



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS



ORDARLEI JOSÉ APARECIDO SILVA

CONSERVAÇÃO DE ALIMENTOS UTILIZANDO FLUIDIZAÇÃO

Patos de Minas

2025

ORDARLEI JOSÉ APARECIDO SILVA

CONSERVAÇÃO DE ALIMENTOS UTILIZANDO FLUIDIZAÇÃO

Projeto Final de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Corrêa de Santana

Patos de Minas

2025



HOMOLOGAÇÃO Nº 131

ORDARLEI JOSÉ APARECIDO

Conservação de alimentos utilizando fluidização

Projeto Final de Curso aprovado nesta data para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) - *campus* Patos de Minas (MG) pela banca examinadora constituída por:

Prof. Dr. Ricardo Corrêa de Santana
Orientador - FEQUI/UFU

Prof. Dr. Henrique Coutinho de Barcelos Costa
FEQUI/UFU

Prof.^a Dr.^a Marta Fernanda Zotarelli
FEQUI/UFU

Patos de Minas, 8 de outubro de 2025.



Documento assinado eletronicamente por **Ricardo Correa de Santana, Professor(a) do Magistério Superior**, em 08/10/2025, às 10:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marta Fernanda Zotarelli, Professor(a) do Magistério Superior**, em 08/10/2025, às 10:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Henrique Coutinho de Barcelos Costa, Professor(a) do Magistério Superior**, em 08/10/2025, às 10:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6748089** e o código CRC **4FA5FBA9**.

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S586
2025

Silva, Ordarlei José Aparecido, 2001-
Conservação de alimentos utilizando fluidização [recurso
eletrônico] / Ordarlei José Aparecido Silva. - 2025.

Orientadora: Ricardo Correa de Santana.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade
Federal de Uberlândia, Graduação em Engenharia de Alimentos.

Modo de acesso: Internet.

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Alimentos - Indústria. I. Santana, Ricardo Correa de, 1981-,
(Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em
Engenharia de Alimentos. III. Título.

CDU: 664

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2: Gizele
Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

Dedico este trabalho a meus pais por todo o
apoio durante minha vida e formação, sem eles
nada teria sido possível.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me permitido chegar até aqui, por ter me dado saúde e força para vencer os desafios no caminho.

Agradeço à minha família, meu pai Ordalio e minha mãe Maria José, por sempre me apoiarem, por serem meu porto seguro, sem eles nada teria sido possível. Mesmo que o caminho fosse difícil foram eles que confiaram em mim e me motivaram a seguir em frente. Devo tudo a eles.

Agradeço à minha irmã Maiana pelo apoio em minha caminhada e por sempre estar presente quando precisava.

Agradeço ao professor doutor Ricardo Correa de Santana por me orientar e pelo tempo dedicado a me ajudar no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço às minhas amigas Bruna Marra e Julia Caixeta pelo apoio durante cada aula do curso e por todos os momentos divertidos e pelas dores que compartilhamos nesse período.

Agradeço ao Programa Pomar e ao projeto da Semente à Xícara por terem feito parte da minha formação acadêmica e por todas as oportunidades que tive enquanto fui membro.

Agradeço a todos os colegas e professores que tive durante a minha graduação.

RESUMO

A conservação de alimentos é um tema de grande importância para garantir o fornecimento de alimentos de qualidade para a população. Diversos processos são utilizados com esse objetivo, entre eles a fluidização, que consiste na aplicação do escoamento de um fluido para movimentar partículas sólidas, criando um meio turbulento com elevadas taxas de transferência de calor. O objetivo deste estudo foi realizar uma revisão bibliográfica sobre a aplicação da fluidização como método de conservação de alimentos, com foco nos processos de secagem e congelamento. Foram discutidas as principais características que regem e definem o processo de fluidização. Também foram apresentadas equações que estabelecem parâmetros importantes para avaliação de processos em meios porosos, como a queda de pressão. Existem diferentes tipos de leitos sólidos. Nos leitos fixos, o material permanece estático, enquanto nos leitos fluidizados o material sólido se movimenta intensamente devido ao escoamento do fluido. Há ainda variações do leito fluidizado, como o leito vibrofluidizado e o leito de jorro. Na secagem, obtêm-se produtos de alta qualidade, com diferentes granulometrias, devido às elevadas taxas de transferência de calor, que tornam o processo mais rápido e menos danoso à estrutura dos alimentos, além de poderem contribuir para a redução do consumo energético em comparação a métodos tradicionais mais lentos, como a liofilização ou a secagem convencional por ar quente. No congelamento, a maior velocidade do processo permite a formação de cristais de gelo menores, que não danificam a estrutura celular do alimento, favorecendo a melhor conservação de suas características. Em resumo, a técnica de fluidização apresenta diversas vantagens e aplicações para a conservação de alimentos, proporcionando ganhos em tempo, eficiência e de qualidade.

Palavras-chave: leito fluidizado, secagem de alimentos, congelamento de alimentos, transferência de calor.

ABSTRACT

Food preservation is a subject of great relevance to ensure the supply of high-quality food to the population. Various processes are employed for this purpose, among which fluidization stands out. This technique involves the application of a fluid flow to promote the movement of solid particles, generating a turbulent medium characterized by high heat and mass transfer rates. The aim of this study was to conduct a literature review on the application of fluidization as a method for food preservation, with emphasis on drying and freezing processes. The fundamental principles that govern and define the fluidization process were discussed, as well as equations that establish key parameters for the evaluation of processes in porous media, particularly pressure drop. Different types of solid beds were considered: in fixed beds, the material remains static, whereas in fluidized beds, solid particles exhibit intense movement due to fluid flow. Variants of fluidized beds, such as vibro-fluidized beds and spouted beds, were also addressed. In drying, fluidization enables the production of high-quality products with different particle size distributions, due to elevated heat transfer rates that render the process faster and less detrimental to food structure, while also contributing to lower energy consumption compared to slower conventional methods such as freeze-drying or hot-air drying. In freezing, the higher cooling rates favor the formation of smaller ice crystals, which preserve the cellular structure of foods and thereby maintain their quality attributes. In summary, the fluidization technique offers several advantages and applications in food preservation, providing improvements in processing time, energy efficiency, and product quality.

Keywords: fluidized bed, food drying, food freezing, heat transfer.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	Objetivo	12
2	METODOLOGIA.....	13
2.1	Análise bibliométrica.....	13
2.1.1	Biblioshiny	13
2.1.2	VOSviewer	15
2.1.3	CitNetExplorer	17
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	21
3.1	Conservação de alimentos	21
3.2	Processos com fluidização.....	24
3.2.1	Leitos porosos.....	24
3.2.2	Equações do escoamento	25
3.2.3	Fluidização	27
3.3	Tipos de leito	32
4	APLICAÇÕES DA FLUIDIZAÇÃO EM DIFERENTES PROCESSOS.....	37
4.1	Secagem.....	37
4.2	Congelamento	40
5	ESTUDOS DA LITERATURA SOBRE SECAGEM E CONGELAMENTO EM LEITO FLUIDIZADO	42
6	CONCLUSÃO.....	63
7	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

A produção de alimentos engloba um amplo conjunto de atividades econômicas, representando um dos setores de maior movimentação de capital no mundo. Com o crescimento populacional e econômico dos países, aumenta também a demanda mundial por alimentos e insumos para serem utilizados tanto na agricultura quanto na produção animal, o que reforça a necessidade de métodos eficazes para conservar esses produtos (Fukase; Martin, 2020).

Diversos métodos de conservação são utilizados para prolongar a vida útil dos alimentos, fundamentados em diferentes princípios. Entre eles, destacam-se a aplicação de calor, como nos processos de secagem, que promovem a remoção parcial da umidade e, conseqüentemente, a redução da atividade de água, retardando reações químicas, diminuindo a atividade enzimática e inibindo o crescimento microbiano responsável pela deterioração. Outro recurso amplamente empregado é a aplicação do frio — por meio da refrigeração ou do congelamento — que reduz a taxa de reações químicas, enzimáticas e metabólicas naturais, preservando parcialmente a qualidade sensorial e nutricional do alimento por períodos mais longos. Nesse sentido, diferentes métodos de secagem e de congelamento têm sido empregados e estudados, isoladamente ou em combinação, visando não apenas prolongar a vida útil dos alimentos, mas também preservar suas características nutricionais, além de reduzir perdas ao longo da cadeia produtiva (Earle, 1983; Fellows, 2006; Çengel; Ghajar, 2020; Ibarz; Barbosa-Cánovas, 2020; Singh; Heldman; Erdogdu, 2025).

A água compõe uma proporção substancial de quase todos os alimentos e, portanto, a secagem e o congelamento têm um efeito físico marcante sobre os alimentos (Earle, 1983; Çengel; Ghajar, 2020). O congelamento e a secagem são métodos de conservação comuns de serem aplicadas na indústria de alimentos e em comparação com outros métodos, podem apresentar custos menores (Gomes Vaz *et al.*, 2023; Khodadadi; Masoumi, 2025; Santos *et al.*, 2003; Zhu *et al.*, 2024).

A secagem é uma operação unitária de transferência simultânea de calor e massa que consiste na retirada parcial da umidade excessiva contida no material úmido, geralmente por meio da evaporação causada pela convecção forçada de ar aquecido (fonte de calor). O objetivo primordial é reduzir a atividade de água, permitindo armazenamento e disponibilização do produto com segurança microbiológica, ao mesmo tempo em que se busca preservar características desejáveis e a qualidade global. Trata-se de um dos métodos mais empregados na conservação de alimentos de origem animal e vegetal (Fellows, 2006). A remoção de água

do alimento mediante do uso de calor calor dificulta o crescimento microbiano e, dependendo da temperatura utilizada, pode-se eliminar certos patógenos (Li *et al.*, 2025a). Entretanto, o produto pode sofrer alterações química, físicas e reológicas, além de alguns processos serem relativamente demorados e energeticamente onerosos, em razão da baixa eficiência térmica (Khodadadi; Masoumi, 2025; Mujumdar; Law, 2010; Sadin; Chegini; Khodadadi, 2017; Salehi, 2021), ressaltando a importância tanto do desenvolvimento de métodos emergentes quanto da otimização e do aperfeiçoamento de técnicas consolidadas.

O congelamento é outro método de conservação, baseado na aplicação de temperaturas gélidas, que inibe reações químicas e reduz o crescimento microbiano nos alimentos. Assim como na secagem, o processo envolve transferência de calor, incluindo calor sensível e latente. De modo geral, o congelamento pode ser dividido em três etapas: (i) pré-congelamento ou pré-resfriamento — resfriamento do alimento até o ponto de congelamento, com remoção de calor sensível; (ii) congelamento propriamente dito — a mudança de fase, com remoção de calor latente; e, (iii) pós-congelamento ou sub-resfriamento — resfriamento até a temperatura final desejada (negativa), com remoção de calor sensível do alimento já congelado. Devido à presença de substâncias (solutos) dissolvidas na água, os alimentos apresentam uma depressão do ponto de congelamento em relação à água pura e não congelam a uma temperatura única, mas em uma faixa de temperaturas. Em níveis inferiores aos do ponto de congelamento, formam-se cristais de gelo quase puros, enquanto a fase líquida remanescente se torna progressivamente mais concentrada. Mesmo em temperaturas bastante baixas, parte da água permanece não congelada, em soluções de elevada concentração (Earle, 1983; Çengel; Ghajar, 2020; Singh; Heldman; Erdogdu, 2025).

Tanto na secagem quanto no congelamento, a transferência de energia térmica envolve calor sensível, associado à variação de temperatura, e calor latente, relacionado às mudanças de fase, como fusão e evaporação. Esses processos dependem de mecanismos de transmissão de calor para o alimento, incluindo condução, convecção e radiação. Esses dois processos podem ser conduzidos por diferentes métodos: convencionais/tradicionais ou não convencionais/emergentes, e em distintos tipos de equipamentos, que apresentam princípios de funcionamento variados, tempos de operação e custos diferenciados, além de adequações específicas conforme a natureza, a forma e o tamanho das matérias-primas. Consequentemente, exercem impactos diversos sobre as características físico-químicas, nutricionais, sensoriais e tecnológicas que definem a qualidade final do produto. Por exemplo, a depender do método de congelamento, o processo pode ser conduzido de forma lenta ou rápida, o que afeta diretamente a formação dos cristais de gelo, em termos de velocidade, tamanho e quantidade, e,

consequentemente, a preservação da estrutura e das características sensoriais: congelamentos rápidos tendem a conservar melhor o produto, enquanto congelamentos lentos favorecem a formação de cristais maiores, que podem provocar danos celulares (Çengel; Ghajar, 2020; Ibarz; Barbosa-Cánovas, 2020; Singh; Heldman; Erdogdu, 2025).

No caso da secagem, podem ser citados: secadores de bandeja, de túnel, pneumáticos, por atomização, rotatórios (*rotary dryers*), de tambor (*roller* ou *drum dryers*), por micro-ondas, liofilizadores e de leito fluidizado. Para o congelamento, destacam-se os congeladores com ar forçado (incluindo leito fluidizado), por placas, por imersão e por criogenia (Earle, 1983).

Entre essa diversidade de métodos, tanto na secagem quanto no congelamento, os sistemas convectivos — que utilizam, respectivamente, ar quente como meio secante e ar frio como meio de congelamento — representam uma parcela significativa das aplicações industriais. Dentre eles, o leito fluidizado (fluidização) é empregado em ambas as operações (Earle, 1983; Barbosa-Cánovas, 2020). A fluidização gasosa é uma operação em que uma corrente de gás ascendente percola através de um leito de partículas sólidas apoiadas sobre uma placa distribuidora, de modo que, ao atingir uma velocidade adequada, a força exercida pelo fluido equilibra o peso das partículas, promovendo sua suspensão. Nessa condição, o leito sólido passa a comportar-se como um fluido, com movimentação e circulação intensa das partículas juntamente com o gás, o que elimina regiões estagnadas e reduz gradientes de temperatura, favorecendo elevadas taxas de transferência de calor e massa. Esse processo merece destaque, constituindo uma alternativa atrativa por permitir tempos relativamente curtos de operação. O intenso movimento e a interação entre ar e partículas (bem como entre as próprias partículas), aliados à elevada área superficial disponível, resultam em altos coeficientes convectivos (Cremasco, 2021; Cheng; Langrish, 2025), o que explica sua eficácia tanto na secagem quanto no congelamento rápido.

Diante do exposto, nota-se que a escolha adequada do método de conservação é determinante para a manutenção da qualidade e da segurança dos alimentos, bem como para a redução de perdas ao longo da cadeia produtiva. Entre as alternativas disponíveis, a fluidização apresenta particular relevância, pois permite elevadas taxas de transferência de calor e massa, além de oferecer uniformidade de tratamento, tempos de processo reduzidos e possibilidade de aplicação tanto na secagem quanto no congelamento de alimentos. Considerando a crescente demanda por processos eficientes e economicamente viáveis, torna-se pertinente reunir e analisar o conhecimento disponível na literatura sobre a aplicação da fluidização nessas duas operações unitárias de conservação, destacando a eficiência do processo e os efeitos sobre os alimentos, seus avanços, limitações e perspectivas de uso.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo geral realizar uma revisão bibliográfica sobre a utilização da fluidização como método de conservação de alimentos, reunindo e analisando informações disponíveis na literatura acerca de sua eficiência e de seus efeitos sobre as características dos produtos. Os objetivos específicos são:

- Sintetizar os conceitos fundamentais e os princípios gerais da fluidização aplicados a sistemas de leito fluidizado;
- Reunir informações disponíveis na literatura sobre a aplicação da fluidização na secagem e no congelamento de diferentes tipos de alimentos;
- Identificar os principais efeitos dessa técnica sobre as características físico-químicas, tecnológicas, nutricionais e sensoriais dos produtos;
- Comparar resultados reportados em diferentes estudos, destacando vantagens, limitações e potenciais desafios do uso da fluidização.

2 METODOLOGIA

A busca por publicações foi realizada na base de dados *Web of Science*. As palavras-chave selecionadas para o trabalho foram *food preservation, fluidization, fluidized bed, drying, freezing, individual quick freezing*, englobando a ideia central da conservação de alimentos associada aos principais processos nos quais a fluidização pode ser aplicada (secagem e congelamento). A pesquisa foi efetuada em *All Fields* (todos os campos).

Os resultados foram inicialmente filtrados por área, aplicando-se o filtro de *Food Science & Technology*, disponível na própria plataforma.

2.1 Análise bibliométrica

A análise bibliométrica é uma ferramenta usada para explorar, mapear e interpretar grandes volumes de dados científicos, permitindo identificar padrões de colaboração, tendências temporais e áreas emergentes de um campo específico, notoriamente com caráter descritivo (Donthu *et al.*, 2021a). Entre suas limitações, destaca-se a incapacidade de projeções confiáveis em horizontes a longo prazo, sendo mais adequada para descrever impactos e tendências a curto prazo (Donthu *et al.*, 2021b).

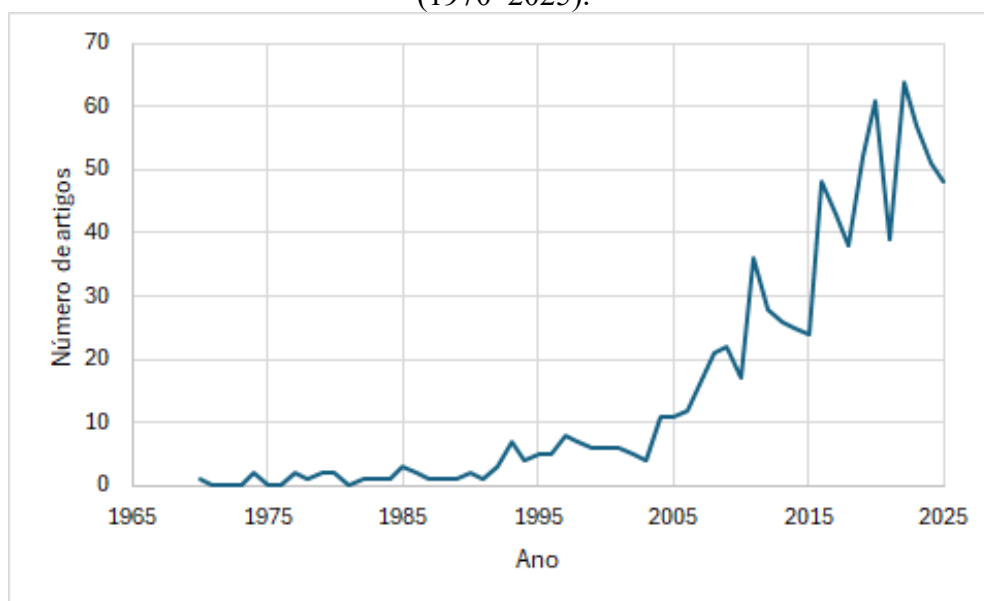
Para esse trabalho, a busca sistemática foi realizada na *Web of Science* e o método de busca utilizado foi como *topic search* (pesquisa por assunto: título, resumo, *keyword plus* e palavras-chave dos autores). Optou-se por termos em inglês referentes à fluidização, como *fluidization* e *fluidized*, para garantir cobertura ampla da literatura internacional. Especificamente, aplicou-se truncamento ao termo relacionado com fluidização com a expressão “*fluidiz**”, o que retornou 57.137 registros em um recorte amplo. Para restringir o campo à engenharia de alimentos, combinou-se esse termo com “*food*” (alimento), de forma que a expressão de busca final foi “*fluidiz* and food*”, resultando em 893 registros. Após filtragem por tipo documental (apenas artigos originais e artigos de revisão), e aplicação do filtro *Food Science & Technology*, permaneceram 840 registros, que compuseram o conjunto final utilizado nas análises bibliométricas descritas a seguir, destinadas, entre outros para responder os questionamentos:

- (1) Em quais processos o leite fluidizado tem sido mais empregado?
- (2) Quais os autores e trabalhos se destacam ao longo do tempo?

2.1.1 Biblioshiny

Os 840 registros foram adicionados ao *Biblioshiny* (interface do pacote *bibliometrix* em R) para o tratamento e obtenção das informações descritivas do conjunto de dados. O intervalo temporal (*timespan*) desses artigos foi de 1970 a 2025. A Figura 1 apresenta a distribuição anual da produção científica, observando-se o grande crescimento a partir de 2005, seguido por variações na série temporal.

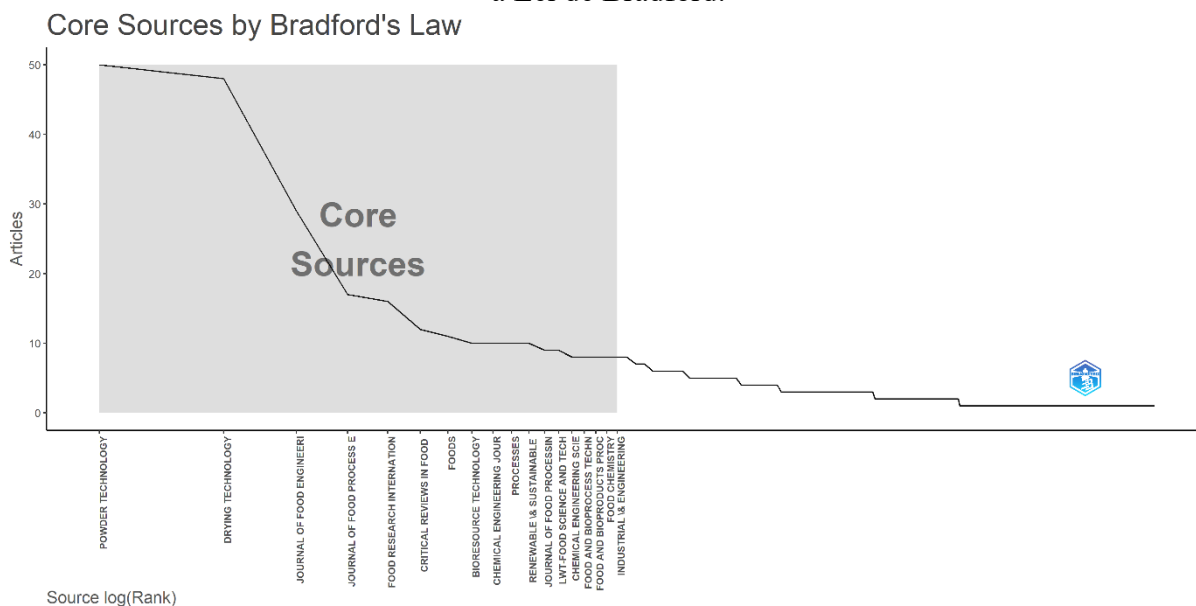
Figura 1 - Distribuição anual da produção científica sobre fluidização aplicada a alimentos (1970–2025).



Fonte: O autor.

Na bibliometria, a lei de Bradford indica que um pequeno número de periódicos concentra a maioria das publicações sobre um tema, enquanto o restante dos trabalhos se distribui por um número crescente de periódicos (Shenton; Hay-Gibson, 2011). No conjunto de dados analisado, conforme mostra a Figura 2, verifica-se esse padrão: as principais fontes foram *Powder Technology*, *Drying Technology* e *Journal of Food Engineering*. A Tabela 1 apresenta a relação do número de trabalhos publicados em cada periódico.

Figura 2 - Principais periódicos de publicação sobre fluidização aplicada a alimentos, segundo a Lei de Bradford.



Fonte: O autor.

Tabela 1 - Número de artigos sobre fluidização aplicada a alimentos publicados em cada periódico.

