

Fernando Gabriel Antunes
Wagner Felipe Bedin
Lucas Maffini Souza

ESTUDO DOS **PARÂMETROS** DE TEMPERATURA NA UMIDADE DE ALIMENTOS PARA CÃES EM SECADOR CONTRAFLUXO



Fernando Gabriel Antunes
Wagner Felipe Bedin
Lucas Maffini Souza

ESTUDO DOS **PARÂMETROS** DE TEMPERATURA NA UMIDADE DE ALIMENTOS PARA CÃES EM SECADOR CONTRAFLUXO

2025 by Atena Editora

Copyright © 2025 Atena Editora

Copyright do texto © 2025, o autor

Copyright da edição © 2025, Atena Editora

Os direitos desta edição foram cedidos à Atena Editora pelo autor.

Open access publication by Atena Editora

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira Scheffer

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Yago Raphael Massuqueto Rocha



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

A Atena Editora tem um compromisso sério com a transparência e a qualidade em todo o processo de publicação. Trabalhamos para garantir que tudo seja feito de forma ética, evitando problemas como plágio, manipulação de informações ou qualquer interferência externa que possa comprometer o trabalho.

Se surgir qualquer suspeita de irregularidade, ela será analisada com atenção e tratada com responsabilidade.

O conteúdo do livro, textos, dados e informações, é de responsabilidade total do autor e não representa necessariamente a opinião da Atena Editora. A obra pode ser baixada, compartilhada, adaptada ou reutilizada livremente, desde que o autor e a editora sejam mencionados, conforme a Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Cada trabalho recebeu a atenção de especialistas antes da publicação. A equipe editorial da Atena avaliou as produções nacionais, e revisores externos analisaram os materiais de autores internacionais.

Todos os textos foram aprovados com base em critérios de imparcialidade e responsabilidade.

Estudo dos parâmetros de temperatura na umidade de alimentos para cães em secador contrafluxo

| Autores:

Fernando Gabriel Antunes
Lucas Maffini Souza

Wagner Felipe Bedin

| Revisão:

Os Autores

| Diagramação:

Nataly Gayde

| Capa:

Yago Raphael Massuqueto Rocha

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

A636 Antunes, Fernando Gabriel
Estudo dos parâmetros de temperatura na umidade de
alimentos para cães em secador contrafluxo /
Fernando Gabriel Antunes, Wagner Felipe Bedin,
Lucas Maffini Souza. – Ponta Grossa - PR: Atena,
2026.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-258-3888-5
DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.885261802>

1. Secagem de alimentos. 3. Alimentos para cães. 3.
Controle de temperatura e umidade. 4. Processamento
de alimentos. I. Antunes, Fernando Gabriel. II. Bedin,
Wagner Felipe. III. Souza, Lucas Maffini. IV. Título.

CDD 664.07

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora

📞 +55 (42) 3323-5493

📞 +55 (42) 99955-2866

🌐 www.atenaeditora.com.br

✉ [contato@atenaeditora.com.br](mailto: contato@atenaeditora.com.br)

CONSELHO EDITORIAL

CONSELHO EDITORIAL

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof^a Dr^a Amanda Vasconcelos Guimarães – Universidade Federal de Lavras
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Prof^a Dr^a Ariadna Faria Vieira – Universidade Estadual do Piauí
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Cirênio de Almeida Barbosa – Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Cláudio José de Souza – Universidade Federal Fluminense
Prof^a Dr^a Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidade Federal do Piauí
Prof^a Dr^a. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Dr. Elio Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof^a Dr^a Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Fabrício Moraes de Almeida – Universidade Federal de Rondônia
Prof^a Dr^a Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Humberto Costa – Universidade Federal do Paraná
Prof. Dr. Joachin de Melo Azevedo Sobrinho Neto – Universidade de Pernambuco
Prof. Dr. João Paulo Roberti Junior – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof^a Dr^a Juliana Abonizio – Universidade Federal de Mato Grosso
Prof. Dr. Julio Cândido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof^a Dr^a Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
Prof^a Dr^a Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
Prof. Dr. Sérgio Nunes de Jesus – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia
Prof^a Dr^a Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

APRESENTAÇÃO

APRESENTAÇÃO

A operação de secadores industriais ocupa um papel central em diversos segmentos da indústria química, influenciando diretamente a qualidade do produto final, o consumo energético e a eficiência global do processo. Apesar de sua ampla utilização, esses equipamentos ainda apresentam desafios relevantes relacionados à variabilidade operacional, custos elevados e dificuldade de ajuste fino das condições de operação. Nesse contexto, a otimização de secadores torna-se uma ferramenta essencial para a melhoria do desempenho industrial.

Este livro tem como objetivo apresentar um estudo sistemático sobre a otimização de um secador industrial, abordando tanto os fundamentos teóricos quanto a aplicação prática de métodos de análise e melhoria de processos. A obra busca integrar conceitos clássicos da engenharia química com estratégias de otimização, permitindo a avaliação criteriosa de parâmetros operacionais e seus impactos no funcionamento do equipamento.

Ao longo do texto, são discutidos os princípios que regem os processos de secagem, os fatores que influenciam a transferência de calor e massa e as limitações inerentes aos sistemas industriais reais. A partir dessa base, são exploradas metodologias para análise de desempenho e proposição de melhorias operacionais, sempre com foco em eficiência, estabilidade do processo e viabilidade técnica.

Destinado a estudantes, pesquisadores e profissionais da área de engenharia química e áreas correlatas, este livro procura contribuir para uma compreensão mais aprofundada dos processos de secagem industrial e estimular a aplicação da otimização de processos como ferramenta estratégica na indústria. Mais do que apresentar resultados, a obra convida o leitor a refletir sobre a importância do pensamento analítico e da melhoria contínua em sistemas industriais complexos.

AGRADECIMENTOS

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradecemos a Deus por ter nos concedido saúde, sabedoria e força para concluir este trabalho. Em momento nenhum trilhamos essa jornada sozinhos.

Aos pais, expressamos nossa mais profunda gratidão. Seu amor, apoio incondicional e incentivo foram a base para todas as nossas conquistas. A vocês dedicamos esta realização.

Aos mestres, em especial ao nosso orientador, Thiago, agradecemos pela paciência, dedicação e conhecimento compartilhados. Vocês foram guias neste percurso.

Aos familiares e amigos, por estarem sempre ao nosso lado, celebrando vitórias, oferecendo apoio nos momentos de dificuldade e muitas vezes partilhando o percurso. Vocês tornaram essa jornada mais leve.

Agradecemos também a todas as instituições que contribuíram para a realização deste trabalho, por proporcionar um ambiente propício para a pesquisa e o desenvolvimento acadêmico.

Deus não joga dados com o universo.

Albert Einstein

RESUMO

RESUMO

O setor de alimentos para cães vem crescendo significativamente, impulsionando a adaptação da indústria por meio do aprimoramento das técnicas de produção e controle de fabricação. No entanto, ainda há oportunidades de melhoria, especialmente na produção de alimentos secos extrusados, que dominam o mercado. As etapas de extrusão e secagem, altamente demandantes de energia, envolvem múltiplos parâmetros de processo, aumentando sua complexidade. Modelos complexos tornam-se pouco viáveis devido à especificidade de cada indústria, processo e produto, dificultando a otimização da produção e o uso eficiente das matérias-primas. Nesse contexto, a análise estatística dos dados do processo se destaca como uma abordagem eficaz para aprimorar a eficiência e a qualidade do processo produtivo. Neste estudo, utilizou-se a metodologia de superfície de resposta, associada à análise estatística dos dados de um secador contrafluxo vertical de oito pisos, no qual os parâmetros de temperatura das quatro zonas (T1, T2, T3 e T4) do equipamento foram analisados. O objetivo foi obter um perfil de tendência das temperaturas durante o processo de secagem, visando alcançar um teor de umidade alvo de 8,5%. Os resultados indicaram correlações qualitativamente significativas entre as temperaturas, nas diferentes zonas do secador contrafluxo, destacando-se o comportamento oposto nas zonas T2 e T4, além da alta variabilidade observada na última zona. A primeira zona, T1, mostrou-se mais estável e menos suscetível a alterações operacionais, enquanto as etapas finais do processo revelaram-se mais críticas para o controle adequado. A otimização das condições de secagem foi, portanto, fundamental para alcançar o teor de umidade ideal e garantir a qualidade do alimento processado.

PALAVRAS-CHAVE: extrusão; qualidade; análise estatística; superfície de resposta; otimização de processos.

ABSTRACT

ABSTRACT

The dog food sector has been experiencing significant growth, driving the industry's adaptation through the improvement of production techniques and manufacturing control. However, there are still opportunities for improvement, especially in the production of extruded dry pet food, which dominates the market. The extrusion and drying stages, which are highly energy-intensive, involve multiple process parameters, increasing their complexity. Complex models become unfeasible due to the specificity of each industry, process, and product, making it difficult to optimize production and efficiently use raw materials. In this context, statistical analysis of process data stands out as an effective approach to enhancing efficiency and product quality. This study employed the response surface methodology, combined with statistical data analysis of an eight-tier vertical counterflow dryer, in which the temperature parameters of the four zones (T1, T2, T3, and T4) of the equipment were analyzed. The objective was to obtain a temperature trend profile during the drying process to achieve a target moisture content of 8.5%. The results indicated qualitatively significant correlations between temperatures in the different zones of the counterflow dryer, highlighting the opposite behavior in zones T2 and T4, as well as the high variability observed in the last zone. The first zone, T1, proved to be more stable and less susceptible to operational changes, while the final stages of the process were more critical for proper control. Optimizing the drying conditions was therefore essential to achieving the ideal moisture content and ensuring the quality of the processed food.

KEYWORDS: extrusion; quality; statistical analysis; response surface; process optimization.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Siglas

ABINPET	Associação Brasileira da Indústria de Produtos para Animais de Estimação
ANOVA	Analysis of Variance
APCC	Análises de Pontos Críticos de Controle
BPF	Boas Práticas Fabris
EME	Energia Mecânica Específica
ETE	Energia Térmica Específica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MAPA	Ministério da Agricultura e Pecuária
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
NIR	Near Infrared
PPR	Programas de Pré-requisitos
PPRO	Programas de Pré-requisitos Operacionais

SUMÁRIO

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo geral	3
2.2 Objetivos específicos	3
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
3.1 A indústria de alimentos para animais de estimação	4
3.2 Processo produtivo.....	6
3.3 Alimento Extrusado	9
3.4 O Processo de Extrusão	10
3.5 O processo de secagem	14
3.5.1 Fundamentos de secagem	15
3.5.2 Mecanismos de transferência no processo de secagem.....	16
3.5.3 Taxa de secagem.....	19
3.5.4 Variáveis no processo de secagem	21
3.5.5 Secador contrafluxo	22
3.5.6 Desafios da secagem de alimentos para cães.....	26
3.6 Análise estatística.....	27
3.7 Metodologia de superfície de resposta	28
4. MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1 Materiais.....	29
4.2 Métodos.....	31

SUMÁRIO

SUMÁRIO

5. RESULTADOS	36
5.1 Estatística descritiva.....	36
5.2 Análise de covariâncias	38
5.3 Análise de variância.....	39
5.4 Metodologia de superfície de resposta.....	40
5.4.1 Correlações de T1.....	40
5.4.2 Correlações de T2.....	46
5.4.3 Correlações de T3	49
5.5 Otimização de resposta.....	53
6. CONCLUSÃO	55
REFERÊNCIAS	56
SOBRE O AUTOR	61



1. INTRODUÇÃO

No universo da nutrição animal, a formulação de uma alimentação adequada tornou-se uma abordagem essencial, independentemente do objetivo da criação. Garantir o bem-estar dos animais e maximizar seu desempenho depende de um fornecimento preciso e balanceado de nutrientes (ARAÚJO; ZANETTI, 2019). Em meio a essas demandas produtivas, em especial ao crescimento do setor *petfood*, em âmbito mundial, a produção em escala industrial apresenta incessante busca por eficiência e qualidade.

No campo da engenharia de nutrição animal, o desenvolvimento de dietas balanceadas constitui um aspecto fundamental para a maximização do desempenho zootécnico e a garantia do bem-estar animal. A eficiência da formulação nutricional está diretamente relacionada à precisão na oferta de macro e micronutrientes, assegurando a adequação das exigências metabólicas e produtivas dos animais (ARAÚJO; ZANETTI, 2019).

A formulação de alimentos para cães e gatos, dentro desse cenário, busca não apenas reduzir custos, mas também atender às demandas nutricionais específicas dos animais. Esse processo começa com a farelada, composta por ingredientes adequados, como aminoácidos, minerais e matérias-primas, que variam em diferentes proporções (CHANG; SCHMIELE; MARTÍNEZ-BUSTOS, 2010).

Após a preparação, a mistura seca passa pelo processo de extrusão, sendo inicialmente admitida em pré-condicionadores, com adição de água, onde altas temperaturas, pressões e forças de cisalhamento transformam a massa umidificada em um produto com características específicas. Este processo detalhado por Sule et al. (2024), essa fase prepara o alimento para a próxima etapa: a secagem. A secagem desempenha um papel fundamental, aprimorando as características do produto e garantindo sua conservação ao reduzir o teor de água, o que aumenta a pressão osmótica, inibindo a proliferação de microrganismos deteriorantes, como explicado no *Handbook of Industrial Drying* (MUJUMDAR, 2014).

A umidade final do produto na saída do secador é um indicador crucial da qualidade, como destaca Corazza (2004). Níveis inadequados podem gerar perdas para a indústria e comprometer a aceitação do produto pelos clientes. O design e

a operação de equipamentos de desidratação também são fatores determinantes, uma vez que a seleção das condições adequadas de secagem pode minimizar desvios e oscilações no processo (FELLOWS, 2018).

Contudo, a operação para a obtenção de produtos de alta qualidade e baixo custo, geralmente, é prejudicada por perturbações na planta industrial, sendo a etapa de secagem particularmente sensível a esses desvios. Como seu processamento afeta diretamente as propriedades finais do produto, ela se configura como um ponto crucial para o estudo da perda de produto e do descarte devido à não conformidade, além do elevado consumo de energia agregado ao equipamento (CORAZZA, 2004).

A produção de alimentos para cães e gatos exige um controle rigoroso da umidade do produto final, uma vez que níveis inadequados podem comprometer não apenas a qualidade e segurança alimentar, mas também a vida útil do produto. A secagem, portanto, é uma etapa crucial nesse processo. O estudo e a otimização dos parâmetros operacionais são essenciais para garantir as características ideais dos alimentos, minimizando desvios nos níveis de umidade.

Nesse contexto, o presente estudo avaliou o desvio de umidade, após o processo de secagem, em uma planta industrial de alimentos para cães, localizada nos Campos Gerais. Foi analisado o impacto dos parâmetros de temperatura do equipamento na umidade final do produto, visando obter relações para otimização e aumento da eficiência do processo, afetando diretamente a qualidade do produto final.



2. OBJETIVOS

Esta seção possui o objetivo de descrever os propósitos fundamentais da pesquisa, destacando os objetivos específicos que o orientam. Este delineamento representa a base sobre a qual todo o trabalho é construído.

2.1 Objetivo geral

Avaliar o comportamento e a correlação entre os parâmetros de um secador industrial contrafluxo instalado em uma fábrica de alimentos para cães e gatos.

2.2 Objetivos específicos

- | Coletar e analisar o desvio dos parâmetros de temperatura e umidade de um produto alimentício para cães;
- | Avaliar a significância dos fatores no comportamento da umidade na saída do secador;
- | Identificar possíveis interações entre as temperaturas nas zonas do secador contra-fluxo, bem como as combinações mais influentes;
- | Obter as possíveis causas de desvios na umidade do produto seco, considerando diferentes configurações de temperatura;
- | Sugerir combinações ideais ou tendências de otimização de temperatura visando atingir a umidade ideal.



3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 A indústria de alimentos para animais de estimação

A interação entre humanos e animais desempenhou um papel fundamental ao longo da história. Desde cerca de 3.100 a.C., práticas como a ordenha, o consumo de leite e o pasto-reio de espécies como bovinos, equinos e ovinos têm intensificado essa relação. Documentos históricos, como o Código de Hamurabi, o Código dos Hititas e a Bíblia, corroboram essa integração (ARAÚJO; ZANETTI, 2019). Com o passar do tempo, o aumento das demandas e o aprimoramento das técnicas geraram significativas oportunidades de desenvolvimento.

A produção comercial de alimentos para animais de estimação começou em 1940, nos Estados Unidos e na Europa, marcando um ponto de inflexão no setor. Desde então, o segmento tem experimentado um crescimento contínuo, impulsionado pela diversificação e sofisticação dos produtos disponíveis no mercado. Esses alimentos, diferenciados por forma física, composição nutricional e capacidade de atender às necessidades fisiológicas e patológicas dos animais, desempenham um papel essencial na expansão e valorização do setor (SGORLON et al., 2022; YANG et al., 2023).

A evolução do setor de alimentos para animais de estimação (*pet food*) reflete as transformações e avanços sociais observados nas últimas décadas, impulsionados pela crescente conscientização sobre a nutrição animal e pela demanda por produtos mais saudáveis e equilibrados (ARAÚJO; ZANETTI, 2019). Este avanço contínuo é resultado de inovações tecnológicas e melhorias constantes na engenharia de processos, visando a otimização do uso de recursos e a garantia de uma produção de alta qualidade, mesmo em larga escala (CREPALDE et al., 2023). Tais avanços não só proporcionam uma alimentação mais adequada e nutritiva para os animais, como também fortalecem a indústria como um todo, destacando-se como um setor dinâmico e inovador.

