

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

Antonio Carlos de Oliveira Martins

**Estruturação de modelo matemático para a análise da influência das variáveis do
processo de secagem em spray dryer nas propriedades físicas do produto**

ARARAQUARA

2025

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

Antonio Carlos de Oliveira Martins

**Estruturação de modelo matemático para a análise da influência das variáveis do
processo de secagem em spray dryer nas propriedades físicas do produto**

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Instituto de Química,
Araraquara, para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química.**

**Orientador: Prof. Dr. Gustavo Nakamura
Alves Vieira**

ARARAQUARA

2025

M386e

Martins, Antonio Carlos de Oliveira

Estruturação de modelo matemático para a análise da influência das variáveis do processo de secagem em spray dryer nas propriedades físicas do produto / Antonio Carlos de Oliveira Martins. -- Araraquara, 2025
39 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Química) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Química, Araraquara
Orientador: Gustavo Nakamura Alves Vieira

1. atomização. 2. secagem em spray. 3. modelos matemáticos. 4.
propriedades físicas e químicas. I. Título.

ANTONIO CARLOS DE OLIVEIRA MARTINS

Estruturação de modelo matemático para a análise da influência das variáveis
do processo de secagem em spray dryer nas propriedades físicas do produto

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Instituto de Química,
Araraquara, para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Química.

Araraquara, 02 de julho de 2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Gustavo Nakamura Alves Vieira
Instituto de Química - UNESP, Araraquara

Prof. Dr. Elias de Souza Monteiro Filho
Instituto de Química - UNESP, Araraquara

Prof. Dr. Leandro Pierroni Martins
Instituto de Química - UNESP, Araraquara

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo estruturar um modelo matemático baseado em dados reais do processo de secagem de aromas alimentícios utilizando spray dryer, visando analisar a influência das variáveis operacionais nas propriedades do produto final. Foram utilizados dados de produção industrial, bem como resultados de análises físico químicas dos produtos secos, com o intuito de estabelecer correlações quantitativas entre as variáveis de processo e atributos do produto, como umidade e densidade aparente. Durante a aplicação do modelo, observaram-se limitações significativas relacionadas à qualidade e localização dos pontos de medição de temperatura e umidade no equipamento. A principal inconsistência foi a utilização de temperaturas medidas na saída do segundo ciclone, onde o ar já se encontra resfriado, o que resultou em estimativas fisicamente inviáveis, como temperaturas negativas. Além disso, a suposição de comportamento adiabático do sistema e a representatividade das amostras de produto influenciaram na precisão dos resultados. Como proposta de melhoria, destaca-se a necessidade de instalação de sensores na saída imediata do secador, anterior aos ciclones, o que permitiria uma coleta mais fiel dos dados e a construção de um modelo mais robusto. O estudo conclui que a combinação entre dados confiáveis e boa modelagem matemática é fundamental para gerar ferramentas de análise e controle que possam ser aplicadas na otimização de processos industriais de secagem.

Palavras-chave: atomização; secagem em spray; modelos matemáticos; propriedades físicas e químicas.

ABSTRACT

This work aimed to develop a mathematical model based on real data from the spray drying process of food flavorings, in order to analyze the influence of operational variables on the properties of the final product. Industrial production data, as well as results from physicochemical analyses of the dried products, were used to establish quantitative correlations between process variables and product attributes such as moisture content and bulk density. During model application, significant limitations were observed regarding the quality and location of the temperature and humidity measurement points within the equipment. The main inconsistency was the use of temperature readings taken at the outlet of the second cyclone, where the air is already cooled, which led to physically unfeasible estimations, such as negative temperatures. Furthermore, the assumption of adiabatic system behavior and the representativeness of the product samples impacted the accuracy of the results. As a proposed improvement, the installation of sensors directly at the dryer outlet, before the cyclone separation stage, is recommended to allow for more accurate data collection and the development of a more robust model. The study concludes that combining reliable data with sound mathematical modeling is essential for developing analysis and control tools applicable to the optimization of industrial drying processes.

Keywords: atomization; spray drying; mathematical models; physical and chemical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema do secador utilizado.....	25
Figura 2 – Esquema representativo de um secador.	28
Figura 3 – Umidade e temperatura média em função das datas de operação do secador.....	30
Figura 4 – Umidade relativa ambiente média, umidade relativa de entrada e de saída do processo em função das datas de operação do secador.	32
Figura 5 – Comparação das umidades relativas do ar de entrada e saída média para os produtos de estudo.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Temperaturas de ar de entrada e saída para os produtos estudados.....	26
Tabela 2 – Composição em fração mássica dos aromas secos.	27
Tabela 3 – Composição em fração mássica das emulsões.....	27
Tabela 4 – Parâmetros da equação para o cálculo da pressão de vapor da água.	29
Tabela 5 – Calor específico da emulsão e sólido seco para cada produto.....	35
Tabela 6 - Resultados de temperatura média de pó seco para cada produto	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	MATERIAIS	25
2.1	Equipamento	25
2.2	Produtos	26
3	MÉTODO	28
4	RESULTADOS	29
4.1	Balanço de massa	31
4.2	Balanço de energia	33
5	CONCLUSÃO	37
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1 INTRODUÇÃO

A microencapsulação é definida por um processo o qual pequenas partículas ou gotas são envoltas por uma cobertura ou integradas em uma matriz homogênea ou heterogênea, resultando em microcápsulas com muitas propriedades úteis. Na sua forma mais simples, a microcápsula é uma esfera pequena envolta em uma parede uniforme. O material na parte interna é referido como núcleo, fase interna ou recheio, enquanto o da parte externa é chamado de casca, cobertura, material de parede ou membrana. O núcleo pode ser composto de um ou vários ingredientes e a parede pode ser simples ou dupla camada. A retenção dos núcleos é governada pela sua função química, solubilidade, polaridade e volatilidade. (GHARSALLAOUI et al., 2007)

A microencapsulação de particulados em invólucros de materiais protetores tornou-se uma tecnologia consolidada para o revestimento e isolamento de substâncias líquidas ou sólidas para preservar suas características até que sua atividade seja necessária.

Entre as principais razões para o uso da microencapsulação incluem a proteção do produto contra o ambiente (temperatura, umidade, radiação e interações com outros materiais), proteção do ambiente contra produto perigoso ou tóxico, facilitar condições de manuseio ou transporte, reduzir a difusão e transferência de massa do material para o ambiente e controlar o a taxa de liberação da substância do núcleo sob condições desejáveis.