PERIÓDICO	Rank	Frequência
POWDER TECHNOLOGY	1	50
DRYING TECHNOLOGY	2	48
JOURNAL OF FOOD ENGINEERING	3	29
JOURNAL OF FOOD PROCESS ENGINEERING	4	17
FOOD RESEARCH INTERNATIONAL	5	16
CRITICAL REVIEWS IN FOOD SCIENCE AND NUTRITION	6	12
FOODS	7	11
BIORESOURCE TECHNOLOGY	8	10
CHEMICAL ENGINEERING JOURNAL	9	10
PROCESSES	10	10
RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS	11	10
JOURNAL OF FOOD PROCESSING AND PRESERVATION	12	9
LWT-FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY	13	9

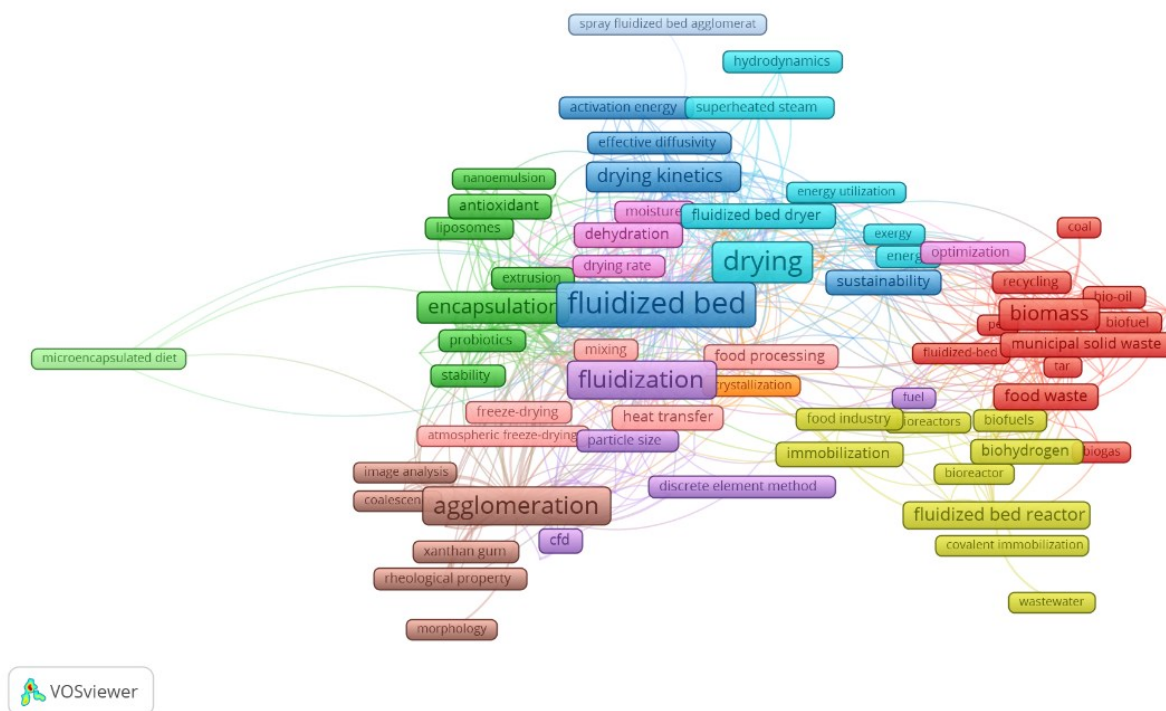
Fonte: O autor.

2.1.2 VOSviewer

Utilizou-se o *VOSviewer* para análise de co-ocorrência de palavras-chave entre 840 trabalhos avaliados. Na rede (Figura 3) cada palavra representa um nó — cujo tamanho indica a frequência de ocorrência —, e as ligações entre nós representam co-ocorrências, com a espessura dos vínculos proporcional ao número de co-menções. As cores identificam *clusters*

(grupo de nós fortemente conectados) (Donthu *et al.*, 2021). O algoritmo do *VOSviewer* detectou 12 *clusters*.

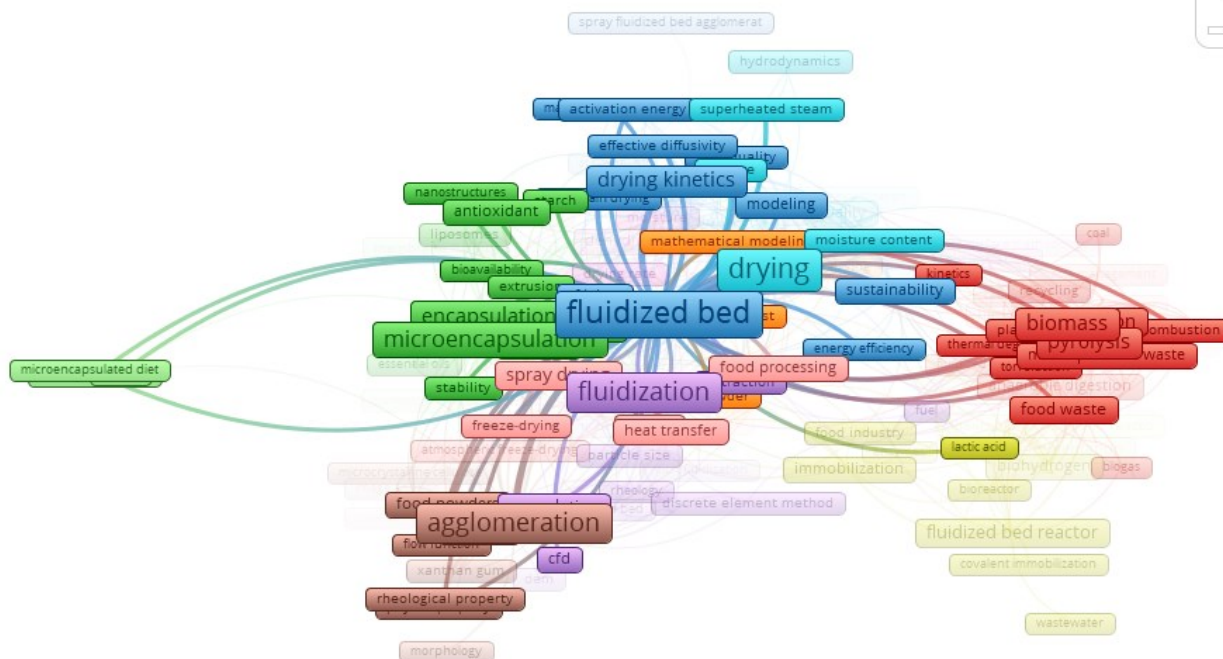
Figura 3 - Rede de co-ocorrência de palavras-chave nos artigos sobre fluidização aplicada a alimentos (*VOSviewer*).



Fonte: O autor.

O termo de maior destaque foi “*Fluidized bed*”, presente em 7 dos 12 *clusters* identificados (Figura 4). Em torno desse nó, concentraram-se termos associados à secagem, tais como “*drying*”, “*drying kinetics*” e “*moisture content*”. Na área de alimentos também apareceram processos e características correlatos, como congelamento, *spray drying*, revestimento, torrefação, aglomeração, microencapsulação, atividade antioxidante e estabilidade, o que indica conexões temáticas que nem sempre implicam o uso direto de leitos fluidizados nesses processos (p. ex., uso do congelamento como pré-tratamento, e não necessariamente como método de conservação). Além da área de alimentos, tem-se conexões com processos de outras áreas, como na engenharia química, em aplicações de pirólise, gaseificação e combustão.

Figura 4 - Rede de co-ocorrência destacando o termo *fluidized bed* e suas conexões (VOSviewer).



Fonte: O autor.

2.1.3 CitNetExplorer

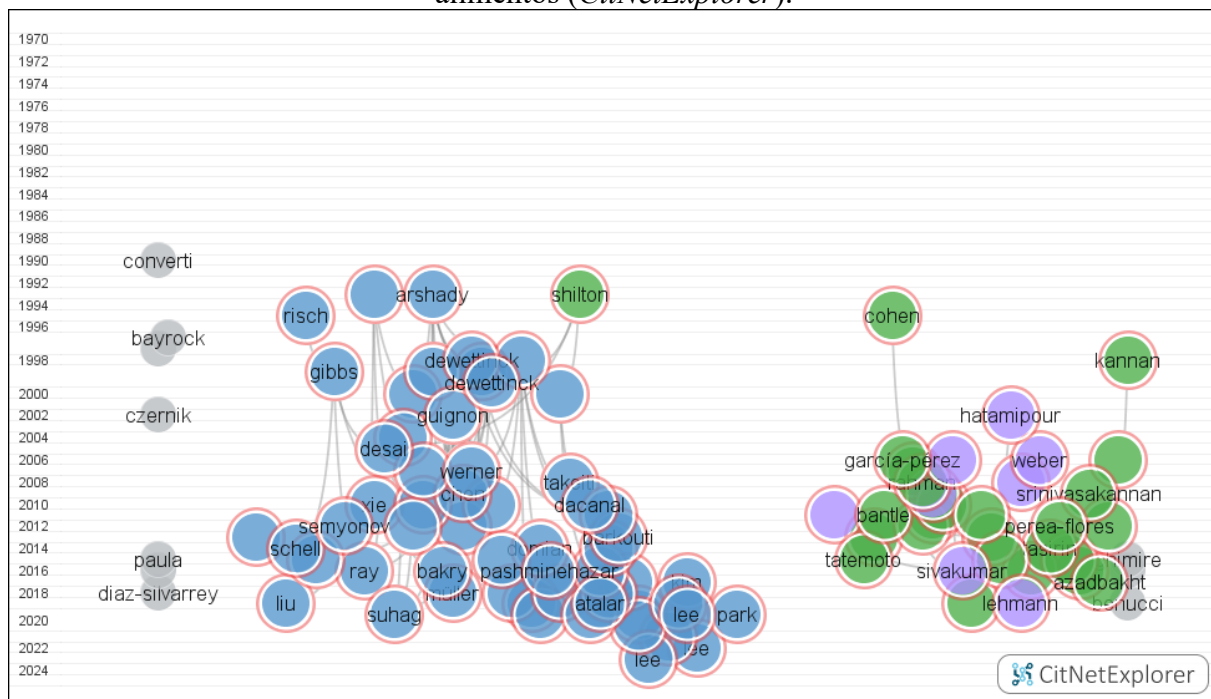
O *CitNetExplorer* foi utilizado para visualizar redes de citação e identificar agrupamentos de publicações (Van Eck; Waltman, 2017).

Importou-se o arquivo de dados e ajustou-se a visualização de citações para as 100 publicações mais citadas, dada a limitação da interface em exibir a totalidade (840) simultaneamente.

Em seguida, utilizando as ferramentas disponíveis no próprio *CitNetExplorer*, foi realizada uma análise para definir agrupamentos de publicações, aplicando-se um critério de formação de *clusters* com tamanho mínimo de *cluster* de 10 artigos. Assim, formaram-se 3 *clusters* principais: *cluster 1* (177 publicações), *cluster 2* (99 publicações) e *cluster 3* (58 publicações).

A Figura 5 indica os 100 artigos mais relevantes, com os três agrupamentos destacados por círculos vermelhos. A diferenciação entre os grupos foi representada pelas cores azul (grupo 1), verde (grupo 2) e lilás (grupo 3), sendo os artigos agrupados de acordo com o assunto que abordam, dessa forma, cada *cluster* é formado por trabalhos que se relacionam a algum tema ou aplicação.

Figura 5 - Rede de citações dos 100 artigos mais relevantes sobre fluidização aplicada a alimentos (*CitNetExplorer*).

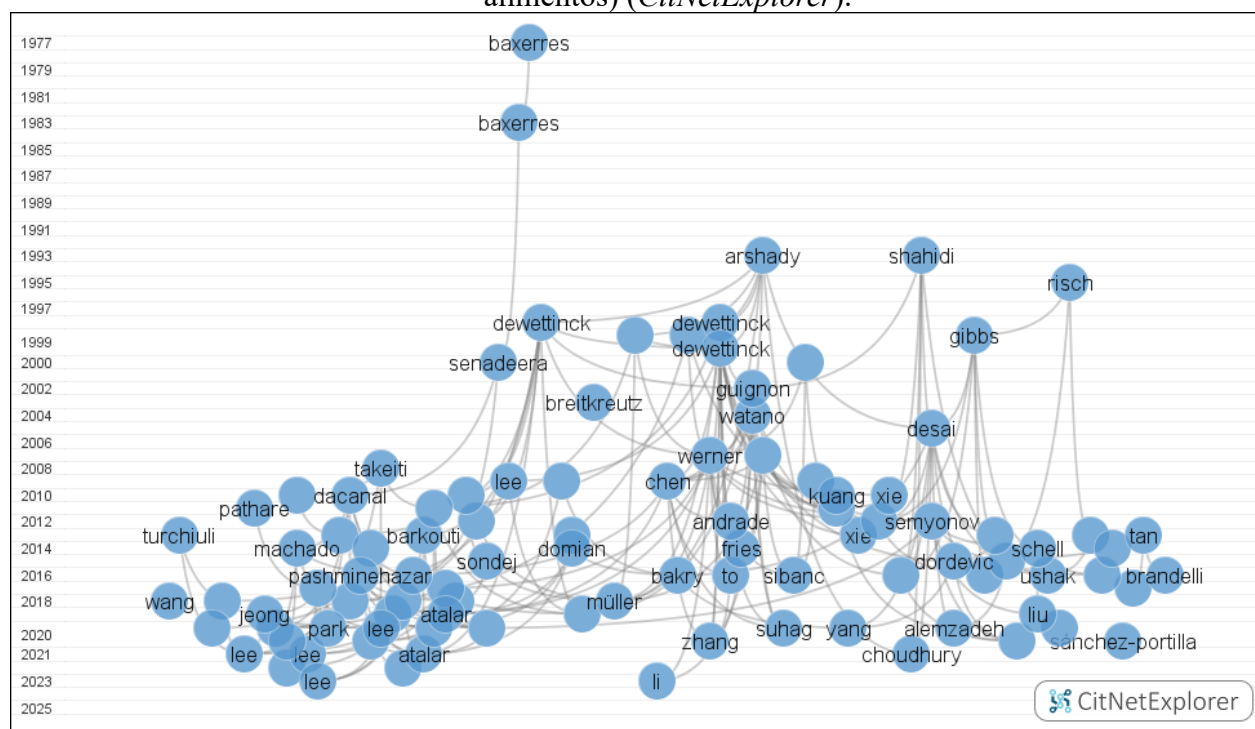


Fonte: O autor.

A análise qualitativa desses grupos revelou diferenças temáticas:

O grupo 1 (azul) focou em aplicações práticas de leito fluidizado em alimentos, sendo citados processos como revestimento, microencapsulação, aglomeração e avaliação de produtos em pó. O artigo *Microcapsules for food* de Arshady (1993), teve destaque, servindo de referência para diversos trabalhos. Entre os autores recorrentes está Koen Dewettinck (três artigos entre 1998-1999; 36 citações por outros autores). Na Figura 6 está representada a rede de citações do grupo 1.

Figura 6 - Rede de citações referente ao grupo 1 (aplicações práticas de leito fluidizado em alimentos) (*CitNetExplorer*).

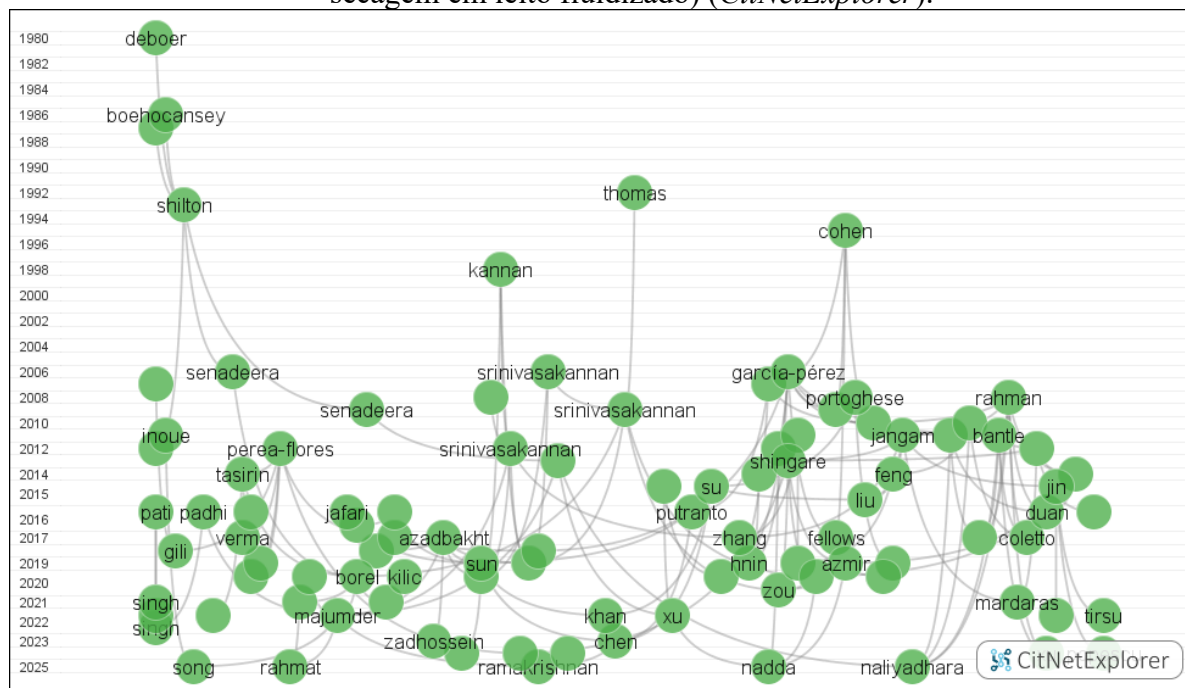


Fonte: O autor.

O grupo 2 (Figura 7) enfatizou artigos com aspectos teóricos e experimentais da secagem em leito fluidizado (velocidade, mecanismos, modelos matemáticos, hidrodinâmica). O artigo *Ultrasonic drying of foodstuff in a fluidized bed: Parametric study* de García-Pérez *et al.* (2006) aparece como referência relevante neste conjunto. Os artigos de Perea-Flores *et al.* (2012) e de Srinivasakannan e Balasubramanian (2009) apresentam conexões distribuídas ao longo de toda a rede, configurando-se como trabalhos de base para diversos outros estudos. Destaca-se também o artigo de Shilton e Niranjani (1993), posicionado entre os grupos 1 e 2, integrando ambos e abordando a aplicação da fluidização em processos relacionados à alimentos.

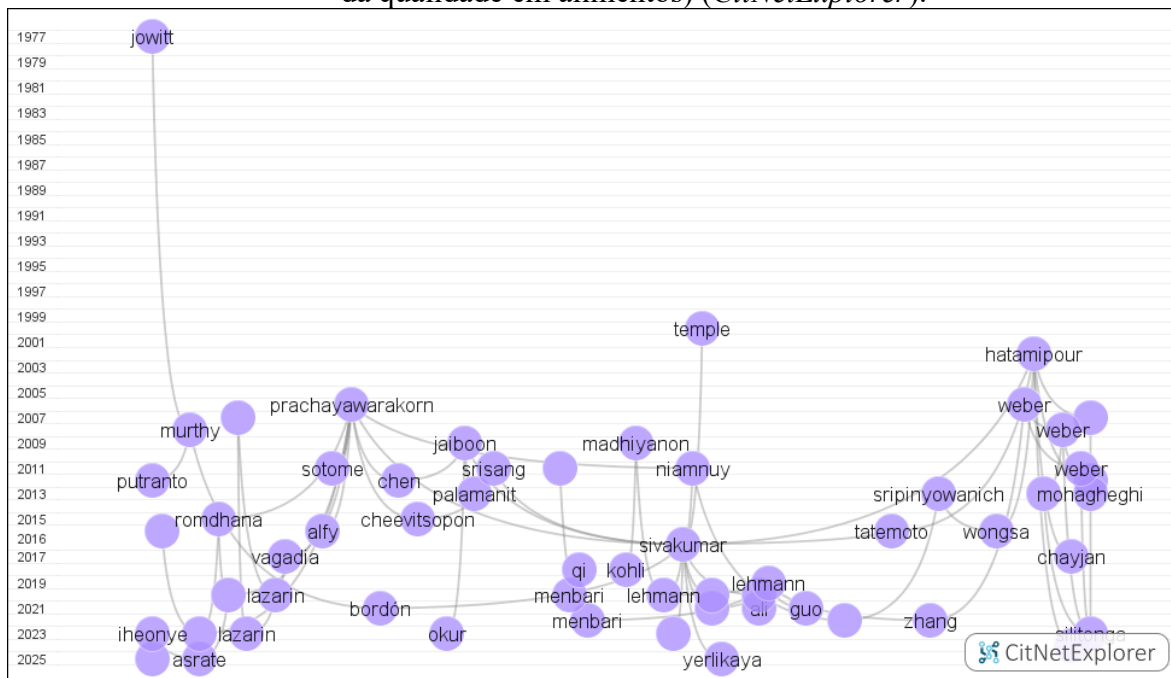
Já no grupo 3 (Figura 8) se concentram trabalhos voltados ao ajuste e controle de parâmetros do processo para garantir qualidade do produto, estabelecendo a conexão entre teoria e aplicação. Três trabalhos são centrais: Prachayawarakorn, Prachayawasin e Soponronnarit (2006), Sivakumar *et al.* (2016) e de Hatamipour e Mowla (2002). Esses estudos têm ligações com toda a rede de citações desse terceiro grupo.

Figura 7 - Rede de citações referente ao grupo 2 (aspectos teóricos e experimentais da secagem em leito fluidizado) (*CitNetExplorer*).



Fonte: O autor.

Figura 8 - Rede de citações referente ao grupo 3 (controle e ajuste de parâmetros para garantia da qualidade em alimentos) (*CitNetExplorer*).



Fonte: O autor.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 CONSERVAÇÃO DE ALIMENTOS

Ao longo da cadeia produtiva os alimentos estão sujeitos a sofrerem prejuízos em sua estrutura física e composição química, perdas essas que afetam tanto o seu valor econômico quanto nutricional (Campo-Vera; Gélvez-Ordoñez; Ayala-Aponte, 2018).

As causas desses prejuízos podem ser de origem física, como a temperatura, o contato com o ar e danos mecânicos; de origem química, por meio de reações indesejáveis, como a oxidação e a rancidez; ou de origem biológica, por contaminação com microrganismos patogênicos ou deteriorantes, além da ação de roedores e outras pragas (Torres-Giner; Chiralt; González-Martínez, 2023).

Para que os produtos alimentares mantenham sua qualidade até o momento de consumo, são utilizados métodos de conservação que preservam por mais tempo as características físicas, químicas, tecnológicas e nutricionais dos alimentos, aumentando a vida útil, agregando valor e garantido o consumo seguro (Campo-Vera; Gélvez-Ordoñez; Ayala-Aponte, 2018; Torres-Giner; Chiralt; González-Martínez, 2023). Nesse sentido, existem diversos métodos, tanto térmicos quanto não térmicos, empregados para promover a preservação dos alimentos.

A aplicação de ultrassom na indústria de alimentos vem crescendo devido à sua capacidade de eliminar células microbianas e inativar enzimas por meio de ondas ultrassônicas de alta intensidade. Uma vantagem dessa técnica é não afetar significativamente as principais características dos alimentos, além de não envolver riscos químicos (Campo-Vera; Gélvez-Ordoñez; Ayala-Aponte, 2018; Mason; Paniwnyk; Lorimer, 1996). Em leite, por exemplo, o ultrassom mostrou-se eficaz na destruição de *Escherichia coli*, *Pseudomonas fluorescens* e *Listeria monocytogenes*, bem como na inativação de enzimas como pectinametilesterase, polifenoloxidasas e peroxidases, responsáveis por degradação de frutas e vegetais (Chemat; Zill-E-Huma; Khan, 2011).

A tecnologia de campo elétrico pulsado possui uma ampla gama de aplicações, incluindo na área de alimentos, podendo ser empregada em alimentos líquidos, semissólidos e até sólidos. Nesse processo, aplicam-se, por um curto período (micro a milissegundos), pulsos elétricos de alta voltagem que são capazes de inativar células microbianas. A técnica é utilizada, por exemplo, na pasteurização de leite, na melhoria da qualidade de sucos de fruta e na prevenção do desenvolvimento de sabores indesejáveis durante o armazenamento de frutas, entre outras aplicações. Entretanto, apresenta limitações, como a necessidade de que o produto tratado tenha

baixa condutividade elétrica; além disso, a presença de bolhas de ar prejudica o processo. Embora possa ser aplicada em alguns produtos sólidos, esses casos são exceções, pois, de modo geral, os resultados não são satisfatórios para alimentos desse tipo (Abbas Syed, 2017; Yeom *et al.*, 2000).

Óleos essenciais também são usados na conservação de alimentos, devido a sua atividade antimicrobiana, sendo aplicados, por exemplo, em produtos cárneos para inibir microrganismos como *Listeria monocytogenes* e alguns tipos de *Salmonella*. Contudo, seu uso apresenta limitações relacionadas à volatilidade e ao aroma intenso. Para superar esses problemas, têm sido aplicadas técnicas de microencapsulação e nanoencapsulação, que permitem maior estabilidade e viabilidade tecnológica (Tocto-Yajahuanca; Yata-Franco; Malpartida-Yapias, 2024).