A crescente demanda global por alimentos de qualidade para animais de estimação tem levado o setor de *pet food*, especialmente no segmento de cães e gatos, a se adaptar e expandir para atender a esses novos desafios. De acordo

com a Associação Brasileira da Indústria de Produtos para Animais de Estimação, a indústria *pet* no Brasil apresentou um crescimento de 12,03% em 2023, com uma produção de 4,08 milhões de toneladas de produtos. Esse crescimento reflete não apenas a adaptação às necessidades do mercado, mas também o compromisso da indústria com a inovação e excelência contínua (ABINPET, 2024).

De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e da Associação Brasileira da Indústria de Produtos para Animais de Estimação (ABINPET), em 2022, a média foi de 1,6 animal de estimação por residência no Brasil, com a maior predominância de cães. Este dado reflete a crescente popularidade dos animais de estimação no país, destacando a importância do mercado *pet*. A Tabela 1, que detalha essa distribuição, mostra que os cães continuam sendo os animais de estimação mais comuns no Brasil, seguidos de gatos, aves e outros tipos de *pets* (ABINPET, 2023). Esses números refletem a forte tendência de humanização dos animais de estimação e a maior preocupação com o seu bem-estar, o que impulsiona o crescimento do mercado de alimentos e produtos para *pets*.

Tabela 1 – Número de animais no Brasil por espécie

Animal	Quantidade
Cães	60 milhões
Aves	40 milhões
Gatos	30 milhões
Peixes ornamentais	20 milhões
Pequenos répteis e pequenos mamíferos	2,5 milhões
Total	152,5 milhões

Fonte: Adaptado de ABINPET - Associação Brasileira da Indústria de Produtos para Animais de Estimação, 2023.

A crescente relação emocional entre tutores e seus animais de estimação tem sido um dos principais motores para o avanço do setor de *pet food*. O desejo de prolongar a vida dos *pets* e proporcionar-lhes uma alimentação de alta qualidade tem levado a um aumento nos investimentos por parte dos tutores. Essa tendência é particularmente visível na popularização dos produtos *premium* e *super premium*, mesmo diante da presença de opções mais econômicas no mercado. A busca por alimentos que atendem melhor às necessidades nutricionais e de bem-estar dos animais reflete uma mudança significativa no comportamento dos consumidores (WHITE et al., 2016; LINDER; MUELLER, 2014).

O consumo de alimentos de qualidade é determinante para o desempenho animal, fornecendo nutrientes essenciais ao organismo. Medidas como o aumento do consumo alimentar, oferta de alimentos mais nutritivos e maior digestibilidade podem otimizar a nutrição. Segundo a ABINPET (2023), a nutrição de cães é subdividida em:

- | Natural: Derivado de ingredientes naturais, sem elementos sintetizados quimicamente.
- | Específico: Não completo, usado como agrado ou recompensa.
- | Caseiro: Produzido fora do ambiente industrial, sem controle rigoroso de nutrientes.
- | Industrializado:
 - | Completo: Atende integralmente às exigências nutricionais.
 - | Coadjuvante: Indicado para animais com distúrbios fisiológicos ou metabólicos.

O alimento seco (industrializado completo) é o mais utilizado para cães devido à praticidade, economia e adequação a cães de companhia (CASE, 2016). Além da composição química, a qualidade dos alimentos deve considerar a digestibilidade (capacidade de absorção de nutrientes) e a palatabilidade (atratividade ao paladar do animal).

No ramo alimentício, a qualidade e segurança alimentar devem ser garantidas em todas as etapas do processo industrial, afirma Souza (2013), para isso o sistema de gestão de segurança dos alimentos deve ser bem definido, com parâmetros mensuráveis. No processo, medidas como Programas de Pré-requisitos (PPR), Programas de Pré-requisitos Operacionais (PPRO), Boas Práticas Fabris (BPF) ou Análises de Pontos Críticos de Controle (APCC), são tomadas para padronização e verificação das condições operacionais. No entanto, o produto processado também deve apresentar condições adequadas, principalmente para conservação pós produção (BERTOLINO, 2010).

O produto acabado é particularmente afetado pelas condições internas que o compõem, sobretudo durante a estocagem, onde esses fatores podem ser agravados. Além da temperatura e da atividade de água, a umidade é uma das principais fontes de crescimento fúngico e bacteriano, podendo atrair até mesmo insetos. Qualquer contaminação ou influência negativa sobre o produto pode ocasionar prejuízos significativos à saúde do animal, diz Aquino *et al.* (2011). Nessa situação, todo o empenho no processo produtivo pode ser parcial ou completamente desperdiçado.

3.2 Processo produtivo

O processo de fabricação desses produtos alimentícios destinados aos animais varia, conforme as especificidades do produto. Os métodos de processamento a seco incluem moagem fina e/ou grosseira, micronização, tostagem, peletização e laminação. Por outro lado, os processos que envolvem a adição de água incluem

laminação a vapor, floculação, expansão e extrusão. Os métodos que utilizam umidade, pressão e temperatura elevadas têm se mostrado mais eficientes, pois promovem a gelatinização do amido e aumentam a digestibilidade, em comparação com os processos de secagem a seco (MOURÃO et al., 2012).

O processo de produção de ração seca extrusada, para cães e gatos, está representada na Figura 1, e inicia-se com a seleção e mistura dos ingredientes secos, que são combinados de acordo com formulações específicas desenvolvidas.

Figura 1 – Diagrama simplificado do processo produtivo de alimento extrusado



Fonte: Autoria própria (2025).

Para a produção, todos os ingredientes secos, como farinhas de cereais, proteínas animais e vegetais, vitaminas e minerais, são admitidos em uma etapa anterior à extrusão. Nela, misturadores com rosas verticais garantem a homogeneização completa da mistura seca, preparando-a para a etapa seguinte, a extrusagem (RIAZ, 2000).

O condicionador prepara a massa umedecendo-a com água e vapor, aumentando a eficiência da mistura e promovendo a gelatinização do amido. Isso ocorre em cilindros horizontais com rosas e aletas. Logo, a mistura pode ser descarregada na extrusora, sofrendo todas as modificações físico-químicas necessárias (RIAZ, 2000).

Na extrusora, a massa homogênea é submetida à forças de cisalhamento e dosagens controladas de água e vapor. Essas condições promovem uma série de modificações físico-químicas, como a formação da textura característica do produto (GUY, 2001).

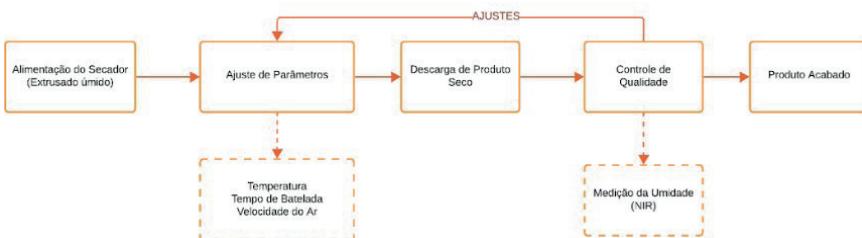
Ao final da extrusora, a massa passa por um molde com o formato desejado do produto, onde facas giratórias, em alta velocidade, moldam os *kibbles*. Ao sair do ambiente de alta pressão, o produto se expande rapidamente, devido à liberação da energia acumulada no interior do equipamento. Essa expansão confere ao produto sua textura crocante e aerada, no entanto, ainda é necessária a remoção da umidade excessiva do produto (HARPER, 1981; KOKINI; HO; KARWE, 1992).

Em seguida, o produto extrusado é direcionado para o secador. Nessa etapa, o equipamento calcula, a partir da quantidade de água acrescentada à massa e da taxa de produto sendo processado por hora, o volume de água que precisa ser removido, por meio de um balanço de massa. Cálculos são realizados para que se obtenha uma sugestão dos demais parâmetros de processo, de forma que a umidade ideal seja atingida, ou pelo menos uma faixa próxima (RIAZ, 2000; SINGH; HELDMAN; ERDOGDU, 2025; MUJUMDAR, 2014).

Após a etapa de secagem, o produto escoa, com a ajuda de agitadores, para uma grelha que dispensará o produto para a próxima etapa. Neste processo, uma das principais características que devem ser analisadas no produto é a umidade. De acordo com as normas estabelecidas pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), o teor de umidade para rações extrusadas deve ser mantido abaixo de 10% para garantir a qualidade e a segurança do produto final.

Durante todo o período de produção, amostras são coletadas e encaminhadas ao laboratório de análises, conforme ilustrado na Figura 2. Os resultados obtidos para os parâmetros do produto serão utilizados para determinar a necessidade de ajustes no processo.

Figura 2 – Diagrama simplificado das análises de controle de qualidade



Fonte: Autoria própria (2025).

A análise da umidade é realizada por espectroscopia de reflectância ou absorção no Infravermelho Próximo, *Near Infrared (NIR)*. Uma técnica analítica utilizada na indústria de alimentos para animais de estimação, como uma alternativa rápida e não destrutiva para determinar diversas especificações, com espectro na faixa de 700 nm a 2500 nm. O produto após a secagem é triturado, para facilitar a leitura, e inserido no equipamento que em poucos minutos retorna com os resultados (HERVERA *et al.*, 2012).

Por fim, o produto é embalado e armazenado, de forma a proteger, por exemplo, do umedecimento ou da contaminação devido ao contato com condições externas. A embalagem também desempenha um papel importante na preservação dos nutrientes e na manutenção do frescor da ração durante o armazenamento e a distribuição. O produto final é então distribuído para pontos de venda, onde os consumidores podem adquiri-lo. Todas as etapas de armazenamento são essenciais, porém, serão bem-sucedidas desde que os parâmetros de qualidade do produto, no processo, sejam atendidos (RIAZ, 2000; SINGH; HELDMAN, 2008).

3.3 Alimento Extrusado

A ração seca extrusada é amplamente utilizada como o tipo mais comum de alimento comercial para animais de estimação, tanto para cães quanto para gatos. Estima-se que uma grande parte da ração consumida por animais domésticos seja produzida através do processo de extrusão. Esse método de produção é altamente eficiente, transformando matérias-primas alimentares em produtos com formatos e texturas específicas, atendendo às necessidades nutricionais dos animais.

Através da aplicação de pressão controlada, a extrusão força os ingredientes por uma abertura moldada. A possibilidade de adaptação deste processo permite seu uso em diversos setores, resultando em uma variedade de produtos como cereais matinais, massas, salgadinhos e até mesmo opções alimentares à base de carne (SINGH; HELDMAN, 2008). Devido à sua eficiência e versatilidade, este processo tem sido utilizado na produção de rações para animais desde 1954 (CORBIN, 2003).

A extrusão submete os amidos a um intenso banho de calor e pressão, desencadeando um processo conhecido como gelatinização. Durante essa etapa, os grânulos de amido, que inicialmente eram rígidos e cristalinos, são submetidos a calor e pressão, rompendo suas estruturas cristalinas e se desdobrando em longas cadeias moleculares (RIAZ, 2000). Esse processo melhora a digestibilidade, a palatabilidade e a segurança alimentar da ração (SINGH; HELDMAN, 2008).

Enquanto o amido passa pelo processo de gelatinização, as proteínas presentes na mistura também sofrem alterações substanciais. Sob a influência do alto cisalhamento, pressão e temperatura, as estruturas complexas das proteínas se desdobram e se rompem, alterando suas propriedades funcionais. Essa desnaturação das proteínas pode resultar em uma diminuição da solubilidade e formação de complexos com outros componentes da ração, como lipídios e amido (PÉREZ; BERTOFT, 2010).

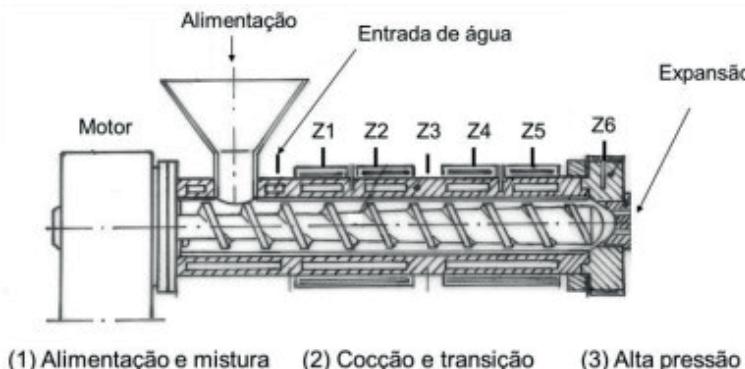
A transformação do amido durante o processo de extrusão facilita a digestão dos animais, permitindo uma absorção mais eficiente dos nutrientes. Esse processo também contribui para a segurança e a estabilidade do produto final. A tecnologia de

extrusão tem sido essencial para a produção de ração de alta qualidade, atendendo às necessidades nutricionais dos animais de estimação e proporcionando uma experiência alimentar satisfatória.

3.4 O Processo de Extrusão

O processo de extrusão é realizado em uma máquina chamada extrusora, como demonstrado na Figura 3. O processo inicia-se com a mistura dos ingredientes selecionados (*pre-mix*), etapa que precede a alimentação da extrusora. Durante essa fase, vapor e água são adicionados ao pré-condicionador do equipamento — uma região de formato cilíndrico, disposta na direção horizontal, responsável pela mistura do material, que é agitado com o auxílio de aletas internas — iniciando o umedecimento da massa. Essa umidificação inicial da mistura favorece a estabilidade do equipamento, diminuindo o desgaste da máquina durante a plastificação dos ingredientes abrasivos.

Figura 3 – Representação de uma extrusora e etapas básicas



(1) Alimentação e mistura (2) Cocção e transição (3) Alta pressão

Fonte: LabGrãos, 2018.

Na sequência, a extrusora é alimentada a uma determinada taxa por meio do bocal de alimentação. O material segue para a segunda parte do equipamento, onde ocorre a chamada cocção e transição. Nessa região, um novo volume de água pode ser adicionado, se necessário. Todo esse volume líquido é de extrema importância, pois desempenha um papel crucial no aprimoramento do processo, sendo posteriormente removido durante a secagem. Durante essa fase, o calor adicionado promove o cozimento da massa.

A parte final da extrusora consiste em uma zona de alta pressão com uma abertura de formato determinado. Ao passar por essa abertura, o produto recebe o formato característico da ração, e uma lâmina faz o corte do produto no tamanho desejado (ROKEY; PLATTNER; SOUZA, 2010).

A extrusora de alimentos é projetada para empregar duas fontes de energia distintas durante o processamento: a Energia Mecânica Específica (EME) e Energia Térmica Específica (ETE). A EME, gerada pelo motor principal da extrusora, facilita a mistura e homogeneização dos ingredientes, promovendo a quebra mecânica dos grãos e a formação dos *kibbles*. Esse processo resulta na criação de uma textura consistente e contribui para a integridade estrutural do produto final (RIAZ, 2000; SINGH; HELDMAN, 2008). Por outro lado, a ETE, fornecida pelo calor e vapor aplicados, favorece a gelatinização do amido e altera as propriedades das proteínas, melhorando a digestibilidade e segurança do produto (GUY, 2001).

A ETE é fornecida por meio da injeção direta de vapor e água na mistura durante o processamento (RIAZ, 2000; GUY, 2001). Esse método de injeção atua como um sistema de aquecimento interno, elevando a temperatura dos ingredientes e favorecendo a cocção e a modificação estrutural dos componentes alimentares (SINGH; HELDMAN, 2008).

A ETE desempenha um papel crucial em reações químicas essenciais, como a gelatinização do amido, processo fundamental para a melhora da digestibilidade dos carboidratos pelos animais de estimação. Durante a gelatinização, os grânulos de amido, que inicialmente são rígidos e cristalinos, rompem suas estruturas e se tornam mais acessíveis para digestão (RIAZ, 2000).

Além disso, é significativa a contribuição para a desnaturação das proteínas, alterando suas propriedades funcionais, o que pode melhorar a solubilidade e interação com outros ingredientes, como lipídios, influenciando diretamente a palatabilidade e a segurança alimentar da ração (PÉREZ; BERTOFT, 2010). Dessa forma, a energia térmica não só promove o cozimento adequado dos ingredientes, mas também assegura a qualidade nutricional e a estabilidade do produto final, tornando-o adequado para a alimentação dos animais (GUY, 2001).

De acordo com Riaz (2000), o controle preciso da EME e da ETE é vital para a produção de ração de alta qualidade, fornecendo o produto adequado para a etapa de secagem, visto que a adequada homogeneização é trivial para a padronização industrial.

A aplicação correta desses tipos de energia garante o cozimento completo dos ingredientes, a formação uniforme dos *kibbles* e a preservação dos nutrientes essenciais. Esse equilíbrio no controle energético permite uma produção que não só atende às necessidades nutricionais, mas que também oferece textura e consistência adequadas (GUY, 2001).