Para componentes alimentícios, as vantagens típicas da microencapsulação são meios de: proteger compostos sensíveis de outros ingredientes durante a estocagem, proteger contra perda nutricional e até mesmo adicionar materiais nutritivos a alimentos no pós processamento, incorporar mecanismos incomuns ou de liberação lenta na formulação, mascarar ou preservar características e prover um atrativo adicional para a exposição e comercialização de produtos alimentícios (maior flexibilidade e controle no desenvolvimento de alimentos mais saborosos e nutritivos, para melhor atender às expectativas dos consumidores atuais). Exemplos de aditivos em alimentos os quais se beneficiam de encapsulação e liberação controlada são conservantes, corantes, adoçantes, enzimas, antioxidantes, aromas, nutrientes e agentes de entrecruzamento.

Para fragrâncias a microencapsulação é utilizada para um número de outras razões que incluem liberação retardada de perfumes voláteis, prevenção de degradação química ou interações com materiais incompatíveis, incorporação em sistemas secos, modulação de liberação de odor e perda por volatilização. Fragrâncias finas podem consistir em mais de 200 elementos diferentes e, embora alguns possam estar presentes em níveis muito baixos, podem ser intrínsecos às qualidades estéticas da formulação e, portanto, devem ser preservados. Uma

liberação uniforme dos componentes da fragrância também é desejada, sem qualquer fracionamento que possa alterar o aroma.

Muitos métodos diferentes foram propostos para a produção de microencapsulados, que podem ser generalizados em três grupos:

- Processos físico-químicos: coacervação simples e complexa (separação em fase aquosa), evaporação emulsão-solvente (separação em fase orgânica), etc.;
- Processos químicos: polimerização interfacial, inclusão molecular;
- Processos físicos: *spray drying*, *spray coating*, *prilling*, extrusão, etc.

A escolha do processo de encapsulamento para uma aplicação específica é baseada em parâmetros como: tamanho médio da partícula necessária, propriedades físicas/químicas do núcleo e do revestimento, aplicações para o material microencapsulado, mecanismos de liberação desejados, escala de fabricação industrial prevista e custo aceitável do processo. (RÉ, 1998)

Spray drying é uma operação unitária onde um produto líquido é atomizado em uma corrente de gás quente para a obtenção de pó instantaneamente. O gás geralmente utilizado é ar ou, mais raramente, um gás inerte, como nitrogênio. A secagem por *spray drying* é a tecnologia mais comum utilizada na indústria de alimentos, devido ao baixo custo e a alta disponibilidade de equipamentos.

O fluido de alimentação do pulverizador pode consistir em uma solução, emulsão ou suspensão. A secagem por atomização resulta na formação de um pó fino ou de partículas com diâmetro maior, a depender das propriedades do material de entrada e dos parâmetros operacionais adotados.

A remoção de água por meio da secagem por atomização é uma prática amplamente empregada na engenharia de processos. Ao reduzir o teor de água e a atividade de água dos materiais, essa técnica é comumente utilizada na indústria de alimentos com o objetivo de garantir a estabilidade microbiológica dos produtos, minimizar os riscos de degradações químicas e/ou biológicas, reduzir os custos de armazenamento e transporte, além de possibilitar a obtenção de produtos com propriedades específicas, como a solubilidade instantânea.

Quatro etapas são fundamentais para a secagem em *spray dryer*: atomização, interação líquido atomizado com o ar quente, evaporação da água e separação do produto seco do ar de secagem.

A atomização do líquido em pequenas gotículas pode ser realizada por meio da aplicação de energia centrífuga ou pressão. Os dispositivos atomizadores comumente utilizados

incluem atomizadores pneumáticos, bicos de pressão e discos rotativos. O principal objetivo desta etapa é maximizar a superfície de troca térmica entre o ar seco e as gotículas, otimizando assim os processos de transferência de calor e de massa. A escolha do tipo de atomizador deve considerar a natureza e a viscosidade do fluido de alimentação, bem como as características desejadas do produto seco. (GHARSALLAOUI et al., 2007)

Os atomizadores pneumáticos, também denominados bicos de dois fluidos, utilizam ar comprimido ou vapor para promover a atomização do fluido de alimentação. Mais comumente, a mistura entre o fluido e o ar ocorre externamente ao corpo do bico, em configurações menos frequentes, essa mistura é realizada internamente. A capacidade operacional de um único bico pneumático geralmente não ultrapassa 1000 kg/h de alimentação. Quando utilizados com fluidos de baixa viscosidade, os sprays resultantes apresentam diâmetro médio reduzido das gotículas e elevado grau de homogeneidade. Em contrapartida, a atomização de fluidos com alta viscosidade tende a gerar gotículas de maior diâmetro médio e menor uniformidade.

Uma das principais vantagens desse tipo de atomizador é sua elevada flexibilidade, possibilitando a produção de partículas com diferentes tamanhos, conforme a razão ar-líquido aplicada. No entanto, o elevado custo associado ao uso de ar comprimido - principal agente atomizante - impacta significativamente a viabilidade econômica do processo, dado que os bicos pneumáticos apresentam o maior consumo energético entre os três principais tipos de atomizadores disponíveis.

Os bicos de pressão, também conhecidos como bicos de fluido único, pulverizam por meio da conversão de energia de pressão em energia cinética, à medida que o líquido é forçado a passar sob pressão pelo orifício do bico. O líquido é introduzido tangencialmente na câmara interna do bico e é expelido por um orifício, formando um cone cônico de material pulverizado. O diâmetro do orifício é geralmente reduzido, variando entre 0,4 e 4 mm, e a capacidade típica de um único bico não ultrapassa 100 L/h. Quando se deseja processar vazões maiores, é comum a utilização de múltiplos bicos na câmara de secagem.

Devido ao ângulo de pulverização mais estreito característico desse tipo de bico, é possível empregar câmaras de secagem com geometria mais estreita e elevada. Em geral, os bicos de pressão permitem a geração de gotículas com distribuição de tamanho relativamente estreita, resultando em partículas secas predominantemente na forma de esferas ocas. Entretanto, esses bicos não são recomendados para a atomização de suspensões altamente concentradas ou materiais abrasivos, uma vez que apresentam maior propensão ao entupimento e à erosão do orifício. Do ponto de vista energético, os bicos de pressão apresentam consumo significativamente inferior em comparação aos atomizadores centrífugos (disco rotativo) e aos bicos pneumáticos.