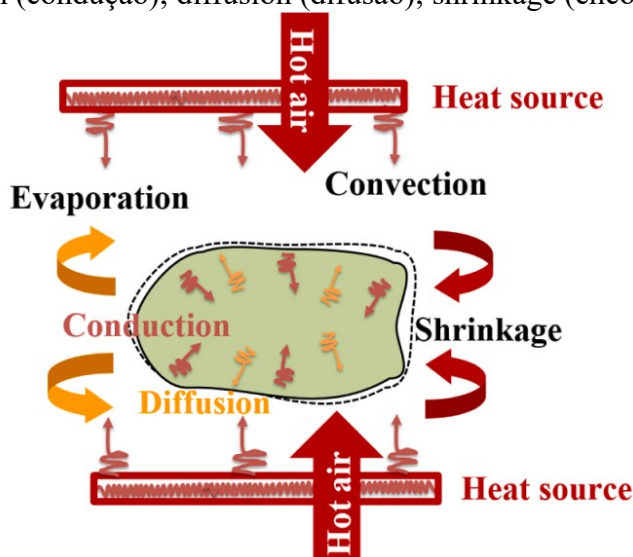
Outra tecnologia aplicada à conservação de alimentos é a alta pressão isostática. Nesse processo, o produto é submerso em um recipiente cheio de fluido, geralmente água, sobre o qual atua um pistão que aumenta a pressão, transmitindo-a de maneira uniforme ao alimento. As pressões elevadas aplicadas por alguns minutos, são capazes de inativar microrganismos, esporos e patógenos que poderiam comprometer a qualidade e a segurança do produto. Em muitos casos, o efeito obtido é equivalente ao da pasteurização, mas sem necessidade de aquecimento. A alta pressão preserva as características sensoriais e nutricionais dos alimentos, sendo aplicada em geleias, sucos de frutas e molhos. Contudo, sua utilização em escala industrial ainda enfrenta barreiras, principalmente devido aos altos custos envolvidos e ao baixo rendimento (Daher; Le Gourrierc; Pérez-Lamela, 2017; Paucar-Menacho; Moreno-Rajo; Chuqui-Diestra, 2024).

Na liofilização ocorre a remoção de água do produto sem uso de altas temperaturas, caracterizando um processo conduzido em baixas temperaturas. Inicialmente, o material é congelado e, em seguida, é submetido a um ambiente à vácuo, no qual a água congelada sofre sublimação. Esse processo permite preservar as características do alimento, resultando em um produto de alta qualidade. Essa técnica leva a uma melhor preservação da qualidade do produto, entretanto, é menos utilizada devido aos custos envolvidos, tanto relacionados aos equipamentos quanto ao consumo energético, além do longo tempo de secagem (Andreeva; Shorstkii, 2025).

Já a secagem é um dos métodos mais antigos e ainda hoje amplamente utilizado na conservação de alimentos. Consiste na remoção de água por meio da aplicação de calor, empregando tecnologias que buscam aumentar a eficiência da transferência de calor (elevando os coeficientes de troca térmica) e reduzindo danos (ou alterações) às propriedades dos

alimentos. Normalmente, utiliza-se a convecção forçada de ar quente para acelerar o processo de secagem, como ilustrado na Figura 9 (Asrate; Ali, 2025). Entre as técnicas empregadas, destaca-se a secagem em leito fluidizado, na qual o material é suspenso e intensamente movimentado em uma corrente de fluido (geralmente ar seco), que transfere calor ao produto para a evaporação da água (transferência de massa). Esse método proporciona uma transferência de calor rápida e uniforme e, em muitos casos, apresenta custos operacionais inferiores aos de determinados métodos convencionais de secagem (Kang *et al.*, 2025).

Figura 9 - Ilustração do processo de secagem usando ar quente como fonte de calor. Heat source (fonte de calor); hot air (ar quente); convection (convecção); evaporation (evaporação), conduction (condução); diffusion (difusão); shrinkage (encolhimento).



Fonte: Asrate; Ali (2025).

O congelamento de alimentos, amplamente utilizado tanto em escala doméstica quanto industrial, baseia-se na remoção de calor do produto, atingindo temperaturas geralmente abaixo de -18°C , levando à solidificação da água presente e, consequentemente, à redução da atividade de água (a_w) do alimento. Isso inibe o crescimento de microrganismos e diminui a velocidade de reações químicas e enzimáticas. Durante a mudança de fase, porém, a formação de cristais de gelo pode danificar os tecidos do alimento e afetar sua qualidade. Para aumentar a eficiência e reduzir esses danos, foram desenvolvidas tecnologias de congelamento rápido, como o *individual quick freezing* (IQF – congelamento rápido individual). Nesse método, aplicado principalmente a unidades pequenas, diferentes técnicas podem ser empregadas, incluindo o congelamento por leito fluidizado, que utiliza um fluido em temperaturas muito baixas para promover elevados coeficientes de transferência de calor. Isso resulta na formação de cristais

de gelo menores, minimizando alterações estruturais e preservando melhor a qualidade do alimento (Chaves-Quesada; Acosta-Montoya, 2023).

Tanto na secagem quanto no congelamento, processos térmicos, uma grande dificuldade que se tem é o dano causado devido à exposição do alimento à condições de altas e baixas temperaturas. O emprego da fluidização nesses processos leva à ganhos na eficiência da transferência de calor e redução no tempo de processamento, reduzindo o tempo de exposição do alimento à temperatura e assim conservando melhor seu sabor e aroma.

3.2 PROCESSOS COM FLUIDIZAÇÃO

3.2.1 Leitos porosos

Vários processos na indústria de alimentos envolvem materiais sólidos interagindo com um fluido (gás ou líquido), formando um leito particulado. Quando o fluido somente escoar através do material, sem promover o seu movimento, o sistema é denominado leito fixo. Com o aumento da vazão, a queda de pressão no leito cresce até que a força de arraste do fluido se equilibre com o peso aparente das partículas, ponto conhecido como velocidade mínima de fluidização, associado a uma queda de pressão característica. A partir dessa condição, as partículas passam a se movimentar de forma intensa e aleatória, e o sistema passa a apresentar propriedades semelhantes às de um fluido. Esse regime é denominado fluidização e é amplamente empregado em operações de transferência de calor e/ou de massa (Cremasco, 2021).

A fluidização envolve a aplicação de fundamentos de escoamento em meios porosos, de modo que a operação é significativamente influenciada pela porosidade do leito. Em uma partícula isolada, a porosidade refere-se ao espaço vazio presente na sua estrutura. Entretanto, em processos industriais a avaliação individual de partículas é pouco relevante, e impraticável, sendo mais adequado considerar características globais do leito. Nesse contexto, a porosidade *bulk*, ou do leito de partículas, está associada ao volume de vazios entre as partículas do material, e não à soma dos espaços vazios de cada partícula. Assim, a porosidade *bulk* corresponde à fração volumétrica ocupada pelo fluido no leito poroso, enquanto o empacotamento corresponde à fração do volume total que é ocupada pelas partículas. Uma forma mais simples de entender esse conceito é considerar um conjunto de partículas totalmente compacto, equivalente a um material único, no qual o fluido penetraria internamente na estrutura (Peçanha, 2014).

Em um leito poroso, as partículas permanecem separadas, permitindo a penetração do fluido pelos espaços vazios entre elas, o que facilita o escoamento. Dessa forma, dependendo da aplicação do escoamento em meios porosos, a porosidade *bulk* do leito favorece a transferência de energia térmica, ao ampliar a superfície de contato entre fluido e partículas, e pode também influenciar a transferência de massa (Peng; Wu, 2005; Tadini, 2016).

Além da porosidade, outras propriedades do leito particulado, fortemente influenciadas pelas características das partículas, como tamanho e forma, e pelas propriedades do fluido, como viscosidade e densidade, também são relevantes. Entre elas destacam-se a densidade *bulk*, a área superficial específica, a permeabilidade e a tortuosidade.

A densidade *bulk* é definida pela razão entre a massa total do material sólido e o volume que ele ocupa no leito. A área superficial específica corresponde à área disponível de contato do leito com o fluido, por unidade de volume. Essa grandeza pode ser determinada por cálculos baseados na isoterma de Brunauer–Emmett–Teller (BET), utilizando medições de adsorção gasosa (Peigney *et al.*, 2001; Tadini, 2016).

A permeabilidade é a medida da facilidade com que um fluido atravessa o leito poroso, estando diretamente associada à estrutura e à conectividade os interstícios entre as partículas, que definem os caminhos disponíveis para o escoamento. Em leitos fixos, para escoamentos laminares, a permeabilidade aparece como um parâmetro chave na Lei de Darcy; em regimes de maior vazão, correlações mais complexas (como a de Ergun) são usados (Peçanha, 2014). A tortuosidade está relacionada aos diferentes caminhos que um fluido pode percorrer em um meio poroso. Em vez de seguir trajetórias retilíneas, a forma das partículas induz desvios no escoamento. O conceito mais comum na literatura é da tortuosidade hidráulica (ou equivalente), que considera todos disponíveis para o escoamento do fluido, comparando a capacidade de transporte efetiva desses canais a capacidade total do leito (Sobieski; Zhang; Liu, 2012).

Conforme reportado, com o aumento da vazão atinge-se uma velocidade e uma queda de pressão nas quais o material particulado começa a se movimentar, e o sistema passa a adquirir propriedades de um fluido. Nesse ponto, torna-se importante determinar a queda de pressão e perda de carga do fluido no meio, que podem ser avaliadas experimentalmente ou por meio de equações deduzidas para diferentes condições de operação. Esses modelos frequentemente se baseiam na analogia a um conjunto de canais tortuosos com diferentes seções transversais, representando o meio poroso (Tadini, 2016).

3.2.2 Equações do escoamento

A lei que Henry Darcy apresentou em 1856 é utilizada para se resolver uma grande variedade de problemas relacionados à escoamento em meios porosos. Essa lei apresenta uma relação para a resistência ao escoamento em meios porosos, sendo representada pela Equação 1.

$$\frac{dP}{dL} = \frac{1}{\kappa} * \mu * \overrightarrow{v_f} \quad (1)$$

Ou, então, em sua forma diferencial, integrando na Equação (1): dL de L_0 a L_1 ; e, dP de P_0 a P_1 ; sendo $L_0 = 0$ e $L_1 = L$, obtendo a Equação 2.

$$-\Delta P = \frac{1}{\kappa} * \mu * \overrightarrow{v_f} * L \quad (2)$$

Na Equação 2, $-\Delta P$ representa a queda de pressão, sendo negativo porque o fluido se desloca da região de maior para a de menor pressão; L é a distância percorrida no leito; κ é a permeabilidade; μ é a viscosidade dinâmica; e, $\overrightarrow{v_f}$ é a velocidade de escoamento do fluido. A partir dessa lei, diversas equações foram desenvolvidas para caracterizar o escoamento em meios porosos (Sobieski; Zhang; Liu, 2012; Valdes-Parada; Ochoa-Tapia; Alvarez-Ramirez, 2009; Whitaker, 1966).

Com a grande variedade de configurações que um meio poroso pode apresentar, determinar uma única equação capaz de representar todos os casos é muito difícil. Por isso, vários estudos avaliaram os meios porosos em diferentes condições de operação e buscaram relacioná-los a equações empíricas ou semiempíricas capazes de caracterizar esses sistemas (Valdes-Parada; Ochoa-Tapia; Alvarez-Ramirez, 2009).

Nesse sentido, a permeabilidade (κ) de meios porosos pode ser obtida pela equação de Kozeny-Carman (Equação 3).

$$\kappa = \frac{1}{C_{CK}} * (L_{CK})^2 * \varepsilon^3 \quad (3)$$

Nessa equação, C_{CK} é a constante de Kozeny-Carman, que depende de vários parâmetros estruturais, como por exemplo o tamanho dos poros, o diâmetro e a porosidade das partículas, dentre outros; L_{CK} é o comprimento característico, estando relacionado ao diâmetro médio das partículas; e, ε é a porosidade do meio. Experimentalmente a equação mostrou-se útil para

determinar a permeabilidade em diferentes meios, mas está limitada escoamento laminares com baixas velocidades.

A queda de pressão pode ser determinada pela equação de Burke-Plumer (Equação 4), na qual f' é o fator de atrito modificado, ε_b é a porosidade do meio, ρ é a densidade do fluido, D_{esf} é o diâmetro equivalente da partícula esférica ou diâmetro de Sauter, H_L é a altura do leito e v_s é a velocidade superficial do fluido.

$$\frac{\Delta P}{H_L} = 3f' \frac{\rho}{D_{esf}} \frac{(1-\varepsilon_b)}{(\varepsilon_b)^3} v_s^2 \quad (4)$$

Como as equações anteriores são adequadas para tipos específicos de escoamento, torna-se interessante dispor de uma equação aplicável independentemente do regime de escoamento. Esse é o caso da equação de Ergun (Equação 5), amplamente utilizada na engenharia (Sabri Ergun, 1952; Peçanha, 2014; Tadini, 2016; Xiao et al., 2019; Cremasco, 2021).

$$\frac{\Delta P}{H_L} = 150 \frac{\mu}{(D)^2} \frac{(1-\varepsilon_b)^2}{(\varepsilon_b)^3} v_s + 1,75 \frac{\rho}{D} \frac{(1-\varepsilon_b)}{(\varepsilon_b)^3} v_s^2 \quad (5)$$

Em que D é o diâmetro equivalente esférico das partículas; ou diâmetro médio das partículas.

3.2.3 Fluidização

Os processos envolvendo fluidização são aplicados não apenas na indústria de alimentos, mas também em indústrias químicas, metalúrgicas e de construção (Fu *et al.*, 2022). A fluidização ocorre quando um fluido escoa através de um meio sólido e poroso a uma velocidade suficiente para suspender as partículas, iniciando-se no ponto de mínima fluidização (U_{mf}), em que as partículas ficam apenas em equilíbrio no fluido. Ao aumentar a velocidade além de U_{mf} , estabelece-se a fluidização plena, em que as partículas se movimentam continuamente sem serem completamente arrastadas — condição que, se ultrapassada, caracterizaria o transporte pneumático (Peçanha, 2014; Cremasco, 2021).

Para avaliar a operação de fluidização, analisam-se as características fluidodinâmicas do sistema, ou seja, propriedades do fluido e das partículas, como a variação da porosidade do leito, a velocidade superficial do gás, a variação de pressão, velocidade mínima de fluidização,

queda de pressão de mínima fluidização. Esses parâmetros dependem das condições do processo e podem ser caracterizados por meio de curvas características obtidas a partir de dados experimentais coletados durante a operação, que relacionam a variação da queda de pressão com a vazão ou velocidade do fluido. Essas curvas permitem compreender o comportamento das partículas no leito e também avaliar aspectos operacionais, como o gasto energético, estimado a partir do requerimento de sopradores para manter a queda de pressão observada (Liu; Liu; Ge, 2021).

Na Figura 10, apresenta-se um exemplo de curva de fluidização para um sistema binário de areia e cenosferas (material composto principalmente por sílica e alumina). As linhas contínuas representam as relações obtidas ao aumentar (linhas mais espessas) e reduzir (linhas mais finas) a vazão do gás. Observa-se que, na região de leito fixo, para uma mesma velocidade, a queda de pressão é menor durante a redução da vazão, o que reflete o efeito de compactação do leito e caracteriza a histerese típica das curvas de fluidização. Nota-se também que o comportamento fluidodinâmico depende do material, visto que areia, cenosferas e a mistura binária apresentam valores distintos de velocidade mínima de fluidização (U_{mf}), e da queda de pressão correspondente. A velocidade mínima de fluidização corresponde à menor velocidade do fluido capaz de manter as partículas suspensas no leito. Esse equilíbrio ocorre quando as forças externas, como a da gravidade (F_{ex}) que agem sobre as partículas, entram em equilíbrio com as forças geradas pela interação do fluido com as partículas, como a força de arraste (F_a) e a de empuxo (F_e), como ilustrado na Figura 11 (Berkowicz-Platek; Żukowski; Leski, 2024; Tadini, 2016).

Figura 10 - Exemplo de curva característica de fluidização. Cenospheres (cenosferas); sand (areia); binary fluidized bed (sand + cenospheres) [leito fluidizado binário (areia + cenosferas)]; pressure drop (queda de pressão); superficial velocity of the fluidizing gas (velocidade superficial do gás fluidizante).

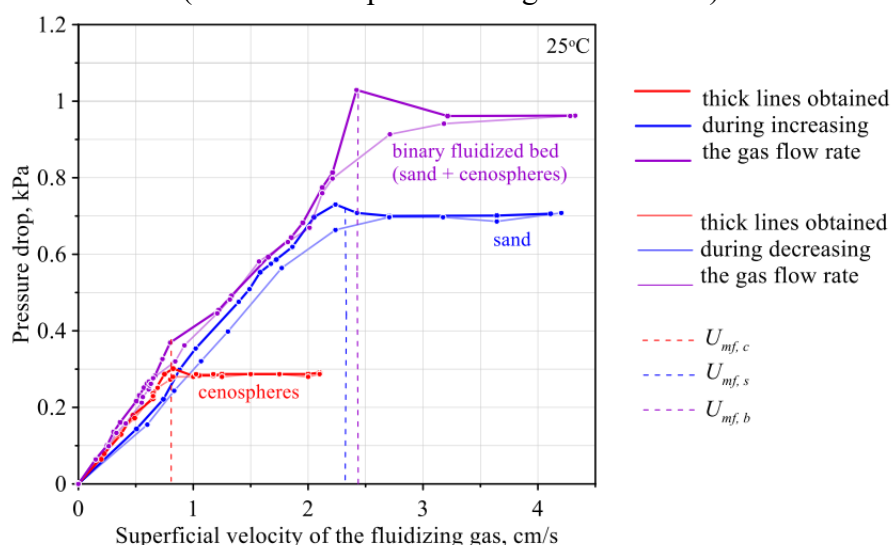
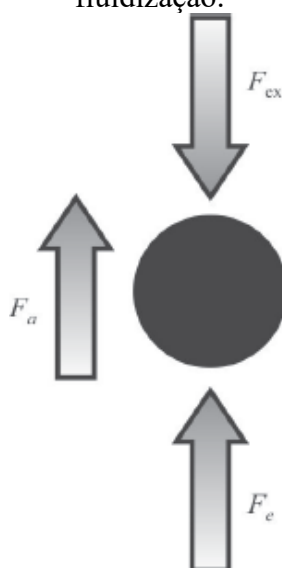


Figura 11 - Ilustração das forças que atuam sobre a partícula na velocidade mínima de fluidização.

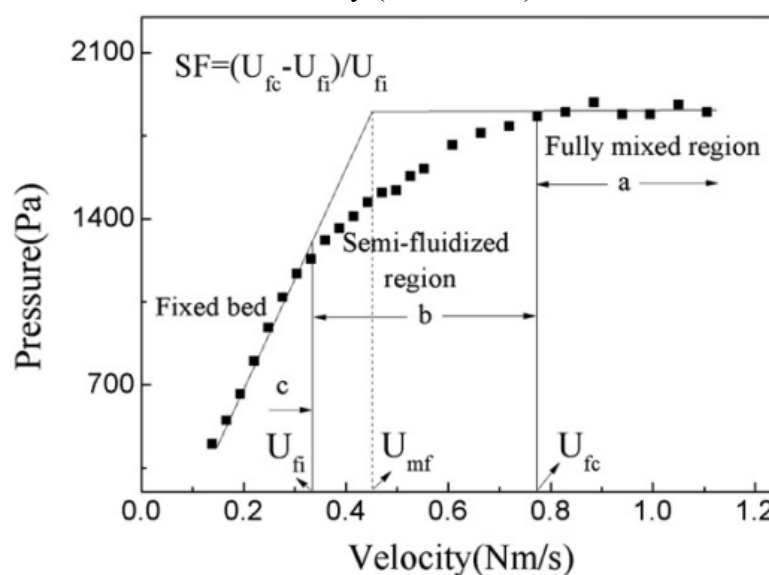


Observa-se que existe uma relação relativamente linear entre o início do escoamento do fluido e o ponto em que se inicia fluidização, na qual a queda de pressão cresce com o aumento da velocidade superficial do gás. No ponto de máxima queda de pressão, as partículas ficam suspensas, pois o fluxo de gás oferece sustentação suficiente. A partir desse ponto, a velocidade do fluido necessária para manter o leito fluidizado sofre apenas uma ligeira variação, assim como a respectiva queda de pressão. Nesse regime, aumentos adicionais de velocidade

praticamente não alteram a queda de pressão, uma vez que a resistência ao escoamento do fluido através do leito já foi vencida (Chhabra; Basavaraj, 2019).

A curva de fluidização pode ser dividida em três partes, conforme ilustrado na Figura 12. O leito fixo corresponde ao trecho entre o início do escoamento e a velocidade de fluidização incipiente (U_{fi}), quando as primeiras partículas começam a se movimentar, caracterizando-se por um comportamento aproximadamente linear da variação da queda de pressão em função da velocidade do ar, representado pelo período c da Figura 12. Na região semi-fluidizada (SF), região representada por b na Figura 12, atinge-se a velocidade mínima de fluidização, e parte do leito já se encontra suspensa. Por fim, na região totalmente misturada, região representada por a na Figura 12, todas as partículas estão fluidizando, o que ocorre na velocidade de fluidização completa (U_{fc}) (Jiliang; Xiaoping; Daoyin, 2013).

Figura 12 - Regiões da curva de fluidização. Fixed bed (leito fixo); semi-fluidized region (região semi-fluidizada); fully mixed region (região totalmente misturada); pressure (pressão); velocity (velocidade).



Fonte: Jiliang; Xiaoping; Daoyin (2013).

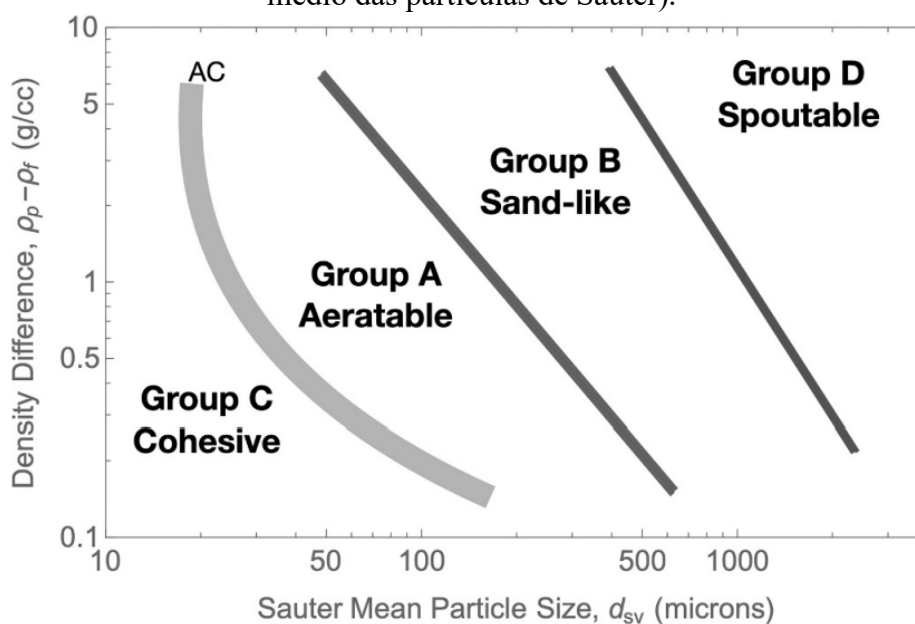
As características de fluidização estão diretamente relacionadas às propriedades das partículas, como densidade, tamanho e forma. A presença de partículas maiores pode levar à formação de aglomerados que dificultam a fluidização, enquanto partículas muito finas e de baixa densidade podem resultar em menor expansão do leito devido à canalização (dificultando a fluidização estável), ou, em condições mais intensas, acabar sendo arrastadas, causando perdas de material e contaminação do fluido (Li *et al.*, 2025b). A densidade influencia a estabilidade do leito, e as interações entre partículas, reduzindo o arraste quando o leito é mais homogêneo (Verma; Yogi; Anand, 2021). Quanto à forma, partículas mais esféricas tendem a

fluidizar mais facilmente, ao passo que partículas irregulares, embora apresentem maior resistência à compressão, dificultam o escoamento (Weber *et al.*, 2006).

