrifugal Spray Dryer. Disponível em: <https://www.spraydryermachine.com/supplier-3649449-centrifugal-spray-dryer>. Acesso em: 15 de maio de 2024

CHEN, H. H.; MUJUMDAR, A.S. Development and performance analysis of a new solar energy-assisted photocatalytic dryer. *Drying Technology*, v. 26, n. 4, p. 503–507, 2008.

CHRONAKIS, I.S.; TRIANTAFYLLOU, A.O.; ÖSTE, R. Solid-state characteristics and redispersible properties of powders formed by spray-drying and freeze-drying cereal dispersions of varying (1→3,1→4)- $\beta$ -glucan content. *Journal of Cereal Science*, Volume 40, 2004, Páginas 183-193, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2004.03.004>.

DE-LA-HABA, F. et al. Suitability in the microencapsulation of fish oil and in vitro bioaccessibility of omega-3 fatty acids, *Food Bioscience*, Volume 55, 2023, 103027, ISSN 2212-4292. DOI: 10.1016/j.fbio.2023.103027.

DURMAZ, Y. et al. Using spray-dried microalgae in ice cream formulation as a natural colorant: Effect on physicochemical and functional properties. *Algal Research*, Volume 47, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.101811>.

DESOBRY, S.A.; NETTO, F.M.; LABUZA, T.P. Comparison of Spray-Drying, Drum-Drying and Freeze-Drying for  $\beta$ -Carotene Encapsulation and Preservation. *Journal of Food Science*, Volume 62, 1997, Páginas 1158-1162. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1997.tb12235.

FANG, Y. et al. Functionality of milk protein concentrate: Effect of spray drying temperature. *Biochemical Engineering Journal*, Volume 62, 2012, Páginas 101-105, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2011.05.007>.

FOUST, A.S. et al. *Princípio das Operações Unitárias*. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1982.

FRASCARELI, E. C. et al. Effect of process conditions on the microencapsulation of coffee oil by spray drying. *Food Bioproducts Processing*, Volume 90, 2012, Páginas 413–424.

FRIIS, K. P. et al. Spray dried lipid nanoparticle formulations enable intratracheal delivery of mRNA. *J Control Release*. Novembro de 2023. Páginas 389-401. DOI: [10.1016/j.jconrel.2023.09.031](https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2023.09.031).

GHAEMMAGHAMIAN, Zahra et al. Stabilizing vaccines via drying: Quality by design considerations. *Advanced Drug Delivery Reviews*. Volume 187. 2022. ISSN 0169-409X. DOI: [10.1016/j.addr.2022.114313](https://doi.org/10.1016/j.addr.2022.114313).

GHARSALLAOUI, A. et al. Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview, *Food Research International*, Volume 40, 207, Páginas 1107-1121. DOI: [10.1016/j.foodres.2007.07.004](https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.07.004).

GIBBS, B. F. et al. Encapsulation in the food industry: A review. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, Volume 50, 1999, Páginas 213–224.

GOMEZ, Mellissa; VEHRING, Reinhard. Spray Drying and Particle Engineering in Dosage Form Design for Global Vaccines. *Journal of Aerosol Medicine and Pulmonary Drug Delivery*. Junho de 2022. Páginas 121-138. DOI: [10.1089/jamp.2021.0056](https://doi.org/10.1089/jamp.2021.0056).

GOMEZ, Mellissa et al. Evaluation of the stability of a spray-dried tuberculosis vaccine candidate designed for dry powder respiratory delivery. *Vaccine*, Volume 39, Issue 35, 2021, Páginas 5025-5036, ISSN 0264-410X. DOI: [10.1016/j.vaccine.2021.07.002](https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2021.07.002).

HANSEN, L. J. et al. Freeze-drying of live virus vaccines: A review. *Vaccine*, Volume 33, Issue 42, 2015, Páginas 5507-5519, ISSN 0264-410X. DOI: [10.1016/j.vaccine.2015.08.085](https://doi.org/10.1016/j.vaccine.2015.08.085).

