

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

JOÃO RAFAEL BORTOI FRANCESCHINI

**FUNDAMENTOS DA EXTRUSÃO TERMOPLÁSTICA DE *PET FOOD*:
Uma Revisão com base em Literatura Acadêmica**

**SÃO CARLOS - SP
2025**

JOÃO RAFAEL BORTOTI FRANCESCHINI

FUNDAMENTOS DA EXTRUSÃO TERMOPLÁSTICA DE *PET FOOD*:
Uma Revisão com base em Literatura Acadêmica

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química da
Universidade Federal de São Carlos, para
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Química.

Orientadora: Prof^a Dr^a Maria do Carmo
Ferreira

São Carlos-SP
2025

RESUMO

A indústria de *pet food* apresenta crescimento expressivo no Brasil e no mundo, demandando processos produtivos eficientes e produtos de alta qualidade nutricional. A extrusão termoplástica é o principal método de processamento de ração seca para cães e gatos e principal operação do processo produtivo. Este trabalho teve como objetivo reunir e analisar os aspectos técnicos fundamentais da extrusão de *pet food* através de revisão bibliográfica complementada por conhecimentos obtidos durante estágio em fábrica de ração seca para *pets*. A literatura foi compilada e analisada para reunir os principais efeitos das matérias-primas e parâmetros do processo às condições de processamento e à qualidade do extrudado. A análise demonstra que a extrusão não é uma operação unitária isolada, mas um sistema dependente de etapas precedentes, onde a granulometria e a homogeneidade da mistura influenciam diretamente a estabilidade do processo. A composição bioquímica tem impacto significativo na reologia da massa: o amido atua na estrutura e expansão; as proteínas alteram a viscosidade e a demanda de energia mecânica; os lipídios agem como lubrificantes; as fibras modificam a textura final e demandam mais água. O controle da umidade da massa e a aplicação eficiente de energia térmica (vapor) no pré-condicionador são fundamentais para a otimização do cozimento, reduzindo a demanda de energia mecânica no canhão da extrusora. A configuração física da rosca e seus parâmetros determinam o cisalhamento e cozimento ao plastificar a massa. A matriz aplica a energia mecânica final, controlando a taxa de expansão e formatação do *kibble* juntamente com o sistema de corte.

Palavras-chave: Extrusão. Ração. Parâmetros. Alimento seco para cães e gatos.

ABSTRACT

Pet food industry is experiencing significant growth in Brazil and worldwide, demanding efficient production processes and high-quality nutritional products. Thermoplastic extrusion is the main method of processing dry food for dogs and cats and the main operation in the production process. The objective of this study was to gather and analyze the fundamental technical aspects of pet food extrusion through a literature review supplemented by knowledge obtained during an internship at a dry pet food factory. The literature was compiled and analyzed to gather the main effects of raw materials and process parameters on processing conditions and extrudate quality. The analysis demonstrates that extrusion is not an isolated unit operation, but a system dependent on preceding steps, where particle size and mixture homogeneity directly influence process stability. Biochemical composition has significant impact on melt rheology: starch acts on the structure and expansion; proteins alter viscosity and mechanical energy demand; lipids act as lubricants; fibers modify the final texture and require more water. Controlling moisture content of the dough and efficiently applying thermal energy (steam) in the preconditioner are fundamental to optimizing cooking, reducing the mechanical energy demand in the extruder barrel. Physical configuration of the screw and its parameters determine shear rate and cooking. Die plate applies final mechanical energy as it controls expansion rate and kibble size and shape alongside with knife setup.

Keywords: Extrusion. Pet food. Parameters. Dry dog and cat food.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma simplificado do processo de produção de <i>pet food</i>	11
Figura 2. Representação de um moinho martelo	12
Figura 3. Comparação entre <i>kibbles</i> extrudados com moagem fina e grosseira	13
Figura 4. Esquema ilustrativo da etapa de extrusão	15
Figura 5. Esquema de secador de esteiras de múltiplos passos	18
Figura 6. Esquema de um resfriador vertical em contracorrente	20
Figura 7. Parâmetros dependentes e independentes da extrusora	30
Figura 8. Relação entre umidade acumulada no canhão e densidade aparente do extrudado	31
Figura 9. Origem da energia no sistema de extrusão de <i>pet food</i>	32
Figura 10. Perfil de extrusora de rosca simples com 6 zonas e matriz	35
Figura 11. Dispositivos da extrusora: (a) Matrizes; (b) Placa de restrição	38
Figura 12. Sistema de corte da extrusão	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Ingredientes das formulações de <i>pet food</i> e suas contribuições à dieta	24
Tabela 2. Resumo dos macronutrientes e efeitos ao processo e produto	29
Tabela 3. Resumo dos parâmetros operacionais e efeitos ao processo e produto	40