No contexto da ETE, a temperatura desempenha um papel fundamental no processo de extrusão de alimentos, sendo um fator chave na definição das propriedades físicas e nutricionais do produto final. De acordo com Riaz (2000), o ajuste e a otimização das temperaturas do cilindro e da matriz são cruciais para alcançar as propriedades reológicas desejadas, como viscosidade e elasticidade, bem como a expansão e as características texturais da ração extrusada. A temperatura correta também afeta a gelatinização do amido e a desnaturação das proteínas, influenciando diretamente a digestibilidade e a palatabilidade do produto (RIAZ, 2000; SINGH; HELDMAN, 2008).

O controle adequado da temperatura permite manipular diversos parâmetros importantes, entre os quais se destacam:

- | **Viscosidade do material:** A temperatura afeta significativamente a viscosidade da mistura durante o processamento. Ajustar a temperatura de maneira precisa possibilita obter a consistência ideal para a formação dos *kibbles*, garantindo uniformidade e estabilidade no produto final (RIAZ, 2000; SINGH; HELDMAN, 2008).
- | **Gelatinização do amido:** A temperatura apropriada facilita a gelatinização do amido, um processo crucial para melhorar a digestibilidade dos carboidratos para os pets. Controlar a temperatura dentro de uma faixa adequada promove a gelatinização eficaz, resultando em uma ração mais nutritiva e de melhor qualidade (SINGH; HELDMAN, 2008).
- | **Taxa de expansão:** A expansão do produto é diretamente influenciada pela temperatura. Ajustar a temperatura com precisão permite controlar a densidade final do produto, proporcionando uma textura crocante e atraente para os animais. Isso não apenas melhora a aceitação do alimento pelos pets, mas também contribui para uma experiência sensorial satisfatória (RIAZ, 2000).

A temperatura na extrusão atua como um parâmetro crítico que influencia diretamente a qualidade da ração. De acordo com Guy (2001), o calor gerado durante o processo de extrusão pode ser aproveitado em processos subsequentes, como a secagem, contribuindo para uma maior eficiência energética. Como o produto chega ao secador com uma temperatura elevada, o calor gerado durante a extrusão é melhor utilizado para evaporar a água residual, resultando em uma redução do consumo de energia adicional.

Riaz (2000) também destaca que a integração eficiente entre as etapas de extrusão e secagem é essencial para otimizar o uso de energia térmica, garantindo que o processo seja não apenas eficaz, mas também sustentável e economicamente viável.

Da mesma forma, o teor de umidade da alimentação está diretamente relacionado a várias características importantes do produto final, como expansão, dureza e textura da ração.

Hagenimana, Ding e Fang (2006) explicam que a umidade presente no interior do material a ser extrusado, quando exposta a altas temperaturas, se transforma em vapor de água ao sair da matriz. A liberação desse vapor provoca a formação de bolhas dentro do material devido à pressão exercida, o que resulta em um produto mais aerado. Esse fenômeno está intimamente associado à taxa de expansão do material, fator que contribui significativamente para a densidade final do produto extrusado. A formação adequada dessas bolhas é essencial para atingir a textura desejada na ração final, o que afeta diretamente a palatabilidade e a aceitabilidade do alimento.

Ao ser adicionada à mistura, a água desempenha um papel fundamental na proteção do equipamento, facilitando o escoamento do material ao longo da extrusora. Ela atua como plastificante, reduzindo o atrito e a viscosidade do material, além de contribuir para uma mistura mais eficiente e homogênea. Essa ação de plastificação é essencial, pois permite que o material flua com mais facilidade através do equipamento, minimizando o desgaste e prolongando a vida útil das máquinas utilizadas no processo de extrusão. A utilização adequada de água, portanto, não apenas melhora a eficiência do processo, mas também assegura a durabilidade do sistema de extrusão, conforme destacado por (RIAZ, 2000), que indica que a água age como um fator crítico para garantir a estabilidade e otimização do processo.

Segundo Hagenimana, Ding e Fang (2006), o teor de umidade na alimentação também está diretamente relacionado à cor final do produto. Quando o teor de umidade é elevado, a ração apresenta uma aparência mais clara e brilhante, devido à menor formação de compostos responsáveis pelo escurecimento. Em contraste, quando o teor de umidade é baixo, a luminosidade do produto final diminui, resultando em uma ração mais escura. Os autores explicam que esse fenômeno se deve ao fato de que altas temperaturas, combinadas com baixos teores de umidade, favorecem a reação de Maillard, que envolve a interação entre açúcares redutores e aminoácidos presentes no material, levando à formação de compostos escuros (HAGENIMANA; DING; FANG, 2006).

O produto final desta operação sai do equipamento com elevado teor de umidade, logo, é necessária uma operação subsequente: a secagem.

3.5 O processo de secagem

A secagem é uma técnica amplamente aplicada em diversos setores industriais, como papel, madeira, alimentos, agricultura e gestão de resíduos (SABAREZ, 2016). Ela apresenta um longo histórico, além de grandes investimentos em pesquisa e adaptações, sendo, certamente, a operação unitária mais antiga, mais comum e diversificada da engenharia química (MUJUMDAR, 2014). Existem mais de 400 tipos de secadores relatados, porém, apenas 25% são comumente utilizados. Ela compete com a destilação como a operação unitária que mais consome energia, devido ao calor latente de vaporização e à inerente ineficiência do uso comum de ar quente como meio de secagem (MUJUMDAR, 2014; GREEN; PERRY, 2007).

É uma operação unitária essencial no processamento industrial de grãos naturais ou processados, como os *kibbles*. Na indústria de alimentos, a secagem também desempenha a função de conservação dos produtos, no caso de grãos, frutos do mar, carnes, laticínios, frutas e vegetais (JANGAM, 2011). Portanto, o aprimoramento das técnicas de secagem é essencial, de forma a maximizar a eficiência energética sem comprometer a qualidade do produto final.

A suscetibilidade de um alimento à deterioração ou contaminação está diretamente relacionada ao seu teor de umidade. Nesse contexto, no processo de fabricação de alimentos extrusados, como rações para cães, a remoção da umidade é uma etapa crítica para garantir a estabilidade do produto final (RIAZ, 2000).

Fellows (2018) destaca que o controle da umidade é essencial para a preservação da qualidade e a segurança microbiológica dos alimentos, sendo indispensável para prolongar a vida útil dos produtos.

A secagem, definida como a remoção de pequenas porções de água, busca atingir níveis aceitáveis ou desejáveis, sendo amplamente reconhecida como uma das operações unitárias mais importantes da engenharia química (MUJUMDAR, 2014). Esse processo além de impedir o crescimento de microrganismos, contribui para a manutenção da textura, sabor e aparência dos produtos, fatores essenciais para a sua comercialização (SABAREZ, 2016).

McCabe e Smith (2018) ressaltam que a secagem de materiais sólidos é o processo de eliminação gradual de água ou outro líquido, até que seu teor atinja níveis apropriados. Mujumdar (2014) aborda a secagem como um processo térmico com a finalidade de remoção de uma substância do produto sólido, porém, com base na sua volatilidade.

Além disso, o aprimoramento das técnicas de secagem é fundamental para maximizar a eficiência energética sem comprometer a qualidade do alimento (JANGAM, 2011; MUJUMDAR, 2014).

3.5.1 Fundamentos de secagem

O objetivo da secagem é a redução da umidade do produto, quantidade de água pre-sente no material, geralmente expressa em porcentagem. No entanto, junto à umidade, outros conceitos relevantes ao estudo da secagem devem ser considerados, de modo a atingir uma melhor compreensão do processo, sendo:

I Atividade da água

A atividade da água (a_w) é definida como a razão entre a pressão de vapor de equilíbrio do alimento (P) e a pressão de vapor de equilíbrio da água pura (P_0) à mesma temperatura, demonstrado na equação 1, variando de 0 a 1, sendo 1 o valor para a água pura (PRIOR, 1979).

$$A_w = \frac{P}{P_0} \quad (1)$$

Esse parâmetro é crucial para entender o comportamento microbiológico dos alimen-tos e sua preservação, já que a redução da atividade de água inibe o crescimento de muitos microrganismos patogênicos e altera a estabilidade do produto. Embora seja influenciada pela temperatura, ela permanece relativamente constante dentro de uma faixa de temperaturas, visto que está relacionada diretamente à disponibilidade de água para os microrganismos e reações bioquímicas (PRIOR, 1979).

I Temperatura de bulbo úmido

A temperatura de bulbo úmido é definida como a temperatura medida por um termômetro cuja extremidade é envolvida por um material úmido, o que permite a evaporação da água e resfriamento da superfície. Essa temperatura, normalmente inferior à do bulbo seco, depende da quantidade de umidade presente no ar. Quando o ar está saturado, as temperaturas de bulbo úmido e seco coincidem (CENGEL, 2007).

I Temperatura de bulbo seco

A temperatura de bulbo seco é definida como a temperatura comum do ar atmosférico, medida sem considerar efeitos como evaporação ou radiação. Em outras palavras, é a tempe- ratura verdadeira do ar (CENGEL, 2007).

I Umidade relativa

A umidade relativa pode ser compreendida como a relação entre: quantidade de vapor de água presente no ar atmosférico e a quantidade máxima que o ar pode conter, na mesma temperatura. Essa relação também pode ser expressa como o quociente entre a pressão de vapor atual e a pressão de saturação da água na referida temperatura (CENGEL, 2007).

I Ponto de orvalho

Quando o ar é resfriado a pressão constante (resfriamento isobárico), mantendo-se também constante a quantidade de vapor de água presente no ar, pode-se definir a temperatura do ponto de orvalho no momento em que a condensação começa. O ponto de orvalho desempenha um papel fundamental no processo, pois ajuda a garantir que a umidade seja adequadamente removida, sem causar condensação, reabsorção de água ou danos ao produto (SILVA; MENDES; FERREIRA, 2024).

Consonante com esses conceitos, o *Handbook of Industrial Drying*, editado por Mujumdar (2014), relata que a secagem industrial envolve a transferência simultânea de calor e massa entre o material úmido e o meio de secagem. Nesse contexto, dois processos distintos ocorrem de forma paralela, sendo que um deles pode se tornar o fator limitante no processo, sendo:

- I Remoção da umidade superficial do material como vapor. É influenciada por parâmetros como a umidade e o fluxo do ar, além da temperatura, pressão e área de superfície do sólido;
- I Movimentação da umidade interna do sólido para suas zonas mais externas. É um fenômeno determinado por fatores como teor de umidade, temperatura e propriedades físicas do sólido, incluindo dimensões e densidade.

Costa (2000) menciona essa relevância a respeito das dimensões de produto, na qual o aumento da área superficial está relacionado com o aumento da taxa de secagem, devido ao maior contato do ar quente com o produto. Os constituintes e seu arranjo, bem como a sua estrutura celular são influentes no processo.

3.5.2 Mecanismos de transferência no processo de secagem

No processo de secagem, a água presente no material, que possui maior concentração, migra para o ar aquecido, que apresenta menor concentração de água. Esse movimento ocorre devido ao gradiente de concentração de água entre a superfície do material e o ar, resultando na evaporação da água e no seu transporte para o ambiente (MUJUMDAR, 2014).

Segundo Ratti (2001), a secagem por ar quente é amplamente utilizada na indústria de alimentos devido à sua simplicidade e eficiência. A escolha das condições de operação, como temperatura, umidade e fluxo de ar, influencia diretamente a taxa de secagem e a qualidade do produto final.

A complexidade do processo de secagem aumenta à medida que os fenômenos essenciais, mas complexos, de transporte de energia ou massa são avaliados. A transferência de calor é responsável por fornecer a energia externa necessária para a evaporação da água superficial. A transferência de massa, no entanto, envolve características intrínsecas ao material a ser seco, com ênfase na posição do conteúdo interno (MUJUMDAR, 2014; GEANKOPLIS, 1993).

A condução é o mecanismo de transferência de calor que ocorre devido à interação molecular em um meio sólido ou líquido estacionário, sendo regida pela Lei de Fourier. No processo de secagem, o calor é transferido da superfície do material para seu interior por meio da condução, principalmente quando o material é compactado ou apresenta baixa porosidade. Segundo Geankoplis (1993), a taxa de condução depende das propriedades térmicas do material, como a condutividade térmica, e do gradiente de temperatura estabelecido no sistema.

A convecção é o principal mecanismo de transferência de calor da fonte de aquecimento para a superfície do material. Bergman (2019) define a transferência de calor por convecção como o processo no qual a energia é transportada dentro de um fluido, devido à interação entre a condução térmica e o movimento global do fluido.

Mujumdar (2014) ressalta que a convecção forçada é amplamente empregada em sistemas industriais de secagem, pois permite controlar com maior precisão variáveis como a temperatura e a velocidade do ar, aumentando a eficiência do processo. Durante esse mecanismo, o calor é transferido para a superfície do material, promovendo a evaporação da água e facilitando a remoção do vapor gerado.

Para compreender melhor os mecanismos de transferência de calor é necessário entender os conceitos de calor latente e calor específico. Conforme Halliday, Resnick e Walker (2023), o calor específico de uma substância é definido como a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de uma unidade de massa da substância, em um grau de temperatura. Enquanto calor latente é dito como a quantidade de calor que uma substância precisa absorver ou liberar para mudar seu estado físico, sem alteração da temperatura.

De acordo com Geankoplis (1993), a secagem é definida como a remoção de umidade de um material sólido ou semi-sólido, impulsionada por um gradiente de concentração. O processo envolve dois mecanismos principais: a difusão interna e a convecção externa.

Geankoplis (1993) define a difusão interna como o movimento de partículas ou moléculas através do interior de um material, causado por gradientes de concentração. Esse fenômeno é regido pela Lei de Fick, sendo descrito de forma geral para situações em estado estacionário e não estacionário (Equações 2 e 3).

Primeira Lei de Fick (estado estacionário):

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (2)$$

Onde:

- | J : é o fluxo de massa por unidade de área;
- | D : é o coeficiente de difusão;
- | C : é a concentração da espécie;
- | x : é a posição no espaço.

Segunda Lei de Fick (estado não estacionário):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3)$$

Onde:

- | $\frac{\partial C}{\partial t}$: Taxa de variação da concentração ao longo do tempo;
- | D : Coeficiente de difusão;
- | $\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$: Segunda derivada espacial da concentração, que descreve como o gradiente de concentração varia no espaço.

A difusão externa refere-se ao transporte de massa que ocorre na interface entre a superfície de um material e o meio fluido circundante. Este processo é fundamental para etapas em que a massa, de água por exemplo, é transferida do sólido para um fluido (ar, vapor, ou gás) ou vice-versa (GEANKOPLIS, 1993).

Definiu-se a difusão externa como o movimento de moléculas através de uma camada límite, próxima à superfície do sólido, impulsionado por um gradiente de concentração. A camada limite é a região do fluido onde os efeitos viscosos predominam, e o transporte ocorre predominantemente por difusão molecular, uma vez que os movimentos turbulentos são minimizados (GEANKOPLIS, 1993).

O processo é descrito pela equação da taxa de transferência de massa:

$$N = k_m(C_s - C_\infty) \quad (4)$$

Onde:

- | N : Taxa de transferência de massa;
- | k_m : Coeficiente de transferência de massa;
- | C_s : Concentração da substância na superfície;
- | C_∞ : Concentração da substância longe da superfície (equilíbrio).

Geankoplis (1993) ressalta que o coeficiente de transferência de massa k_m é dependente das condições hidrodinâmicas do fluxo do fluido, da geometria do sólido e das propriedades físicas do sistema. Ele sugere que k_m pode ser determinado por correlações empíricas envolvendo números adimensionais, como na Equação 5:

$$Sh = aRe^bSc^c \quad (5)$$

Onde:

- | Sh : Número de Sherwood, que relaciona a transferência de massa convectiva à difusiva;
- | Re : Número de Reynolds, que representa a relação entre forças iniciais e viscosas;
- | Sc : Número de Schmidt, que é a razão entre a difusividade de momento e a difusividade de massa;
- | a, b, c : Constantes empíricas que dependem do sistema e do processo.

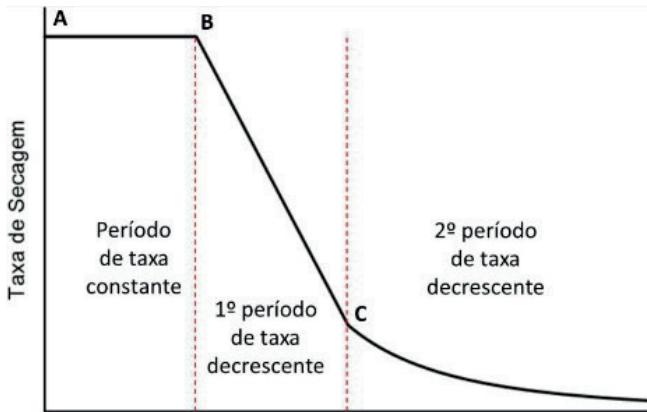
No contexto da secagem, a difusão externa determina a velocidade na qual a umidade, liberada da superfície do sólido, é removida pelo fluxo de ar. Geankoplis (1993) aponta que, em condições onde a difusão externa é a etapa controladora, aumentar a velocidade do fluxo ou reduzir a umidade relativa do ar pode acelerar o processo.

A escolha das condições operacionais devem ser otimizadas para maximizar a eficiência energética e garantir a qualidade do produto final. Essa compreensão, portanto, também é crucial para projetar equipamentos de secagem eficientes, otimizando a transferência de massa e minimizando custos energéticos.