Em um atomizador centrífugo típico (ou atomizador de disco), o líquido é introduzido no centro de uma roda em rotação, sendo conduzido até a periferia por força centrífuga, onde ocorre sua desintegração em gotículas. A pulverização resultante apresenta um amplo ângulo de dispersão, formando uma nuvem com trajetória predominantemente horizontal. Devido a essa geometria, esse tipo de atomizador exige câmaras de secagem com grande diâmetro. O modelo mais comum do atomizador centrífugo utiliza palhetas radiais. A velocidade periférica linear do disco varia entre 100 e 200 m/s, o que, para os diâmetros usuais, requer velocidades angulares da ordem de 10.000 a 30.000 rpm. O número e o formato das palhetas são ajustados de acordo com os requisitos de capacidade e qualidade do produto. As formas mais utilizadas incluem geometrias circulares, ovais ou retangulares. Para aplicações de alta vazão, onde se busca manter o grau de atomização, aumenta-se o número e a altura das palhetas a fim de preservar a espessura do filme líquido sobre cada uma.

De maneira geral, o atomizador centrífugo gera uma pulverização com elevada homogeneidade dentro de uma ampla faixa de tamanhos médios de gotículas. A distribuição de tamanho pode ser controlada pela variação da velocidade de rotação da roda, sendo que alterações na vazão de alimentação exercem influência significativamente menor. Atomizadores de disco são notadamente versáteis, sendo capazes de processar uma ampla variedade de líquidos com diferentes propriedades físicas. (FILKOVÁ; HUANG; MUJUMDAR, 2006)

Durante a atomização, o contato entre o líquido atomizado e o ar quente ocorre e marca o início do processo de secagem. Dependendo da configuração relativa entre o atomizador e o distribuidor de ar quente, é possível distinguir dois modos operacionais principais: secagem em co-corrente e secagem em contracorrente.

Na secagem em co-corrente, o líquido é pulverizado na mesma direção do fluxo de ar quente no interior do equipamento. As temperaturas de entrada do ar geralmente variam entre 150°C e 220°C, promovendo a evaporação instantânea da água. Como resultado, o pó seco é exposto a temperaturas moderadas, normalmente entre 50°C e 80°C, o que minimiza os riscos de degradações térmicas, sendo essa configuração particularmente adequada para materiais termossensíveis.

Por outro lado, na secagem em contracorrente, a pulverização do líquido ocorre em direção oposta ao fluxo de ar quente. No arranjo, o produto seco é exposto a temperaturas mais elevadas, o que restringe sua aplicação em compostos sensíveis ao calor. No entanto, a principal vantagem do processo em contracorrente está na maior eficiência energética, sendo considerado mais econômico em termos de consumo de energia.

No momento do contato entre as gotículas atomizadas e o ar quente, estabelecem-se equilíbrios térmicos e de pressão de vapor entre as fases líquida e gasosa. O gradiente de temperatura promove a transferência de calor do ar para o produto, enquanto o gradiente de pressão de vapor impulsiona a transferência de água no sentido oposto, ou seja, do interior da gotícula para o ambiente gasoso. Inicialmente, após o contato do ar quente com a gotícula, o calor transferido eleva sua temperatura até um valor constante, conhecido como temperatura de bulbo úmido do ar de secagem. Em seguida, a evaporação da água da gotícula ocorre sob temperatura e pressão de vapor constantes. Nesse estágio, considera-se que a taxa de difusão da água do centro da gotícula até sua superfície é constante e equivalente à taxa de evaporação superficial. Por fim, quando o teor de umidade da gotícula atinge um valor crítico, forma-se uma crosta seca em sua superfície. A partir desse ponto, a taxa de secagem diminui significativamente, sendo controlada pela difusão da água através dessa crosta. Teoricamente, a secagem está completa quando a temperatura da partícula atinge o valor da temperatura do ar de secagem.

A duração relativa dessas três etapas varia conforme a natureza do produto e a temperatura do ar de entrada. Quando se empregam temperaturas elevadas, a formação da crosta superficial ocorre de forma mais rápida, em função da taxa intensificada de evaporação da água. Devido à alta razão entre área superficial e volume característica das gotículas atomizadas, o processo de secagem ocorre de maneira extremamente rápida na atmosfera aquecida da câmara.

Historicamente, a secagem por atomização foi adotada como um método rápido e eficaz para a secagem de compostos sensíveis à degradação térmica observada em processos de secagem mais lentos e convencionais. Na prática, o processo de secagem ocorre quase que instantaneamente no momento da mistura do ar quente com o líquido atomizado. A intensa evaporação que se dá na superfície das gotículas é tão acelerada que estas permanecem resfriadas durante todo o processo de secagem, devido à absorção de calor latente de vaporização. Somente após a completa evaporação da água é que a temperatura das partículas secas se eleva até atingir a temperatura do ar da câmara.

A separação entre o produto seco e o ar úmido é comumente realizada por meio de ciclones posicionados externamente ao secador, os quais contribuem para a redução das perdas de produto para a atmosfera. As partículas mais densas são geralmente recuperadas na base da câmara de secagem, enquanto as partículas mais finas acompanham o fluxo de ar e são posteriormente separadas no ciclone. Além dos ciclones, os secadores por atomização são frequentemente equipados com filtros, utilizados para reter as partículas mais finas, e com lavadores químicos (*scrubbers*) destinados à remoção de pós residuais e poluentes voláteis, como compostos aromáticos. O pó obtido por esse processo é constituído por partículas que se

originam da contração de gotas esféricas durante a secagem. A utilização de secadores por atomização multietapas permite aumentar o tempo de residência das partículas na câmara, o que possibilita operar com temperaturas mais baixas e, conseqüentemente, minimizar a desnaturação térmica dos compostos sensíveis, ao mesmo tempo em que se melhora a eficiência térmica do processo. Além disso, a integração de um leito fluidizado na saída do secador permite um controle mais preciso sobre o tamanho das partículas e a produção de pós com baixos teores de umidade residual. (GHARSALLAOUI et al., 2007)

Cada uma dessas etapas exerce influência direta nas características do produto em pó. A forma de atomização, bem como as propriedades físico-químicas do líquido atomizado afetam significativamente o tamanho das partículas sólidas formadas, sua densidade, umidade residual e aparência. O tipo de interação entre o líquido e o ar quente, assim como as condições de evaporação, influenciam não apenas essas propriedades, mas também a retenção de compostos voláteis, como aromas e sabores. Por fim, a técnica empregada na separação do pó do ar seco impacta a distribuição granulométrica do produto obtido.