Nesse contexto, a classificação de Geldart (Figura 13) tornou-se referência essencial no estudo de leitos fluidizados. O autor dividiu as partículas em quatro grupos (A, B, C e D), de acordo com o tamanho, a densidade da partícula e a densidade do fluido. Cada um desses grupos apresenta características específicas em relação à capacidade e comportamento de fluidização das partículas (Peçanha, 2014; Cremasco, 2021; Cocco; Chew, 2023):

- **Grupo A** – partículas pequenas e/ou de baixa densidade, como leite em pó desnatado, ideais para fluidização, exibindo uma faixa não-borbulhante com intensa mistura de sólidos. O leito se expande rapidamente, mesmo antes da formação de bolhas, que se quebram e coalescem.
- **Grupo B** – partículas como a areia ou milho moído. Apresentam expansão moderada do leito e mistura intermediária de sólidos, com surgimento natural de bolhas próximo à velocidade mínima de fluidização; não há limite de tamanho para as bolhas.
- **Grupo C** – partículas muito finas (ou ultrafinas) e coesas, como a farinha de trigo e amido de milho, pó probiótico de leite desnatado, de difícil fluidização. Leitos deste grupo apresentam baixa expansão devido à canalização, ausência de bolhas, aeração inicialmente rápida seguida de aumento exponencial e baixa mistura de partículas.
- **Grupo D** – partículas grandes e/ou densas, como grãos de café, arroz ou soja. Apresentam baixa expansão do leito, alta taxa de aeração e baixa mistura de sólidos, sem limite para o tamanho das bolhas. Dependendo das condições operacionais, podem atingir regimes turbulentos de escoamento ou mesmo jorro (*spouted bed*).

Figura 13 - Diagrama de Geldart. Group C cohesive (grupo C coesivo); group A aeratable (grupo A aerável); group B sand-like (grupo B arenoso); group D spoutable (grupo D escoável); density difference (diferença de densidade); Sauter mean particle size (tamanho médio das partículas de Sauter).



Fonte: Cocco; Chew (2023).

São várias as condições nas quais um leito fluidizado pode operar, abrangendo diferentes regimes de escoamento como turbulento, de borbulhante, de fluidização rápida, entre outros. A transição entre esses regimes ocorre conforme a velocidade do fluido é alterada (Cremasco, 2021).

Quando o fluido escoa através do material sem promover sua movimentação, caracteriza-se o leito fixo ou compactado. Com o aumento da velocidade, atinge-se a velocidade mínima de fluidização na qual as partículas ficam suspensas, configurando o regime de fluidização mínima. Ao se elevar ainda mais a velocidade, formam-se bolhas no leito, caracterizando a fluidização borbulhante. A redução da intensidade de formação de bolhas dá lugar ao regime turbulento, no qual predominam aglomerados de partículas. Por fim, ao se atingir velocidades mais elevadas, esses aglomerados se desfazem, estabelecendo o regime de fluidização rápida, marcado por maior escoamento do fluido entre as partículas (Aghabarannejad *et al.*, 2011; Vainshtein *et al.*, 1999).

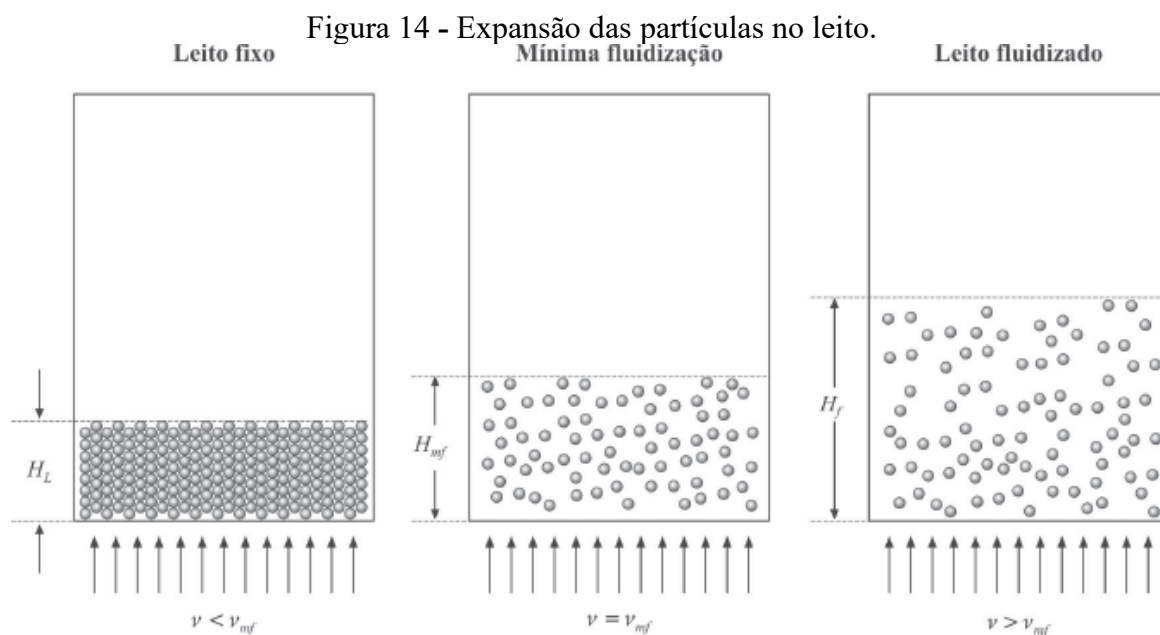
3.3 Tipos de leito

Os leitos porosos podem ser classificados em diferentes tipos de leitos, cada um com características próprias, que determinam suas aplicações e finalidades.

O leito fixo é um tipo de leito poroso no qual a velocidade de escoamento do fluido não é suficiente para fazer com que as partículas fluidizem, ou seja, não ocorre expansão do leito (Tadini, 2016). Nesses sistemas, o escoamento pode ser em contracorrente, concorrente ou cruzado (raramente usado). Em operações de transferência de calor com leitos fixos, diversos fatores influenciam o desempenho, como características das partículas (empacotamento e suas propriedades intrínsecas), o regime de escoamento e a temperatura de operação (Fang *et al.*, 2025). Uma limitação desse tipo de leito é a distribuição não uniforme da temperatura, decorrente da ausência de movimentação das partículas (Pourfattah *et al.*, 2025), o que diminui a superfície de contato com o fluido e pode comprometer processos de conservação como a secagem e o congelamento de alimentos.

A técnica de fluidização começou a ser difundida na década de 1940 (Almeida; Rocha, 2002). Nos leitos fluidizados o fluido atinge a velocidade mínima de fluidização (U_{mf}), superando a força gravitacional que mantém as partículas em repouso, o que provoca sua suspensão e expansão (Figura 11). Com o aumento da velocidade, o leito continua a expandir. Esses sistemas são aplicados em processos de secagem nas indústrias farmacêutica, química e alimentícia, apresentando maiores taxas de transferência de calor e massa em comparação aos leitos fixos, devido à maior área de contato entre fluido e partículas. Entre as vantagens adicionais está o custo relativamente baixo do equipamento. Por outro lado, a fluidização de partículas finas e úmidas pode levar à formação de aglomerados, e materiais pastosos apresentam maior dificuldade de processamento. No projeto de leitos fluidizados, deve-se considerar a queda de pressão e os fatores que a influenciam, como a vazão e a velocidade do fluido, a força de arraste e as características do equipamento (tubulações, coluna, distribuidores), de forma a avaliar otimizações e custos operacionais. Em relação aos leitos fixos, os leitos fluidizados demandam maior consumo de energia devido à necessidade de maior vazão do fluido (Potgieter; Bhamjee; Kruger, 2021; Tadini, 2016).

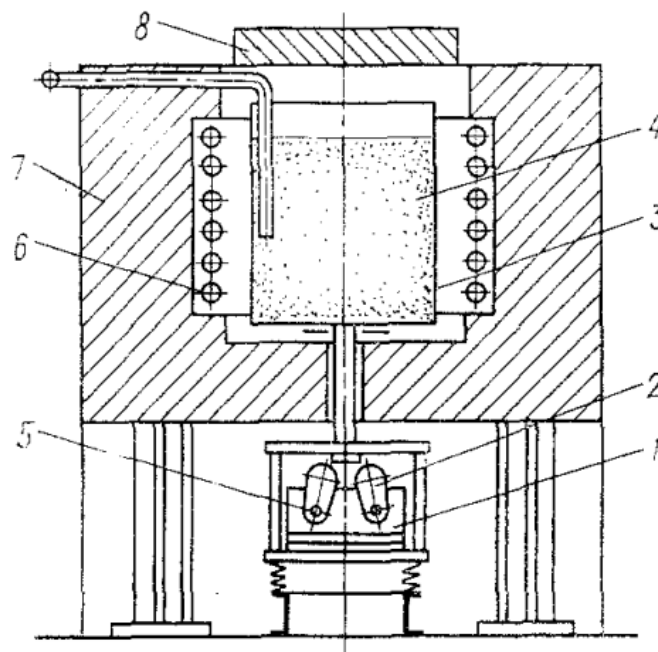
Na Figura 14 é ilustrado o processo de expansão das partículas no leito fixo, no estado mínima de fluidização e no leito fluidizado, em que se observa o aumento da altura do leito com o incremento da velocidade do fluido.



Fonte: Tadini (2016).

O leito vibrofluidizado utiliza vibração mecânica para auxiliar a fluidização das partículas, sendo aplicado em processos de secagem, granulação e revestimento. Esse tipo de equipamento (Figura 15) permite o processamento eficiente de materiais pegajosos e pastosos, favorece a transferência de calor e massa, e possibilita o controle do processo por meio do ajuste da amplitude e/ou frequência da vibração. Seu desempenho depende das propriedades físicas dos sólidos, da intensidade da vibração e dos parâmetros do escoamento. Os leitos vibrofluidizados são especialmente úteis para melhorar a fluidização de partículas do grupo C da classificação de Geldart, como pós finos de amido (Stakić; Urošević, 2011). A principal desvantagem é o maior custo de implementação e operação quando comparado com outros tipos de leitos (Tadini, 2016).

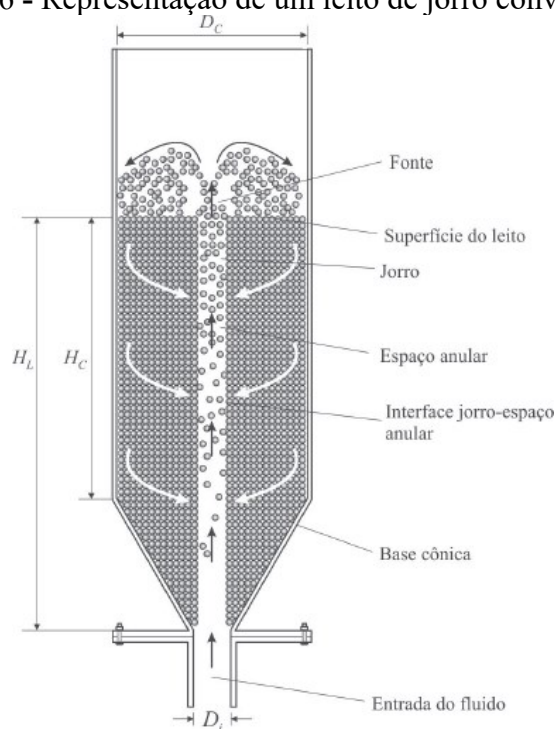
Figura 15 – Diagrama de partes de um leito vibrofluidizado: (1) vibrador de dupla ação; (2) balancins; (3) recipientes; (4) partículas de grafite; (5) par de engrenagens de textolita; (6) aquecedores; (7) preteleiras de revestimento; (8) tampa termicamente isolada.



Fonte: Zavarov; Tyupakov; Belyaush (1980).

O leito de jorro é utilizado em processos de secagem, revestimento, granulação, gaseificação, mistura de sólidos. Sua principal característica é o movimento cíclico das partículas, devido ao escoamento do fluido, que define três regiões: a base cônica, responsável por direcionar o fluido para a formação do jorro; a região de jorro, localizada na parte central, que se inicia na base cônica e se estende até a superfície do leito, culminando na formação da “fonte” de partículas; e, região anular, situada entre o jorro central e a parede da coluna, por onde os sólidos descem em direção à base, reiniciando o ciclo, conforme ilustrado na Figura 16. Esse movimento promove elevadas taxas de transferência de calor e massa, embora o estabelecimento do regime de jorro em escala industrial apresente desafios (Tadini, 2016).

Figura 16 - Representação de um leito de jorro convencional.



Fonte: Tadini (2016).

O dimensionamento dos equipamentos de leito de jorro requer a determinação da queda de pressão e da vazão do fluido. Um parâmetro fundamental é a velocidade mínima de jorro (U_{ms}), análoga à velocidade mínima de fluidização nos leitos fluidizados, que define o início do regime fluidodinâmico de jorro. Na Figura 16 são apresentadas as principais dimensões e notações utilizadas no cálculo da perda carga, incluindo a altura total do leito (H_L), a altura da parte cilíndrica (H_c), a o diâmetro da seção cilíndrica (D_c) e o diâmetro interno do tubo de entrada do fluido no processo (D_i) (Almeida; Rocha, 2002; Tadini, 2016).

4 APLICAÇÕES DA FLUIDIZAÇÃO EM DIFERENTES PROCESSOS

Mesmo sendo uma tecnologia consolidada desde a década de 1940, a fluidização continua industrialmente relevante, com aplicações recentes em diferentes setores (Cocco; Chew, 2023). Na conservação de alimentos, os leitos fluidizados são amplamente empregados em processos de secagem e congelamento.

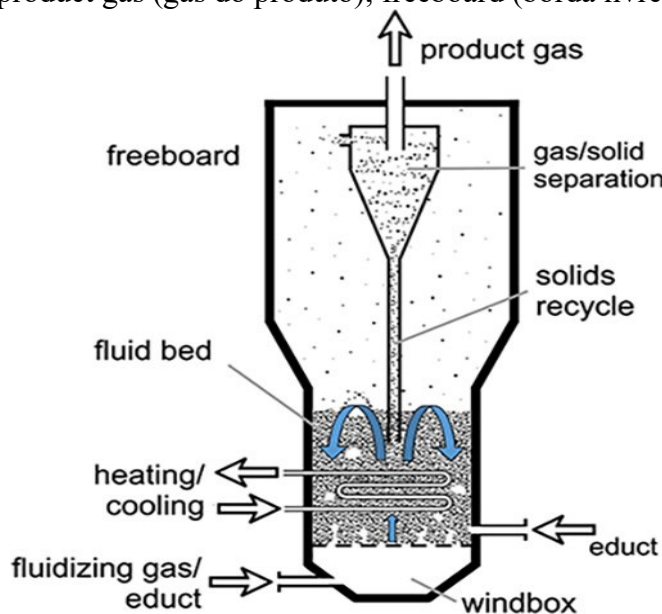
4.1 Secagem

A secagem de alimentos consiste na remoção de água por meio da transferência simultânea de calor e massa. Trata-se, em geral, de um processo demorado, a depender do método utilizado e das condições operacionais, podendo exigir temperaturas elevadas, que resultam em perdas de qualidade, afetando sabor, aroma, cor e valor nutricional. Métodos alternativos, como a liofilização, reduzem esses danos, mas apresentam custos elevados que limitam sua aplicação (Chakraborty *et al.*, 2023).

O uso de leitos fluidizados na secagem oferece diversas vantagens, o que torna essa tecnologia particularmente interessante para o processamento de alimentos. As elevadas taxas de transferência de calor e massa decorrem do intenso contato entre o gás e as partículas fluidizadas. A movimentação contínua das partículas promove a uniformidade de temperatura, resultando em produtos com qualidade melhor preservada em comparação com processos sem utilização de leitos fluidizados. Além disso, esses sistemas possuem alta capacidade de secagem, associada à elevada razão entre a massa de gás e do material a ser seco, bem como vantagens operacionais, como simplicidade de construção custos relativamente baixos, facilidade de expansão e elevada capacidade produtiva (Kaleta *et al.*, 2013; Yoon *et al.*, 2024).

Na secagem em leitos fluidizados, o material mantido suspenso no fluido (geralmente um gás) em escoamento (Asrate; Ali, 2025) é introduzido pela base, através de uma placa distribuidora, e a vazão é ajustada até atingir a fluidização completa. Nesse estado, as partículas permanecem em constante movimento, favorecendo a transferência de calor. Trata-se de um equipamento versátil, capaz de operar em condições controladas de temperatura e pressão. Na Figura 17 é apresentado um esquema de um leito fluidizado empregado em processos usuais (Ahmed *et al.*, 2024).

Figura 17 - Esquema de leito fluidizado. Fluidizing gas/educt (gás fluidizante/educto); windbox (caixa de vento); heating/cooling (aquecimento/resfriamento); fluid bed (leito fluidizado); solids recycle (reciclo de sólidos); gas/solid separation (separação gás/sólido); product gas (gás do produto); freeboard (borda livre).

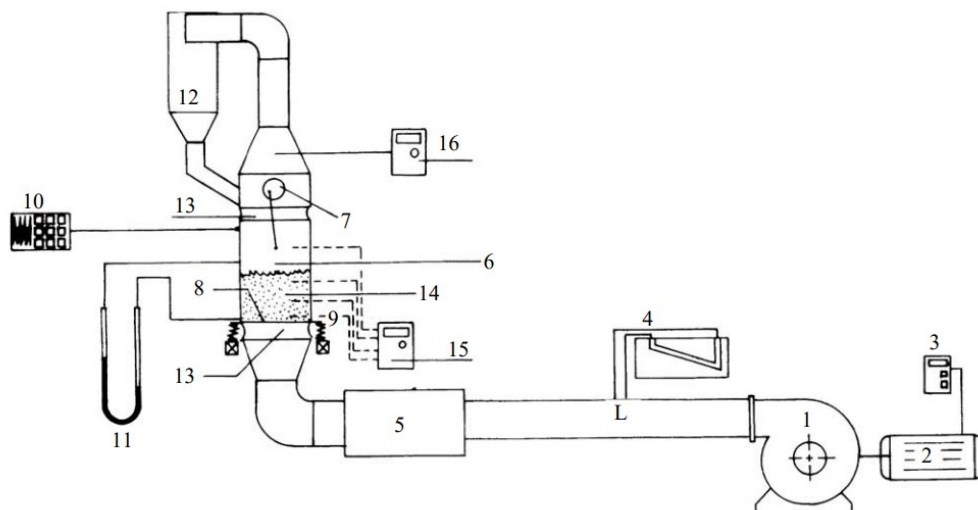


Fonte: Ahmed *et al.* (2024).

Nesse exemplo, o material é alimentado dentro do corpo cilíndrico do equipamento, enquanto o gás é introduzido na base passando pela placa distribuidora, que inicialmente serve de suporte para o leito de partículas. A região de maior diâmetro corresponde à zona de expansão, onde ocorre a fluidização das partículas, que são separadas do fluxo gasoso. O gás, é direcionado ao topo do equipamento, podendo ser reutilizado, enquanto as partículas são recirculadas. Durante a secagem, ocorre a transferência de água do material para o gás, sendo que o movimento das partículas intensifica a transferência de massa e calor (Ahmed *et al.*, 2024).

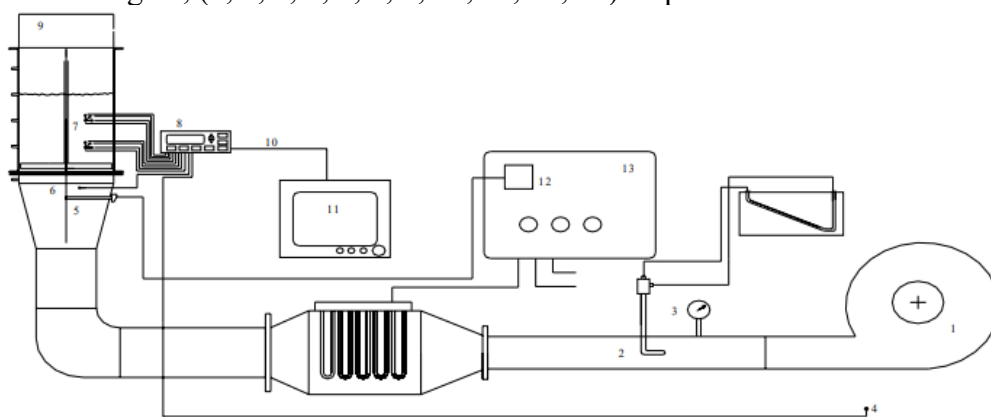
A Figura 17 ilustra apenas o funcionamento de uma câmara de secagem do leito fluidizado; contudo, em escala industrial, é importante considerar todos os equipamentos que compõem o processo. Existem diferentes configurações de equipamentos para processos em leitos fluidizados, que variam conforme as características do processo, do fluido e das partículas (Ahmed *et al.*, 2024). As Figuras 18, 19 e 20 exemplificam, respectivamente, diferentes arranjos de secadores em leito fluidizado utilizados na secagem de serragem, biomassa florestal (matéria orgânica como galhos, folhas e madeiras) e ácido 2-hidroxibenzoico (na forma de cristais de pó).

Figura 18 - Esquema de sistema para secagem em leito fluidizado: (1) soprador de ar, (2) motor, (5) aquecedor de ar, (6) câmara vibrada para testes em leito vibrofluidizado, (7) vibrador, (8) distribuidor de ar, (9) molas, (12) ciclone, (13) mangueira flexível, (14) leito de partículas, (3, 4, 10, 11, 15 e 16) Dispositivos de medição.



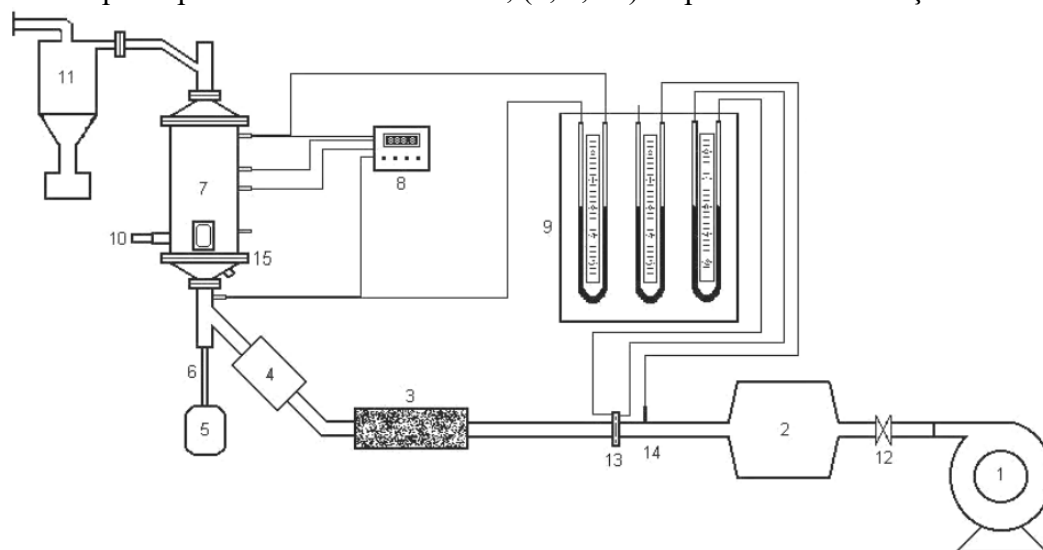
Fonte: Moreno; Rios (2002).

Figura 19 - Esquema de leito fluidizado agitado mecanicamente: (1) soprador, (9) câmara de secagem, (2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13) dispositivos de controle.



Fonte: Moreno; Antolín; Reyes (2007).

Figura 20 - Esquema de leito fluidizado rotativo pulsado: (1) soprador de ar, (2) resfriador de ar, (3) leito de sílica em gel, (4), aquecedor elétrico (5) motor elétrico, (6) eixo do motor, (7) leito cilíndrico, (10) amostrador, (11) ciclone, (12) válvula globo, (13) placa de orifício, (15) placa perfurada e disco rotativo, (7, 8, 13) dispositivos de medição.



Fonte: Ambrosio-Ugri; Taranto (2007).