3.5.3 Taxa de secagem

Uma curva de secagem comum apresenta geralmente um breve intervalo inicial de equilíbrio, no qual a umidade diminui de maneira acentuada e quase linear ao longo do tempo. Esse estágio inicial é seguido por um período de taxa de secagem reduzida, no qual a remoção de umidade torna-se progressivamente mais lenta com o passar do tempo (HARTEL; HELDMAN, 1997). A Figura 4 demonstra como a taxa de secagem se comporta ao longo do tempo.

Figura 4 – Gráfico da taxa de secagem por tempo



Fonte: GOMEZ et al., 2020.

Durante o período de taxa constante, o transporte de umidade ocorre através da transferência de massa do vapor de água, presente na superfície do produto, na forma de uma película, para o ar ambiente, sendo acompanhado pela transferência de calor através dos sólidos do alimento (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996). Neste estágio, o teor de água na superfície do material é mantido constante e igual à concentração de saturação. A migração de água, do interior do produto, até a superfície ocorre de maneira suficientemente rápida para garantir essa condição. Ou seja, a taxa de migração das moléculas de água é maior ou igual à taxa de remoção de água da superfície para o ar de secagem (HARTEL; HELDMAN, 1997). A força motriz para a secagem no período de taxa constante é determinada pela diferença entre a pressão de vapor de água na superfície do alimento (pressão de vapor saturado) e a pressão de vapor de água no ar de secagem (HARTEL; HELDMAN, 1997). Quando a migração de umidade se torna menor do que a taxa de vaporização da água, o período de taxa constante chega ao fim, e a umidade neste ponto é chamada de umidade crítica.

O período de taxa decrescente tem início quando se atinge o ponto de umidade crítica. Nesse momento, a quantidade de água que chega à superfície do alimento já não é suficiente para manter a concentração e a saturação constantes. Isso ocorre porque a remoção de umidade na superfície do alimento se dá a uma velocidade maior do que a capacidade de difusão das moléculas de água que ainda permanecem no interior do produto. Como resultado, a taxa de evaporação diminui, pois a água disponível para migrar até a superfície é cada vez mais escassa (GEANKOPLIS, 1993; HARTEL; HELDMAN, 1997).

3.5.4 Variáveis no processo de secagem

Ao considerar as condições do processo de secagem, é fundamental selecionar o tipo adequado de secador e definir as condições operacionais ideais. Dentre essas condições, destacam-se a temperatura, a velocidade do ar, a umidade relativa e a pressão do ar de secagem. Cada um desses fatores desempenha um papel crucial na eficiência do processo, conforme detalhado por Hartel e Heldman (1997).

O aumento da temperatura favorece a secagem, pois a umidade relativa do ar diminui à medida que a temperatura sobe, facilitando a remoção da umidade do produto. Isso ocorre porque o ar quente tem uma maior capacidade de absorver vapor d'água, acelerando a evaporação (MUJUMDAR, 2014).

A velocidade do ar de secagem também afeta a taxa de migração da umidade para o ar. Aumentar a velocidade do ar intensifica a evaporação, promovendo uma maior transferência de massa convectiva e acelerando o processo de secagem. A velocidade ideal depende do tipo de material sendo processado, sendo que valores mais elevados favorecem a remoção de umidade sem causar danos térmicos ao produto (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

A umidade relativa do ar de secagem é um fator crítico para a eficiência do processo. Quanto menor a umidade relativa, maior será o gradiente de umidade entre o produto e o ar, o que aumenta a força motriz da secagem (MUJUMDAR, 2014).

Quando a secagem é realizada sob vácuo, a pressão de vapor é reduzida, o que acelera o processo de secagem. Essa técnica é particularmente útil para produtos sensíveis ao calor, pois permite uma secagem eficaz a temperaturas mais baixas, preservando as propriedades nutricionais e físicas do produto (MUJUMDAR, 2014).

Além disso, muitas das inovações nos sistemas de secagem estão focadas em pré-tratamentos do produto como sistemas de pré-aquecimento. Essas abordagens ajudam a reduzir a necessidade de remoção excessiva de umidade e diminuem o consumo energético do secador.

Além do equipamento e do processo operacional, as propriedades do ar são críticas para conduzir a umidade superficial para fora do produto, promovendo a secagem. O ar de secagem deve apresentar baixa umidade relativa, para aumentar sua capacidade de absorção de água do produto. Quando a temperatura do material aumenta, ocorre a transferência da água das camadas internas para as superficiais, fenômeno essencial no processo (MUJUMDAR, 2014; FELLOWS, 2018). Assim, um ar com elevada umidade específica reduz sua eficiência como agente secante, o que, por sua vez, eleva o tempo de processamento e o consumo energético (SABAREZ, 2016).

3.5.5 Secador contrafluxo

O secador contrafluxo é um equipamento que busca a otimização de todas essas condições, junto com o ganho de eficiência e redução de consumo energético e até mesmo de espaço físico. Sua estrutura é vertical e subdividida em *decks* ou pisos.

Seu princípio de funcionamento é dado, fundamentalmente, pela convecção. Nesse método de secagem de partículas sólidas, no qual o calor é fornecido por ar aquecido, fluindo sobre a superfície do material. Esse processo ocorre em duas etapas: taxa constante e taxa decrescente. Na primeira, a umidade superficial evapora e a temperatura do sólido atinge a do bulbo úmido do ar. Essa etapa ocorre nas primeiras regiões do secador, zonas de maior temperatura. Na segunda, a temperatura do sólido se aproxima da do bulbo seco do meio de secagem, etapa na qual é necessário maior tempo de retenção do produto (MUJUMDAR, 2014).

Os sistemas de secagem por convecção são, comumente, os mais utilizados devido às suas características, entre os diferentes tipos de sistemas de secagem (DEMIRPOLAT, 2019). Ela é uma das últimas etapas do processamento da ração extrusada, no entanto, além do processo, o equipamento deve adequar-se corretamente às condições e necessidades da indústria. Basicamente, o equipamento vertical de secagem contrafluxo, representado na Figura 5, contempla um princípio simples de funcionamento, porém, com grandes benefícios. Apresenta as seguintes condições:

- | Modo de operação em bateladas;
- | Entrada contínua de calor;
- | Material pode ser considerado em estado estacionário;
- | Operação a vácuo;
- | Ar aquecido como meio de secagem;
- | Temperatura acima do ponto de ebulação;
- | Movimento contra corrente;
- | Múltiplos estágios;
- | Tempo de residência médio.

Figura 5 – Corte de secador contrafluxo



Fonte: Adaptado de Geelen, 2023.

A entrada do produto ocorre, inicialmente, na parte mais alta, através de uma válvula giratória de entrada. Nesta plataforma é criada a camada de produto, por meio de um distribuidor de esteira, conforme a Figura 6, buscando o máximo de uniformidade do lote. O fluxo contínuo se torna um processo de lotes (Geelen, 2023).

Figura 6 – Distribuidor de esteira

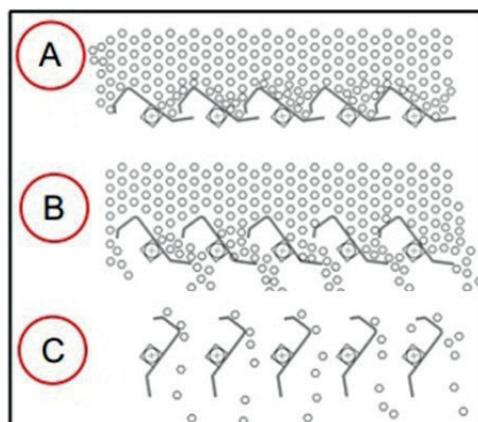


Fonte: Geelen, 2023.

Durante a secagem, o fluxo descendente dos grãos, em batelada, é contrariado pelo fluxo ascendente contínuo do ar quente, promovendo uma interação gradual e eficiente entre o grão úmido e o ar seco. Esse arranjo, permite que os grãos atinjam temperaturas muito próximas às do ar de secagem. À medida que o ar perde temperatura, os grãos perdem umidade de forma controlada, minimizando o risco de degradação térmica e evitando o acúmulo de umidade residual (MUJUMDAR, 2014).

Após o período de carregamento e a secagem dos pisos inferiores, procede-se à des- carga do produto, garantindo que todo o lote seja depositado na plataforma inferior. Conforme ilustrado na Figura 7, durante o carregamento do piso, a plataforma permanece fechada, sustentando o volume do produto ao longo do tempo de carregamento e permanência. Posteriormente, inicia-se o processo de descarregamento, permitindo o escoamento dos grãos para o piso inferior até a etapa final, na qual a totalidade do produto é liberada.

Figura 7 – Demonstração do descarregamento de produto



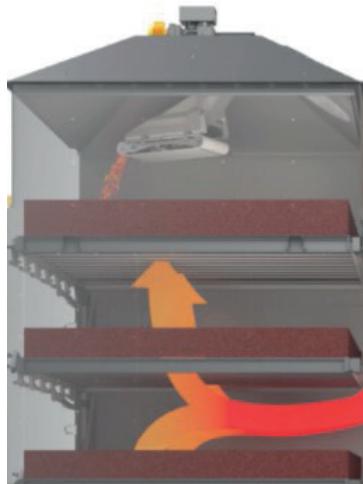
Fonte: Adaptado de Geelen, 2024.

Durante cada descarregamento os granulados são misturados, aumentando a uniformidade do produto para a melhor circulação do ar quente ocasionando mais efetiva secagem (Geelen, 2023).

O fundo do piso possui perfurações, para que haja o fluxo de ar entre os grãos e os compartimentos. O ar admitido inferiormente é misturado com o ar da plataforma superior, sendo aquecido pelo aquecedor desta zona.

Parte do ar aquecido e recirculado move-se da plataforma inferior para a superior, entrando no ciclo de recirculação superior, conforme a Figura 8, com o caminho do fluxo de ar. O mesmo processo se repete, de forma que o ar atinja a região mais superior do secador, com elevada saturação. Essa recirculação aumenta a eficiência energética devido às condições do ar, devido ao princípio do fluxo invertido. Somente ao atingir a umidade relativa de 80 a 90% o ar será expelido (GEELEN, 2022).

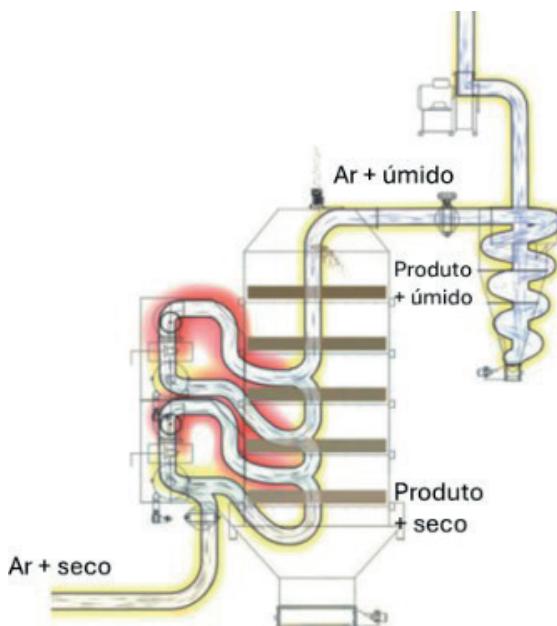
Figura 8 – Fluxo de ar no secador contrafluxo



Fonte: Geelen, 2024.

Em secadores contracorrentes, o primeiro contato do material com o ar ocorre com uma corrente de ar úmido e de temperatura reduzida. Essa abordagem ajuda a prevenir o choque térmico, evitando a quebra do material, o que é crucial para a indústria de alimentos, onde a integridade física é essencial para garantir a qualidade do produto final. Nesse contexto, a Figura 9 representa a admissão do ar seco em contato com o produto menos úmido e remoção desse ar, com maior umidade.

Figura 9 – Secador do tipo contrafluxo



Fonte: Adaptado de Geelen, 2024.

Além disso, o método de secagem contrafluxo contribui significativamente para a eficiência energética do processo, uma vez que o calor é aplicado de maneira mais consistente e prolongada, resultando em menores perdas térmicas. Essa técnica otimiza o uso de energia, mas a ausência de variações agressivas de temperatura também ajuda a evitar danos estruturais, como rachaduras nos grãos, preservando sua qualidade e adequação para o processamento e consumo final (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

3.5.6 Desafios da secagem de alimentos para cães

A secagem de alimentos extrusados apresenta desafios específicos que devem ser cuidadosamente considerados, para garantir um produto final de alta qualidade. Um dos principais desafios é a alta densidade do material, que dificulta a penetração do ar quente necessário para a remoção uniforme da água durante o processo. Essa limitação pode resultar em pontos de umidade residual, comprometendo a estabilidade microbiológica e reduzindo a vida útil do produto.

Outro aspecto relevante é o impacto da secagem na eficiência energética do processo. Como a secagem é uma etapa de alto consumo energético na fabricação, a adoção de tecnologias sustentáveis, como sistemas de recuperação de calor, tem sido um foco de pesquisa, com o objetivo de reduzir custos operacionais.

A seleção do tipo adequado de secador e a definição das condições operacionais, como a otimização contínua dos parâmetros do secador, são cruciais para o sucesso de um processo de secagem eficiente. Dentre essas condições, destacam-se a temperatura, o tempo de baixa-telada e a velocidade do ar circulante. Segundo Geankoplis (1993), esses fatores influenciam diretamente a eficiência da transferência de calor e massa, que são fundamentais para a remoção da umidade do material.

3.6 Análise estatística

A análise estatística é uma ferramenta utilizada na busca por padrões ou na análise da dispersão que um ou mais conjuntos de dados específicos possuem, com o objetivo de obter conclusões a respeito de um processo ou produto. Montgomery e Runger (2021) mencionam a variabilidade como uma medida de uma das características intrínsecas de um sistema. Segundo os autores, essa variabilidade considera se as sucessivas observações de um sistema produzem, ou não, exatamente os mesmos resultados.

A variabilidade é capaz de expressar se, no desempenho ou comportamento observado, um sistema está sujeito a múltiplos fatores que possam influenciar um resultado. A variabilidade, portanto, é uma característica intrínseca dos sistemas e pode ser analisada estatisticamente, para identificar quais fatores têm o maior impacto (MONTGOMERY; RUNGER, 2021).

Por meio de métodos estatísticos, como *Analysis of Variance* (ANOVA), também é possível quantificar e entender as fontes dessa variabilidade. Pode ser feita a identificação de quais variáveis ou condições mais afetam o desempenho do sistema. Isso é essencial em várias áreas de pesquisa e indústria, como no controle de qualidade e na melhoria de processos, onde a redução da variabilidade pode ser crucial para garantir resultados mais consistentes e previsíveis, bem como na otimização e padronização de processos e produtos (MONTGOMERY; RUNGER, 2021).

A ANOVA é utilizada para comparar as médias de três ou mais grupos independentes. Ela permite determinar se existem diferenças significativas entre essas médias, ou seja, se os grupos são realmente distintos em relação à variável em análise (MONTGOMERY; RUNGER, 2021).

Da mesma forma, Triola (2024), aborda o conceito básico de média. Uma medida central que representa o valor esperado de uma distribuição de probabilidades, ou seja, é o ponto em torno do qual os dados tendem a se concentrar. Por outro lado, a variância é uma medida de dispersão, indicando o grau de afastamento

dos dados em relação à média. Ela ajuda a entender a variabilidade ou a incerteza dentro de um conjunto de dados. Quanto maior a variância, maior será a dispersão dos dados ao redor da média.

Essas duas medidas são fundamentais em estatística para descrever e analisar distribuições de probabilidades. A média fornece uma visão geral de um conjunto de dados, enquanto a variância detalha a dispersão desses dados, proporcionando *insights* sobre a estabilidade e a consistência dos valores observados (TRIOLA, 2024).

3.7 Metodologia de superfície de resposta

A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) já foi usada com sucesso em diversas áreas, incluindo o tratamento de riscos relacionados à eliminação de resíduos radioativos, questões ambientais, exploração de campos de petróleo, aspectos geológicos, problemas de confiabilidade estrutural, incêndios, desastres naturais até ao setor financeiro e a indústria de alimentos (BORBA; SARMENTO; LEONEL, 2005; LEAL, 2015).

A MSR pode ser entendida como uma combinação de técnicas de planejamento de experimentos, análise de regressão e métodos de otimização. Essa metodologia baseia-se no ajuste de modelos aos dados experimentais obtidos, com o objetivo de descrever o comportamento destes dados e fazer previsões estatisticamente válidas. Dentre as diversas técnicas multivariadas de otimização, ela é muito aplicada por causa de sua alta eficiência, poder de modelagem e capacidade de exploração dos sistemas estudados (NOVAES *et al.*, 2017).

Galdamez e Carpinetti (2004) demonstraram o uso de experimentos industriais, visando a melhoria de processos e desempenho de produtos, aplicados ao processo de injeção plástica. Com essa pesquisa experimental foi possível identificar os níveis ótimos de regulagem e os parâmetros mais importantes da injeção plástica: temperatura da máquina e pressão de injeção.

Borba, Sarmento e Leonel (2005) concluíram que a umidade é fator decisivo nas propriedades funcionais de extrusados de farinha de batata-doce, ao analisar o índice de expansão e escurecimento do produto. Segundo Montgomery (1991), conforme citado por Galdamez e Carpinetti (2004), o uso de técnicas como planejamento experimental podem permitir a redução significativa no número de testes necessários para essa análise, conforme a disponibilidade de adequação ao modelo. No entanto, análises personalizadas também podem ser realizadas, havendo confiabilidade no conjunto representado.