As características dos produtos obtidos por secagem em spray dryer são fortemente influenciadas por diversas variáveis operacionais e de formulação. (TONON, 2009)

Para alcançar elevada eficiência de microencapsulação, mesmo quando um material de parede adequado é utilizado, é imprescindível a adoção de condições otimizadas no processo de secagem por atomização. Os principais parâmetros operacionais que requerem ajuste são: a temperatura da alimentação, a temperatura de entrada do ar e a temperatura de saída do ar. A temperatura da solução de alimentação influencia diretamente a viscosidade da emulsão, sua fluidez e, por conseqüência, a uniformidade da atomização. Em geral, o aumento da temperatura da alimentação reduz a viscosidade e o tamanho médio das gotículas formadas; contudo, temperaturas elevadas podem comprometer a integridade de compostos termossensíveis, ocasionando sua degradação ou volatilização. Além disso, a vazão de alimentação direcionada ao atomizador deve ser cuidadosamente ajustada para garantir que cada gota pulverizada atinja o nível de secagem desejado antes de entrar em contato com as superfícies internas da câmara de secagem.

A definição da temperatura de entrada do ar deve considerar dois fatores principais: o limite térmico seguro para o produto, a fim de evitar sua degradação, e os custos associados às fontes de calor disponíveis. Já a temperatura na extremidade da zona de secagem - comumente referida como temperatura de exaustão ou temperatura de saída do ar - é considerada um parâmetro indicativo do desempenho do secador e depende das características específicas do material em processamento. Diferentemente da temperatura de entrada, a de saída não pode ser diretamente controlada, uma vez que resulta da interação entre a temperatura do ar de entrada,

a formulação da alimentação e as condições operacionais. Para ingredientes alimentícios microencapsulados, como aromas, a literatura recomenda temperaturas de saída na faixa de 50°C a 80°C.

Em síntese, as melhores condições de secagem por atomização resultam de um equilíbrio entre temperatura elevada do ar, alta concentração de sólidos na solução de alimentação e facilidade de atomização e secagem, sem promover a expansão excessiva ou a formação de fissuras nas partículas finais.

Devido à complexidade inerente às diferentes etapas do processo de secagem por atomização, o projeto de secadores tradicionalmente tem se baseado em abordagens empíricas, incluindo experimentações em escala piloto e métodos de tentativa e erro. Contudo, os avanços recentes em Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) e em técnicas de medição de tamanho de gotas têm impactado significativamente o projeto desses equipamentos, além de contribuírem para a aplicação de métodos baseados na função de distribuição do tempo de residência. A CFD tem sido empregada no contexto da secagem por atomização de ingredientes alimentícios com o objetivo de prever fenômenos como degradação térmica, perda de compostos aromáticos, deposição nas paredes do equipamento e aderência das partículas.

A modelagem matemática do processo de secagem por atomização é desafiadora, uma vez que envolve uma multiplicidade de parâmetros e fenômenos simultâneos, tais como evaporação, colisão, fragmentação e aglomeração de gotículas, bem como trocas de calor e massa entre estas e o meio de secagem. (GHARSALLAOUI et al., 2007)

A medição contínua da umidade em sólidos é um desafio nos processos industriais, principalmente devido à variabilidade física do material e à dificuldade de manuseio. Métodos indiretos, que se baseiam em propriedades como constante dielétrica e condutividade, são afetados por fatores como granulometria e densidade, o que limita sua precisão. A análise por infravermelho é uma técnica comum, pois a água absorve seletivamente essa radiação. Nesse caso, o feixe é refletido na amostra, e sensores ópticos transformam a luz refletida em sinal elétrico. Apesar de eficazes, esses sensores têm uso limitado devido ao alto custo, necessidade de calibração e sensibilidade ao posicionamento. Como alternativa, surgem os sensores virtuais de umidade, que utilizam modelos matemáticos baseados em variáveis operacionais para estimar o teor de umidade. Essa abordagem mostra-se promissora para o controle em tempo real de processos de secagem, como na produção de aromas alimentícios por spray dryer. (BRODGESELL; LIPTÁK, 2003)

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo principal utilizar dados reais de secagem de aromas alimentícios em *spray dryer* e resultados de análises do produto para

estruturar um modelo matemático que permita a análise da relação de influência das variáveis operacionais em suas propriedades físicas.

2 MATERIAIS

Para a realização dos cálculos, foram utilizados dados de múltiplos sistemas independentes que serão relacionados para a obtenção das condições do ar de entrada de secagem, parâmetros de processo e propriedades físico-químicas do material seco.

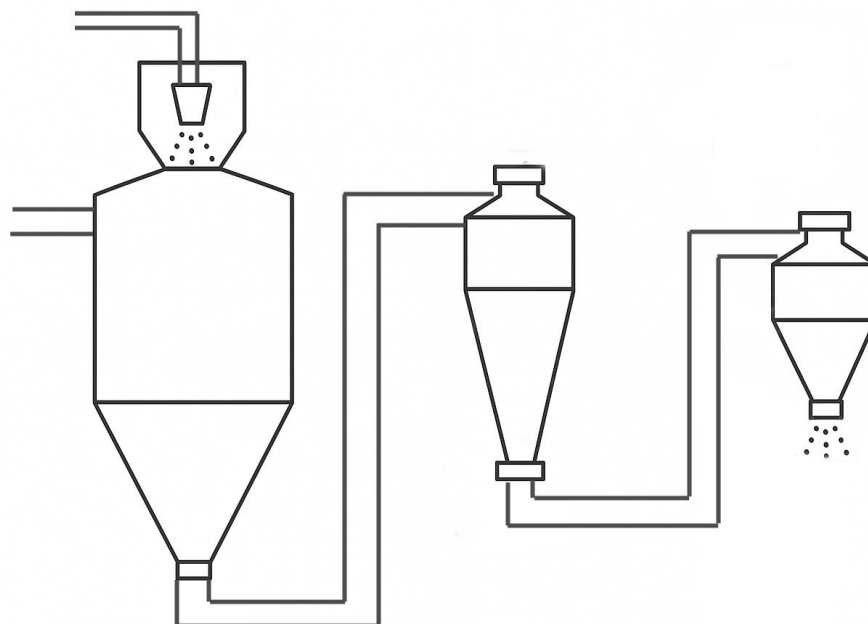
Foram coletados dados do período de janeiro de 2022 até junho de 2024, para sete produtos diferentes, classificados e nomeados com base em sua composição e perfil sensorial.

2.1 Equipamento

O equipamento utilizado neste trabalho é um spray dryer em escala real, empregado em uma indústria alimentícia para processos de secagem de aromas por atomização. Possui atomizador por disco rotativo operando a 14.000 RPM. O equipamento conta com ciclones para coleta do pó. Utilizar dados de um spray dryer industrial permite simular condições de processo compatíveis com a escala produtiva, fornecendo dados representativos para a análise de objetivo.