4.2 Congelamento

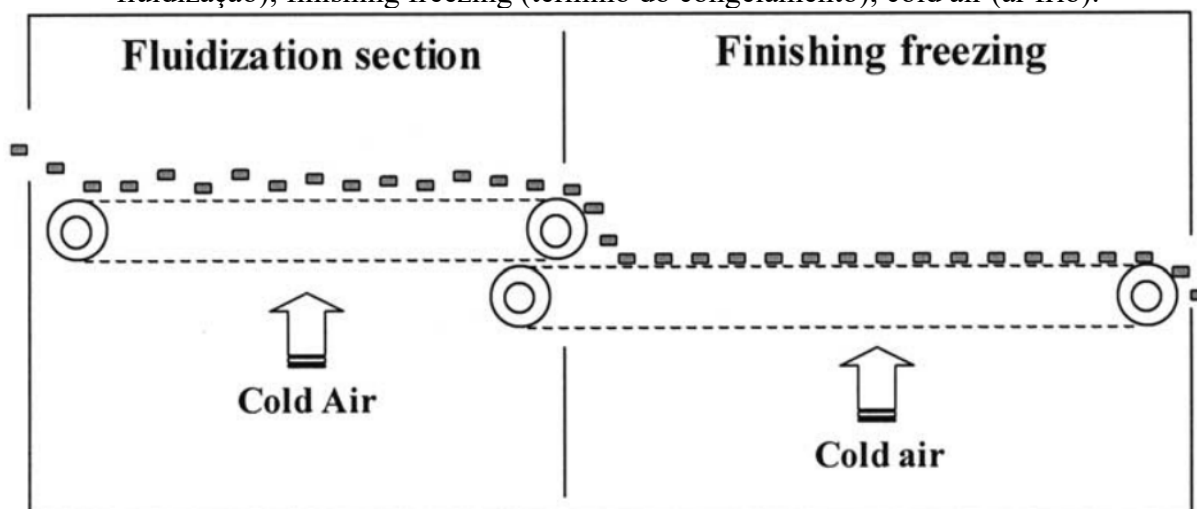
O uso de leitos fluidizados em processos de congelamento iniciou-se comercialmente na década de 1960, sendo utilizado principalmente no congelamento rápido individual (IQF, *individual quick freezing*) (Khairullah; Paul Singh, 1991). Esse método emprega ar em alta velocidade e baixa temperatura (-30 a -40°C) para reduzir rapidamente a temperatura do produto até o ponto de congelamento, preservando as células e minimizando perdas nutricionais e sensoriais dos alimentos (Jo *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2018).

O processo apresenta diversas vantagens, como elevada taxa de congelamento devido ao intenso contato entre o ar e o produto fluidizado, preservação da qualidade dos alimentos e possibilidade de automação do processo para produção contínua (Evans, 2008). Nesses equipamentos, o ar escoia a alta velocidade, através de uma esteira perfurada, que transporta o alimento. Controlam-se a espessura da camada do alimento (altura do leito de partículas) e o tempo de residência, de forma a assegurar o congelamento eficiente.

Os equipamentos de congelamento em leito fluidizado podem variar quanto ao seu *design*, sendo que, em alguns adota-se uma primeira etapa de congelamento rápido em fina camada, formando uma película superficial de gelo que evita a aglomeração e a desidratação, especialmente em frutas, seguida pela conclusão do congelamento. A Figura 21 ilustra o processo de congelamento em leito fluidizado. O produto é alimentado no equipamento,

resfriado/congelado com ar que circula em sistema fechado (com reaproveitamento após remoção do calor), e descarregado já congelado. Em determinadas configurações, utiliza-se uma barreira na esteira, promovendo o acúmulo do material e aumentando a espessura da camada, o que permite controlar tanto o tempo de retenção quanto a uniformidade do congelamento no equipamento (Fellows, 2019).

Figura 21 - Processo de congelamento em leito fluidizado. Fluidization section (seção de fluidização); finishing freezing (término do congelamento); cold air (ar frio).



Fonte: Amarante; Lanoisellé (2005).

5 ESTUDOS DA LITERATURA SOBRE SECAGEM E CONGELAMENTO EM LEITO FLUIDIZADO

Nesse tópico são apresentados exemplos de aplicações de leitos fluidizados voltados para a conservação de alimentos. A Tabela 2 reúne trabalhos da literatura relacionados à secagem e ao congelamento de alimentos por meio de processos em leito fluidizado.

Tabela 2 - Trabalhos que analisaram secagem e congelamento de alimentos utilizando fluidização.

Processo	Matéria-prima utilizada no processo	Objetivo do processo	Principal resultado	Referência
Secagem	Colza	Avaliar a conservação de proteínas e ácidos, e o impacto do processo na qualidade do óleo, na secagem em leito fluidizado e por microondas	A secagem em leito fluidizado preservou melhor os teores de proteína das sementes de colza	Benyoucef; Panigrahi (2025)
Secagem	Leguminosas	Efeito da secagem na redução de compostos e fatores antinutricionais	Secagem em leito fluidizado contribuiu positivamente para a redução de alguns inibidores enzimáticos, com dificuldade para afetar fatores antinutricionais termicamente estáveis	Cheng; Langrish (2025)
Secagem	Painço (<i>finger millet</i>)	Determinar a cinética de secagem e a difusividade de umidade em painço úmido e germinado	Painço germinado apresentou maior difusividade que o úmido; modelo de Page ajustou-se bem	Ramakrishnan <i>et al.</i> (2025)
Secagem	Casca de abóbora	Avaliar a preservação das características físico-químicas do produto seco a 60°C e 70°C	A secagem não comprometeu as propriedades do produto	Román <i>et al.</i> (2025)
Secagem	Pitanga	Desenvolver micropartículas utilizando secagem em leito fluidizado	Obteve-se um resultado promissor, com a secagem aumentando a estabilidade dos compostos ativos da fruta	Santos <i>et al.</i> (2025)
Secagem	Grama de trigo	Avaliar o efeito da secagem em leito fluidizado na retenção de nutrientes e compostos terapêuticos	Obtenção de pós sem perda significativa de macronutrientes, e melhor desempenho na secagem a 60°C	Chakraborty <i>et al.</i> (2023)

Secagem	Grão-de-bico	Reduzir a desnaturação de proteínas durante a secagem e remover inibidores de tripsina	Melhores resultados na secagem a 80°C	Cheng; Langrish (2023)
Secagem	Diversos: arroz, soja, vegetais, frutas, leite, café, entre outros	Revisar aplicações da tecnologia de leito jorro na secagem de produtos alimentícios	Leito jorro é eficiente para secagem, mas limitações de escalonamento restringem aplicação industrial; métodos híbridos combinando leito jorro com outras tecnologias mostram-se promissores	Huang <i>et al.</i> (2023)
Secagem	Cúrcuma	Avaliar o efeito do processo na conservação (secagem em estufa de convecção, secagem em leito fluidizado e secagem solar tradicional) no teor de curcuminoides, capacidade antioxidante e cor	A secagem em leito fluidizado (50–80°C) preservou o teor de curcuminóides e a capacidade antioxidante da cúrcuma, com melhores resultados que a secagem convectiva e solar.	Llano; Gómez; Duarte-Correa (2022)
Secagem	Cenoura	Comparar o desempenho da secagem em leito fluidizado e no sistema <i>refrigeration adsorption dehumidified dryer</i> (RADD) em termos de taxa de secagem, reidratação, encolhimento e retenção de compostos bioativos	O leito fluidizado apresentou maior taxa de secagem, mas o RADD preservou melhor fenólicos, flavonoides e β -caroteno, mantendo boa qualidade sensorial	Nandhu Lal <i>et al.</i> (2022)
Secagem	Levedura	Validar um modelo matemático para o processo de secagem em leito fluidizado de levedura, considerando temperaturas de entrada do ar entre 40–80°C, temperaturas do leito de 10–60°C e massas de 400–600 g	O modelo apresentou excelente concordância com os dados experimentais, mostrando-se adequado para prever o comportamento da secagem de leveduras e de outras culturas iniciadoras usadas na indústria alimentícia.	Soltani <i>et al.</i> (2020a)
Secagem	Levedura	Avaliar o efeito das condições de secagem em leito fluidizado na viabilidade de células de levedura através de um modelo, com o processo ocorrendo em temperaturas do leito de 10 a 60°C, temperaturas do ar de entrada de 30 a 110°C e teores de umidade de 70 a 4% em base úmida	As previsões do modelo apresentaram boa concordância com as observações experimentais, com erro quadrático médio inferior a 3% nas previsões da viabilidade celular, possuindo aplicações claras no projeto, operação e otimização de secadores utilizados na indústria alimentícia	Soltani <i>et al.</i> (2020b)
Secagem	Cenoura	Avaliar a estrutura, volume e propriedades de reidratação da cenoura	O pré-tratamento foi vantajoso do ponto de vista cinético, por acelerar a secagem,	Tatemoto; Hagimoto (2019)

		após secagem, comparando amostras com e sem pré-tratamento por congelamento	mas prejudica a preservação estrutural do tecido vegetal	
Secagem	Pimentão verde	Avaliar três métodos de modelagem (técnica de regressão não linear, Lógica Fuzzy e Redes Neurais Artificiais) para a secagem em leito fluidizado de pimentão verde	Dos três métodos, o que se mostrou mais preciso foi o método de Redes Neurais	Jafari <i>et al.</i> (2016)
Secagem	Diversos: cenoura, maçã, soja, arroz, trigo entre outros	Revisar características de secagem de produtos agropecuários em leito fluidizado e técnicas híbridas	Secagem em leito fluidizado oferece alta transferência de calor/massa e uniformidade; técnicas híbridas (micro-ondas, infravermelho, bomba de calor) melhoraram eficiência e qualidade	Sivakumar <i>et al.</i> (2016b)
Secagem	Cenoura	Avaliar a secagem de cenouras pré-congeladas em leito fluidizado sob pressão reduzida	O pré-tratamento por congelamento aumentou a taxa de secagem e reduziu a mudança de volume; a secagem sob pressão reduzida proporcionou maior taxa, sendo a combinação dos dois processos a mais eficiente para baixa temperatura e mínima retração	Tatemoto <i>et al.</i> (2016)
Secagem	Milho e pistache com casca	Avaliar o desempenho da secagem em leito fluidizado em batelada, com foco nas eficiências energética e exergética, variando massa, temperatura, velocidade do ar e número de Reynolds	O aumento da temperatura e da velocidade do ar reduziu o tempo de secagem. As eficiências energética e exergética dependeram fortemente da vazão mássica do ar, da massa de partículas, do teor de umidade inicial e da temperatura ambiente	Özahi; Demir (2015)
Secagem	Esferas de pós misturados de arroz e proteína de soja	Avaliar se a injeção de solventes orgânicos (etanol, acetato de etila ou isopropanol) aumenta a taxa de secagem de bolas de mistura de arroz e proteína de soja em leito fluidizado sob pressão reduzida	Etanol e acetato de etila aumentaram a taxa de secagem e geraram grandes poros na superfície; isopropanol não teve efeito significativo	Tatemoto <i>et al.</i> (2015)

Secagem	Feijão-fava	Estudar a secagem em camada fina de feijão-fava em leito fixo e semi-fluidizado, aplicando temperaturas de ar de 40, 50, 60 e 70 °C	Os valores de difusividade da umidade para a primeira e segunda fase de secagem em taxa decrescente variaram, sendo que os valores máximos de difusividade da umidade pertenciam à condição de leito semi-fluidizado	Amiri Chayjan; Shadidi (2014)
Secagem	Folhas de limão-Kaffir	Avaliar a retenção de vitaminas A e C, e cor	A secagem em leito fluidizado reduziu o tempo de secagem e preservou melhor a cor e os compostos bioativos em comparação à secagem ao sol e em estufa	Tasirin <i>et al.</i> (2014)
Secagem	Cenoura	Preservar a qualidade do produto, com ênfase na avaliação da cor e encolhimento	A secagem em leito fluidizado levou a pouca variação na cor e formato das amostras	Tatemoto; Michikoshi, (2014)
Secagem	Sementes de abóbora	Avaliar a secagem de sementes de abóbora em camada fina em leito semi-fluidizado e fluidizado	Os resultados mostraram que o leito semi-fluidizado foi mais eficaz para a secagem convectiva das sementes de abóbora	Chayjan <i>et al.</i> (2013)
Secagem	Trigo germinado	Avaliar o processo de secagem de trigo germinado em leito fluidizado	Obteve-se excelente capacidade de reidratação do trigo germinado após o processo de secagem e posterior transformação e boa estabilidade de armazenamento do trigo seco, sendo que com a secagem, houve um aumento da luminosidade, enquanto a intensidade de amarelo e de vermelho diminuíram	Shingare; Thorat (2013)
Secagem	Farelo de soja	Investigar experimental e numericamente a cinética de secagem do farelo de soja em leito fluidizado, avaliando efeitos de temperatura, velocidade do ar e altura do leito	A secagem ocorreu apenas no período de taxa decrescente, controlada pela difusão interna; a temperatura teve efeito significativo, mas a altura do leito e a velocidade do ar não. O modelo CFD (<i>Computational Fluid Dynamics</i>) mostrou boa relação com os dados experimentais	Da Silva <i>et al.</i> (2012)
Secagem	<i>Enterococcus faecium</i> M74	Avaliar a secagem em leito fluidizado de <i>Enterococcus faecium</i> M74, considerando pressão do ar de atomização, temperatura e tempo sobre a viabilidade celular	Condições ótimas de 1,5 bar, 37°C e 15 min preservaram a viabilidade; pré-tratamento com sacarose ou leite reduziu	Stummer <i>et al.</i> (2012)

			perdas, e as células apresentaram melhor fluidez que as liofilizadas	
Secagem	Cenoura	Investigar as análises de energia e exergia na secagem em leito fluidizado de cubos de cenoura, utilizando ar de entrada nas temperaturas de 50, 60 e 70°C, profundidades de leito de 30, 60 e 90 mm, e dimensões dos cubos de cenoura de 4, 7 e 10 mm.	Observou-se que partículas menores, leitos mais profundos e altas temperaturas do ar de entrada aumentaram a utilização de energia, a razão de utilização de energia e a perda de exergia devido ao elevado valor de transferência de calor e massa	Nazghelichi; Kianmehr; Aghbashlo (2010)
Secagem	Arroz ceroso	Avaliar a qualidade do arroz em termos de quantidade de grãos inteiros, cor, microestrutura e grãos translúcidos	A secagem leito fluidizado em altas temperaturas melhorou a qualidade dos grãos inteiros	Jaiboon <i>et al.</i> (2009)
Secagem	Coco	Avaliar a cinética de secagem em leito fluidizado em camada fina de coco picado. Foram utilizadas temperaturas de 60 a 120°C e velocidade constante de 2,5 m/s	A secagem em leito fluidizado foi caracterizada pelo período de taxa decrescente, descrita adequadamente pelo modelo de Henderson e Pabis modificado, com coeficientes de difusão mais elevados que os obtidos em secadores de bandejas	Madhiyanon; Phila; Soponronnarit (2009)
Secagem	Milho miúdo (<i>millet</i>)	avaliar a cinética de secagem do milheto em leito fluidizado em batelada	Observou-se aumento da taxa de secagem com temperatura e vazão do ar e redução com maior carga sólida. O modelo de Page descreveu melhor os dados, e a difusividade efetiva foi inferior à de outros grãos como ragi e milho	Srinivasakannan; Balasubramanian (2009)
Secagem	Macarrão	Avaliar o efeito de micro-ondas na secagem em leito fluidizado em esferas de macarrão de 2,4 mm de diâmetro, nas temperaturas de 50, 60 e 70°C até atingirem aproximadamente 12% de umidade	Observou-se que a taxa de secagem aumentou com a temperatura do ar e as potências do micro-ondas, reduzindo significativamente o tempo de secagem, sendo que o leito fluidizado com associação a micro-ondas reduziu o tempo de secagem em 50%	Goksu; Sumnu; Esin (2005)
Secagem	Pimenta-do-reino	Investigar o teor médio de umidade e a taxa de secagem de pimentas-do reino secas em	Constatou-se que o uso de micro-ondas do secador combinado pode aumentar o potencial da secagem convencional em	Kaensup; Wongwises (2004)

		um secador de leito fluidizado e um secador combinado (micro-ondas/leito fluidizado)	leito fluidizado; as taxas de secagem de ambos os secadores dependeram da temperatura e da velocidade do ar	
Secagem	Feijão-verde, batata e ervilha	Avaliar o efeito da forma geométrica (paralelepípedo, cilindro, esfera) e da temperatura (30–50°C) na cinética de secagem em leito fluidizado, ajustando modelos exponencial e de Page	A difusividade efetiva foi pouco afetada pelo tamanho quando considerado o movimento tridimensional da umidade; a temperatura teve forte efeito, sendo a resistência à difusão maior para ervilhas do que para feijão e batata	Senadeera <i>et al.</i> (2003)
Secagem	Cenoura	Avaliar o encolhimento volumétrico durante a secagem em leito fluidizado e correlacioná-lo com o teor de umidade sob diferentes condições (temperatura, umidade do ar, diâmetro da amostra cilíndrica, umidade inicial, velocidade do ar e presença de partículas inertes)	O encolhimento apresentou forte correlação com o teor de umidade; temperatura, velocidade do ar e partículas inertes tiveram pouca influência no fenômeno	Hatamipour.; Mowla (2002)
Secagem	Cenoura	Determinar as curvas de secagem em secador de leito fluidizado com agitação mecânica e propriedades da cenoura	A cinética de secagem foi modelada pela segunda lei de Fick, apresentando excelente concordância com os dados experimentais. Verificou-se que a perda de carotenos foi minimizada a 130°C, com tempo de secagem inferior a 12 min	Reyes; Alvarez; Marquardt (2002)
Congelamento	Vegetais	Obter características experimentais do coeficiente de transferência de calor durante o congelamento por fluidização com impacto (<i>impingement fluidized freezing</i>) utilizando fatias de vegetais com dimensões de $3 \times 3 \times 0,5$ cm	Constatou-se forte correlação entre os valores do coeficiente de transferência de calor obtidos pelo modelo proposto e os valores experimentais	Góral; Kluza (2012)
Congelamento	Produtos alimentícios em geral	Revisar processos de congelamento utilizados na indústria alimentícia	O congelamento rápido preserva melhor a qualidade; técnicas criogênicas e sistemas combinados (criogênico-mecânico) oferecem vantagens de qualidade e economia	George (1993)
Congelamento	Ervilha, cereja e rabanete	Avaliar as condições operacionais ótimas para preservação dos vegetais	No congelamento em leito fluidizado o coeficiente de transferência de calor é de	Khairullah; Paul Singh, (1991)

			grande importância para eficiência do processo, e aumenta com o número de Reynolds até o ponto de mínima fluidização	
Congelamento	Cenoura	Estudar os coeficientes de transferência de calor no congelamento de cenouras em leito fluidizado e por convecção forçada de ar	Desenvolveu-se um modelo de transferência de calor para leitos fluidizados de partículas grandes, permitindo prever as características do processo	Sheen; Whitney (1990)
Congelamento	Frutas e vegetais	Determinar as propriedades de alimentos congelados	As propriedades dos alimentos congelados em leito fluidizado dependem linearmente da porcentagem de água congelada	Marin; Rios; Gibert (1985)
Congelamento	Ervilha	Comparar o processo de congelamento de ervilhas em leito fixo e em leito fluidizado	O leito fluidizado apresentou maior produtividade e menor consumo de energia que o leito fixo	Reynoso; Calvelo (1985)
Congelamento	Ervilha	Analisar o movimento das partículas e tempo de residência em congelador de leito fluidizado	Foi desenvolvido um modelo que permite prever o tempo mínimo de residência, o coeficiente de transferência de calor e a taxa de produção em leitos fluidizados	Vázquez; Calvelo (1983)
Congelamento	Frutas e vegetais	Avaliar a melhoria da qualidade do produto e sua preservação para armazenamento por congelamento rápido utilizando nitrogênio líquido aspergido em leito fluidizado	O uso de nitrogênio líquido levou a um congelamento mais rápido, o que impactou na formação de pequenos cristais de gelo, causando menor dano ao produto e gerando alimentos com qualidade preservada	Reid; Stark (1975)
Congelamento e secagem	Batata	Preservação da qualidade do produto	Os processos de leito fluidizado mostraram-se adequados e versáteis para a preservação de alimentos em pequena escala	Reid; Stark (1974)
Desinfecção usando plasma atmosférico	Milho	Inativação de esporos fúngicos aflatoxigênicos em milho	Reduções mais significativas obtidas com tratamento por 5 min no reator com leito fluidizado de 49 mm de diâmetro	Dasan; Boyaci; Mutlu (2016)

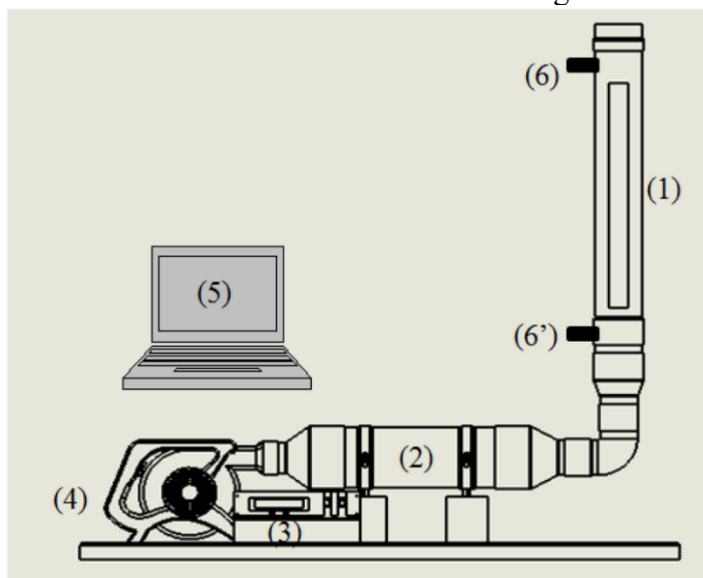
Secagem em dois estágios	Intestino bovino	Preservação da qualidade dos intestinos bovinos	Esse processo de secagem em leito fluidizado é uma tecnologia eficiente e ecologicamente correta que melhora a remoção de umidade, mantendo a qualidade do produto	Senadeera; Alves-Filho; Eikevik (2012)
Resfriamento e congelamento	Peixes	Avaliação de um método de resfriamento e congelamento usando fluidização intensiva de água para conservação de peixes	Congelamento mais rápido do que em túneis de congelamento e com baixo consumo de energia	Fikiin (1992)

Fonte: O autor.

Como visto na Tabela 2, a secagem em leito fluidizado pode ser aplicada em diversos alimentos. No estudo de Abdesslem, Hemis e Raghavan (2023) foi avaliada a cinética do processo de secagem de fatias de alho em leito fluidizado. O alho possui diversos compostos com efeitos benéficos à saúde, principalmente a cardiovascular, um dos fatores avaliados no produto seco foi o teor de alicina, um composto organossulfurado, conhecido por seus benefícios antimicrobianos, antioxidantes e cardiovasculares. Esses atributos conferem grande valor ao consumo do alho, bem como à sua aplicação na medicina alternativa. No entanto, a presença de alicina no pó de alho tende a diminuir com o aumento da temperatura do processo, sendo observada melhor retenção desse composto em temperaturas mais baixas, entre 40 e 50°C (Thakur *et al.*, 2024).

Nesse estudo de Abdesslem, Hemis e Raghavan (2023), as fatias de alho utilizadas apresentavam espessura de 3 mm, pesando em torno de 100 g, e teor de umidade inicial de 68% [b.u]. O secador de leito fluidizado utilizado no estudo é apresentado na Figura 22. A unidade experimental era composta por um cilindro de secagem (1), pelo aquecedor (2), um soprador centrífugo (4) e por dispositivos para medição, sendo uma placa de aquisição de dados (3) e dois sensores de temperatura (6 e 6'), que enviavam os dados a um computador externo (5) (Abdesslem; Hemis; Raghavan, 2023).

Figura 22 - Secador de leito fluidizado usado na secagem das fatias de alho.



Fonte: Abdesslem, Hemis, Raghavan (2023).