Não apenas ajustes de processo e cumprimento dos requisitos de qualidade, a metodologia também visa o alcance de uma maior competitividade no mercado (BOX; HUNTER; HUNTER, 2005; MONTGOMERY, 1991).



4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Esta pesquisa-ação foi conduzida na etapa de secagem de uma das linhas de produção de alimento *premium* para cães em uma indústria localizada na região dos Campos Gerais. O produto analisado trata-se de um alimento extrusado para cães, que refere-se ao item de maior volume de produção da indústria. As etapas do processo são comuns aos demais produtos, porém, devido aos maiores lotes de produção desse item, a variabilidade tende a ser maior, dificultando a padronização dos parâmetros de qualidade.

Além disso, com a ampla variedade de ingredientes, mesmo que se mantenham dentro dos limites padrões especificados, podem sofrer alterações devido a fatores como variação de fornecedores ou mesmo lote. Esses aspectos justificam a necessidade do estudo para compreender o comportamento do produto em relação às características operacionais do equipamento de secagem, pois o controle da matéria prima, por exemplo, se torna mais complexo.

O secador utilizado é do tipo contrafluxo, semelhante ao equipamento representado na figura 10 porém, composto por oito pisos de altura (GEELEN, 2024). Foram analisadas as variações de temperatura durante o processamento de três lotes de produção. Suas características são fundamentais para a otimização da secagem, e sua estrutura foi projetada para promover não apenas a remoção eficiente da umidade, mas também a máxima homogeneização do produto, evitando desuniformidades na secagem dos grãos extrusados.

Figura 10 – Secador contrafluxo geelen



Fonte: Geelen, 2024.

Os principais parâmetros de controle nessa etapa são: temperaturas das zonas de aquecimento, tempo de permanência nos pisos e velocidade do ar. A maioria dos demais parâmetros segue uma configuração padrão, enquanto algumas características são automaticamente ajustadas conforme outras variáveis do processo. No entanto, no presente estudo, o controle das temperaturas, no processo, é realizado manualmente pelo operador, de acordo com a umidade de saída do produto, que foi analisada anteriormente. Essas observações foram consideradas para o estudo.

O processo de secagem no secador contrafluxo, foi analisado utilizando um produto com as seguintes características:

- | Diâmetro: 0,0152 m;
- | Comprimento: 0,0191 m;
- | Densidade: entre 445 e 450 kg/m³.

Outras variáveis do processo, como fluxo de ar de exaustão, fluxo de ar de ventilação e quantidade de gordura no farelo, não foram consideradas devido à alta variabilidade dos componentes. O estudo foi conduzido em blocos, considerando fatores externos ao processo, como umidade relativa do ar e temperatura ambiente. Dessa forma, foram abordadas diferentes condições operacionais, refletindo distintos cenários produtivos.

4.2 Métodos

Inicialmente, buscou-se a estabilização da produção, visto que, no início do processo, existem oscilações significativas. Após atingir a estabilidade e garantir que o produto estivesse dentro dos critérios de qualidade, procedeu-se à amostragem do material.

A primeira combinação de parâmetros de temperatura foi registrada a partir do painel de controle na sala de operação. Após a configuração, aguardou-se a saída do produto correspondente a essas condições. Ao final da secagem, uma amostra foi coletada para análise.

A análise do produto foi realizada por meio da coleta espaçada dessas amostras, com intervalo aproximado de trinta minutos. O produto foi, posteriormente, triturado para preparo e inserção no equipamento NIR. O equipamento permitiu a obtenção rápida e precisa dos dados relevantes à análise do produto. O relatório com os resultados foi disponibilizado em poucos minutos no monitor, indicando as condições do material e a necessidade de ajustes no processo. Quanto às condições iniciais, o produto úmido proveniente da extrusão entrou no secador com as seguintes características:

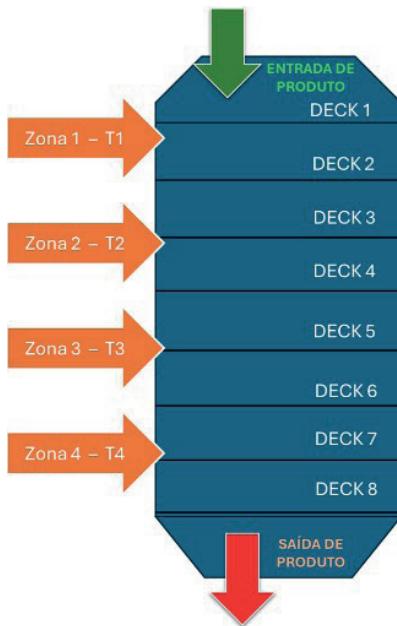
- | Umidade média: 33%;
- | Teor de gordura: aproximadamente 8,73%;
- | Temperatura inicial: cerca de 125°C;
- | Altura média da camada de produto no secador: aproximadamente 0,30 m.

A análise foi realizada especificamente nesse produto devido ao alto volume processado, visando à otimização da eficiência do equipamento, à redução de perdas e o aumento da produtividade com reduzido consumo energético, sem desperdiçar a energia disponível. Foram utilizadas diferentes combinações de temperatura para a obtenção de valores específicos de umidade.

O secador de oito pisos apresenta quatro zonas de temperatura, consideradas como quatro fatores para a análise estatística. Cada zona de circulação de ar quente é responsável por dois pisos de secagem, sendo que o material é carregado nos pisos superiores e, progressivamente, transferido para os inferiores por meio de descarregadores acionados por pistões.

As combinações de temperatura das Zonas 1, 2, 3 e 4 foram denominadas, respectivamente, como T1, T2, T3 e T4, sendo estas as variáveis independentes do estudo. A umidade final do produto foi considerada a variável dependente, conforme a Figura 11, analisada como resposta do processo.

Figura 11 – Esquema do secador de 8 pisos



Fonte: Autoria própria (2025).

Durante o processamento, o produto passou pelas etapas de extrusão e secagem. Nos momentos iniciais da produção, foram observadas variações consideráveis até que o fluxo se estabilizasse. O primeiro lote, produzido sob condições instáveis com características irregulares, foi reprocessado e, portanto, não considerado na análise.

Após a estabilização, com ajustes nos parâmetros operacionais, a produção foi destinada às etapas subsequentes, incluindo o empacotamento. A validação do produto foi realizada pela equipe de controle de qualidade, em colaboração com a equipe operacional, garantindo o atendimento aos parâmetros estabelecidos, tais como:

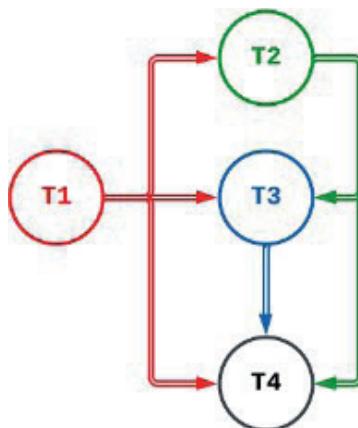
- | Aparência;
- | Dimensões;
- | Teor de matéria mineral;
- | Densidade;
- | Atividade de água;
- | Umidade, entre outros fatores.

No contexto da secagem, os principais pontos comumente analisados são atividade de água e umidade. No entanto, para esta abordagem, apenas a umidade foi considerada, em função das regiões de temperatura previamente mencionadas.

A partir das diferentes combinações de temperatura de cada zona do secador, foram obtidos dados estatísticos descritivos e superfícies de resposta para análise. Para o processamento e tratamento dos dados, utilizou-se o software *Minitab® Statistical Software* (2024), permitindo a realização de análises estatísticas e simulações para a definição dos parâmetros de melhor ajuste. O software também possibilitou a identificação das variáveis com maior influência no processo, mapeando seu impacto sobre a secagem do produto.

As análises foram realizadas por meio da MSR, considerando as correlações estabelecidas com base nas combinações da Figura 12. Em suma, T1 foi analisada em combinação com T2, T3 e T4; T2 foi combinada com T3 e T4; e, por fim, T3 foi analisada juntamente com T4.

Figura 12 – Correlações de temperatura em função da umidade



Fonte: Autoria própria (2025).

Os dados foram obtidos em blocos, conforme apresentado nas Tabelas 2, na primeira amostragem. Box, Hunter e Hunter (2005) são citados por (LEAL, 2015) por introduzirem a divisão em blocos no planejamento experimental, extensão que permite que estruturas distintas de variância-covariância sejam consideradas, mesmo que tais condições sejam desconhecidas. Assim, diferentes lotes foram considerados em blocos, de forma a avaliar o comportamento dos parâmetros de secagem, mesmo com diferentes estruturas.

Tabela 2 – Primeira amostragem

T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	UMIDADE (%)
137	140	120	7,0
142	140	115	7,8
135	140	121	7,8
143	140	111	7,9
134	134	119	7,9
136	131	119	8,0
139	140	110	8,1
138	139	119	8,5
139	135	120	8,8
137	141	119	7,3
135	140	119	7,7
140	141	118	7,8
140	140	120	7,8
133	139	120	8,0
135	141	121	8,1
133	140	119	8,2
140	140	116	8,3
143	140	118	9,2
138	140	120	6,8
143	140	120	7,6
141	139	112	7,7
130	140	127	8,0
138	140	128	8,0
137	141	136	8,4
140	143	125	8,6
139	138	122	8,7
134	140	133	9,1

Fonte: Autoria própria (2025).

No presente caso, as estruturas distintas são definidas pelas características da matéria prima, oscilações de dosagem, condições de extrusão, condições ambientais externas, entre outros. A reamostragem está representada na Tabela 3.

Dessa forma, três blocos foram analisados em réplica, sendo nove amostras para cada bloco, em momentos distintos da operação. Devido às limitações de processos e simulação, a análise foi baseada em um delineamento personalizado, com 54 amostras de combinações

Tabela 3 – Segunda amostragem

T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	UMIDADE (%)
140	138	119	7,4
140	140	119	7,9
138	135	118	8,0
135	140	118	8,1
139	140	118	8,2
141	140	116	8,3
140	140	115	8,5
134	140	121	8,5
138	140	119	8,7
135	140	120	7,6
142	140	119	7,9
140	140	118	8,0
134	139	118	8,1
135	140	119	8,1
134	140	119	8,3
140	140	117	8,5
142	140	118	8,6
138	140	117	9,0
140	140	128	7,1
135	140	121	7,7
137	140	128	7,7
134	139	120	7,9
139	139	122	8,2
135	140	127	8,3
137	140	127	8,7
141	140	128	8,9
138	140	126	9,0

Fonte: Autoria própria (2025).



5. RESULTADOS

5.1 Estatística descritiva

Os fatores obtidos no processo foram, inicialmente, analisados estatisticamente, com a interpretação fundamental dos comportamentos junto de seus desvios e tendências, conforme observa-se nas Tabela 4 e 5. O rendimento médio manteve-se constante, com aproximadamente 18 toneladas de produto sendo processado por hora.

Tabela 4 – Análise estatística descritiva

Variável	Média	EP Média	DesvPad	Variância	CoefVar
T1	140,019	0,061943	0,45519	0,2071	0,33
T2	137,778	0,410950	3,01985	9,1195	2,19
T3	139,481	0,250423	1,84023	3,3864	1,32
T4	120,407	0,669031	4,91635	24,1705	4,08
UMIDADE	8,116	0,070525	0,51825	0,2685	6,39

Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 5 – Análise estatística descritiva continuação

Variável	Mínimo	Mediana	Q3	Máximo	Moda
T1	139,0	140,0	140,0	141,0	140,0
T2	130,0	138,0	140,0	143,0	140,0
T3	131,0	140,0	140,0	143,0	140,0
T4	110,0	119,0	121,3	136,0	119,0
UMIDADE	6,8	8,1	8,5	9,2	8,0

Fonte: Autoria própria (2025).

As quatro zonas de temperatura apresentam os mesmos limites inferiores e superiores de funcionamento, porém, com o levantamento de dados, notou-se que a tendência é que a faixa de operação esteja entre 110 e 143 °C. Alguns critérios qualitativos são necessários nesta etapa, pois temperaturas demasiadamente altas e/ou por longos períodos podem prejudicar o alimento, provocando, por exemplo, odor queimado ou escurecimento excessivo.

Durante o processamento de rações animais, o tratamento térmico é aplicado não apenas para preservar os ingredientes, mas também para melhorar a digestibilidade dos componentes. Neste ponto entra a reação de Maillard, como objeto de atenção, sendo uma das reações químicas mais relevantes no processamento alimentício (HELLWIG; HENLE, 2014 *apud* HOFMANN *et al.*, 2020).

O trabalho de Hofmann *et al.* (2020) faz uma avaliação dos componentes dessa reação na alimentação animal. Além de ser fomentada com a alta temperatura é evidenciada pelo escurecimento, efeito acarretado por interações entre os aminoácidos e açúcares presentes no alimento, portanto extremos devem ser evitados (BASTOS, 2009). A partir das análises internas e dos produtos a indústria considerou os valores em uso.

A média dos valores não é um ponto de partida para decisões importantes, visto que o seu erro da média é bastante considerável na maioria das variáveis, semelhante à variância. T1 é o mais estável dos parâmetros, devido ao interesse na redução da perda de calor do produto oriundo da extrusão, logo, busca-se um valor alto pois sua redução não seria apropriada ao processo.

Conforme a Instrução Normativa nº 9, de 9 de julho de 2003, do MAPA, o teor de umidade máximo permitido para rações secas para cães é de 12%. No presente caso, em termos de média, para umidade, observou-se o valor aproximado de 8,12%, indicando que este é o valor central observado para a umidade do produto, estando de acordo com a legislação. Nota-se que mesmo com valores tão dispersos, as temperaturas têm sido ajustadas de forma a obter um valor aproximado do ideal de 8,5%, e bem abaixo do limite legal. Tal análise também é justificada pelo baixo Erro Padrão da Média, de 0,070525% e baixo Desvio Padrão, 0,51825%.

O parâmetro T4, temperatura da zona mais inferior, por outro lado, demonstrou grande taxa de variação:

- | Erro padrão: 0,669031, sugerindo maior variabilidade na estimativa de sua média;
- | Desvio padrão: 4,91635, refletindo maior dispersão dos dados em torno da média;

- | Variância: 24,1705, confirmando a elevada variabilidade dos dados e destacando maior inconsistência na distribuição em relação à média;
- | Coeficiente de variação: 4,08%, sugerindo maior variabilidade relativa entre as temperaturas.

Os valores do terceiro quartil (Q3) mostram as três primeiras zonas de temperatura (T1, T2 e T3) com resultados bastante próximos, com Q3 igual a 140 °C para todas elas. Isso indica que a maior parte dos dados (75%) está concentrada abaixo desse valor, evidenciando uma distribuição semelhante entre essas zonas.

Para variáveis com pouca dispersão, como T1 e T3, a moda reflete a tendência central mais diretamente do que a média ou a mediana. Para T1, a moda é 140°C, que aparece 43 vezes, indicando que esse valor predomina amplamente na zona T1.

5.2 Análise de covariâncias

Pela Análise de Variâncias (diagonal principal) e das covariâncias (dados fora da diagonal principal), apresentadas na Tabela 6, referentes à estatística descritiva, fornecem informações sobre as relações que as temperaturas possuem entre si, além dessa influência na umidade.

Essa análise reafirma a participação conjunta das variáveis no processo. As covariâncias fora da diagonal mostram como as variáveis mudam juntas e, diante disso, nota-se que:

Tabela 6 – Matriz de covariâncias

	T1	T2	T3	T4	UMIDADE
T1	0,207198				
T2	0,023061	9,119497			
T3	0,104123	0,693920	3,386443		
T4	0,086653	-4,700210	1,366177	24,170510	
UMIDADE	0,005346	0,096226	0,012579	0,445912	0,268585

Fonte: Autoria própria (2025).

- | Em termos de variância, T4 e T2 apresentaram maiores valores, seguidos de T3 e, por fim, T1;
- | A relação entre T1 e as demais variáveis foi baixa, demonstrando pouca relevância;

- I O parâmetro T2, por outro lado, apresentou relação mais significativa com T3, em comparação às relações com T1;
- I Para T4 a alta variância e maior interação com as outras variáveis, T2 e T3, indicam que essa pode ser uma variável crítica na modelagem da umidade;
- I Entre T2 e T4 a relação negativa forte fornece outra análise, pois pode-se atestar efeitos opostos no controle da umidade. Isso sugere que quando T2 aumenta, T4 tende a diminuir.

5.3 Análise de variância

A Análise de Variância (ANOVA) permite avaliar a significância das variáveis independentes, servindo como embasamento para expressar se as variáveis diferem significativamente em relação a uma variável dependente e o ajuste global do modelo. Os principais componentes estão na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados da análise de variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor P
Regressão	4	0,6752	0,168808	0,61	0,657
T1	1	0,0039	0,003880	0,01	0,906
T2	1	0,2323	0,232252	0,84	0,364
T3	1	0,0210	0,020972	0,08	0,784
T4	1	0,6146	0,614653	2,22	0,143

Fonte: Autoria própria (2025).

A análise de variância apresentada avalia a significância de um modelo de regressão e os resultados indicam que o modelo, como um todo, não é estatisticamente significativo, uma vez que o valor-P associado à regressão é de 0,657, valor acima do nível de significância usual de 0,05.