LISTA DE SIGLAS

A_w – Atividade de Água

DGM – Diâmetro Geométrico Médio

HIP – Pré-condicionador de alta intensidade

PCC – Ponto Crítico de Controle

SME – Energia Mecânica Específica

STE – Energia Térmica Específica

TSE – Energia Específica Total

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: O PROCESSO PRODUTIVO DE <i>PET FOOD</i>	11
2.1. Moagem	11
2.2. Separação e Mistura	14
2.3. Extrusão	14
2.4. Secagem	17
2.5. Recobrimento	18
2.6. Resfriamento	19
3. METODOLOGIA	21
4. ANÁLISE DA EXTRUSÃO DE PET FOOD	23
4.1. Composição e Matérias-Primas	23
4.1.1. Efeito do Amido	24
4.1.2. Efeito das Proteínas	25
4.1.3. Efeito dos Lipídios	26
4.1.4. Efeito das Fibras	27
4.2. Efeitos dos parâmetros de processo	28
4.2.1. Umidade da Massa	29
4.2.2. Carga Térmica	30
4.2.3. Carga mecânica	32
4.2.4. Matriz e dispositivos	35
5. CONCLUSÕES	39
REFERÊNCIAS	40

1. INTRODUÇÃO

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Produtos para Animais de Estimação (Abinpet), o Brasil possui cerca de 60 milhões de cães e 30 milhões de gatos. É o país com a terceira maior população de pets, atrás apenas dos Estados Unidos e da China. Dentre os ramos do mercado pet, um dos maiores é a indústria de *pet food*, com projeção de mais de 50% do faturamento do setor no primeiro trimestre de 2025 (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA, 2025). A indústria alcançou 35,27 Mt produzidos globalmente em 2022, com valor de mercado estimado em US\$117,34 bilhões e projetado para US\$201,39 bilhões para 2033. Neste cenário, o Brasil é parte chave: maior produtor da América Latina e terceira maior região produtora do mundo com 8,3 Mt, após Europa, 11,7 Mt, e América do Norte, 11,4 Mt (ALLTECH, 2025).

A ração seca, também chamada de *kibble*, compõe grande parte da dieta de cães e gatos. Segundo pesquisa de Morelli et al. (2021), 75,7% dos donos alimentam seus pets com *kibble*, e 37,7% alimentam exclusivamente com ele. Dessa forma, as formulações devem atender às necessidades nutricionais do pet – que podem variar muito conforme sua fase de vida, atividade e porte físico, castração, entre outros aspectos. Cerca de 95% dos alimentos secos para cães e gatos são produzidos a partir da extrusão (SPEARS & FAHEY, 2004).

Segundo Brennan (2006), a extrusão pode ser definida como o processo de forçar um material por uma abertura restrita. No contexto do processamento de alimentos, a extrusão termoplástica é simultaneamente uma operação de cocção termomecânica e formatação do produto, constituindo-se como uma reação *high-temperature short-time* (HTST) (HARPER & CLARK, 1979). Uma das operações unitárias mais comuns da indústria alimentícia, a extrusão é considerada eficiente, com baixo custo relativo e alta escalabilidade. Dentre as operações de cozimento de alimentos em larga escala, é eficaz energeticamente, substituindo parcialmente a demanda térmica pela aplicação de energia mecânica no cozimento, através das forças de atrito e altas pressões contra a massa semissólida (OLIVEIRA, 2019). Presente na fabricação de cereais, *snacks*, biscoitos, massas e pães, a extrusão é a principal etapa do processamento de rações para pets (BRENNAN, 2006).