ISHWARYA, S. P. et al. Spray-Freezing-Drying approach for soluble coffee processing and its effect on quality characteristics. *Journal of Food Engineering*, Volume 149, 2015, Páginas 171-180, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.10.011>.

JAFARI, S. M.; VAKILI, S.; DEHNAD, D. Production of a Functional Yogurt Powder Fortified with Nanoliposomal Vitamin D Through Spray Drying. *Food Bioprocess Technol*, Volume 12, 2019, Páginas 1220–1231. DOI: [10.1007/s11947-019-02289-9](https://doi.org/10.1007/s11947-019-02289-9).

KANOJIA, G. et al. A Design of Experiment approach to predict product and process parameters for a spray dried influenza vaccine. *International Journal of Pharmaceutics*,

Volume 511, Edição 2. 2016. Páginas 1098-1111. ISSN 0378-5173. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2016.08.022.

KANOJIA, G. et al. The effect of formulation on spray dried Sabin inactivated polio vaccine. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*. Volume 129. 2018. Páginas 21-29. ISSN 0939-6411. DOI: 10.1016/j.ejpb.2018.05.021.

KANWAL, S. et al. Development of chitosan based microencapsulated spray dried powder of tuna fish oil: oil load impact and oxidative stability. *Brazilian journal of biology*, Volume 84, 2021, e254010. DOI: 10.1590/1519-6984.254010.

KIM, Y. D.; MORR, C. V. Microencapsulation properties of gum arabic and several food proteins: spray dried orange oil emulsion particles. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, Volume 44, 1996, Páginas 1314–1320.

LANGRISH, T. A. G. Spray drying and crystallization. In: *Spray Drying Technology*. Volume 1. Ed. WOO, M. W.; MUJUMDAR, A. S.; DAUD, W. R. W, 2010, ISBN: 978-981-08-6270-1. Publicadoem Singapura, Páginas 61-76.

LI, X. et al. Application prospect of replacement of fish meal with spray-dried egg meal in diets for swimming crab (*Portunustrituberculatus*). *Aquaculture Reports*, Volume 32, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2023.101745>.

MAARTEN, A.I. et al. Single droplet drying for optimal spray drying of enzymes and probiotics. *Trends in Food Science & Technology*, Volume 27, 2012, Páginas 73-82, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.05.006>.

MASTERS, K. et al. *Spray drying handbook (terceiraedição)*. George Godwin Limited, 1979. John Wiley & Sons, 1979. 687 páginas. *AIChE J.*, v. 26. DOI: 10.1002/aic.690260430.

MCCABE, W.; SMITH, J.; HARRIOTT, P. *Unit Operations of Chemical Engineering*. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1993.

MERRELL-SOULE COMPANY. *Merrell-Soule Products, Powdered Milk and None Such Mince Meat*. Nova Iorque, 1919.

MUJUMDAR, A. S. *Handbook of Industrial Drying*. Terceira Edição. CRC Press. 2006. DOI: 10.1201/9781420017618.

NEDOVIC, V. et al. An overview of encapsulation technologies for food applications, *Procedia Food Science*, Volume 1, Páginas 1806-1815, ISSN 2211-601X. DOI: 10.1016/j.profoo.2011.09.265.

OIKONOMOPOULOU, V. et al. Optimization of encapsulation of stevia glycosides through electrospraying and spray drying. *Food Hydrocolloids*, Volume 131, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107854>.

OLIVEIRA, W. P. et al. Spray drying of food and herbal products. In: Spray Drying Technology. Volume 1. Ed. WOO, M. W.; MUJUMDAR, A. S.; DAUD, W. R. W, 2010, ISBN: 978-981-08-6270-1. Publicado em Singapura, Páginas 113-156.

PASSOS, M. L.; BIRCHAL, V. S. Manipulating physical properties of powder. In: Spray Drying Technology. Volume 1. Ed. WOO, M. W.; MUJUMDAR, A. S.; DAUD, W. R. W, 2010, ISBN: 978-981-08-6270-1. Publicado em Singapura, Páginas 37-60.

PATEL, R. P.; PATEL, M. P.; SUTHAR, A. M. Spray Drying technology: an overview. Indian Journal of Science and Technology, Volume 2, Número 10, Páginas 44-47. 2009.