Um esquema representativo do equipamento é mostrado na Figura 1:

Figura 1 – Esquema do secador utilizado.



Fonte: Elaborado pelo autor

2.2 Produtos

Cada produto analisado neste trabalho possui uma temperatura de entrada de ar de secagem T_E [$^{\circ}\text{C}$], alcançada pelo uso de um aquecedor industrial de ar, e uma temperatura de saída de ar úmido T_S [$^{\circ}\text{C}$] ótimas previamente estabelecidas como variáveis controladas de processo. Para isso, a vazão mássica de emulsão L é a variável manipulada do processo. A Tabela 1 elenca os materiais de estudo, nomeados de acordo com sua composição e perfil sensorial com suas variáveis controladas de processo:

Tabela 1 – Temperaturas de ar de entrada e saída para os produtos estudados.

Produto	T_E [$^{\circ}\text{C}$]	T_S [$^{\circ}\text{C}$]
Chocolate	188	90
Fruta	180	93
Lácteo	195	95
Carne	185	98
Galinha	215	88
Doce	175	88
Salgado	190	98

Fonte: Elaborado pelo autor.

A composição de cada amostra será um fator considerado para os cálculos subsequentes, portanto, dados de formulação foram consultados. Os alimentos geralmente são compostos por diversos constituintes, entre os quais se destacam a água (X), proteínas (P), lipídeos (L), carboidratos (C), fibras (F), cinzas (Z) e outros de valor nutricional nulo (N). Os dados de composição do aroma seco e emulsão são mostrados na Tabela 2 e Tabela 3, respectivamente.

Tabela 2 – Composição em fração mássica dos aromas secos.

Produto	X_P (%)	P (%)	L (%)	C (%)	F (%)	Z (%)	N (%)
Chocolate	4	0,01	0,65	59,90	0	0,91	34,53
Fruta	4	0,10	0	71,40	1,2	0,20	23,10
Lácteo	4	7,49	5,20	49,10	0,05	26,26	7,90
Carne	4	0	22,00	73,00	0	0,30	0,70
Galinha	4	6,86	8,40	46,09	0	0,05	34,60
Doce	4	0	0	51,80	0	0,80	43,40
Salgado	4	0,20	18,00	76,10	0	0,10	1,60

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 – Composição em fração mássica das emulsões.

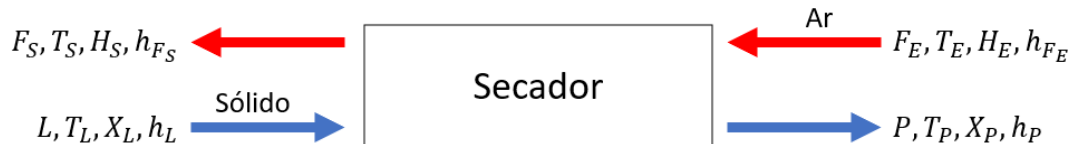
Produto	X_L (%)	P (%)	L (%)	C (%)	F (%)	Z (%)	N (%)
Chocolate	50	0,01	0,34	31,25	0	0,47	17,93
Fruta	50	0,05	0	37,25	0,63	0,10	11,97
Lácteo	50	3,91	2,71	25,62	0,03	13,70	4,03
Carne	50	0	11,48	38,09	0	0,16	0,27
Galinha	50	3,58	4,38	24,05	0	0,03	17,96
Doce	50	0	0	27,03	0	0,42	22,55
Salgado	50	0,10	9,39	39,70	0	0,05	0,76

Fonte: Elaborado pelo autor.

3 MÉTODO

Foi realizada uma simulação computacional em Excel baseada em um banco de dados de produção. A Figura 2 representa um processo de secagem e suas variáveis.

Figura 2 – Esquema representativo de um secador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Variáveis de processo medidas:

- Ar de entrada: F_E, T_E, H_E
- Ar de saída: T_S
- Emulsão: L, T_L, X_L
- Produto: P, X_P

As demais variáveis serão estimadas utilizando equações de balanço de massa e de energia.

4 RESULTADOS

Os dados referentes às condições do ar ambiente foram obtidos a partir do banco de dados da estação meteorológica WeatherLink, instalada nas proximidades da unidade de produção. As medições são realizadas em intervalos de um minuto, sendo extraídos os valores correspondentes ao primeiro minuto de cada ciclo de produção. As variáveis coletadas neste estudo foram a temperatura do ar T [K] e a umidade relativa RH [%].

Utilizando a temperatura do ar é possível calcular a pressão de vapor de saturação P_s [Pa] pela Equação (1) (SOKHANSANJ; JAYAS, 2006):

$$\ln\left(\frac{P_s}{R}\right) = \frac{A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4}{FT - GT^2} \quad (1)$$

Na Equação (1), os valores dos parâmetros utilizados estão listados na Tabela 4.

Com a umidade relativa extraída, calcula-se a pressão de vapor da água P_v [Pa] pela Equação (2):

$$RH = \frac{P_v}{P_s} \quad (2)$$

Tabela 4 – Parâmetros da equação para o cálculo da pressão de vapor da água.

Constante	Valor
A	-27405,526
B	97,5413
C	-0,146244
D	$0,12558 \times 10^{-3}$
E	$-0,48502 \times 10^{-7}$
F	4,34903
G	$0,39381 \times 10^{-2}$
R	22105649,25

Fonte: (SOKHANSANJ; JAYAS, 2006)

A umidade absoluta do ar H [kg água/ kg ar seco] é calculada utilizando a pressão atmosférica $P_{atm} = 101325 Pa$ com a equação:

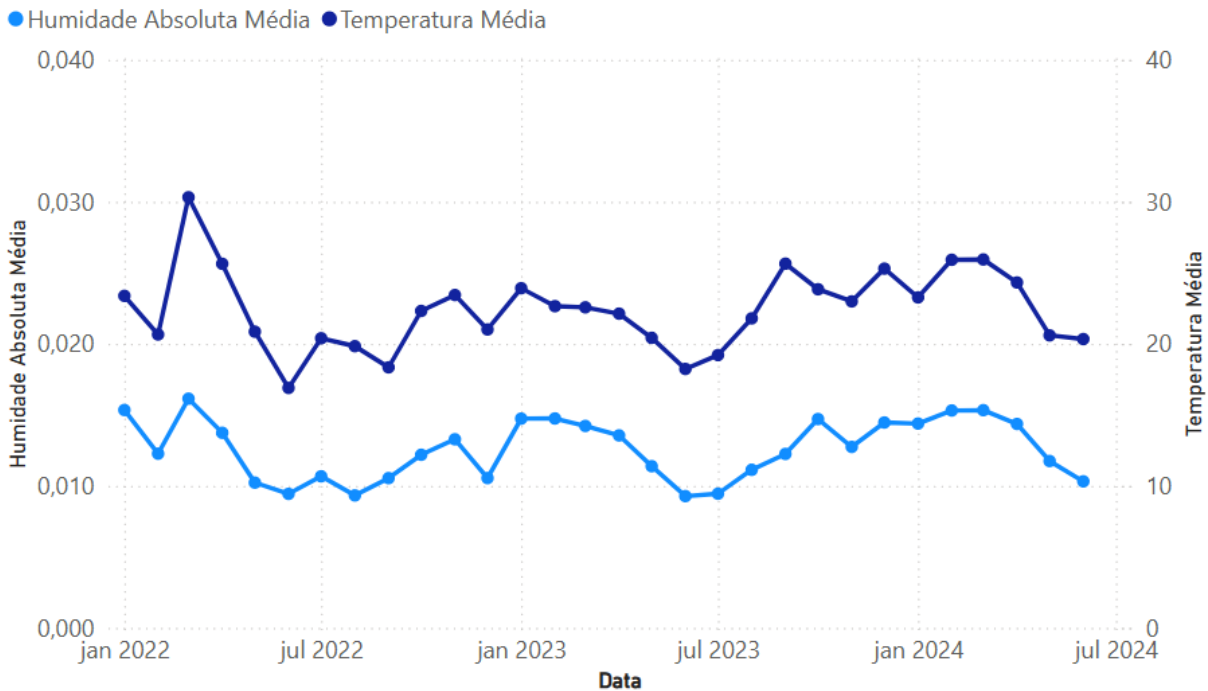
$$H = \frac{0,6219P_v}{P_{atm} - P_v} \quad (3)$$

Por fim pode se converter para fração mássica de água no ar H_i [kg água/ kg ar úmido] pela equação:

$$H_i = \frac{H}{1 + H} \quad (4)$$

Para este trabalho, a fração mássica de água no ar da entrada é H_E e a fração mássica de água no ar da saída é H_S . A média dos resultados calculados no período de coleta de dados para umidade absoluta H são mostrados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** a acompanhadas da temperatura ambiente T [$^{\circ}C$].

Figura 3 – Umidade e temperatura média em função das datas de operação do secador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

É notável o comportamento semelhante entre a umidade absoluta do ar e sua temperatura ambiente. A capacidade do ar de reter vapor d'água aumenta exponencialmente com a temperatura. Isso significa que, em meses mais quentes, mesmo que a umidade relativa não seja

alta, a umidade absoluta pode ser significativamente maior. Em contrapartida, em meses frios, mesmo com umidade relativa alta, a quantidade absoluta de vapor no ar é baixa, pois o ar frio tem baixa capacidade de retenção.

Os dados de processo foram coletados da planilha de controle do tempo de ciclo de produção do *spray dryer* utilizada pela unidade produtiva, em que são registrados a fração mássica de água na emulsão X_L [kg água/ kg emulsão], a massa total de emulsão l [kg], a quantidade de pó seco produzido p [kg] e o tempo de processo t [min]. Com isso é possível calcular a vazão mássica de alimentação L [kg/h] e vazão mássica de produto P [kg/h] na saída do equipamento pelas Equações (5) e (6), respectivamente.

$$P = \frac{p}{t} * 60 \quad (5)$$

$$L = \frac{l}{t} * 60 \quad (6)$$

Também foram levantados dados de análises físico-químicas do laboratório de controle de processo para a umidade em base úmida do pó produzido X_p [kg água/ kg pó úmido]. As análises foram feitas em um titulador automático modelo Metrohm 870 KF Titrino plus que determina o teor de água em amostras pelo método de Karl Fischer.

Quanto ao ar de secagem, sua vazão mássica foi calculada com base na especificação do equipamento de alimentação, que registra uma vazão constante de ar de $V_e = 19000 \text{ m}^3/h$, que pode ser convertida em vazão mássica F_E [kg ar úmido/ h] utilizando a Equação (7) com a densidade do ar considerada constante de $\rho_{ar} = 1,2922 \text{ kg/m}^3$.

$$F_E = V_e \rho_{ar} \quad (7)$$

As variáveis restantes de entalpia h_i [kJ/kg] para cada corrente: h_{F_E} , h_{F_S} , h_L , e h_P para entrada de ar, saída de ar, entrada de emulsão e saída de produto, respectivamente. Declaradas todas as variáveis anteriores os balanços de massa e energia são calculados.

4.1 Balanço de massa

O balanço de massa relativo à água no sistema para um secador *spray dryer* sem acúmulo de produto, se dá pela equação (8):

$$LX_L + F_E H_E = PX_P + F_S H_S \quad (8)$$

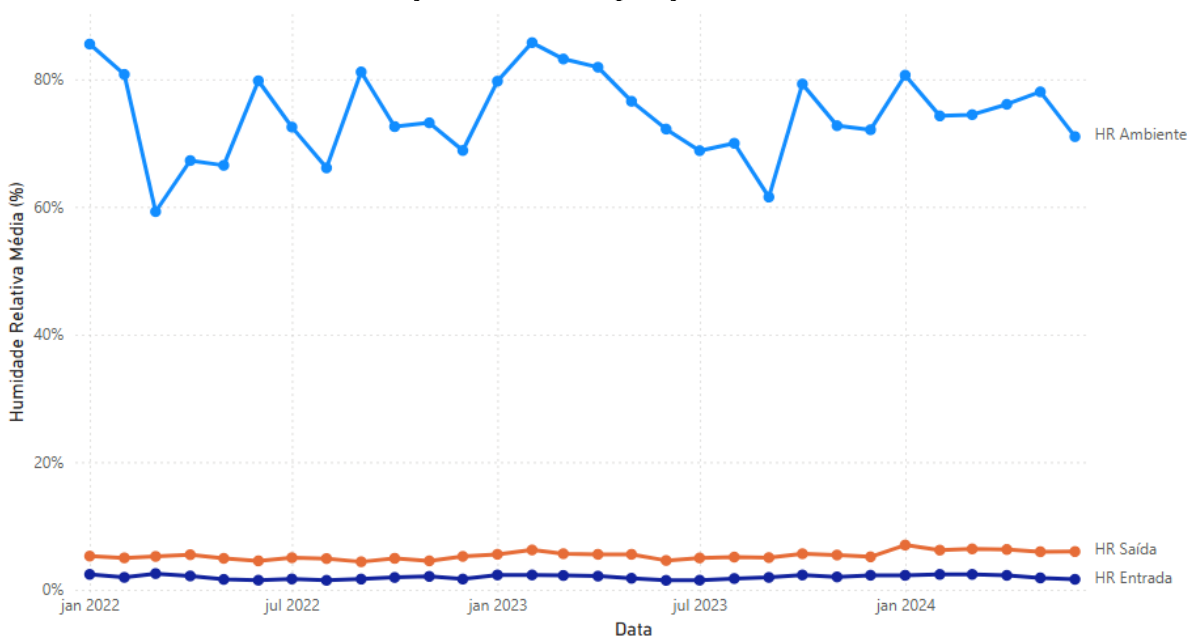
A vazão mássica de ar de saída F_S e sua umidade H_S são incógnitas para o balanço de massa, visto que não existem instrumentos de medida no processo; entretanto, é possível estimar a vazão assumindo que toda a água transferida da emulsão é absorvida totalmente para a corrente de saída de ar. Então, a vazão de transferência de água k_w [kg água/ h] é calculada pela diferença da vazão de água entre as correntes de emulsão e de produto, pela equação (9). Por fim, a vazão de ar úmido se dá pela equação (10):