A secagem foi conduzida com vazão de ar de 0,034 kg.s⁻¹ nas temperaturas de 45°C, 50°C, 55°C e 60°C. A Figura 23 mostra as fatias de alho antes e após a secagem, evidenciando a mudança de cor sofrida pelas amostras. Observou-se que as fatias perdem parte da polpa

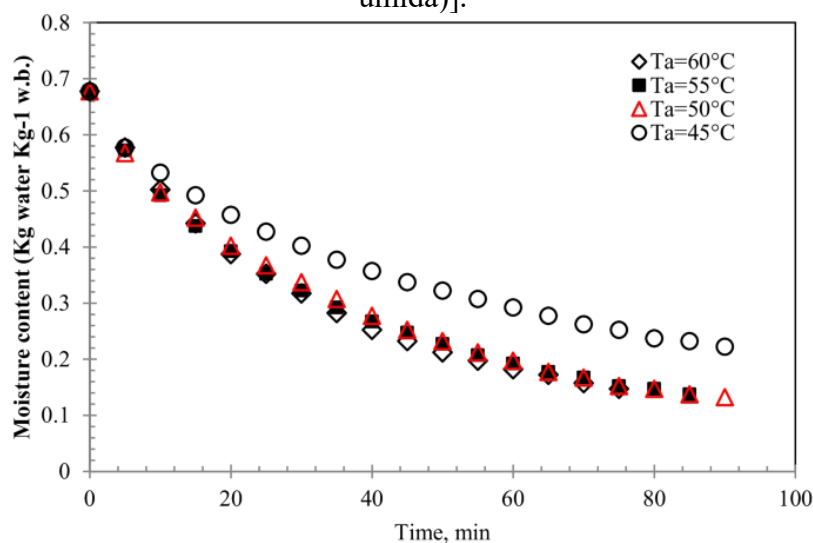
devido as colisões ocorridas durante a secagem, mas mantêm a sua forma original. Os autores perceberam que não houve grandes diferenças no efeito da temperatura na alteração do teor de umidade em temperaturas acima de 50°C (Figura 24). Contudo, o processo foi mais rápido nas temperaturas mais elevadas, quando comparado à secagem a 45°C. Após 90 min, o teor de umidade das fatias secas a 45°C era de aproximadamente 21%, enquanto a 50°C a umidade foi reduzida para 12%. Em relação à taxa de secagem (Figura 25), o trabalho mostrou que a diferença entre as temperaturas acima de 50°C foi muito pequena (Abdesselem; Hemis; Raghavan, 2023).

Figura 23 - Fatias de alho antes e após secagem. Before drying (antes da secagem); after drying (após a secagem).



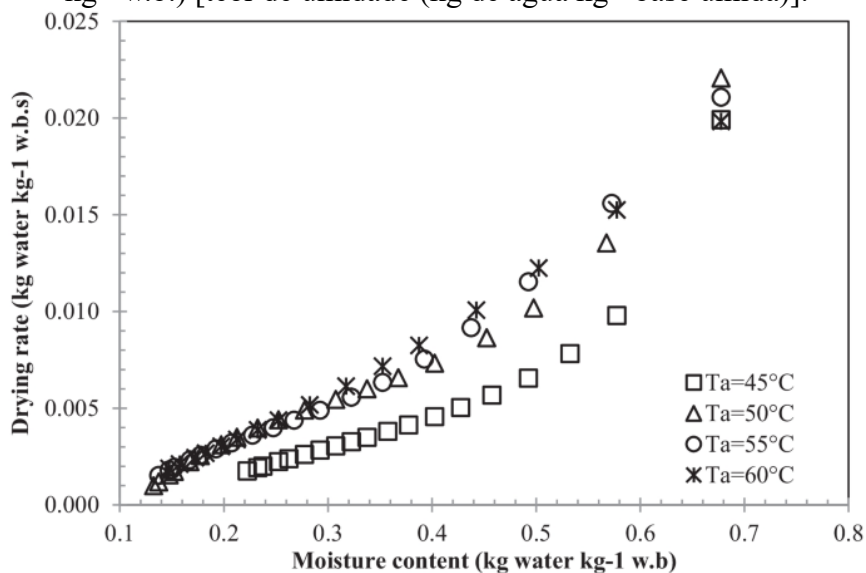
Fonte: Abdesselem, Hemis, Raghavan (2023).

Figura 24 - Cinética de secagem das fatias de alho em secador de leito fluidizado. Time, min (tempo, min); moisture content ($\text{kg water kg}^{-1} \text{ w.b.}$) [teor de umidade ($\text{kg de água kg}^{-1}$ base úmida)].



Fonte: Abdesselem, Hemis, Raghavan (2023).

Figura 25 - Taxa de secagem das fatias de alho em secador de leito fluidizado. Drying rate (kg water kg⁻¹ w.b.) [taxa de secagem (kg de água kg⁻¹ base úmida)]; moisture content (kg water kg⁻¹ w.b.) [teor de umidade (kg de água kg⁻¹ base úmida)].

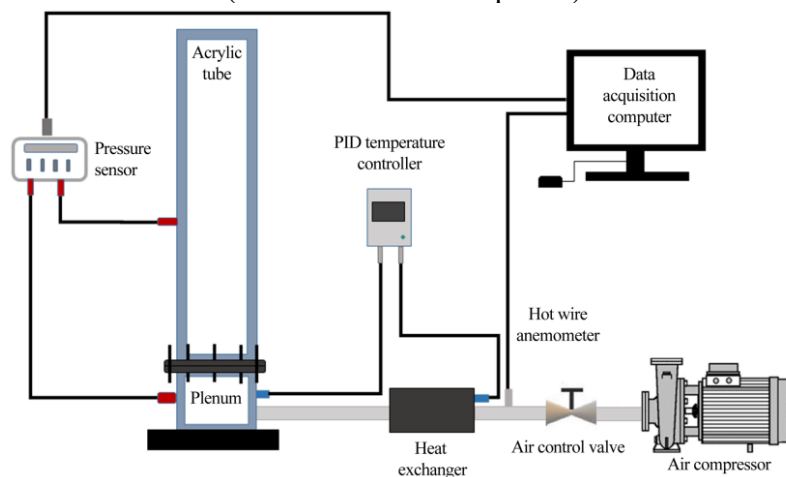


Fonte: Abdesselem, Hemis, Raghavan (2023).

Com base nos resultados, os autores determinaram que a temperatura máxima recomendada para a secagem de alho em leito fluidizado é de 50°C. Concluíram ainda, que a secagem de leito fluidizado apresenta maior eficiência energética, permitindo alcançar baixos teores de umidade em menor tempo, e proporciona melhor preservação da qualidade do alimento. Assim, trata-se de uma técnica eficaz para processos industriais.

Román *et al.* (2025) estudaram a secagem de casca de abóbora em um leito fluidizado. A casca de abóbora, considerada um subproduto do processamento, pode ser aproveitada como ingrediente de valor agregado em alimentos como *snacks*, carnes processadas e sopas, após passar por secagem. A temperatura do processo influencia diretamente a qualidade do produto, razão pela qual se opta, em geral, por temperaturas mais baixas, ainda que resultem em maiores tempos de secagem. No estudo, a unidade experimental de leito fluidizado (Figura 26) foi composta por um compressor centrífugo para fornecimento do ar, aquecido em seguida por um aquecedor elétrico e um leito fluidizado (tubo cilíndrico) para a secagem, conduzida a 60°C e 70°C. Essas temperaturas foram escolhidas por serem adequadas ao equilíbrio entre tempo de processo e preservação do material, uma vez que abaixo de 60 °C a secagem se torna demasiadamente lenta e acima de 70 °C há risco de degradação térmica. As cascas foram cortadas em cubos de 1x1cm, com 0,50 cm de espessura.

Figura 26 - Unidade experimental de leito fluidizado utilizado por Román *et al.* (2025) em seu estudo. Air compressor (compressor de ar); air control valve (válvula de controle de ar); heat exchanger (trocador de calor); plenum (plenário); acrylic tube (tubo de acrílico); pressure sensor (sensor de pressão); PID temperature controller (controle de temperatura PID); data acquisition computer (computador para aquisição de dados); hot wire anemometer (anemômetro de fio quente).



Fonte: Román *et al.* (2025).

A umidade inicial das cascas era de aproximadamente 81%, e após a secagem ficou inferior a 15%, limite estabelecido pelo *Codex Alimentarius* para uso como farinha. Foram avaliados parâmetros de qualidade do produto seco, incluindo o aspecto visual (cor e formato), observado na Figura 27. Verificou-se que o aumento da temperatura intensificou a redução de tamanho (encolhimento) e o escurecimento da casca.

Houve redução do pH e aumento na acidez titulável com a elevação da temperatura, fator relevante para o sabor do alimento e conservação do produto. Não houve grande alteração no teor de lipídeos entre os processos. Já o teor de cinzas aumentou de 9,9% na amostra fresca para 10,4% e 10,8%, após a secagem a 60°C e 70°C, respectivamente. A proteína apresentou comportamento distinto: de 17,2% no material fresco para 14,7% a 60 °C e 18,6% a 70 °C, sem diferenças estatisticamente significativas em relação à amostra *in natura*. Também foi observada maior redução de lignina a 60 °C, sem impacto significativo no teor fibra bruta, que constitui de 20 a 50% da fibra alimentar total (Román *et al.*, 2025).

Figura 27 - Aparência da casca de abóbora: a) Fresh peel (casca fresca); b) dried peel at 60°C (casca seca a 60°C); c) dried peel at 70°C (casca seca a 70°C).



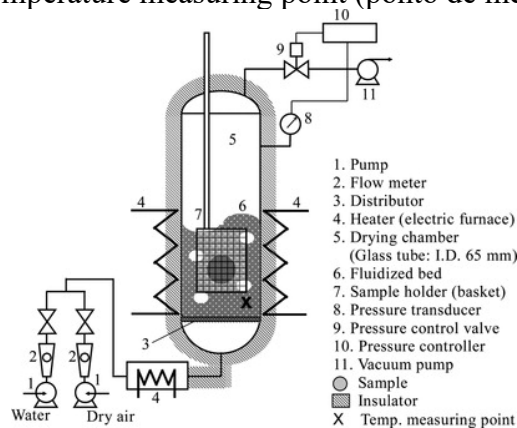
Fonte: Román *et al.* (2025).

Concluiu-se que a maioria das características físico-químicas da casca de abóbora não apresentou alterações expressivas dentro da faixa de 60 a 70°C. Assim, a secagem nesse intervalo de temperatura não compromete significativamente as propriedades do produto, resultando em um pó rico em proteínas, fibras e carboidratos, estes últimos representando mais de 65% do peso seco (Román *et al.*, 2025).

Tatemoto e Michikoshi (2014) avaliaram a preservação da cor e o encolhimento de amostras de cenoura durante a secagem em leito fluidizado sob pressão reduzida e atmosférica, utilizando ar quente a 60 (a 12 e 101 kPa), 100°C (a 101 kPa), 150°C (a 101 kPa) e vapor superaquecido a 60°C (a 12 kPa) como gás de secagem/fluidização. A velocidade do gás foi fixada em duas vezes a velocidade mínima de fluidização, determinada experimentalmente. Como partículas fluidizantes, empregaram-se pós de arroz, de cenoura e esferas de vidro (inerte). Observou-se que, em altas velocidades, a queda de pressão se manteve praticamente constante, enquanto abaixo da velocidade mínima de fluidização, ela diminuía com a redução da velocidade. Os resultados também foram comparados com um processo sem o uso de leito fluidizado.

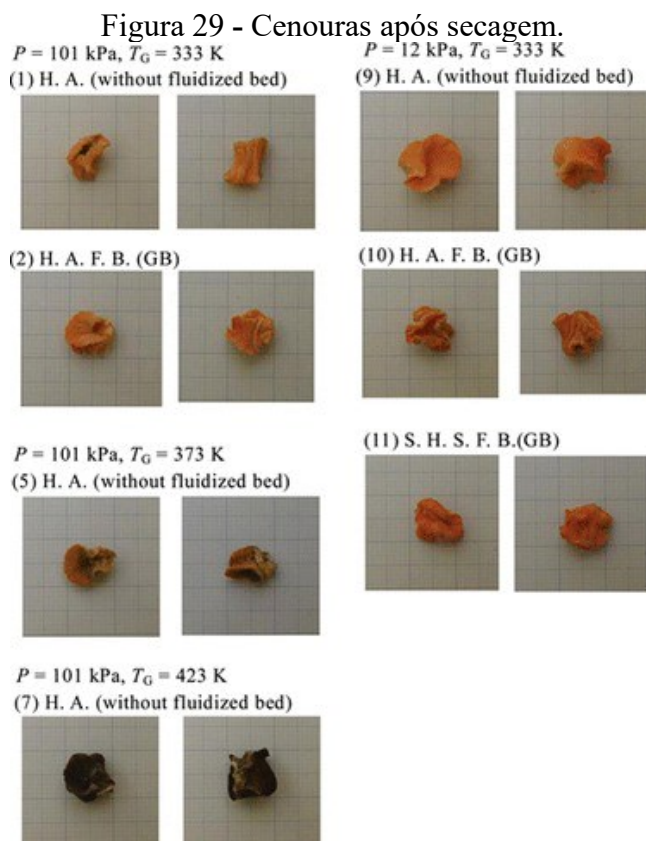
As cenouras foram cortadas em discos com 10 mm de espessura e 15 mm de diâmetro, pré-aquecidas e colocadas em um suporte no centro do leito fluidizado (item 7 na Figura 28). A secagem em leito fluidizado foi mais rápida que a secagem convencional por ar quente, apresentando tempos suficientemente reduzidos, em especial quando se utilizaram esferas de vidro como partículas inertes auxiliares na fluidização. Além disso, a secagem em leito fluidizado resultou em maior taxa de transferência de calor da superfície da amostra (Tatemoto; Michikoshi, 2014).

Figura 28 - Leito fluidizado utilizado para a secagem de cenoura. Pump (bomba); flow meter (medidor de fluxo); distributor (distribuidor); heater (eletric furnace) [aquecedor (forno elétrico)]; drying chamber (glass tube) [câmara de secagem (tubo de vidro)]; fluidized bed (leito fluidizado); sample holder (basket) [suporte de amostra (cesto)]; pressure transducer (transdutor de pressão); pressure control valve (válvula de controle de pressão); pressure controller (controlador de pressão); vacuum pumper (bomba de vácuo); sample (amostra); insulator (isolador); temperature measuring point (ponto de medição de temperatura).



Fonte: Tatamoto; Michikoshi (2014).

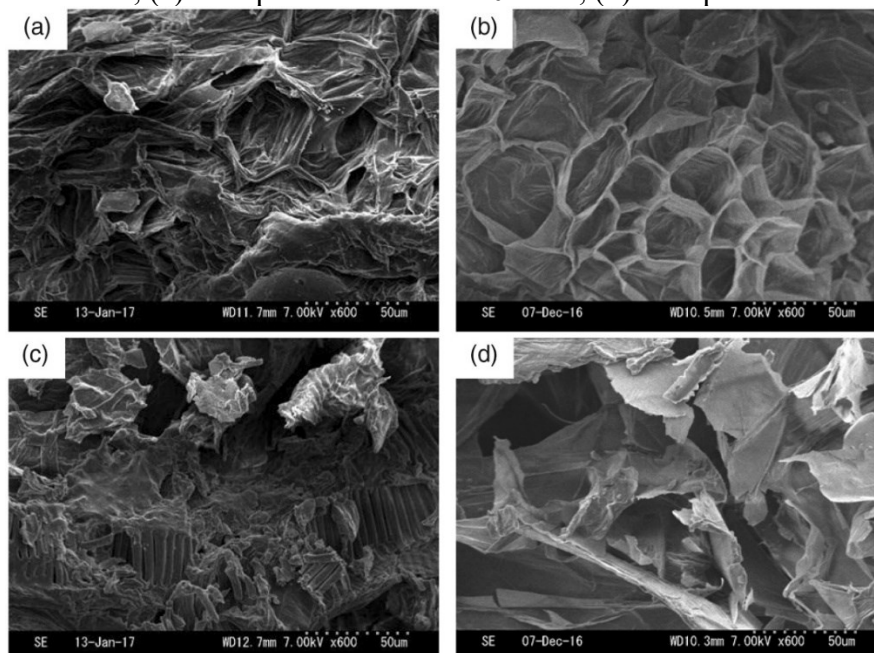
Na Figura 29 são mostradas imagens das cenouras após secagem em diferentes condições de processo. A sigla H.A. se refere à secagem com ar quente sem leito fluidizado, H.A.F.B. corresponde à secagem com ar quente em leito fluidizado, e S.H.S.F.B indica secagem em leito fluidizado com vapor superaquecido. Os autores relataram que, em relação ao volume, as alterações foram menores em leito fluidizado; contudo, de modo geral, não foram observadas grandes diferenças entre os tratamentos. A alteração na cor aumentou com a elevação da temperatura, associada à degradação da qualidade da cenoura. Sob pressão reduzida, a alteração de cor foi mais acentuada, especialmente nos processos com leito fluidizado, ainda que as diferenças tenham sido pequenas. a secagem a pressão atmosférica, sem uso de leito fluidizado, o aumento da temperatura de 373 K (100°C) para 423 K (150°C) provocou alterações expressivas na cor, enquanto nos processos a baixa temperatura (333K ~60°C) as mudanças foram pouco significativas. Por fim os autores concluíram que as partículas fluidizantes (inertes adicionados ao leito que auxiliam na fluidização) não exerceram influência relevante na secagem, que os processos em leito fluidizado apresentaram melhor desempenho global e que as taxas de secagem foram maiores sob pressão reduzida. Quanto à qualidade do produto, as principais alterações ocorreram na cor em altas temperaturas (Tatamoto; Michikoshi, 2014).



Fonte: Tatemoto; Michikoshi (2014).

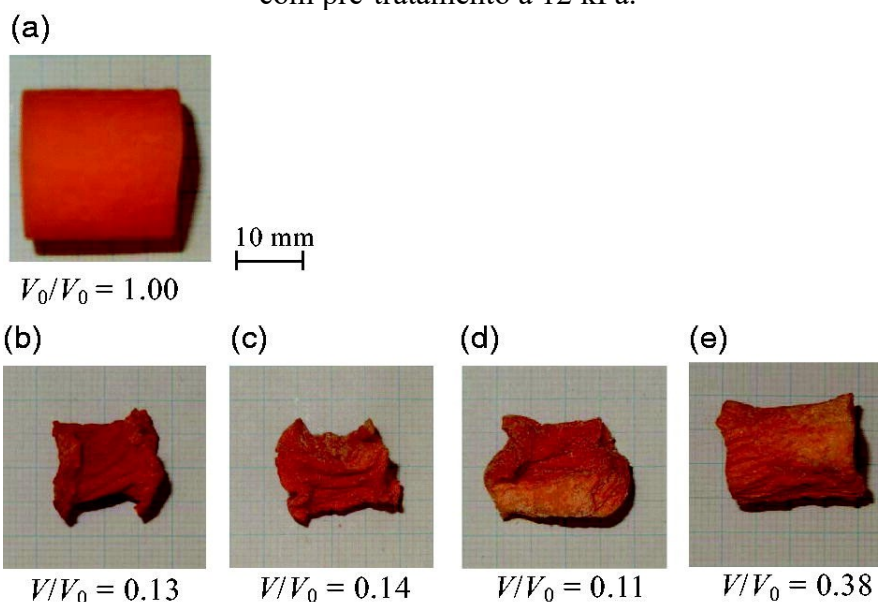
Em outro estudo, Tatemoto e Hagimoto (2019) avaliaram a secagem em leito fluidizado de cenouras pré-tratadas com congelamento, conduzida sob baixa pressão (12 kPa) e à pressão atmosférica (101 kPa). De acordo com os autores, as amostras de cenoura foram cortadas em formato cilíndrico, com massas variando entre, 6,80 a 7,20 g, e a secagem foi realizada com velocidade do gás equivalente a 1,5 vezes a velocidade mínima de fluidização. As cenouras submetidas ao pré-tratamento apresentaram maiores taxas de secagem, independentemente da pressão, porém com danos à parede celular (Figura 30). Já as amostras sem pré-tratamento, embora tenham apresentado maior encolhimento, mantiveram a sua estrutura preservada. A coloração e o encolhimento das amostras secas podem ser observados na Figura 31. Sob baixa pressão, as amostras pré-congeladas apresentaram menor encolhimento pois a camada congelada demorou um tempo maior para descongelar enquanto a água líquida evaporava rapidamente devido à alta taxa de secagem no leito fluidizado. Em contrapartida, em pressão atmosférica, a camada congelada descongelou rapidamente, mas a evaporação da água líquida ocorreu de forma mais lenta, persistindo por mais tempo na amostra. Dessa forma, o pré-tratamento por congelamento não contribuiu para reduzir o encolhimento nessa condição. Concluiu-se, portanto, que o pré-tratamento foi vantajoso do ponto de vista cinético, por acelerar a secagem, mas prejudicou a preservação estrutural do tecido vegetal.

Figura 30 - Estrutura das cenouras secas (a) sem pré-tratamento a 101 kPa, (b) sem pré-tratamento a 12 kPa, (c) com pré-tratamento a 101 kPa, (d) com pré-tratamento a 12 kPa.



Fonte: Tatamoto; Hagimoto (2019).

Figura 31 - Amostras de cenouras (a) antes da secagem; e após a secagem: (b) sem pré-tratamento a 101 kPa, (c) sem pré-tratamento a 12 kPa, (d) com pré-tratamento a 101 kPa, (e) com pré-tratamento a 12 kPa.

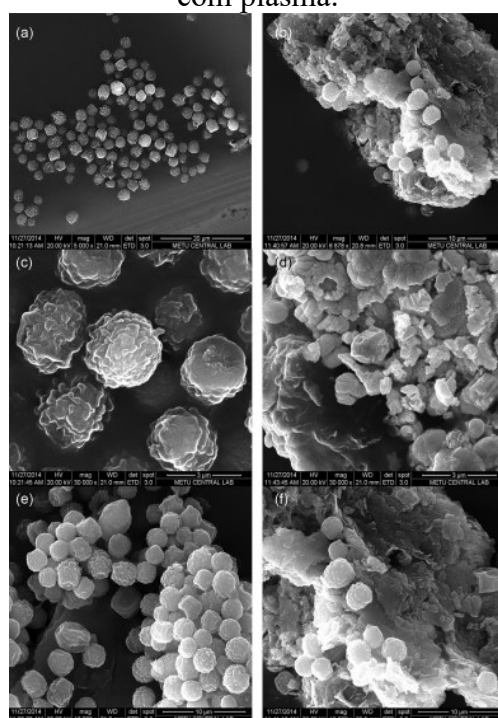


Fonte: Tatamoto; Hagimoto (2019).

Dasan, Boyaci e Mutlu (2016) avaliaram a inativação de fungos aflatoxigênicos em milho por meio de um sistema de plasma de leito fluidizado de pressão atmosférica não térmica (APFBP), utilizando dois tipos de reatores com diâmetros distintos (49 e 65 mm). Foram utilizadas amostras de 10 g de grãos de milho contaminado. O plasma, gerado em um bico com

eletrodos, expande-se com o fluxo de gás até o leito onde ocorre o tratamento. Os ensaios foram conduzidos com diferentes gases (ar ou nitrogênio) e tempos de exposição entre 1 e 5 min. O tratamento com plasma causou severos danos à estrutura dos fungos (Figura 32). Esse efeito antimicrobiano decorre da ação de partículas carregadas e espécies reativas geradas no plasma, que danificam a membrana celular, permitindo maior penetração e ocasionando também lesões no DNA e a ruptura das ligações químicas. As reduções mais significativas foram observadas no reator de 49 mm de diâmetro, usando ar para formação do plasma e um tempo de 5 min de processamento. Os resultados obtidos na amostra de milho indicaram que o desempenho foi superior aos obtidos com avelã em outro estudo dos autores, o que se explica pela menor penetração do plasma em superfícies rugosas, sendo esse um ponto importante a se considerar na aplicação da técnica.

Figura 32 - Estrutura morfologia dos esporos de *Aspergillus* spp. (a,c) *A. flavus* não tratado, (b,d) *A. flavus* tratado com plasma, (e) *A. parasiticus* não tratado, (f) *A. parasiticus* tratado com plasma.