O *kibble* de *pet food* é formado através da passagem forçada de massa úmida fluidizada em alta pressão e temperatura sobre orifícios abertos na matriz da extrusora. Fatores como a composição das matérias-primas, configuração da extrusora, equipamentos acoplados e as

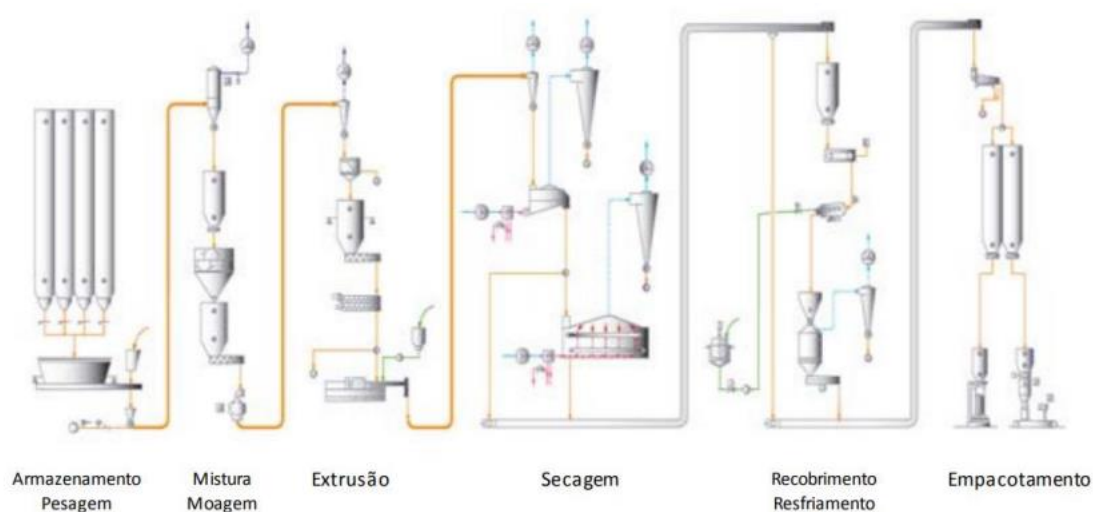
condições de processo impactam significativamente na qualidade do produto acabado e na eficiência operacional. Operações unitárias anteriores, como a moagem e a mistura, também geram grandes implicações na operação da extrusão e na qualidade do material extrudado, enquanto a extrusão também é crucial para etapas posteriores, como a secagem e o recobrimento.

Dentro deste contexto, este trabalho tem como objetivo a compilação e revisão da literatura acadêmica para a fundamentação teórica da extrusão termoplástica de *pet food*, abordando as relações entre a alimentação e as matérias-primas, os parâmetros operacionais e a qualidade do produto acabado. A motivação deste trabalho é a busca por conhecimento técnico e acadêmico sobre a tecnologia de extrusão, a fim de ampliar meus conhecimentos sobre os fundamentos dessa operação durante estágio na área de Melhoria Contínua de uma fábrica de alimento seco para cães e gatos. O conhecimento adquirido, somado à experiência em indústria, devem possibilitar uma análise crítica do processo e identificar os desafios atuais da indústria *pet food*, visando a melhoria do processo e da qualidade do produto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: O PROCESSO PRODUTIVO DE *PET FOOD*

Com o objetivo de contextualizar a extrusão na produção de ração *pet food*, nesta secção será apresentada uma descrição do processo e as principais operações unitárias diretamente relacionadas a esta etapa. A figura 1 ilustra o fluxograma simplificado do processo produtivo tradicional.

Figura 1. Fluxograma simplificado do processo de produção de *pet food*

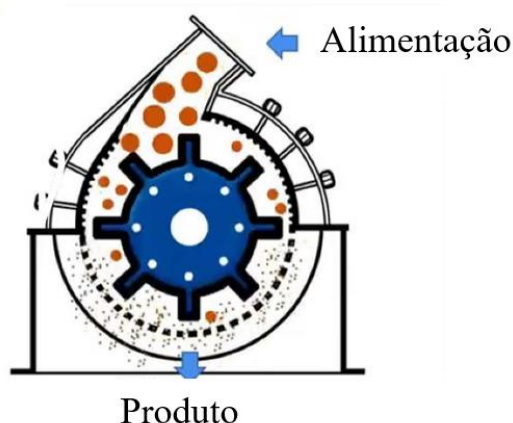


Fonte: Adaptado de MOSCICKI, 2011

2.1. Moagem

A primeira etapa do processo produtivo é a moagem. Grande parte das matérias-primas da indústria *pet food* devem passar pelo processo de redução de granulometria. Após recebimento, armazenamento, dosagem, pré-mistura e retenção de impurezas, os grãos, farinhas e fibras são triturados em moinhos. Os mais utilizados na indústria *pet food* são os do tipo martelo, ilustrado na figura 2, devido à versatilidade e facilidade de manutenção do equipamento (Fucillini & Veiga, 2024). Seu funcionamento baseia-se na rotação de martelos fixados em um rotor que gira em alta velocidade dentro de uma câmara de moagem. As matérias-primas são alimentadas por gravidade e, ao entrarem em contato com os martelos, sofrem impacto e atrito, sendo fragmentadas até atingirem a granulometria desejada (KOCH, 2020).