$$LX_L - PX_P = k_w \quad (9)$$

$$F_S = F_E + k_w \quad (10)$$

Utilizando a equação do balanço de massa, é possível então calcular a umidade de saída do ar de secagem H_S . Com esse dado, é possível construir a Figura 4 e a Figura 5

Figura 4 – Umidade relativa ambiente média, umidade relativa de entrada e de saída do processo em função das datas de operação do secador.

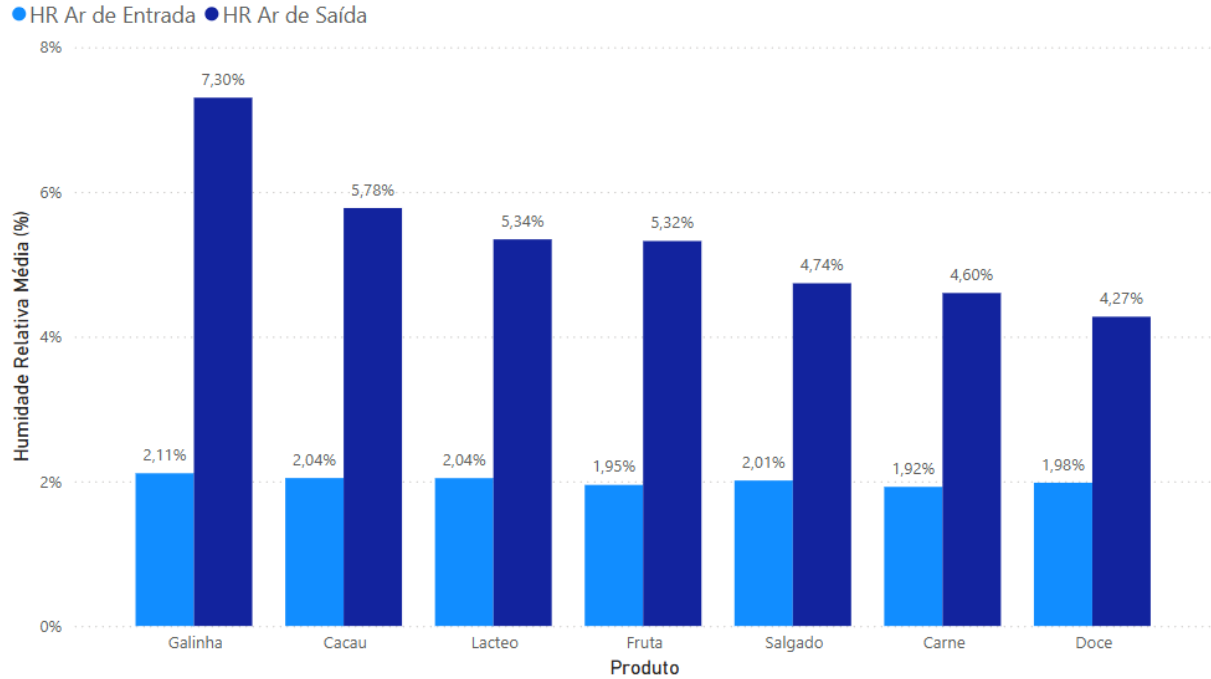


Fonte: Elaborado pelo autor.

O calor fornecido pelo aquecedor de ar ambiente provoca uma redução significativa na umidade relativa do ar. Ao aquecer o ar, sua capacidade de reter vapor d'água aumenta exponencialmente, elevando o ponto de saturação, diminuindo a proporção entre a quantidade constante de vapor e a nova capacidade máxima, resultando em um ar com umidade relativa

mais baixa. A atuação do aquecedor é de extrema importância para garantir que o ar de secagem tenha capacidade de absorção de água constante durante o ano todo.

Figura 5 – Comparação das umidades relativas do ar de entrada e saída média para os produtos de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico apresenta os produtos analisados e os valores de umidade relativa do ar de entrada no secador e a umidade relativa do ar de saída. A variação observada pode ser um fator indicativo do efeito da composição do produto e a sua capacidade de liberar água de sua estrutura. Um teste de médias t (ou teste t de Student) pode ser realizado para comprovar se a diferença na umidade é estatisticamente significativa, reforçando a hipótese de que a composição dos materiais influencia diretamente a transferência de umidade no processo de secagem.

4.2 Balanço de energia

O balanço de energia do processo adiabático, sem troca de calor com o ambiente, se dá pela equação (11):

$$Lh_L + F_E h_{F_E} - Ph_P - F_S h_{F_S} = k_w \Delta H_V \quad (11)$$

A entalpia de vaporização da água é considerada e tomada como constante de valor $\Delta H_V = 2257 \text{ kJ/kg}$ a 100°C . A entalpia da mistura de ar e vapor de água pode ser calculada pela equação (12):

$$h_{ar} = (1,005 + 1,88H_i)T_i + 2501,4H_i \quad (12)$$

Onde H_i representa a umidade absoluta do ar e T_i sua temperatura, ambos dados que já foram obtidos previamente.