PATEL, S. S. et al. Microencapsulation of curcumin by spray drying: Characterization and fortification of milk. J Food Sci Technol, Volume 59, 2022, Páginas 1326–1340. DOI: 10.1007/s13197-021-05142-0.

PERCY, S. Improvement in Drying and Concentrating of Liquid Substances by Atomizing, Volume 125, 1872.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O. Perry's handbook of chemical engineering. 7. ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1997.

PETRI, I.J. Operações Unitárias IV (OP4). 2019. Departamento de Engenharia (DEG), Universidade Federal de Lavras. Apresentação em Power Point. Disponível em: <[https://docs.wixstatic.com/ugd/b9cd9f\\_09c52d0ca63943578e7241bcd949a28e.pdf?index=true](https://docs.wixstatic.com/ugd/b9cd9f_09c52d0ca63943578e7241bcd949a28e.pdf?index=true)>. Acesso em: 15 de maio de 2024.

RAY, S.; RAYCHAUDHURI, U.; CHAKRABORTY, R. An overview of encapsulation of active compounds used in food products by drying technology, Food Biosci. Volume 13, 2016, Páginas 76–83. DOI: 10.1016/j.fbio.2015.12.009.

SAENZ, C. et al. Microencapsulation by spray drying of bioactive compounds from cactus pear (*Opuntia ficus-indica*). Food Chemistry, Volume 14, 2009, Páginas 616–622.

SAMBORSKA, K. et al. 2022. Innovations in spray drying process for food and pharma industries. J. Food Eng., Volume 321, 2022, 110960, DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2022.110960.

SANTOS, Daniel et al. Spray Drying: An Overview. In: PIGNATELLO, Rosario; MUSUMECI, Teresa (Eds.). Biomateriais. Rijeka: IntechOpen, 2017. Capítulo 2. DOI: 10.5772/intechopen.72247.

SARKHEL, S. et al. Studies on supercritical fluid extraction and spray drying effect on the quality of instant tea of Mulberry leaves (*Morus alba* L.). Measurement: Food, Volume 7, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.meafoo.2022.100052>.

SCHRIJNEMAKERS, A. et al. Mullite coatings on ceramic substrates: Stabilisation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> suspensions for spray drying of composite granules suitable for reactive plasma spraying, *Journal of the European Ceramic Society*. Volume 29, 2009, Páginas 2169-2175, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2009.01.031>.

SELVAMUTHUKUMARAN, M. *Handbook on Spray Drying Applications for Food Industries*. 2019. Primeira edição, CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429055133>.

SHAHIDI, F.; HAN, X. Q. Encapsulation of food ingredients. *Critical Review in Food Science and Nutrition*, Volume 33, 1993, Páginas 501–547.

SHANG, J. et al. Effect of operating conditions on structure and digestibility of spray-dried corn starch. *Food Research International*, Volume 174, 2023, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113511>.

TIMILSENA, Y. P.; HAQUE, M. A.; ADHIKARI, B. Encapsulation in the Food Industry: A Brief Historical Overview to Recent Developments. *Food and Nutrition Sciences*, Volume 11, 2020, Páginas 481-508. DOI: [10.4236/fns.2020.116035](https://doi.org/10.4236/fns.2020.116035).

TOLDRA, M. et al. Functional properties of a spray-dried porcine red blood cell fraction treated by high hydrostatic pressure. *Food Chemistry*, Volume 88, 2004, Páginas 461-468, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.01.060>.

TURCHIULI, C. et al. Oil encapsulation by spray drying and fluidised bed agglomeration, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, Volume 6, Issue 1, 2005, Páginas 29-35, ISSN 1466-8564. DOI: [10.1016/j.ifset.2004.11.005](https://doi.org/10.1016/j.ifset.2004.11.005).

ZHANG, Y. et al. Catalytic performance of spray-dried Cu/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub> catalysts for slurry methanol synthesis from CO<sub>2</sub> hydrogenation. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, Volume 15, 2016, Páginas 72-82, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2016.01.005>.