Figura 2. Representação de um moinho martelo



Fonte: Adaptado de TRUSTAR Pharma Pack Equipment Co., Ltd, 2019

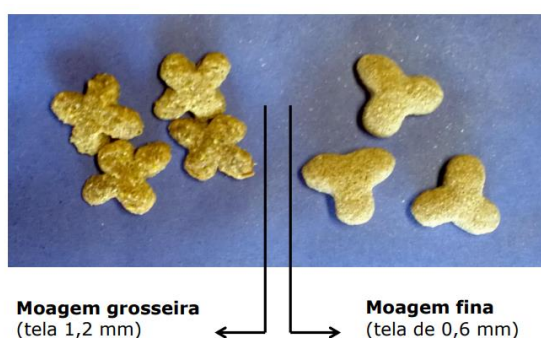
A escolha do tipo de moinho é fundamental para o cálculo da demanda energética da planta, uma vez que é uma das operações unitárias que mais consomem energia na produção de *pet food* (BAZOLLI, 2007). Fatores que interferem na eficiência do processo são a área útil da peneira, a velocidade periférica dos martelos, a configuração dos martelos e a velocidade do alimentador (BAZOLLI, 2007). Em comparação com outro tipo de moinho muito utilizado para moer cereais, o moinho de rolos, o moinho martelo é mais versátil: é capaz de moer fibras sem dificuldades e produzir particulados de tamanhos variados (KOCH, 2020). Além disso, tem operação mais simples e manutenção mais barata, além de oferecer custo de investimento inicial menor. Em contrapartida, tem menor eficiência energética que o moinho de rolos, pois parte de sua energia é perdida na forma de calor e de poluição sonora, além de ser um grande foco de geração de poeira (KOCH, 2020).

A granulometria das matérias-primas exerce influência direta sobre a textura, uniformidade e qualidade do produto acabado. Embora o processo de extrusão aceite uma ampla faixa de tamanhos de partículas, é desejável que essas partículas apresentem uniformidade em tamanho e densidade (ROKEY et al., 2010). Essa homogeneidade contribui para evitar a segregação dos ingredientes durante o transporte e a mistura, além de favorecer uma absorção de umidade mais uniforme e um cozimento mais eficiente na extrusora. A presença de partículas maiores ou mal moídas pode resultar em croquetes (*kibbles*) parcialmente cozidos ou com textura inadequada (ROKEY et al., 2010). A figura 3 mostra uma comparação entre croquetes extrudados com diferentes granulometrias de farelos. Percebe-se um aspecto visual mais homogêneo dos croquetes com moagem mais fina, assim como relatam os autores.

Segundo Merenda (2021), um parâmetro de qualidade da moagem de *pet food* é o diâmetro geométrico médio (DGM), aferido através de análise granulométrica do farelo. Segundo a autora, o DGM deve ser menor que 300 µm para um bom cozimento na etapa de extrusão. Segundo Carciofi (2016), a definição do DGM é a primeira etapa para uma extrusão otimizada. O tamanho geométrico tem influência sobre a homogeneização da mistura, hidratação, viscosidade, transferência de energia mecânica, cozimento e expansão da massa. O autor ainda aponta que o tamanho adequado de partícula tem diversos benefícios, entre eles o aumento da capacidade da extrusora, redução de entupimentos, redução de produtos quebrados e finos e melhorias na digestibilidade e palatabilidade.

A escolha adequada da peneira (ou tela) é essencial para garantir o DGM correto. Segundo Rokey et al. (2010), para matrizes de extrusoras com aberturas de 3 mm ou mais, é comum utilizar peneiras de 1,2 mm nos moinhos. Já para matrizes menores que 3 mm, o tamanho máximo das partículas deve ser de, no máximo, um terço do diâmetro da abertura da matriz, garantindo assim a integridade e a qualidade do extrudado (ROKEY et al., 2010; CARCIOFI, 2016). Além disso, segundo Bazolli (2007), a uniformidade da moagem contribui para uma mistura mais homogênea dos ingredientes, otimizando a digestibilidade e a palatabilidade do alimento para cães e gatos. A moagem fina contribui para melhor aproveitamento dos nutrientes, maior eficiência da utilização de energia e melhor qualidade das fezes nos cães.