Ao examinar os termos individuais, observa-se que nenhum deles apresenta significância estatística isoladamente. Os valores-P para T1 (0,906), T2 (0,364), T3 (0,784) e T4 (0,143) confirmam que esses fatores não têm impacto significativo na variável dependente. Isso pode indicar que esses termos não são relevantes ou que há falta de poder estatístico na análise, possivelmente devido ao tamanho da amostra ou à variabilidade dos dados.

A maior parte da variabilidade observada nos dados está associada ao erro ($SQ = 13,5598$). Dentro do componente de erro, a análise de falta de ajuste aponta um valor-P de 0,105. Embora isso não seja estatisticamente significativo,

indica que o modelo de regressão não se ajusta perfeitamente aos dados, sugerindo a possibilidade de aprimoramentos. No entanto, como o valor-P é maior que 0,05, não há evidência suficiente para rejeitar a hipótese nula de que a falta de ajuste é insignificante, ou seja, o resultado do teste sugere que não há motivo suficiente para acreditar que o modelo ou ajuste é inadequado, com base nos dados e no nível de significância escolhido. Contudo, apenas indica que não há evidência suficiente contra ela.

Os resultados obtidos pela ANOVA demonstraram o comportamento do modelo, com pouca capacidade de explicação da variância nos dados, portanto, buscou-se uma análise com perfil qualitativo, visto que as variáveis dependentes têm pouco efeito sobre a variável dependente.

5.4 Metodologia de superfície de resposta

5.4.1 Correlações de T1

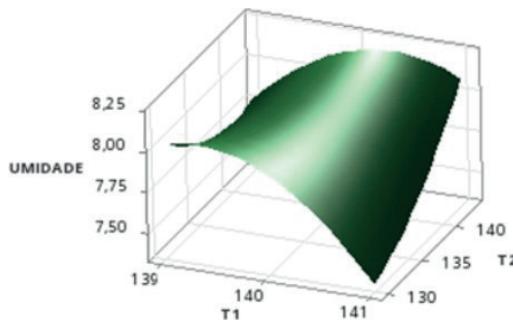
Segundo Leal (2015), a MSR é relevante na caracterização e otimização de sistemas ou de seus componentes, na presente análise a superfície obtida para a combinação de T1 e T2 está apresentada no Gráfico 1.

Apesar de sua versatilidade e de seu amplo espectro de utilização, o impacto mais significativo da MSR é observado na indústria, especialmente em projetos de engenharia, onde a necessidade de planejamento e otimização de processos e produtos é constante. A substituição de modelos complexos de simulação numérica por metamodelos mais simples torna-a não apenas mais acessível, mas também mais eficiente, o que é um fator decisivo em ambientes industriais dinâmicos e com alta demanda de produção (LEAL, 2015).

Para plotar a superfície, os valores dos demais parâmetros foram fixados para T3 e T4, respectivamente, em 140 °C e 120 °C. É possível notar que existe uma interação entre T1 e T2, com a curva apresentando inclinações suaves, sugerindo uma variação combinada dessas variáveis sobre a umidade.

Ainda assim, a superfície mostra uma leve curvatura, indicando que a relação entre as variáveis não é completamente linear, mas também não é extremamente complexa. A região demonstra melhor comportamento da umidade quando T1 assume um valor mais elevado, nesse caso, à medida que T2 aumenta, a umidade sobe para uma região de maior interesse à indústria e ao processo.

Gráfico 1 – Gráfico da superfície de resposta da umidade, T1 e T2



Fonte: Autoria própria (2025).

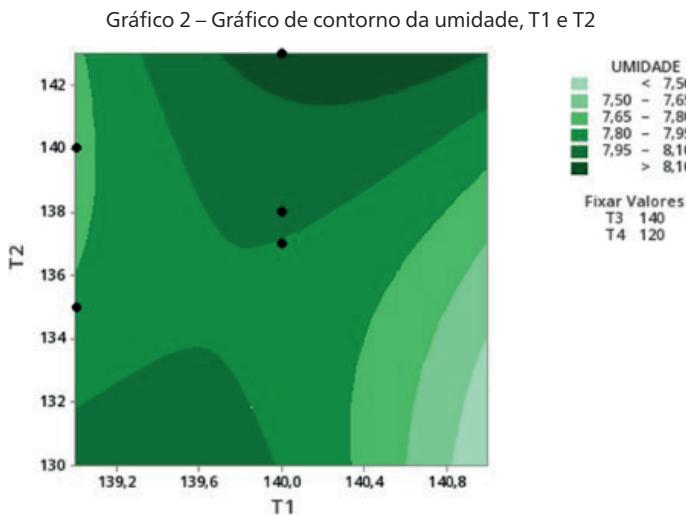
Outro comportamento notável é a diminuição significativa da umidade à medida que ocorre a ascensão da temperatura na zona 1. Esse fenômeno é especialmente perceptível quando se considera um valor de T2 relativamente baixo, como 130 °C. No entanto, ao atingir temperaturas próximas a 140 °C, esse padrão de queda na umidade não se mantém.

A curva para T1, quando T2 é fixado em 140 °C, sugere outro comportamento específico, pois a umidade começa a decrescer para um T1 muito alto, isso expressa a necessidade das demais áreas de secagem para que a umidade ideal seja atingida com a permanência do produto no processo por tempo apropriado. Tal objetivo é atingido não com uma secagem abrupta, mas com a permanência do produto nas condições adequadas de secagem, para que a umidade interna caminhe para a superfície, onde é mais facilmente evaporada, conforme Mujumdar (2014).

De forma geral, T1 apresenta comportamento descendente de umidade para um T2 baixo, porém, com T2 elevado seu comportamento se torna ascendente até certo momento, voltando a decair para temperaturas extremamente altas na zona 1. Em T2 a secagem perde sua eficiência quando T1 é extremamente elevado, pois a umidade encontra-se mais alta e a queda provocada na zona 2 acarreta na grande perda de calor e eficiência. Logo, nesse caso, é importante que as temperaturas de ambas as zonas estejam, à medida do possível, próximas entre si.

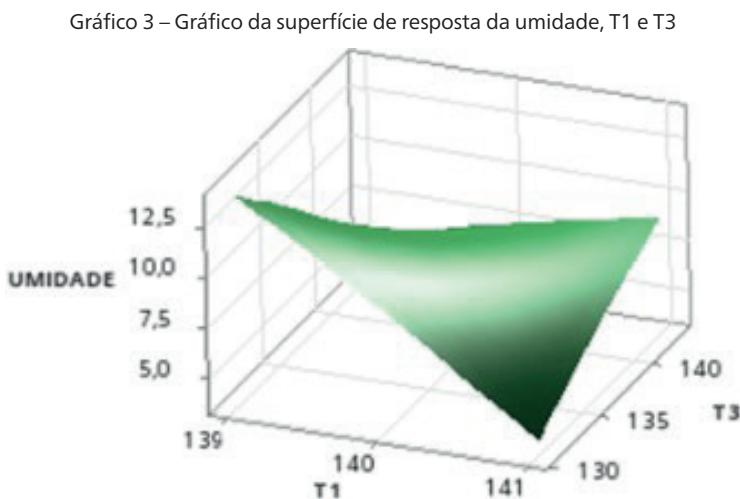
Por meio das curvas de contorno desse arranjo, expressas no Gráfico 2, podem ser visualizadas as regiões de maior interesse para o processo.

Neste caso, a tendência é que a secagem ocorra melhor para um T2 reduzido e um T1 elevado. Porém, a região ideal da umidade está localizada numa zona mais específica com um valor de T2, majoritariamente, mais elevado. No entanto, o parâmetro T1 possui melhor comportamento, neste arranjo, a partir do momento em que assume uma temperatura próxima e superior a 140 °C.



Fonte: Autoria própria (2025).

Em comparação com o Gráfico 3, observa-se que a temperatura na zona 1 do secador tende a um comportamento similar ao visto junto ao T2, pois demonstra o impacto positivo que o parâmetro T1 elevado possui. Os valores T2 e T4 foram fixados, respectivamente, em 140 °C e 120 °C.

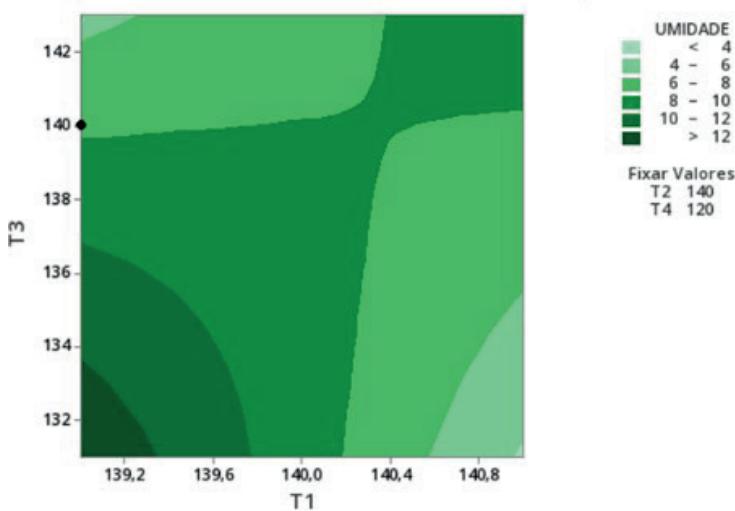


Fonte: Autoria própria (2025).

O aumento do parâmetro T3 é semelhantemente ascendente, a menos que haja a queda de T1, estimulando a secagem. Esse fenômeno demonstra um comportamento mais complexo, o qual pode estar envolvido com outros fatores não observados. No entanto, segundo as análises realizadas, certamente a falta de correlação e interferência entre os dois parâmetros pode justificar tal comportamento.

Segundo Leal (2015), a região experimental é indefinida pois apresenta comportamento de sela, o qual não é um ponto de interesse, pois não representa uma solução ideal (nem máximo nem mínimo global). No Gráfico 4, as curvas de contorno definem melhor essa região, com temperaturas onde obtém-se a secagem com a umidade próxima à ideal.

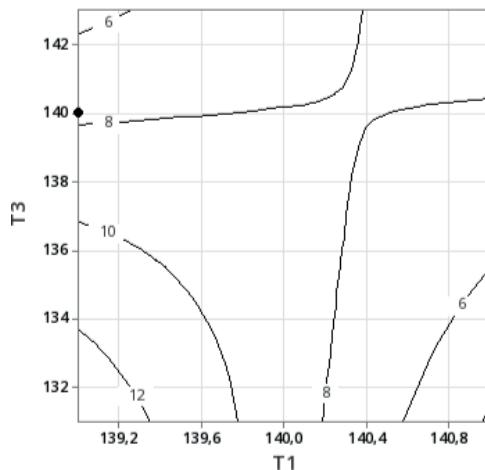
Gráfico 4 – Gráfico de contorno da umidade, T1 e T3



Fonte: Autoria própria (2025).

A região inferior com temperaturas reduzidas é caracterizada por uma curva, melhor visualizada no Gráfico 5, onde a umidade está acima 10%, essa região é obtida com valores de T1 e T3 abaixo, respectivamente, de 139,8 °C e 137 °C.

Gráfico 5 – Gráfico de contorno da umidade, T1 e T3

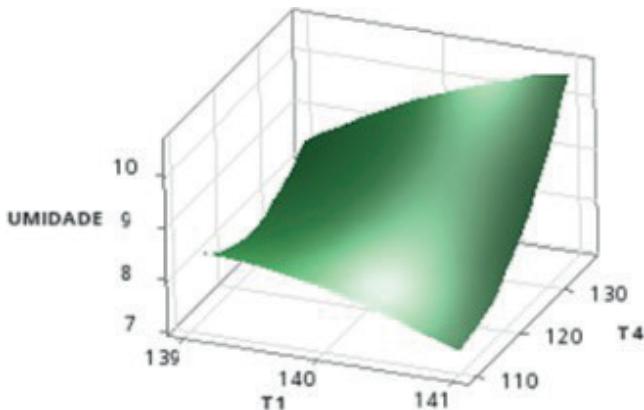


Fonte: Autoria própria (2025).

Essa é uma região que, nessa combinação, deve ser evitada. O melhor ajuste de umidade é obtido na região diagonal do gráfico, com combinações específicas entre T1 e T3, como, por exemplo, T1 em 140,8 °C e T3 em 142 °C.

A última análise em torno de T1 é apresentada no Gráfico 6, onde o contraste de comportamento da umidade é feito com a temperatura na zona 4, T4, sendo T2 e T3 fixados em 140 °C.

Gráfico 6 – Gráfico da superfície de resposta da umidade, T1 e T4



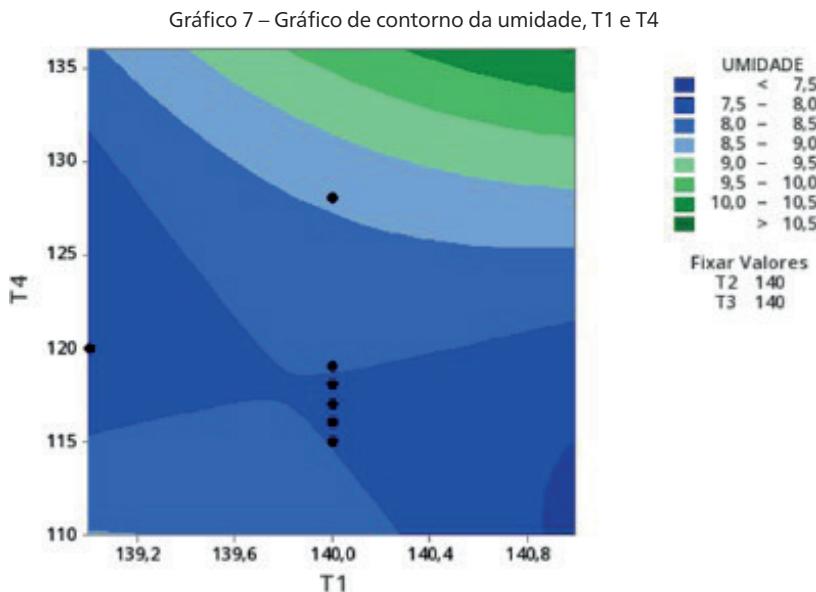
Fonte: Autoria própria (2025).

Neste caso, para um T4 reduzido, T1 possui uma região de interesse mais próxima de 140°C, com pouca alteração, dada sua baixa amplitude. O seu comportamento é mais próximo do padrão linear, no entanto, com percurso levemente descendente quando T4 é baixo. Como já observado para os outros parâmetros, com a elevação de T4 e das outras variáveis, seu comportamento se torna expressivamente ascendente.

Essa análise demonstra que T4 é muito mais sensível à modificações pois o aumento da umidade final do produto se torna bastante expressivo. No Gráfico 7, as curvas de contorno expressam a região de maior interesse ao processo, no entanto, tratam-se de combinações reduzidas de temperatura para este arranjo.

Nesta observação, nota-se que as duas regiões com melhor resposta de umidade são interrompidas por uma região de curvatura semelhante à uma ampulheta, com curvas opostas. Essa região está fortemente definida devido, especialmente, à presença de diversas amostras obtidas para a análise, destacadas em preto.

A perspectiva, ao que os dados estatísticos apresentaram, de T1 é de menor influência, portanto, nas demais análises intenta-se obter correlações e padrões de influência mais expressivos por meio da MSR.

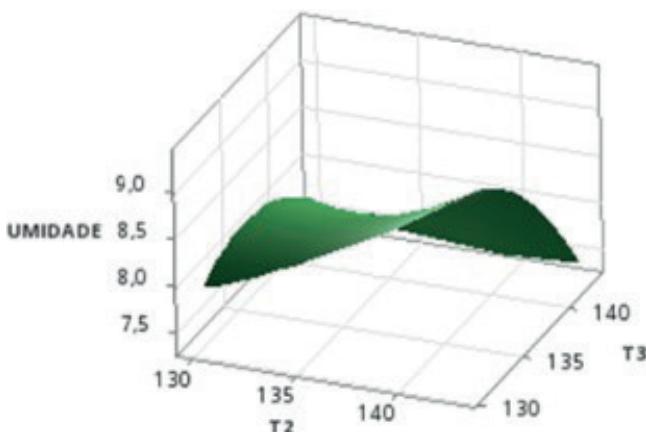


Fonte: Autoria própria (2025).

5.4.2 Correlações de T2

A correlação entre T2 e T3 é mais acentuada. Todavia, T2 apresenta um comportamento ascendente à medida que a temperatura aumenta, demonstrando menor influência na secagem. A zona do parâmetro T3, por outro lado, comporta-se de forma descendente. Assim, como observa-se no Gráfico 8, com T1 e T4 fixados, respectivamente, em 140 °C e 120 °C, o aumento da temperatura eleva a taxa de secagem devido à maior remoção de umidade do produto.