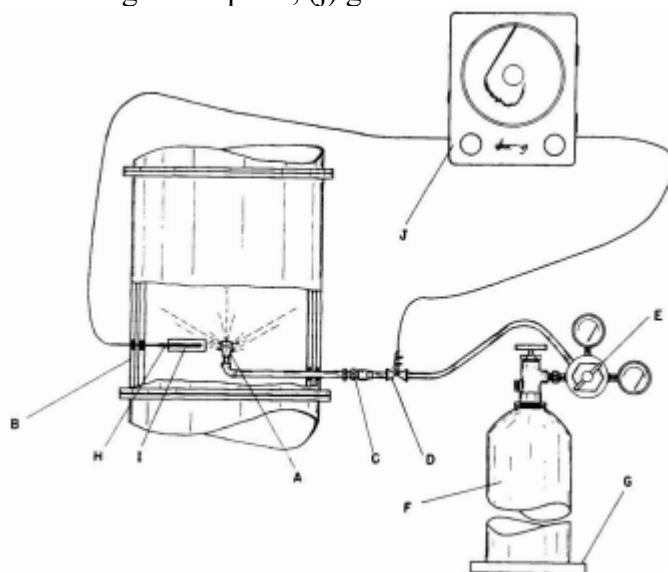


Fonte: Dasan, Boyaci e Mutlu (2016).

Reid e Stark (1975) desenvolveram e avaliaram um sistema de congelamento em leito fluidizado assistido por nitrogênio líquido (LN₂) (Figura 33), aplicado a frutas e vegetais previamente cortados em cubos. O leito fluidizado utilizava ar a -40°C como fluido de fluidização, enquanto o LN₂ era injetado diretamente no interior do leito por meio de um cabeçote de pulverização, especialmente projetado para distribuir o fluido criogênico de forma

homogênea. Essa configuração permitiu combinar a eficiência de troca térmica da fluidização com o intenso resfriamento proporcionado pelo nitrogênio líquido. Os testes demonstraram que a injeção de LN_2 possibilitou reduzir significativamente o tempo total de congelamento e, principalmente, o tempo de permanência das amostras na faixa crítica de cristalização do gelo (entre 0 e -5°C) — fator determinante para a qualidade do produto final. As temperaturas atingidas chegaram a -73°C em cerca de 1,5 minuto, enquanto o sistema convencional de refrigeração mecânica, operando isoladamente, alcançava no máximo -40°C com taxas de resfriamento substancialmente menores. Essa rápida passagem pela zona de congelamento resultou na formação de cristais de gelo menores e mais uniformes, reduzindo danos estruturais às membranas celulares e preservando melhor a textura e integridade do alimento após o descongelamento. Os autores destacam que a integração do sistema de injeção de LN_2 aumentou a versatilidade e eficiência do congelador de leito fluidizado, tornando-o uma ferramenta valiosa para estudos sobre congelamento rápido e conservação de alimentos.

Figura 33 - Esquema do leito fluidizado, da instalação e da injeção do nitrogênio líquido (a) cabeçote de pulverização, (b) leito, (e) regulador de pressão integrado ao tanque, (f) tanque de nitrogênio líquido, (j) gravador/controlador.



Fonte: Reid, Stark (1975).

No trabalho de Chakraborty *et al.* (2023) foi estudado o efeito da secagem na qualidade da grama de trigo, planta jovem recém-germinada de sementes de trigo e reconhecida como fonte de nutrientes e fitoquímicos com propriedades terapêuticas. O objetivo do estudo foi obter um produto que preservasse ao máximo essas propriedades. As temperaturas de secagem adotadas foram de 50, 55, 60, 65 e 70°C , com tempo de 180, 150, 120, 90 e 60 min, respectivamente, e velocidade do ar de 1 m.s^{-1} . A caracterização da amostra *in natura* foi

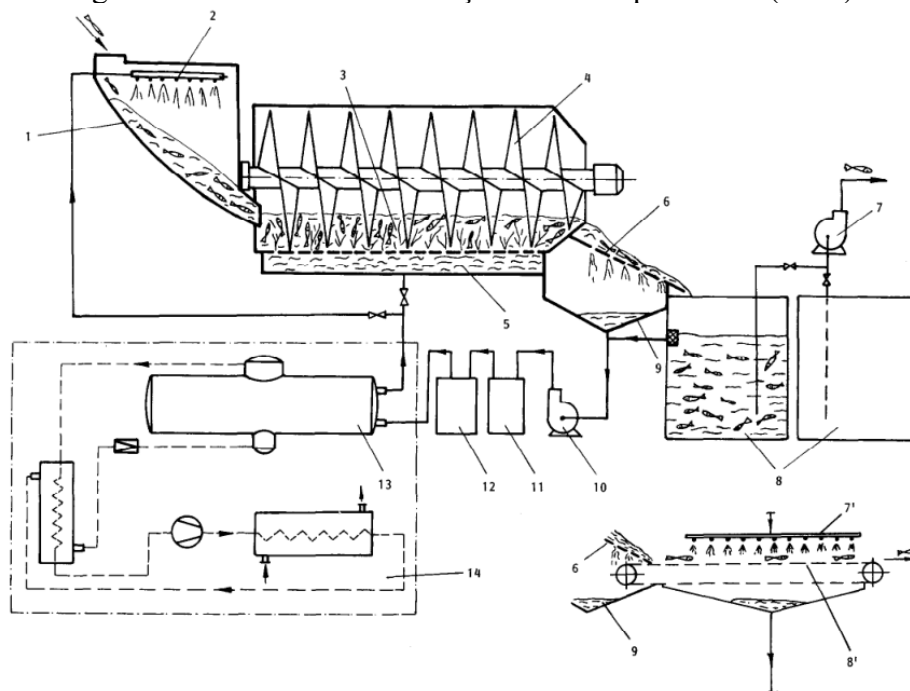
realizada para comparação com o produto seco. Os resultados, apresentados pelos autores, indicaram aumento no teor de fenólicos totais e da atividade antioxidante com o aumento da temperatura, enquanto o teor de clorofila foi reduzido significativamente em temperaturas elevadas. Quanto à taxa de reidratação, os melhores resultados foram obtidos nas menores temperaturas, devido às modificações estruturais e danos causados pelo aquecimento. Resultados semelhantes de reidratação foram relatados por Kakade e Hathan (2014) ao estudar folhas de beterraba. Os pós obtidos também apresentaram altos níveis de macronutrientes, sem perdas significativas, mostrando-se adequado para uso em produtos alimentícios. De modo geral, os autores concluíram que a secagem a 60°C apresentou o melhor desempenho na retenção e estabilidade dos nutrientes e bioativos da grama de trigo.

Cheng e Langrish (2025) apresentaram um trabalho de revisão sobre o efeito de processos de secagem em leito fluidizado nos fatores antinutricionais em leguminosas. Nesse contexto, os autores destacaram cinco aspectos principais: qualidade física, cor, solubilidade de proteínas, teor de umidade e a concentração de fatores antinutricionais. Alguns fatores antinutricionais podem ser reduzidos durante a secagem em leito fluidizado. Entre esses fatores, os inibidores de tripsina, que afetam a digestão de proteínas, apresentam maior taxa de inativação em temperaturas elevadas, como relatado por Osella *et al.* (1997) e Cheng e Langrish (2023). Já os inibidores de α -amilase, reduzem a digestibilidade do amido ao inibir a atividade enzimática. Rekha e Padmaja (2002) observaram a remoção de 80% desses compostos em secagem a 363 K (90°C) por duas horas. O ácido fítico afeta a solubilidade, funcionalidade, digestibilidade e absorção de minerais e proteínas, além de reduzir a conversão de amido em glicose. Embora em algumas dietas esse efeito seja útil, em altas concentrações torna-se problemático por diminuir a disponibilidade de minerais. Os taninos, por sua vez, podem inibir diversas enzimas e formar complexos químicos com proteínas e minerais, reduzindo a absorção de nutrientes. Estudos de Cheng *et al.* (2023), Pande e Mishra (2013) e Muetzel e Becker (2006) mostraram que tanto o ácido fítico quanto os taninos, por serem termicamente estáveis, são pouco ou nada afetados pela secagem em leito fluidizado. No entanto, a aplicação de micro-ondas antes da secagem pode favorecer a remoção do ácido fítico. Conclui-se, portanto, que a secagem em leito fluidizado pode contribuir para a redução de alguns inibidores enzimáticos em leguminosas, mas a combinação com outros processos, como o uso de micro-ondas, é necessária para afetar fatores antinutricionais termicamente estáveis.

Fikiin (1992) avaliou um método baseado na fluidização intensa de água para resfriamento e congelamento de peixes. Cabe destacar que a fluidização não se restringe ao uso de gases (ar quente para secagem ou ar frio para congelamento). Líquidos, como água ou

soluções salinas resfriadas, também podem atuar como fluidos de fluidização. Nesses casos, a suspensão das partículas ocorre de forma mais homogênea devido à maior densidade e viscosidade do meio líquido, o que favorece uma transferência de calor intensa e uniforme. A turbulência gerada, nesse método, proporciona elevados coeficientes de transferência de calor, permitindo um congelamento rápido e preservando a morfologia do tecido muscular. O método também pode ser aplicado ao resfriamento de outros produtos marinhos e de água doce, e de determinados vegetais, mantendo a qualidade por longos períodos. Em comparação com o método tradicional de túneis de congelamento, o sistema apresentou vantagens, como menor tempo de congelamento, simplicidade operacional, baixo custo de mão de obra e menor investimento. Além disso, destacou-se pelo menor consumo de energia no congelamento e menor ganho de calor pelas paredes do equipamento. O sistema do trabalho utilizado é mostrado na Figura 34, embora existam variações em tamanho e configuração, de acordo com a aplicação.

Figura 34 - Sistema de fluidização utilizado por Fikiin (1992).



Fonte: Fikiin (1992).

Reynoso e Calvelo (1985) compararam o congelamento de ervilhas em leito fixo e em leito fluidizado, utilizando equações analíticas para prever as taxas de produção dos congeladores, assumindo temperatura de congelamento constante, transferência de calor em pseudoregime estacionário e temperatura inicial igual à da mudança de fase. Os resultados mostraram que os leitos fluidizados apresentaram resultados 20 a 30% superiores. Para alcançar desempenho equivalente, os leitos fixos demandam consumo de energia até duas vezes maior

que os leitos fluidizados e precisam ser projetados com maiores comprimentos para atingir alturas ótimas de processo, resultando em custos adicionais.

6 CONCLUSÃO

A utilização da fluidização na conservação de alimentos já ocorre há muitos anos, e vem sendo continuamente estudada com o objetivo de aprimorar as características de processo, visando ganhos de qualidade do produto final, redução de consumo de energia, menores tempos de operação, maior taxa de produção e a incorporação de técnicas combinadas.

A fluidização está intrinsicamente relacionada aos leitos fluidizados, cuja aplicação mais comum em alimentos ocorre na secagem e no congelamento. Do ponto de vista teórico, modelos foram apresentados para prever o funcionamento e as condições de operação dos leitos, com destaque para a análise da queda de pressão — parâmetro fundamental por estar diretamente associado ao consumo energético do soprador (ou da bomba, em sistemas de fluidização líquida). Além disso, esse parâmetro se relaciona com a eficiência operacional e a segurança do processo. As equações clássicas deduzidas e validadas por diversos pesquisadores, permanecem como a base para desenvolvimento e avaliação de novos processos.

Por se tratar de um processo complexo, tanto em relação ao equipamento quanto às características do material processado (alimentos, no caso deste trabalho), o conhecimento do comportamento fluidodinâmico mostrou-se indispensável para se prever o comportamento dos sistemas no equipamento.

Em relação à secagem, observou-se maior predominância de estudos sobre pós (ou material particulado) de matérias-primas vegetais e, em menor escala, de produtos de origem animal. Os principais pontos abordados envolvem a preservação da qualidade, o tempo de processo e os custos energéticos. Os leitos fluidizados apresentam como vantagem os elevados coeficientes de transferência de calor, devido à turbulência no leito, que promove contato mais intenso: fluido-partícula e entre partículas. Esse mecanismo reduz o tempo de secagem e os custos operacionais. Apesar do consumo energético elevado, trata-se de uma técnica mais econômica em comparação a outros métodos, como a liofilização, apresentando resultados satisfatórios em relação à qualidade ao produto.

No congelamento, a fluidização é amplamente empregada, sobretudo no congelamento individual rápido (*individual quick freezing* – IQF), que possibilita congelar alimentos em pedaços separados (partículas individuais) e em menor tempo. Assim como na secagem, ocorre elevada transferência de calor e uma grande superfície de contato, o que favorece a formação de pequenos cristais de gelo e reduz os danos estruturais, melhorando a preservação da sua qualidade.

A análise da literatura evidenciou maior volume de estudos sobre secagem em leito fluidizado quando comparado ao congelamento. Ademais, os trabalhos mais relevantes identificados sobre congelamento datam do período de 1974 a 1992, o que levanta o questionamento sobre os avanços e melhorias alcançados por essa tecnologia nas últimas décadas.

Diante de suas vantagens e desvantagens, a fluidização aplicada à conservação de alimentos configura-se como uma tecnologia consolidada, especialmente em escala industrial, pela elevada taxa de produção, possibilidade de operação em regime contínuo ou em batelada e versatilidade de aplicações. Para estudos futuros, recomenda-se aprofundar a investigação sobre a eficiência energética desses equipamentos, buscando soluções que equilibrem eficiência energética e desempenho técnico.

7 REFERÊNCIAS

ABBAS SYED, Q. Pulsed Electric Field Technology in Food Preservation: A Review. **Journal of Nutritional Health & Food Engineering**, [s. l.], v. 6, n. 6, 2017. DOI: <https://doi.org/10.15406/jnhfe.2017.06.00219>.

ABDESSELEM, W.; HEMIS, M.; RAGHAVAN, V. Experimental study of drying garlic slices (*Allium sativum* L.) using a fluidized-bed dryer. **Heat and Mass Transfer**, [s. l.], v. 59, n. 2, p. 229–237, 2023. ISSN: 0947-7411. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00231-022-03259-2>.

AGHABARARNEJAD, M. *et al.* Evaluating the probabilities of fluidization regimes. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, [s. l.], v. 50, n. 8, p. 4245–4251, 2011. ISSN: 08885885. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie100642b>.

AHMED, I. *et al.* Electrically Heated Fluidized Beds—A Review. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [s. l.], v. 63, n. 10, p. 4205–4235, 2024. ISSN: 0888-5885. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c04232>.

ALMEIDA, C. De; ROCHA, S. C. dos S. Fluidodinâmica de sementes de brócolos em leito fluizado e leito de jorro. **Scientia Agricola**, [s. l.], v. 59, n. 4, p. 645–652, 2002. ISSN: 0103-9016. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162002000400004>.

AMARANTE, A.; LANOISELLÉ, J.L. Heat transfer coefficients measurement in industrial freezing equipment by using heat flux sensors. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 66, n. 3, p. 377–386, 2005. ISSN: 02608774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.04.004>.

AMBROSIO-UGRI, M. C. B.; TARANTO, O. P. Drying in the rotating-pulsed fluidized bed. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 95–100, 2007. ISSN: 0104-6632. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-66322007000100009>.

AMIRI CHAYJAN, R.; BAHREABAD, S. M. T.; RAHIMI SARDARI, F. Modeling Infrared-Covective Drying of Pistachio Nuts under Fixed and Fluidized Bed Conditions. **Journal of Food Processing and Preservation**, [s. l.], v. 38, n. 3, p. 1224–1233, 2014. ISSN: 01458892. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfpp.12083>.

AMIRI CHAYJAN, R.; SHADIDI, B. Modeling High-Moisture Faba Bean Drying in Fixed and Semi-Fluidized Bed Conditions. **Journal of Food Processing and Preservation**, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 200–211, 2014. ISSN: 01458892. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2012.00766.x>.

ANDREEVA, O. I.; SHORSTKII, I. A. Innovative physical techniques in freeze-drying. **Foods and Raw Materials**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 341–354, 2025. ISSN: 23109599. DOI: <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2025-2-643>.

ARSHADY, R. Microcapsules for food. **Journal of Microencapsulation**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 413–435, 1993. ISSN: 0265-2048. DOI: <https://doi.org/10.3109/02652049309015320>.

ASRATE, D. A.; ALI, A. N. Review on the recent trends of food dryer technologies and optimization methods of drying parameters. **Applied Food Research Elsevier B.V.**, 2025. (1) ISSN: 27725022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100927>.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. . Water activity in foods : fundamentals and applications. [s. l.], : **John Wiley & Sons, Inc. ; Institute of Food Technologists**, 2020. 616 p. ISBN: 9781118768310.

BENYOUCEF, M.; PANIGRAHI, S. S. Fluidization-bed drying and microwave radiation effects on drying rate, fatty acid, protein and germination of rapeseed. **Journal of Food Composition and Analysis**, [s. l.], v. 142, p. 107562, 2025. ISSN: 0889-1575. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2025.107562>. Disponível em: [https://www.sciencedirect-com.ez34.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0889157525003771?via%3Dihub](https://www.sciencedirect.com.ez34.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0889157525003771?via%3Dihub). Acesso em: 31 ago. 2025.

BERKOWICZ-PLATEK, G.; ŻUKOWSKI, W.; LESKI, K. Combustion of polyethylene and polypropylene in the fluidized bed with a variable vertical density profile. **Energy**, [s. l.], v. 286, 2024. ISSN: 03605442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129611>.

CAMPO-VERA, Y.; GÉLVEZ-ORDOÑEZ, V. M.; AYALA-APONTE, A. Ultrasonido en el procesamiento (homogenización, extracción y secado) de alimentos. **Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial**, [s. l.], 2018. DOI: <https://doi.org/10.18684/bsaa.v16n1.628>. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18684/bsaa.v16n1.628>.

ÇENGEL, Y. A. .; GHAJAR, A. J. . **Heat and mass transfer : fundamentals & applications**. [s. l.], : McGraw Hill Education, 2020. 1013 p. ISBN: 9813158964.

CHAKRABORTY, R. *et al.* Fluidized Bed Drying of Wheatgrass: Effect of Temperature on Drying Kinetics, Proximate Composition, Functional Properties, and Antioxidant Activity. **Foods**, [s. l.], v. 12, n. 8, p. 1576, 2023. ISSN: 2304-8158. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12081576>.

CHAVES-QUESADA, J.; ACOSTA-MONTOYA, O. Isochoric freezing: advantages and research opportunities in the food industry. **Agronomia Mesoamericana**, [s. l.], v. 34, n. 3, 2023. ISSN: 22153608. DOI: <https://doi.org/10.15517/am.2023.52879>.

CHAYJAN, R. A. *et al.* Modeling moisture diffusivity, activation energy and specific energy consumption of squash seeds in a semi fluidized and fluidized bed drying. **Journal of Food Science and Technology**, [s. l.], v. 50, n. 4, p. 667–677, 2013. ISSN: 0022-1155. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0399-8>.

CHEMAT, F.; ZILL-E-HUMA; KHAN, M. K. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 18, n. 4, p. 813–835, 2011. ISSN: 1350-4177. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2010.11.023>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417710002385>. Acesso em: 22 jul. 2025.

CHENG, S. *et al.* The Effects of Fluidized Bed Drying, Soaking, and Microwaving on the Phytic Acid Content, Protein Structure, and Digestibility of Dehulled Faba Beans. **Processes**, [s. l.], v. 11, n. 12, p. 3401, 2023. ISSN: 2227-9717. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr11123401>.

CHENG, S.; LANGRISH, T. A. G. A Review of the Treatments to Reduce Anti-Nutritional Factors and Fluidized Bed Drying of Pulses. **Foods Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)**, 2025. (4) ISSN: 23048158. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods14040681>.

CHENG, S.; LANGRISH, T. A. G. Fluidized bed drying of chickpeas: Developing a new drying schedule to reduce protein denaturation and remove trypsin inhibitors. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 351, p. 111515, 2023. ISSN: 0260-8774. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2023.111515>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877423001139?via%3Dihub>. Acesso em: 7 set. 2025.

CHHABRA, R.; BASAVARAJ, M. G. Fluidisation. **Coulson and Richardson's Chemical Engineering**, [s. l.], p. 449–554, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101098-3.00010-X>. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978008101098300010X>. Acesso em: 3 ago. 2025.

COCCO, R.; CHEW, J. W. 50 years of Geldart classification. **Powder Technology**, [s. l.], v. 428, 2023. ISSN: 1873328X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118861>.

CREMASCO, M. A. **Operações Unitárias Em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos e Outros Trabalhos**. [s. l.], : Editora Edgard Blucher Ltda., 2021. ISBN: 9788521208563.

DA SILVA, F. R. G. B. *et al.* Experimental and numerical analysis of soybean meal drying in fluidized bed. **Powder Technology**, [s. l.], v. 229, p. 61–70, 2012. ISSN: 00325910. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.06.008>.

DAHER, D.; LE GOURRIEREC, S.; PÉREZ-LAMELA, C. Effect of High Pressure Processing on the Microbial Inactivation in Fruit Preparations and Other Vegetable Based Beverages. **Agriculture**, [s. l.], v. 7, n. 9, p. 72, 2017. ISSN: 2077-0472. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture7090072>.

DARVISHI, H.; KHOSHTAGHAZA, M. H.; MINAEI, S. Effects of fluidized bed drying on the quality of soybean kernels. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 134–139, 2015. ISSN: 1658077X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.09.002>.

DASAN, B. G.; BOYACI, I. H.; MUTLU, M. Inactivation of aflatoxigenic fungi (*Aspergillus* spp.) on granular food model, maize, in an atmospheric pressure fluidized bed plasma system. **Food Control**, [s. l.], v. 70, p. 1–8, 2016. ISSN: 09567135. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.05.015>.

DONTHU, N. *et al.* How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. **Journal of Business Research**, [s. l.], v. 133, p. 285–296, 2021 a. ISSN: 01482963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>.

DONTHU, N. *et al.* Research Constituents, Intellectual Structure, and Collaboration Patterns in Journal of International Marketing: An Analytical Retrospective. **Journal of International Marketing**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 1–25, 2021 b. ISSN: 1069-031X. DOI: <https://doi.org/10.1177/1069031X211004234>.

EARLE, R. L. **Unit Operations in Food Processing**. [s. l.], : Elsevier, 1983. ISBN: 9780080255361. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-00556-X>.

EVANS, J. A. . Frozen food science and technology. [s. l.], : **Blackwell Pub.**, 2008. 355 p. ISBN: 9781405154789.

FANG, X. *et al.* Particle-resolved computational fluid dynamics simulation of the heat transfer in fixed-bed reactors for heterogeneous catalysis: A review. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, [s. l.], v. 250, p. 127311, 2025. ISSN: 0017-9310. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2025.127311>. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931025006507?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=96d809eeac5ee3ff. Acesso em: 10 ago. 2025.

FELLOWS, P. J. **Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática**. 4a ed., [S. l.: s. n.], 2006.

FIKIIN, A. G. New method and fluidized water system for intensive chilling and freezing of fish. **Food Control**, [s. l.], v. 3, n. 3, p. 153–160, 1992. ISSN: 09567135. DOI: [https://doi.org/10.1016/0956-7135\(92\)90100-O](https://doi.org/10.1016/0956-7135(92)90100-O).

FU, L. *et al.* Hydrodynamics of gas-solid fluidization at ultra-high temperatures. **Powder Technology**, [s. l.], v. 406, 2022. ISSN: 1873328X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117552>.

FUKASE, E.; MARTIN, W. Economic growth, convergence, and world food demand and supply. **World Development**, [s. l.], v. 132, 2020. ISSN: 18735991. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.104954>.

GARCÍA-PÉREZ, J. V. *et al.* Ultrasonic drying of foodstuff in a fluidized bed: Parametric study. **Ultrasonics**, [s. l.], v. 44, p. e539–e543, 2006. ISSN: 0041624X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2006.06.059>.

GEORGE, R. M. **Freezing processes used in the food industry**. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 4, 1993.

GOKSU, E. I.; SUMNU, G.; ESIN, A. Effect of microwave on fluidized bed drying of macaroni beads. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 66, n. 4, p. 463–468, 2005. ISSN: 02608774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.04.017>.

GOMES VAZ, A. *et al.* Radiação eletromagnética aplicada à conservação de alimentos. **Revista de Enseñanza de la Física**, [s. l.], v. 35, n. 2, p. 165–178, 2023. ISSN: 0326-7091. DOI: <https://doi.org/10.55767/2451.6007.v35.n2.43726>. Disponível em: https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2250-61012023000200165&lng=en&tlng=en. Acesso em: 30 jun. 2025.