Figura 3. Comparação entre *kibbles* extrudados com moagem fina e grosseira



Fonte: CARCIOFI, 2016

2.2. Separação e Mistura

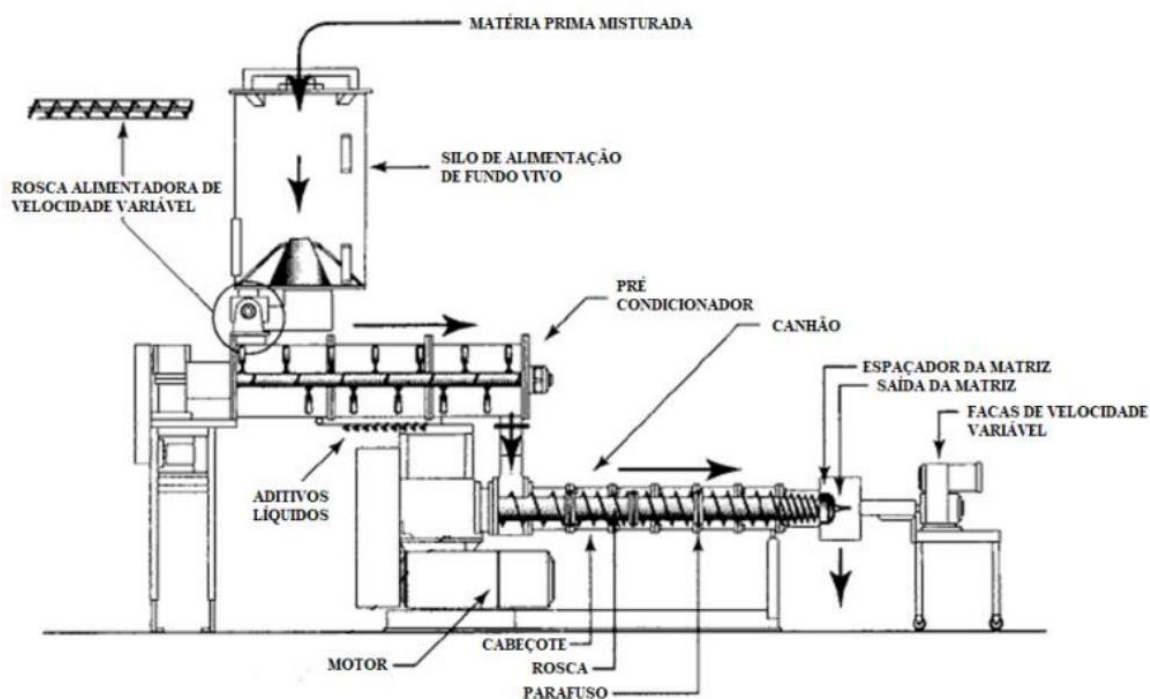
Após a moagem, o farelo pode passar por uma série de operações unitárias de separação e filtração antes de entrar no misturador – e/ou também depois, antes da etapa de extrusão. Entre elas, ciclones, peneiras e ímãs de diferentes configurações são comuns (VOIETSKA et al., 2019). No misturador, são adicionados os *pre-mixes* de vitaminas e minerais, com nutrientes essenciais às dietas dos *pets* e que seriam degradados pela energia mecânica dos moinhos (COSTA, 2015), além de óleos e outros aditivos (MAGALHÃES, 2019).

Os misturadores mais comuns da indústria *pet food* são os verticais e os horizontais. Os misturadores verticais são geralmente compostos por uma rosca sem fim central instalada em silos de fundo cônico e promovem a movimentação ascendente dos materiais. Já os misturadores horizontais podem ser do tipo hélice ou de palhetas. O modelo helicoidal possui um sistema de pás internas e externas que desloca os ingredientes em sentidos opostos, enquanto os misturadores de palhetas realizam movimentos alternados entre o centro e as extremidades do compartimento (FUCILLINI & VEIGA, 2014). A principal vantagem do misturador vertical é seu baixo custo operacional e de manutenção (SILVA, 2022). Entretanto, tem menor eficiência de mistura, pois suas bateladas são mais longas que nos misturadores horizontais (15 minutos versus 4 a 5 minutos). A carga e descarga da mistura é mais rápida também nos horizontais, além de deixarem menos resíduos no equipamento (FUCILLINI & VEIGA, 2014). Após mistura de todos os ingredientes, o produto do misturador é chamado de farelo e é armazenado até ser consumido na etapa de extrusão.