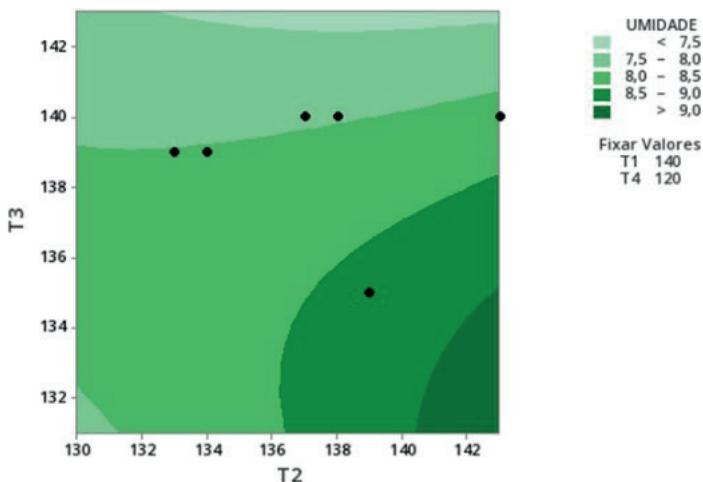
Gráfico 8 – Gráfico da superfície de resposta da umidade, T2 e T3



Fonte: Autoria própria (2025).

Com as curvas de contorno, conforme apresentado no Gráfico 9, a influência do parâmetro T3 torna-se mais evidente. Isso é observado, por exemplo, ao maximizar T2: mesmo com uma alta taxa de temperatura, a combinação com os valores de T3 é indispensável para alcançar o comportamento esperado. No entanto, essa influência não é recíproca, pois T3 exerce maior impacto do que T2 no sistema analisado

Gráfico 9 – Gráfico de contorno da umidade, T2 e T3



Fonte: Autoria própria (2025).

As regiões inferiores, com ambos os parâmetros reduzidos, é uma região bem definida que pode ser determinada como área de pouca eficiência, devendo ser evitadas temperaturas abaixo de 132,5°C, simultaneamente. Por meio dos resultados, também é possível obter uma grande área dentro da região de interesse, com a umidade próxima do valor ideal, de 8,5%. No entanto, um ajuste fino pode ser usado para reduzir a região de interesse, ocasionando, consequentemente, a melhoria dos resultados finais.

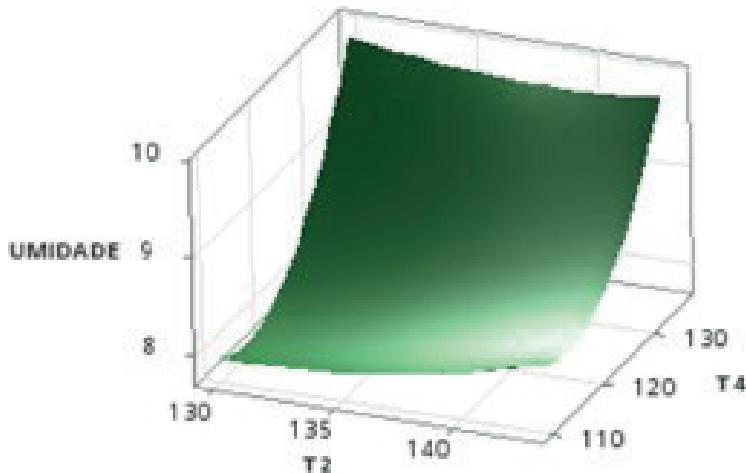
A redução de T3 e o aumento de T2, região inferior direita, com umidade alta, apresenta comportamento incomum, que pode estar relacionado à distribuição da velocidade do ar nas diferentes zonas de secagem. Se a difusão externa for a etapa controladora da secagem do produto, Geankoplis (1993) sugere o aumento da velocidade do fluxo de ar, estimulando a remoção da umidade nessa região de temperaturas. Outra forma de ajuste, segundo o autor, seria a redução da umidade relativa. Tal questão pode evidenciar um defeito ou ineficiência na exaustão do equipamento.

Logo, essa variável pode ser ajustada visando otimizar a remoção de umidade sem comprometer a qualidade do produto, especialmente pelo fato da grande influência que T2 possui sobre a umidade final, para isso outra correlação será analisada, entre T2 e T4.

Plotando-se o gráfico para obter a resposta em função dos parâmetros T2 e T4, no entanto, constatou-se outro comportamento, conforme o Gráfico 10, no qual T1 e T3 foram fixados em 140 °C.

A curva correspondente a T4 apresenta um perfil acentuado, com comportamento claramente ascendente em relação ao aumento da temperatura, indicando sua forte influência na redução da umidade. Para T2, observa-se um comportamento semelhante, mas de forma mais moderada, apresentando variações expressivas apenas quando associado a valores elevados de T4. Esses resultados evidenciam que T4 desempenha um papel mais significativo e determinante no alcance da umidade desejada, em comparação com T2.

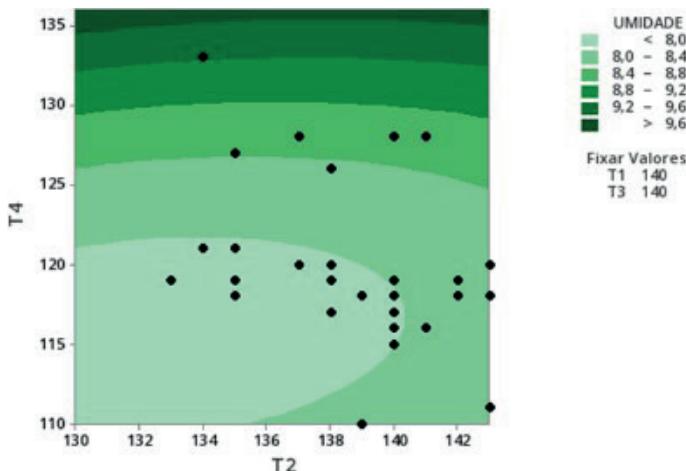
Gráfico 10 – Gráfico da superfície de resposta da umidade, T2 e T4



Fonte: Autoria própria (2025).

No Gráfico 11, as curvas de contorno evidenciam uma maior diversidade de regiões com diferentes níveis de umidade, destacando o amplo alcance dos valores de T4 na modificação dos resultados. Essa larga faixa de atuação indica que T4 possui um impacto significativo no controle e ajuste da umidade final, tornando-o um parâmetro crucial para a otimização do processo de secagem.

Gráfico 11 – Gráfico da superfície de resposta da umidade, T2 e T4



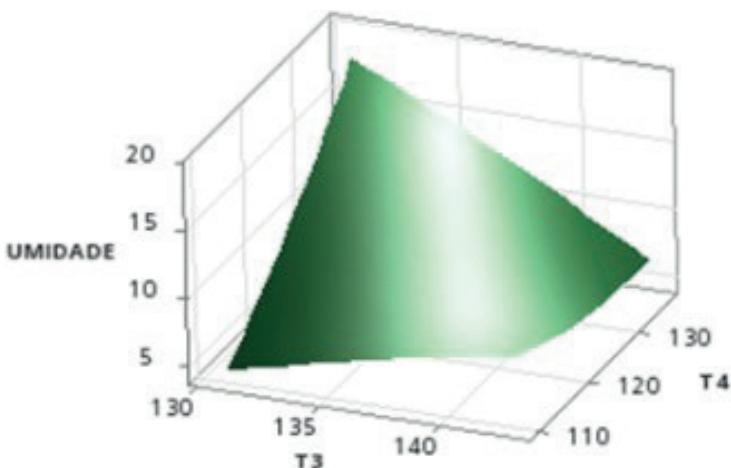
Fonte: Autoria própria (2025).

No entanto, devido ao grande número de amostras obtidas nessa região, a probabilidade de um resultado mais tendencioso é acentuada, uma vez que a umidade tende a aumentar conforme ambas as temperaturas se elevam. Essa tendência é representada pela região em verde escuro, considerando que o aumento das temperaturas deveria intensificar a secagem do produto.

5.4.3 Correlações de T3

Algumas correlações entre a umidade e T4 já foram abordadas, contudo, ainda é necessário realizar a análise dessa variável em contraste com T3, mantendo T1 e T2 fixadas em 140 °C, conforme demonstrado no Gráfico 12. Nas amostragens realizadas, ambos os parâmetros apresentaram maior variabilidade e, consequentemente, exerceram maior influência na análise final da umidade do produto.

Gráfico 12 – Gráfico da superfície de resposta da umidade, T3 e T4



Fonte: Autoria própria (2025).

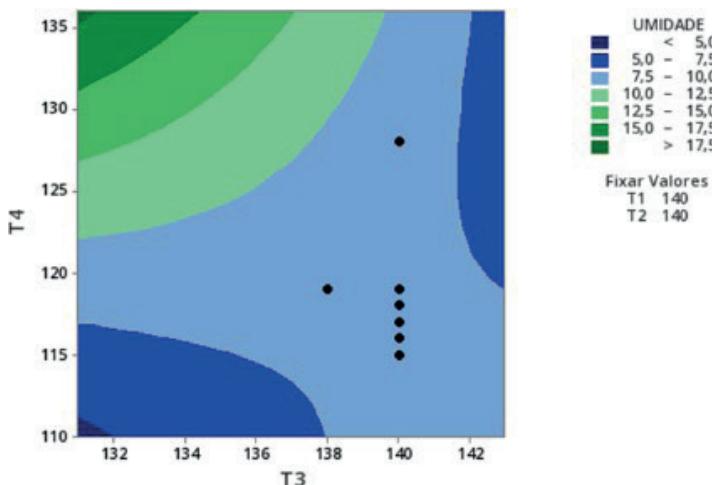
Assim como Freitas e Gomes (2021), os quais analisaram alguns parâmetros durante a fritura de batatas em uma indústria, especificamente o teor de umidade e o teor de lipídios do produto final como resposta, objetiva-se identificar as variáveis mais influentes nessas respostas e a influência da mudança dos níveis das variáveis analisadas.

Borba, Sarmento e Leonel (2005) também usaram a análise dos fatores de processo para obter informações relevantes através do mapeamento dos fatores de influência.

Essas duas zonas de temperaturas são as últimas do processo, sendo cada zona responsável por dois pisos do secador contrafluxo. Nesta etapa final do processo, a secagem deve ser assegurada, porém, alguns critérios são relevantes para otimização do processo, o que envolve economia energética bem como garantia de qualidade e condições adequadas de produto para as etapas posteriores.

O comportamento da superfície está mais distante dos padrões já observados, devido à presença de uma região com secagem pouco definida, conforme é melhor identificado no Gráfico 13. Nesta região, em azul claro, o range de umidade pode variar de 7,5% à 10%, uma faixa mais ampla, expressando maior complexidade na região, possivelmente, com fatores externos alheios aos analisados no presente estudo.

Gráfico 13 – Gráfico da superfície de resposta da umidade, T2 e T4



Fonte: Autoria própria (2025).

A região superior esquerda é indicada com maior umidade, logo, percebe-se que o aumento do T4 não é influente, pois a redução da umidade se dá apenas à medida que o T3 cresce. Apenas a partir dos 138 °C é que o T4 apresenta uma crescente influência, pois a umidade reduz com o aumento de ambas as temperaturas.

Esse comportamento de alta secagem também é observado para os valores reduzidos de T3 e T4, porém, esse comportamento não parece coerente com o padrão de secagem. Isso ocorre, pois o aumento da temperatura deve aprimorar o processo de secagem.

No entanto, como nessa região é feita a admissão do ar ambiente para início da circulação e secagem, esses fatores podem estar associados à dinâmica do ar, à temperatura e à umidade relativa.

A alta umidade relativa reduz a capacidade do ar de absorver água, retardando o processo de secagem. Além disso, a baixa temperatura do ar, uma característica típica da região onde a indústria está localizada, pode reduzir a taxa de evaporação da água, uma vez que o aumento da temperatura ocorre de forma significativa, mas gradativa.

De maneira semelhante, o fluxo de ar pode exercer uma influência negativa, pois uma taxa insuficiente pode levar ao acúmulo de umidade no produto, afetando os resultados, mesmo nas etapas finais de secagem. Em todos esses casos, a configuração adequada dos parâmetros de temperatura é fundamental para

garantir uma colaboração eficiente entre as diferentes etapas do processo. O funcionamento do equipamento, com sistema de ar à vácuo, pode com pensar essa taxa reduzida.

Outro fator que influencia o processo de secagem, e um dos mais determinantes, é a troca térmica entre o produto e o ambiente.

A eficiência da secagem depende da capacidade de transferência de calor para o pro-duto, logo, a evaporação da umidade é comprometida se a relação entre fluxo de calor (circulação de ar aquecido) e fluxo de massa (umidade), as quais estão intrinsecamente relacionadas, forem perturbadas.

Para garantir uma troca térmica ideal e uma correlação adequada entre o produto e o processo, a quantidade de calor disponível deve atender aos parâmetros estabelecidos ou, de maneira mais precisa, corresponder aos valores monitorados e exibidos no painel de controle. Isso assegura que os valores teóricos e os valores medidos estejam alinhados. Qualquer perturbação ou variação nos parâmetros pode comprometer a precisão do controle, dificultando o ajuste adequado do processo e afetando sua eficiência.

Portanto, garantir uma transferência de calor eficiente acelera o processo de secagem, permitindo que o produto atinja a umidade ideal em um tempo reduzido, sem comprometer a qualidade do produto. Contudo, os parâmetros de secagem não são as únicas condições influentes que podem justificar anomalias na secagem.

O processo de extrusão também impacta diretamente nas propriedades da matéria-prima e na eficiência da remoção de umidade. A extrusão pode alterar as características físico-químicas dos ingredientes, como o conteúdo de umidade, a gelatinização do amido e a desnaturação de proteínas, dificultando a secagem subsequente.

Além disso, a desuniformidade na estrutura do produto extrusado, como variações na densidade e compactação, pode levar a uma secagem desigual, resultando em diferentes níveis de umidade no produto final, logo, diferentes padrões no volume a ser seco.

A interação entre o tipo de matéria-prima e as condições do processo de extrusão é outro fator relevante, pois ingredientes ricos em lipídios ou fibras podem dificultar a remoção de umidade, prolongando o tempo de secagem, como observado no estudo de Borba, Sarmento e Leonel (2005). Acrescentado a isso, a operação do equipamento de extrusão, se mal ajustada, pode gerar um produto com características que dificultam a secagem eficiente.

5.5 Otimização de resposta

Visando a otimização dos resultados, mediante as abordagens observadas, em conjunto com as correlações das variáveis de temperatura, a MSR permite identificar as condições que maximizam ou minimizam a resposta. No entanto, neste caso, o produto possui um valor alvo, uma combinação de variáveis independentes, de modo a atingir o valor especificado (otimização) da variável resposta, a umidade.

Embora diversas combinações sejam possíveis para o presente processo, algumas condições serão mantidas, não necessariamente devido a um embasamento técnico específico do processo, mas considerando a adequação das condições do produto e a otimização do processamento na indústria. Além disso, a presente consideração permite usar a correlação crescente ou decrescente das variáveis.

Considerou-se processo de secagem iniciando com a temperatura fixa em 140°C, evitando a elevada energia térmica proveniente da extrusão. As temperaturas nas zonas inter-mediárias (T2 e T3) permanecem livres para ajustes, conforme necessário. No entanto, a zona final (T4) deve operar com o menor valor de temperatura, pois o produto é, posteriormente, direcionado para um resfriador, portanto, uma temperatura reduzida em T4 favorece o processo. A Tabela 8 apresenta as combinações sugeridas.

Tabela 8 – Sugestão de combinações de ajuste ótimo

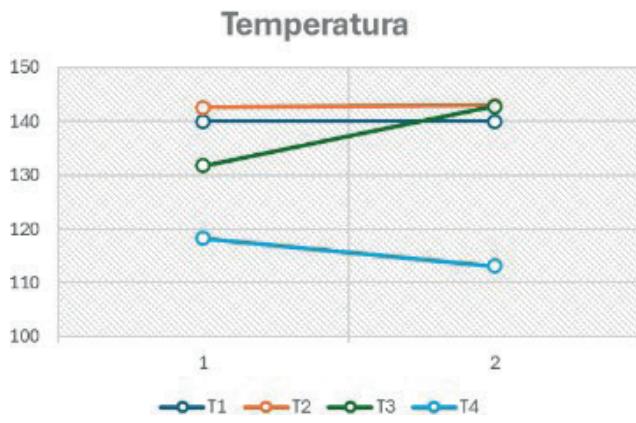
Solução	T1	T2	T3	T4	Ajuste	Desejabilidade	Composta
1	140,000	142,615	131,733	118,262	8,500	1	
2	140,000	142,967	142,800	113,147	8,500	1	

Fonte: Autoria própria (2025).

O produto deve ser removido do resfriador com temperatura em torno de 35°C, para garantir sua qualidade e estabilidade. Assim, uma vez atingido o nível ideal de umidade, operar com temperaturas mais baixas pode acelerar o processo, tornando-o mais eficiente em termos de tempo e consumo energético, contribuindo para uma maior economia operacional.

No entanto, a presente análise possui característica qualitativa, visando um padrão conjunto de parâmetros. Dessa forma, obtiveram-se duas condições, as quais visam a otimização da umidade, para que atinja-se o teor de umidade de 8,5%. O Gráfico 14 expressa as duas combinações de temperatura.

Gráfico 14 – Valores de temperatura para cada combinação



Fonte: Autoria própria (2025).

Portanto, ao contrastar as duas sugestões, observa-se que, com T1 fixado em 140 °C, foi sugerido para T2 um valor próximo de 142 °C, enquanto T3 apresentou uma temperatura em torno de 131,7 °C. O parâmetro T4 ficou próximo de 118,3 °C, seguindo a ideia de redução na última região. Esse padrão evidencia a estratégia de aumento das temperaturas nas primeiras zonas, seguido por uma redução nas zonas finais.