A entalpia das correntes de emulsão e produto podem ser calculadas pela relação entre a entalpia e o calor específico $c_p \text{ [kJ/kg } ^\circ\text{C]}$ da substância mostrada na equação (13)

$$h = c_p T_p \quad (13)$$

Modelos matemáticos foram construídos para prever as propriedades térmicas dos principais componentes presentes em alimentos: água, proteínas, lipídeos, carboidratos, fibras e cinzas. Tais modelos são fundamentais para a análise de processos térmicos na engenharia de alimentos, como a secagem por atomização, uma vez que permitem prever com maior precisão o comportamento térmico dos alimentos durante o processamento. (CHOI; OKOS,1986)

As equações (14) a (19) propostas pelo modelo de calor específico para cada componente foram utilizadas no trabalho, mantendo os índices da Tabela 2 e Tabela 3, e para temperatura ambiente de $T = 25^\circ\text{C}$.

$$c_{p_X} = 4176,2 - 9,0862 \times 10^{-5}T + 5473,1 \times 10^{-6}T^2 \quad (14)$$

$$c_{p_P} = 2008,2 + 1208,9 \times 10^{-3}T - 1312,9 \times 10^{-6}T^2 \quad (15)$$

$$c_{p_L} = 1984,2 + 1473,3 \times 10^{-3}T - 4800,8 \times 10^{-6}T^2 \quad (16)$$

$$c_{p_C} = 1548,8 + 1962,5 \times 10^{-3}T - 5939,9 \times 10^{-6}T^2 \quad (17)$$

$$c_{p_F} = 1845,9 + 1930,6 \times 10^{-3}T - 4650,9 \times 10^{-6}T^2 \quad (18)$$

$$c_{p_Z} = 1092,6 + 1889,6 \times 10^{-3}T - 3681,7 \times 10^{-6}T^2 \quad (19)$$

Assim, o calor específico médio para a emulsão e para o produto final são calculados pela equação (20):

$$C_p = Xc_{p_X} + Pc_{p_P} + Lc_{p_L} + Cc_{p_S} + Fc_{p_F} + Zc_{p_Z} \quad (20)$$

Os resultados de calor específico de cada produto estão na Tabela 5:

Tabela 5 – Calor específico da emulsão e sólido seco para cada produto

Produto	Emulsão C_{pL}	Sólido C_{pP}
Chocolate	2,60	1,15
Galinha	2,63	1,21
Lácteo	2,79	1,51
Carne	2,93	1,78
Fruta	2,70	1,33
Salgado	2,91	1,75
Doce	2,53	1,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Determinado o calor específico e fixando a temperatura $T_L = 25^\circ\text{C}$ da emulsão medida no tanque de alimentação, a última variável de processo necessária para o fechamento do balanço de energia do processo é a temperatura do pó seco, que é calculado pela combinação das equações (11) e (13), resultando na equação (21):

$$T_P = \frac{F_E h_E - F_S h_S + L C_{pL} T_L - k_w \Delta H_V}{P C_{pP}} \quad (21)$$

Os resultados médios calculados pela modelagem realizada são mostrados na Tabela 6:

Tabela 6 - Resultados de temperatura média de pó seco para cada produto

Produto	T_P [$^\circ\text{C}$]
Chocolate	-666,88
Galinha	-925,71
Lácteo	-72,62
Carne	470,49
Fruta	-636,17
Salgado	277,01
Doce	1175,47

Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo estruturar um modelo matemático baseado em dados reais do processo de secagem de aromas alimentícios em spray dryer, com o intuito de analisar a influência das variáveis operacionais nas propriedades físicas do produto final. A partir da aplicação das equações propostas e da análise dos dados disponíveis, foi possível identificar tanto o potencial quanto as limitações da abordagem adotada.

Os resultados indicaram que a qualidade e a localização dos pontos de medição exercem impacto direto sobre a confiabilidade das estimativas fornecidas pelo modelo. A principal limitação observada foi a utilização de valores de temperatura obtidos em uma região não ideal onde o ar já sofreu perdas térmicas significativas. Como consequência, o modelo gerou resultados fisicamente inconsistentes, comprometendo sua aplicabilidade nas condições atuais.

Além disso, a suposição de comportamento adiabático para o sistema mostrou-se inadequada frente à realidade da planta industrial, uma vez que não foram consideradas perdas de calor ao ambiente por falta de instrumentação adequada. A representatividade das amostras de produto utilizadas nas análises também se mostrou um ponto crítico, indicando a necessidade de melhorias no protocolo de coleta para garantir maior fidelidade dos dados.

Como proposta de melhoria, destaca-se a necessidade da instalação de sensores adicionais de temperatura na saída imediata do secador, antes da etapa de separação nos ciclones. Essa alteração permitiria a obtenção de dados mais representativos do produto no momento da secagem, viabilizando a construção de um modelo mais robusto e confiável, especialmente para a estimativa da umidade do produto.

Em suma, o estudo reforça que o desenvolvimento de modelos matemáticos aplicados a processos industriais exige, além de formulações teóricas consistentes, uma infraestrutura de medição apropriada e dados representativos do sistema. Investimentos em instrumentação e qualidade de dados são fundamentais para tornar o modelo não apenas uma ferramenta de análise, mas também um recurso útil para o monitoramento, controle e otimização do processo de secagem de aromas alimentícios.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHOI, Y.; OKOS, M. R. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. In: LeMAGUER, M.; JELEN, P. (Ed.). **Food engineering and process applications**. London: Elsevier Applied Science, 1986. v. 1, p. 93–101.
- FILKOVÁ, I.; HUANG, L. X; MUJUMDAR, A.S. Industrial Spray Drying Systems. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 3. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, Inc., 2006. Cap. 10, p. 217-224.
- GHARSALLAOUI, A.; ROUDAUT, G.; CHAMBIN, O.; VOILLEY, A.; SAUREL, R. Applications of spray drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. **Food Research International**, v.40, n.9, p.1107-1121, 2007.
- RÉ, M.I. Microencapsulation by spray drying. *Drying Technology*, v.16, n.6, p.1195-1236, 1998.
- SOKHANSANJ, S.; JAYAS, D. S. Drying of Foodstuffs. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. 3. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, Inc., 2006. Cap. 21, p. 522-537.
- TONON, Renata Valeriano. **Secagem por atomização do suco de açaí: influência das variáveis de processo, qualidade e estabilidade do produto**. 2009. 212 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, SP. Disponível em: 20.500.12733/1609947. Acesso em: 13 jun. 2025.
- BRODGESELL, A.; LIPTÁK, B. G. Moisture in Solids. In: LIPTÁK, B. G. **Instrument Engineers' Handbook: Process Measurement and Analysis**. 4. ed. Boca Raton: CRC PRESS, 2003. Cap. 8, p. 1452-1453.