GÓRAL, D.; KLUZA, F. Heat transfer coefficient in impingement fluidization freezing of vegetables and its prediction. **International Journal of Refrigeration**, [s. l.], v. 35, n. 4, p. 871–879, 2012. ISSN: 01407007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2011.11.010>.

HATAMIPOUR, M.S; MOWLA, D. Shrinkage of carrots during drying in an inert medium fluidized bed. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 55, n. 3, p. 247–252, 2002. ISSN: 02608774. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00082-1](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00082-1).

HUANG, D. *et al.* Applications of spouted bed technology in the drying of food products. **LWT**, [s. l.], v. 182, p. 114880, 2023. ISSN: 00236438. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114880>.

JAFARI, S. M. *et al.* Modeling the Drying Kinetics of Green Bell Pepper in a Heat Pump Assisted Fluidized Bed Dryer. **Journal of Food Quality**, [s. l.], v. 39, n. 2, p. 98–108, 2016. ISSN: 0146-9428. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfq.12180>.

JAIBOON, P. *et al.* Effects of fluidized bed drying temperature and tempering time on quality of waxy rice. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 95, n. 3, p. 517–524, 2009. ISSN: 0260-8774. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2009.06.019>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026087740900291X>. Acesso em: 2 set. 2025.

JILIANG, M.; XIAOPING, C.; DAOYIN, L. Minimum fluidization velocity of particles with wide size distribution at high temperatures. **Powder Technology**, [s. l.], v. 235, p. 271–278, 2013. ISSN: 00325910. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.10.016>.

JO, Y.-J. *et al.* Effect of Novel Quick Freezing Techniques Combined with Different Thawing Processes on Beef Quality. **Korean Journal for Food Science of Animal Resources**, [s. l.], v. 34, n. 6, p. 777–783, 2014. ISSN: 1225-8563. DOI: <https://doi.org/10.5851/kosfa.2014.34.6.777>.

KAENSUP, W.; WONGWISES, S. Combined Microwave/Fluidized Bed Drying of Fresh Peppercorns. **Drying Technology**, [s. l.], v. 22, n. 4, p. 779–794, 2004. ISSN: 0737-3937. DOI: <https://doi.org/10.1081/DRT-120034262>.

KAKADE, S. B.; HATHAN, B. S. Effect of Blanching and Drying Air Temperature on Quality Characteristics of Beetroot (*Beta vulgaris* L.) Leaves Powder. **International Journal of Advanced Engineering and Management Research**, [s. l.], v. 4, p. 213–219, 2014.

KALETA, A. *et al.* Evaluation of drying models of apple (var. Ligol) dried in a fluidized bed dryer. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 67, p. 179–185, 2013. ISSN: 0196-8904. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2012.11.011>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890412004475?via%3Dihub>. Acesso em: 15 ago. 2025.

KANG, H. J. *et al.* Optimization of Medium Composition and Fluidized Bed Drying Conditions for Efficient Production of Dry Yeast. **Microorganisms**, [s. l.], v. 13, n. 1, 2025. ISSN: 20762607. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms13010022>.

KHAIRULLAH, A.; PAUL SINGH, R. Optimization of fixed and fluidized bed freezing processes. **International Journal of Refrigeration**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 176–181, 1991. ISSN: 0140-7007. DOI: [https://doi.org/10.1016/0140-7007\(91\)90072-O](https://doi.org/10.1016/0140-7007(91)90072-O). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com.ez34.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/014070079190072O?via%3Dihub>. Acesso em: 19 ago. 2025.

KHODADADI, M.; MASOUMI, A. Recent drying technologies used for drying poultry litter (principles, advantages and disadvantages): A comprehensive review. **Poultry ScienceElsevier Inc.**, 2025. (2) ISSN: 15253171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104677>.

LI, T. *et al.* Evaluation of the effects of different freezing and thawing methods on the quality preservation of *Pleurotus eryngii*. **Applied Biological Chemistry**, [s. l.], v. 61, n. 3, p. 257–265, 2018. ISSN: 2468-0834. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13765-018-0354-8>.

LI, L. *et al.* Future directions for multifunctional preservation technologies in food preservation: A review. **Journal of Stored Products ResearchElsevier Ltd**, 2025a. ISSN: 0022474X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2025.102712>.

LI, Y. *et al.* Prediction of separation density of pulsed fluidized bed based on bidisperse particle characteristics. **International Journal of Coal Preparation and Utilization**, [s. l.], v. 45, n. 5, p. 931–949, 2025b. ISSN: 19392702. DOI: <https://doi.org/10.1080/19392699.2024.2361091>.

LIU, J.; LIU, X.; GE, W. EMMS-based modeling of gas–solid generalized fluidization: Towards a unified phase diagram. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, [s. l.], v. 29, p. 27–34, 2021. ISSN: 10049541. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.07.057>.

LLANO, S. M.; GÓMEZ, A. M.; DUARTE-CORREA, Y. Effect of Drying Methods and Processing Conditions on the Quality of Curcuma longa Powder. **Processes**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 702, 2022. ISSN: 2227-9717. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10040702>.

MADHIYANON, T.; PHILA, A.; SOPONRONNARIT, S. Models of fluidized bed drying for thin-layer chopped coconut. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], v. 29, n. 14–15, p. 2849–2854, 2009. ISSN: 13594311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.02.003>.

MARIN, M.; RIOS, G. M.; GIBERT, H. Use of time-temperature data during fluidized bed freezing to determine frozen food properties. **Journal of Food Process Engineering**, [s. l.], v. 7, n. 4, p. 253–264, 1985. ISSN: 0145-8876. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.1985.tb00309.x>.

MASON, T. J.; PANIWNKY, L.; LORIMER, J. P. The uses of ultrasound in food technology. **Ultrasonics Sonochemistry**, [s. l.], v. 3, n. 3, p. S253–S260, 1996. ISSN: 1350-4177. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1350-4177\(96\)00034-X](https://doi.org/10.1016/S1350-4177(96)00034-X). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135041779600034X>. Acesso em: 22 jul. 2025.

MORENO, R. M.; ANTOLÍN, G.; REYES, A. Thermal behaviour of forest biomass drying in a mechanically agitated fluidized bed. **Latin American applied research**, [s. l.], v. 37, n. 2, p. 105–113, 2007. ISSN: 0327-0793. Disponível em:

https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0327-07932007000200001&lng=en&nrm=iso&tlng=en. Acesso em: 18 ago. 2025.

MORENO, R.; RIOS, R. PH—Postharvest Technology: Study on Sawdust Drying Techniques in Fluidised Bed. **Biosystems Engineering**, [s. l.], v. 82, n. 3, p. 321–329, 2002. ISSN: 1537-5110. DOI: <https://doi.org/10.1006/BIOE.2002.0077>. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511002900772?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=972158482f3f625a. Acesso em: 19 ago. 2025.

MUETZEL, S.; BECKER, K. Extractability and biological activity of tannins from various tree leaves determined by chemical and biological assays as affected by drying procedure. **Animal Feed Science and Technology**, [s. l.], v. 125, n. 1–2, p. 139–149, 2006. ISSN: 0377-8401. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ANIFEEDSCI.2005.05.018>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377840105002270?via%3Dihub>. Acesso em: 7 set. 2025.

MUJAFFAR, S.; RAMSUMAIR, S. Fluidized Bed Drying of Pumpkin (*Cucurbita* sp.) Seeds. **Foods**, [s. l.], v. 8, n. 5, p. 147, 2019. ISSN: 2304-8158. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods8050147>.

MUJUMDAR, A. S.; LAW, C. L. Drying Technology: Trends and Applications in Postharvest Processing. **Food and Bioprocess Technology**, [s. l.], v. 3, n. 6, p. 843–852, 2010. ISSN: 1935-5130. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0353-1>.

NANDHU LAL, A. M. *et al.* A comparison of the Refrigerated Adsorption Drying of *Daucus carota* with fluidized bed drying. **LWT**, [s. l.], v. 154, p. 112749, 2022. ISSN: 00236438. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112749>.

NAZGHELICHI, T.; KIANMEHR, M. H.; AGHBASHLO, M. Thermodynamic analysis of fluidized bed drying of carrot cubes. **Energy**, [s. l.], v. 35, n. 12, p. 4679–4684, 2010. ISSN: 03605442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.09.036>.

ÖZAHİ, E.; DEMİR, H. Drying performance analysis of a batch type fluidized bed drying process for corn and unshelled pistachio nut regarding to energetic and exergetic efficiencies. **Measurement**, [s. l.], v. 60, p. 85–96, 2015. ISSN: 02632241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.073>.

OSELLA, C. A. *et al.* Soybean Heat-treated using a Fluidized Bed. **LWT - Food Science and Technology**, [s. l.], v. 30, n. 7, p. 676–680, 1997. ISSN: 0023-6438. DOI: <https://doi.org/10.1006/FSTL.1997.0247>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643897902474?via%3Dihub>. Acesso em: 7 set. 2025.

PANDE, R.; MISHRA, H. N. Effect of fluidized bed heat treatment on insect mortality, proximate composition and antinutritional content of stored green gram (*vigna radiata*) seeds. **Journal of Food Chemistry and Nutrition**, [s. l.], 2013. ISSN: 2307-4124. Disponível em: <http://www.ciart.it/Biblioteca/MICRO>.

PAUCAR-MENACHO, L. M.; MORENO-ROJO, C.; CHUQUI-DIESTRA, S. R. Emerging non-thermal technologies in the food industry: Advances and potential applications in food

processing. **Scientia Agropecuaria** Universidad Nacional de Trujillo, 2024. (1) ISSN: 23066741. DOI: <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2024.006>.

PEÇANHA, R. Pires. **Sistemas particulados: Operações unitárias envolvendo partículas e fluidos**. [s. l.], : Elsevier, 2014. ISBN: 8535277218.

PEIGNEY, A. *et al.* Specific surface area of carbon nanotubes and bundles of carbon nanotubes. **Carbon**, [s. l.], v. 39, n. 4, p. 507–514, 2001. ISSN: 0008-6223. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(00\)00155-X](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(00)00155-X). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000862230000155X?via%3Dihub>. Acesso em: 9 jul. 2025.

PENG, X. F.; WU, H. L. PORE-SCALE TRANSPORT PHENOMENA IN POROUS MEDIA. **Transport Phenomena in Porous Media III**, [s. l.], p. 366–398, 2005. ISBN: 9780080444901. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-008044490-1/50018-1>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080444901500181>. Acesso em: 5 jul. 2025.

POTGIETER, A.; BHAMJEE, M.; KRUGER, S. Modelling of a Heated Gas-solid Fluidised Bed using Eulerian Based Models. **R&D Journal**, [s. l.], 2021. ISSN: 23098988. DOI: <https://doi.org/10.17159/2309-8988/2021/v37a6>.

POURFATTAH, F. *et al.* Investigation and optimisation of ammonia decomposition efficiency in a fixed-bed tubular reactor with fractal-shaped fins: A coupled CFD and RSM approach. **International Journal of Hydrogen Energy**, [s. l.], v. 154, p. 150060, 2025. ISSN: 0360-3199. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2025.150060>. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319925030496?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=96dbe26d2b244d35. Acesso em: 10 ago. 2025.

PRACHAYAWARAKORN, S.; PRACHAYAWASIN, P.; SOPONRONNARIT, S. Heating process of soybean using hot-air and superheated-steam fluidized-bed dryers. **LWT - Food Science and Technology**, [s. l.], v. 39, n. 7, p. 770–778, 2006. ISSN: 00236438. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.05.013>.

RAMAKRISHNAN, S. R. *et al.* Characterization of drying kinetics and moisture diffusivity in finger millet using fluidized bed drying. **Journal of Stored Products Research**, [s. l.], v. 113, p. 102700, 2025. ISSN: 0022474X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2025.102700>.

REID, W. S.; STARK, R. Application of Liquid Nitrogen (LN₂) in a Fluidized Bed Freezer. **Canadian Institute of Food Science and Technology Journal**, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 188–190, 1975. ISSN: 0315-5463. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0315-5463\(75\)73806-3](https://doi.org/10.1016/S0315-5463(75)73806-3). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com.ez34.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0315546375738063?via%3Dihub>. Acesso em: 7 set. 2025.

REID, W. S.; STARK, R. Design and Development of a Batch Fluidized Bed Freezer and Fluidized Bed Dryer for Diced Food Products. **Canadian Institute of Food Science and Technology Journal**, [s. l.], v. 7, n. 4, p. 236–242, 1974. ISSN: 0315-5463. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0315-5463\(74\)73919-0](https://doi.org/10.1016/S0315-5463(74)73919-0). Disponível em: <https://www.sciencedirect->

com.ez34.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0315546374739190?via%3Dihub.
Acesso em: 7 set. 2025.

REKHA, M. R.; PADMAJA, G. Alpha-amylase inhibitor changes during processing of sweet potato and taro tubers. **Plant Foods for Human Nutrition**, [s. l.], v. 57, n. 3–4, p. 285–294, 2002. ISSN: 0921-9668. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1021837115267>.

REYES, A.; ALVAREZ, P. I.; MARQUARDT, F. H. Drying of carrots in a fluidized bed. i. effects of drying conditions and modelling. **Drying Technology**, [s. l.], v. 20, n. 7, p. 1463–1483, 2002. ISSN: 0737-3937. DOI: <https://doi.org/10.1081/DRT-120005862>.

REYNOSO, R. O.; CALVELO, A. Comparison between fixed and fluidized bed continuous pea freezers. **International Journal of Refrigeration**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 109–115, 1985. ISSN: 01407007. DOI: [https://doi.org/10.1016/0140-7007\(85\)90083-0](https://doi.org/10.1016/0140-7007(85)90083-0).

ROMÁN, M. C. *et al.* Pumpkin peel dehydration using a fluidized bed contactor: a technical and environmental study. **Biomass Conversion and Biorefinery**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 3345–3360, 2025. ISSN: 2190-6815. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05276-z>.

SABRI ERGUN. Fluid Flow Through Packed Columns. **Chemical Engineering Progress**, [s. l.], v. 48, p. 89–94, 1952.

SADIN, R.; CHEGINI, G.; KHODADADI, M. Drying characteristics and modeling of tomato thin layer drying in combined infrared-hot air dryer. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 150 – 157, 2017. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85020769606&partnerID=40&md5=b0ab65f296bd92b2431c787d5a5f8edf>.

SALEHI, F. Recent Applications of Heat Pump Dryer for Drying of Fruit Crops: A Review. **International Journal of Fruit Science**, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 546–555, 2021. ISSN: 1553-8362. DOI: <https://doi.org/10.1080/15538362.2021.1911746>.

SANTOS, A. F. *et al.* Determinação da dose de radiação gama para reduzir a população de Salmonella spp em carne de frango. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, [s. l.], v. 23, n. 2, 2003. ISSN: 0101-2061. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-20612003000200017>. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20612003000200017&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt.

SANTOS, A. P. *et al.* Microencapsulation of Pitanga extract (*Eugenia uniflora* L.) by ionic gelation: Effect of wall material and fluidized bed drying. **Food Research International**, [s. l.], v. 209, p. 116304, 2025. ISSN: 09639969. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116304>.

SENADEERA, W. *et al.* Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 58, n. 3, p. 277–283, 2003. ISSN: 02608774. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00386-2](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00386-2).

SENADEERA, W.; ALVES-FILHO, O.; EIKEVIK, T. Influence of Atmospheric Sublimation and Evaporation on the Heat Pump Fluid Bed Drying of Bovine Intestines. **Drying Technology**,

[s. l.], v. 30, n. 14, p. 1583–1591, 2012. ISSN: 0737-3937. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.699011>.

SHEEN, S.; WHITNEY, L. F. Modelling heat transfer in fluidized beds of large particles and its applications in the freezing of large food items. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 249–265, 1990. ISSN: 02608774. DOI: [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(90\)90001-O](https://doi.org/10.1016/0260-8774(90)90001-O).

SHENTON, A. K.; HAY-GIBSON, N. V. Bradford's Law and its relevance to researchers. **Education for Information**, [s. l.], v. 27, n. 4, p. 217–230, 2011. ISSN: 18758649. DOI: <https://doi.org/10.3233/EFI-2009-0882>.

SHILTON, N. C.; NIRANJAN, K. Fluidization and Its Applications to Food Processing. **Food Structure**, [s. l.], v. 12, 1993.

SHINGARE, S. P.; THORAT, B. N. Fluidized Bed Drying of Sprouted Wheat(*Triticum aestivum*). **International Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 29–37, 2013. ISSN: 1556-3758. DOI: <https://doi.org/10.1515/ijfe-2012-0097>.

SIVAKUMAR, R. *et al.* Fluidized bed drying of some agro products – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 61, p. 280–301, 2016 a. ISSN: 13640321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.014>.

SOBIESKI, W.; ZHANG, Q.; LIU, C. Predicting Tortuosity for Airflow Through Porous Beds Consisting of Randomly Packed Spherical Particles. **Transport in Porous Media**, [s. l.], v. 93, n. 3, p. 431–451, 2012. ISSN: 01693913. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11242-012-9961-8>.

SOLTANI, B. *et al.* Experimental investigation and numerical modeling of pilot-scale fluidized-bed drying of yeast: Part A – Drying model development and validation. **Food and Bioprocess Processing**, [s. l.], v. 119, p. 246–256, 2020 a. ISSN: 09603085. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.11.008>.

SOLTANI, B. *et al.* Experimental investigation and numerical modeling of pilot-scale fluidized-bed drying of yeast: Part B — Viability measurements and modeling. **Food and Bioprocess Processing**, [s. l.], v. 119, p. 195–205, 2020 b. ISSN: 09603085. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.11.005>.

SRINIVASAKANNAN, C.; BALASUBRAMANIAN, N. An investigation on drying of millet in fluidized beds. **Advanced Powder Technology**, [s. l.], v. 20, n. 4, p. 298–302, 2009. ISSN: 09218831. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2008.10.010>.

STAKIĆ, M.; UROŠEVIĆ, T. Experimental study and simulation of vibrated fluidized bed drying. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, [s. l.], v. 50, n. 4, p. 428–437, 2011. ISSN: 0255-2701. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.CEP.2011.02.006>. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0255270111000456?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=96b71e1e9b580112. Acesso em: 6 ago. 2025.

STUMMER, S. *et al.* Fluidized-bed drying as a feasible method for dehydration of *Enterococcus faecium* M74. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 111, n. 1, p. 156–165, 2012. ISSN: 02608774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.01.005>.

TADINI, C. C. **Operações Unitárias na Indústria de Alimentos**. 1. ed., Rio de Janeiro: LTC, 2016. 213–258 p. ISBN: 978-85-216-3034-0.

TASIRIN, S. M. *et al.* Drying of kaffir lime leaves in a fluidized bed dryer with inert particles: Kinetics and quality determination. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 61, p. 193–201, 2014. ISSN: 09266690. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.07.004>.

TATEMOTO, Y. *et al.* Drying characteristics of food materials injected with organic solvents in a fluidized bed of inert particles under reduced pressure. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 158, p. 80–85, 2015. ISSN: 02608774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.03.006>.

TATEMOTO, Y. *et al.* Effect of freezing pretreatment on the drying characteristics and volume change of carrots immersed in a fluidized bed of inert particles under reduced pressure. **Journal of Food Engineering**, [s. l.], v. 173, p. 150–157, 2016. ISSN: 02608774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.11.006>.

TATEMOTO, Y.; HAGIMOTO, A. Effects of freezing pretreatment and hygroscopicity of fluidizing particles on drying characteristics of carrots in fluidized bed under reduced pressure. **Drying Technology**, [s. l.], v. 37, n. 12, p. 1511–1519, 2019. ISSN: 0737-3937. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1516223>.

TATEMOTO, Y.; MICHIKOSHI, T. Drying Characteristics of Carrots Immersed in a Fluidized Bed of Fluidizing Particles Under Reduced Pressure. **Drying Technology**, [s. l.], v. 32, n. 9, p. 1082–1090, 2014. ISSN: 0737-3937. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2014.883630>.

THAKUR, P. *et al.* Garlic (*Allium sativum* L.): A review on bio-functionality, allicin's potency and drying methodologies. **South African Journal of Botany**, [s. l.], v. 171, p. 129–146, 2024. ISSN: 0254-6299. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SAJB.2024.05.039>. Disponível em: [https://www.sciencedirect-com.ez34.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0254629924003223?via%3Dihub](https://www.sciencedirect.com.ez34.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0254629924003223?via%3Dihub). Acesso em: 25 ago. 2025.

TOCTO-YAJAHUANCA, L.; YATA-FRANCO, L. E.; MALPARTIDA-YAPIAS, R. J. Micro y nanoencapsulación de aceites esenciales con actividad antimicrobiana y su aplicación en la conservación de alimentos: Una revisión sistemática. **Manglar**, [s. l.], v. 21, n. 4, p. 535–543, 2024. ISSN: 18167667. DOI: <https://doi.org/10.57188/manglar.2024.058>.

TORRES-GINER, S.; CHIRALT, A.; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, C. Circular Bioeconomy: Novel Processes and Materials for Food Preservation. **Foods Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)**, 2023. (23) ISSN: 23048158. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12234341>.

VAINSHTEIN, P. *et al.* Fluidized bed in a confined volume International. **Journal of Multiphase Flow**. [S. l.: s. n.], 1999. Disponível em: www.elsevier.com/locate/ijmulflow.

VALDES-PARADA, F. J.; OCHOA-TAPIA, J. A.; ALVAREZ-RAMIREZ, J. Validity of the permeability Carman-Kozeny equation: A volume averaging approach. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, [s. l.], v. 388, n. 6, p. 789–798, 2009. ISSN: 03784371. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2008.11.024>.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Citation-based clustering of publications using CitNetExplorer and VOSviewer. **Scientometrics**, [s. l.], v. 111, n. 2, p. 1053–1070, 2017. ISSN: 0138-9130. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11192-017-2300-7>.

VÁZQUEZ, A.; CALVELO, A. Modeling of Residence Times in Continuous Fluidized Bed Freezers. **Journal of Food Science**, [s. l.], v. 48, 1983.

VERMA, S. K.; YOGI, J.; ANAND, A. Experimental investigation of segregation for nonspherical particles in a fluidized bed solids mixer. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, [s. l.], v. 60, n. 6, p. 2642–2651, 2021. ISSN: 15205045. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c04683>.

WEBER, S. *et al.* Agglomerate stability in fluidized beds of glass beads and silica sand. **Powder Technology**, [s. l.], v. 165, n. 3, p. 115–127, 2006. ISSN: 00325910. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.03.006>.

WHITAKER, S. The equations of motion in porous media. **Chemical Engineering Science**, [s. l.], v. 21, n. 3, p. 291–300, 1966. ISSN: 00092509. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(66\)85020-0](https://doi.org/10.1016/0009-2509(66)85020-0).

XIAO, B. *et al.* Kozeny–Carman constant for gas flow through fibrous porous media by fractal-monte carlo simulations. **Fractals**, [s. l.], v. 27, n. 04, p. 1950062, 2019. ISSN: 0218-348X. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0218348X19500622>.

YEOM, H. W. *et al.* Effects of Pulsed Electric Fields on the Quality of Orange Juice and Comparison with Heat Pasteurization. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s. l.], v. 48, n. 10, p. 4597–4605, 2000. ISSN: 0021-8561. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf000306p>.

YOON, S. *et al.* Experimental investigation of lab-scale fluidized bed for fine iron ore drying application under constant bed temperature condition. **Advanced Powder Technology**, [s. l.], v. 35, n. 5, p. 104443, 2024. ISSN: 0921-8831. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.APT.2024.104443>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921883124001195>. Acesso em: 17 ago. 2025.

ZAVAROV, A. S.; TYUPAKOV, V. A.; BELYAUSH, S. T. Apparatus with a vibrofluidized bed for heat treatment. **Metal Science and Heat Treatment**, [s. l.], v. 22, n. 5, p. 334–336, 1980. ISSN: 15738973. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00693257/METRICS>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00693257>. Acesso em: 20 out. 2025.

ZHU, Y. *et al.* Recent advances in spoilage mechanisms and preservation technologies in beef quality: A review. **Meat Science Elsevier Ltd**, 2024. ISSN: 03091740. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2024.109481>.