Na segunda sugestão, considerando uma possível oscilação ou modificação das variáveis, verificou-se uma diferença de apenas 0,4 °C para T2, indicando uma variação mínima. Contudo, os parâmetros T3 e T4 apresentaram alterações mais significativas, com um comportamento compensatório: a redução de um parâmetro foi equilibrada pelo aumento do outro. Especificamente, T3 aumentou de 131,7 °C para 142,8 °C, enquanto T4 seguiu a trajetória oposta, diminuindo para cerca de 113,1 °C. Essa redução mais acentuada na última zona atendeu à necessidade de diminuir a temperatura final, mas exigiu um aumento significativo em T3, superior a 10 °C. Essa configuração favorece a etapa subsequente, resultando em um produto final mais frio.

Embora essas sugestões não tenham sido testadas no equipamento, elas representam comportamentos qualitativos que podem orientar decisões no processo, especialmente ao considerar a compensação entre os parâmetros, para controle do produto final, seja para aumento ou redução do teor de umidade.



6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que o processo de secagem, embora essencial para a produção de alimentos de alta qualidade para cães e gatos, apresenta uma complexidade significativa, sendo suscetível à influência de diversos fatores.

Observou-se que as temperaturas de secagem no secador contrafluxo estão inter-relacionadas, mesmo sob a influência de outros parâmetros. Foram identificados padrões operacionais, e delineadas zonas de operação indesejáveis. As influências mais importantes ocorreram nas etapas finais do processo, enquanto a temperatura na primeira zona apresentou comportamento mais estável, sendo menos afetada pelas alterações comparadas às demais variáveis no início do processo. No entanto, recomenda-se a realização de estudos mais aprofundados nessas áreas, a fim de confirmar e validar os padrões observados.

A segunda e a quarta zonas de secagem apresentaram comportamento oposto, o que corrobora a análise de que a utilização de temperaturas mais altas na segunda zona é adequada. A última zona de secagem, por sua vez, mostrou-se a mais crítica, apresentando considerável variabilidade, especialmente quando comparada à relação com a terceira zona. O estudo da interação entre os parâmetros e a otimização das condições operacionais de secagem revelou-se de grande importância para garantir os critérios de qualidade, especialmente em relação ao produto final.

Por fim, ficou evidente que o controle rigoroso de cada etapa do processo é parte fundamental para assegurar que o produto alcance a umidade ideal e as propriedades desejadas, assegurando a qualidade do alimento processado.

REFERÊNCIAS

ABINPET, A. B. da Indústria de Produtos para Animais de E. **Relatório anual: crescimento e tendências da indústria pet.** 2024. ABINPET. Acesso em: 16 jan. 2025.

AQUINO, S. et al. Determinação da contaminação fúngica e análise da atividade de água de rações vendidas a granel no município de são paulo. **Revista de Educação Continuada em Medicina Veterinária e Zootecnia do CRMV-SP (Revista MVZ)**, v. 9, n. 2, 2011.

ARAÚJO, L. F.; ZANETTI, M. A. **Nutrição animal.** [S.I.]: Manole, 2019.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; VEGA-MERCADO, H. **Dehydration of foods.** New York: Springer, 1996.

BASTOS, D. H. M. Produtos da reação de maillard em alimentos: implicações para a saúde. In: **Anais.** [S.I.]: FEA/UNICAMP, 2009. Acesso em: 06 jan. 2025.

BERGMAN, T. L. **Incropera - Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa.** 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019. E-book, p.i. ISBN 9788521636656. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521636656/>.

BERTOLINO, M. T. **Gerenciamento da qualidade na indústria alimentícia : ênfase na segurança dos alimentos.** [S.I.]: Artmed, 2010. 320 p.

BORBA, A. M.; SARMENTO, S. B. S.; LEONEL, M. Efeito dos parâmetros de extrusão sobre as propriedades funcionais de extrusados da farinha de batata-doce. **Food Science and Technology**, Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos, v. 25, n. 4, p. 835–843, Oct 2005. ISSN 0101-2061. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0101-20612005000400034>.

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. **Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery.** [S.I.]: Wiley, 2005.

BROOKER, D.; BAKKER-ARKEMA, F.; HALL, C. **Drying and Storage Of Grains and Oilseeds.** Springer US, 1992. (An avi book). ISBN 9780442205157. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=qx-BaufhXKoC>.

CASE, L. P. **Essentials of Small Animal Nutrition.** [S.I.]: Elsevier, 2016.

CENGEL, Y. A. **Thermodynamics: An Engineering Approach**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2007.

CHANG, Y.; SCHMIELE, M.; MARTÍNEZ-BUSTOS, F. Alterações físico-químicas do alimento durante o processo de extrusão. In: [S.l.:s.n.], 2010.

CORAZZA, F. d. C. **ESTIMAÇÃO DE ESTADO E CONTROLE ÓTIMO EM UM SECADOR INDUSTRIAL DE GELATINA – ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA**. 2004. 169 p. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2004.

CORBIN, J. The history of pet food. **Petfood technology**, p. 514 – 516, 2003. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84962569830&partnerID=40&md5=8289ce571661a4d2c3ca45bc76067ed9>.

COSTA, F. J. **Estudo dos parâmetros de secagem de produtos pet food**. [S.l.: s.n.], 2000.

CREPALDE, L. T. et al. Caracterização do perfil de compradores de pet food. **OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA**, v. 21, n. 12, p. 25878–25899, Dec. 2023. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/2252>.

DEMIRPOLAT, A. B. Investigation of mass transfer with different models in a solar energy food-drying system. **Energies**, v. 12, n. 18, p. 3447, 2019.

FELLOWS, P. **Tecnologia do Processamento de Alimentos - 4.ed.: Princípios e Prática**. Artmed Editora, 2018. ISBN 9788582715260. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=ZyCADwAAQBAJ>.

GALDAMEZ, E. V. C.; CARPINETTI, L. C. R. Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos no processo de injeção plástica. **Gestão & Produção**, v. 11, p. 121–134, 2004.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport Processes and Unit Operations**. 3. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 1993.

GEELEN. **Manual de instalação e utilização do secador VD28X28TB*9+1-P**. [S.l.]: Geelen Counterflow, 2022.

GEELEN. **Dryers**. 2024. <https://www.geelencounterflow.com/dryers/>. Acesso em: 15 dez. 2024. GREEN, D.; PERRY, R. **Perry's Chemical Engineers' Handbook, Eighth Edition**.

McGraw Hill LLC, 2007. (McGraw Hill professional). ISBN 9780071593137. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=tH7IVcA-MX0C>.

GUY, R. **Extrusion Cooking: Technologies and Applications**. Elsevier Science, 2001. (Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition). ISBN 9781855735590. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=nSlccsDAqVIC>.

HAGENIMANA, A.; DING, X.; FANG, T. Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. **Journal of Cereal Science**, v. 43, n. 1, p. 38–46, 2006. ISSN 0733-5210. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0733521005001116>.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física - Gravitação, Ondas e Termodinâmica - Volume 2**. 12. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2023. E-book, p. 218. ISBN 9788521638568. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521638568/>.

HARPER, J. M. **Extrusion Of Foods**. 1st. ed. Boca Raton: CRC Press, 1981. 220 p. EBook published 29 July 2019. ISBN 9780429290428. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9780429290428>.

HARTEL, R.; HELDMAN, D. **Principles of Food Processing**. Springer US, 1997. (Chapman & Hall food science book). ISBN 9780834212695. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=eyQpWAQegDcC>.

HERVERA, M. et al. Use of near-infrared spectroscopy to predict energy content of commercial dog food. **Journal of animal science**, v. 90, 10 2012.

HOFMANN, T. et al. Quantification of maillard reaction products in animal feed. **European Food Research and Technology**, v. 246, n. 1, p. 253–256, 2020. ISSN 1438-2385. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00217-019-03406-w>.

JANGAM, S. V. An overview of recent developments and some r&d challenges related to drying of foods. **Drying Technology**, Taylor & Francis, v. 29, n. 12, p. 1343–1357, 2011.

KOKINI, J. L.; HO, C.-T.; KARWE, M. V. (Ed.). **Food Extrusion Science and Technology**. New York: Marcel Dekker, 1992. 740 p.

LEAL, M. d. C. D. **Fundamentos e aplicações da metodologia de superfície de resposta**. 2015. Tese (Tese de Doutorado), 2015.

LINDER, D.; MUELLER, M. Pet obesity management: Beyond nutrition. **Veterinary Clinics of North America: Small Animal Practice**, v. 44, n. 4, p. 789–806, 2014. ISSN 0195-5616. Clinical Nutrition. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195561614000497>.

MCCABE, W.; SMITH, J. **Unit Operations of Chemical Engineering**. [S.I.]: McGraw-Hill, 2018. (Chemical engineering series).

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. [S.I.]: Wiley, 1991.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. [S.I.]: Wiley, 2021.

MOURÃO, R. d. C. et al. Processamento do milho na alimentação de ruminantes. **pubvet**, 2012.

MUJUMDAR, A. **Handbook of Industrial Drying, Fourth Edition**. Taylor & Francis, 2014. ISBN 9781466596658. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=oT36AwAAQBAJ>.

NOVAES, C. G. et al. Otimização de métodos analíticos usando metodologia de superfícies de resposta - parte i: Variáveis de processo. **Rev. Virtual Quim.**, v. 9, n. 3, 2017. Data de publicação na Web: 5 de abril de 2017.

PÉREZ, S.; BERTOFT, E. The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review. **Starch - Stärke**, v. 62, n. 8, p. 389–420, 2010. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/star.201000013>.

PRIOR, B. Measurement of water activity in foods: A review. **Journal of Food Protection**, v. 42, n. 8, p. 668–674, 1979. ISSN 0362-028X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0362028X23026728>.

RATTI, C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: a review. **Journal of Food Engineering**, v. 49, n. 4, p. 311–319, 2001. ISSN 0260-8774. Drying. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877400002284>.

RIAZ, M. N. **Extruders in Food Applications**. 1st. ed. Boca Raton: CRC Press, 2000. 240 p. EBook published 31 January 2000. ISBN 9780429165566. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781482278859>.

ROKEY, G. J.; PLATTNER, B.; SOUZA, E. M. d. Feed extrusion process description. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Sociedade Brasileira de Zootecnia, v. 39, p. 510–518, Jul 2010. ISSN 1516-3598. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982010001300055>.

SABAREZ, H. Drying of food materials. In: _____. [S.I.:s.n.], 2016. ISBN 9780081005965.

SGORLON, S. et al. Elemental composition in commercial dry extruded and moist canned dog foods. **Animal Feed Science and Technology**, v. 287, p. 115287, 2022. ISSN 0377-8401. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377840122000852>.

SILVA, W. R.; MENDES, K. G.; FERREIRA, R. d. S. Desenvolvimento de uma estação meteoro-lógica a partir de materiais reutilizados e sensores de baixo custo. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Sociedade Brasileira de Física, v. 46, p. e20230337, 2024. ISSN 1806-1117. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2023-0337>.

SINGH, R.; HELDMAN, D. **Introduction to Food Engineering**. Academic Press, 2008. (Food Science and Technology). ISBN 9780080919621. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=jebJgWHADi4C>.

SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R.; ERDOGDU, F. Chapter 14 - extrusion processes for foods. In: SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R.; ERDOGDU, F. (Ed.). **Introduction to Food Engineering (Sixth Edition)**. Sixth edition. Academic Press, 2025, (Food Science and Technology). p. 763-787. ISBN 978-0-12-823129-6. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128231296000143>.

SOUZA, K. K. **ROTULAGEM, QUALIDADE E SEGURANÇA BIOLÓGICA DE ALIMENTOS PARA ANIMAIS DE COMPANHIA E SEU IMPACTO NA SAÚDE**. 2013. 232 p. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, Florianópolis, 2013.

SULE, S. et al. Applications of food extrusion technology. **MOJ Food Processing Technology**, v. 12, p. 74–84, 03 2024.

TRIOLA, M. F. **Introdução à Estatística**. 14. ed. [S.l.]: LTC, 2024. ISBN 9788521638773. WHITE, G. et al. "who's been a good dog?" – owner perceptions and motivations for treat giving.

Preventive Veterinary Medicine, v. 132, p. 14–19, 2016. ISSN 0167-5877. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167587716302495>.

YANG, L. et al. Natural mycotoxin contamination in dog food: A review on toxicity and detoxification methods. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 257, p. 114948, 2023. ISSN 0147-6513. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651323004529>.

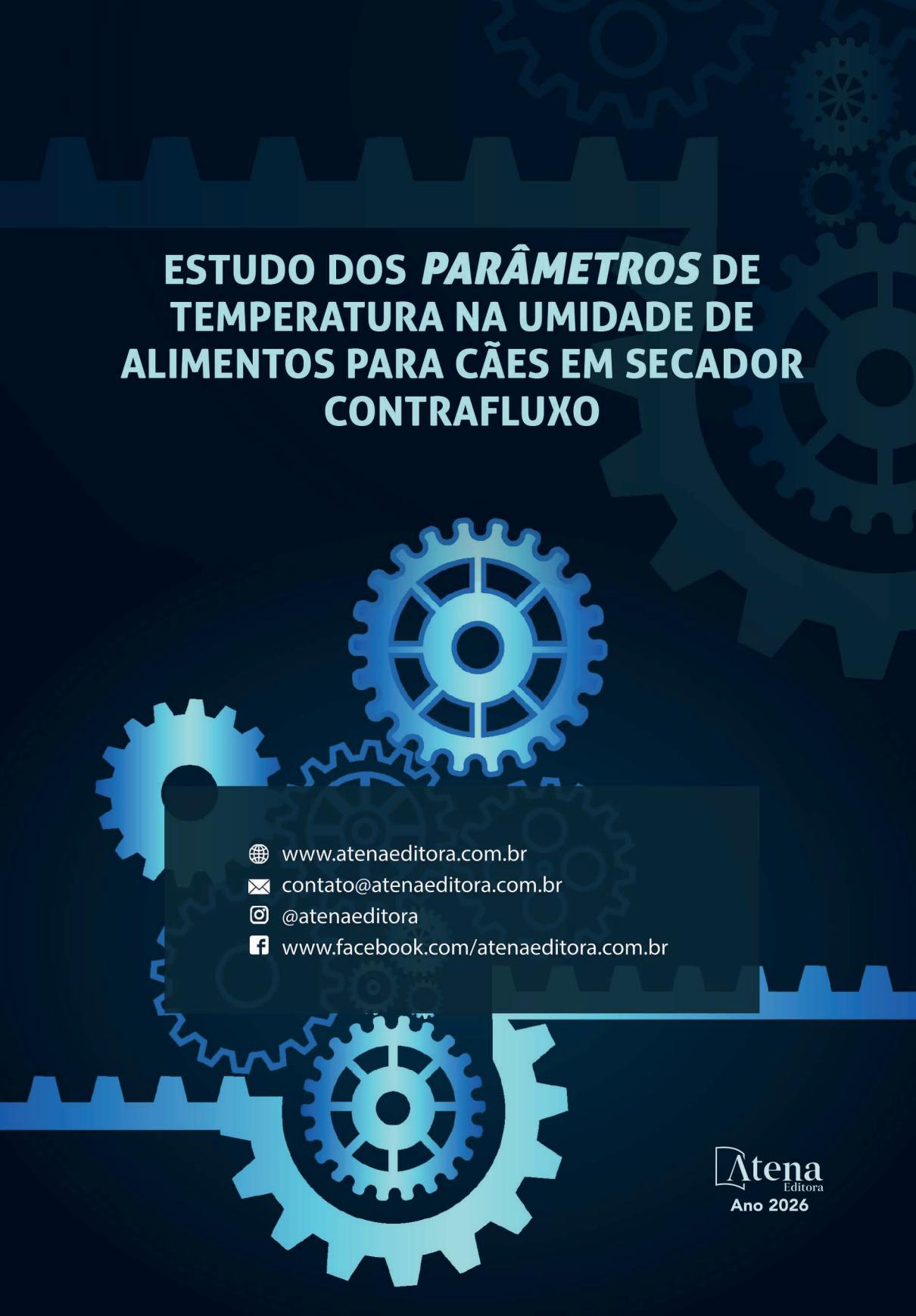
SOBRE O AUTOR

FERNANDO GABRIEL ANTUNES: bacharel em Engenharia Química pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Ponta Grossa. Sua formação acadêmica concentra-se na análise e otimização de processos industriais, com ênfase no estudo e aprimoramento do desempenho de equipamentos de secagem. Demonstra interesse contínuo em otimização de processos, buscando soluções técnicas que aliem eficiência operacional e fundamentação teórica sólida.

ESTUDO DOS *PARÂMETROS* DE TEMPERATURA NA UMIDADE DE ALIMENTOS PARA CÃES EM SECADOR CONTRAFLUXO

🌐 www.atenaeditora.com.br
✉️ contato@atenaeditora.com.br
📷 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
 FACEBOOK www.facebook.com/atenaeditora.com.br

ESTUDO DOS *PARÂMETROS* DE TEMPERATURA NA UMIDADE DE ALIMENTOS PARA CÃES EM SECADOR CONTRAFLUXO

- 
- 🌐 www.atenaeditora.com.br
 - ✉️ contato@atenaeditora.com.br
 - 📷 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
 - FACEBOOK www.facebook.com/atenaeditora.com.br