2.3. Extrusão

A extrusão termoplástica no contexto da produção de *pet food* é composta de uma série de processos acoplados em uma mesma operação unitária: alimentação, mistura, condicionamento, cisalhamento, cocção, transporte e formatação da massa – separados em três equipamentos distintos: silo vivo (alimentador), pré-condicionador e canhão (extrusora) (BRENNAN, 2006). Na literatura, é comum referenciar-se ao processo de extrusão tanto para o processo decorrente no canhão, quanto para todos os processos combinados dos três equipamentos. A Figura 4 ilustra todas essas etapas.

Figura 4. Esquema ilustrativo da etapa de extrusão



Fonte: MAGALHÃES, 2019

A matéria-prima moída e misturada, chamada de farelo, entra pelo silo vivo, que introduz de maneira uniforme as matérias-primas no pré-condicionador e, consequentemente, na extrusora. O silo vivo permite o controle da vazão de alimentação de todo o sistema, fundamental para a estabilidade do processo, através de uma rosca alimentadora. A rosca de velocidade variável permite variação da vazão volumétrica de entrada (ROKEY et al., 2010). Dispositivos mais robustos contemplam ainda sistemas *loss-in-weight*, também chamados de gravimétricos, que possibilitam uma vazão mássica constante, mesmo com variação da densidade aparente do farelo. Nestes casos, há células de carga acopladas abaixo do silo alimentador que monitoram constantemente o peso do silo vivo e enviam sinais para um controlador da rosca alimentadora, permitindo que a vazão volumétrica se altere em detrimento de uma vazão mássica constante (ROKEY et al., 2010).

O pré-condicionador desempenha um papel fundamental na preparação da mistura de ingredientes antes de sua entrada na extrusora. Sua principal função é promover a hidratação e o pré-cozimento dos ingredientes por meio da adição controlada de água e vapor, elevando a umidade e a temperatura da massa para níveis ideais (geralmente entre 10% e 25% de umidade e 70°C a 90°C). Esse processo melhora a gelatinização do amido, facilita a plasticização dos ingredientes e contribui para a estabilidade operacional da extrusora, reduzindo o desgaste

mecânico causado por partículas abrasivas. Além disso, o pré-condicionamento permite a incorporação homogênea de aditivos líquidos, como gorduras, aromas e corantes. A eficiência do pré-condicionador depende de variáveis como tempo de retenção, temperatura, umidade e configuração dos elementos de mistura, sendo que o uso de pré-condicionadores pressurizados pode aumentar a temperatura de saída, embora com maior risco de degradação de nutrientes e custos operacionais mais elevados (BRENNAN, 2006; ROKEY et al., 2010)

Ao sair do pré-condicionador, a massa parcialmente hidratada e aquecida entra no canhão da extrusora, onde é submetida a intensas forças mecânicas e energia térmica. A extrusora é composta por uma ou duas roscas sem fim que giram dentro de um cilindro, promovendo o transporte, compressão, mistura e cisalhamento da massa. Durante esse percurso, a temperatura e a pressão aumentam progressivamente, principalmente devido à energia mecânica gerada pelo atrito entre a massa e os componentes da extrusora, além da eventual injeção direta de vapor (ROKEY et al., 2010).

Essa combinação de calor, pressão e cisalhamento resulta na gelatinização do amido, desnaturação de proteínas e formação de uma massa termoplástica homogênea. A viscosidade da massa aumenta significativamente, e a água presente atinge o estado de vapor superaquecido, contribuindo para a expansão do produto ao sair pela matriz da extrusora. Nesse ponto, a súbita queda de pressão causa a expansão instantânea da massa, formando a estrutura porosa característica dos grânulos de *pet food* (ROKEY et al., 2010).

A configuração da rosca (perfil de compressão, elementos de mistura, zonas de alimentação, compressão e cozimento), a velocidade de rotação, a taxa de alimentação e os parâmetros térmicos são ajustados conforme a formulação e o tipo de produto desejado (por exemplo, densidade, textura, formato e flutuabilidade). A extrusão pode ser realizada em extrusores de rosca simples ou dupla, sendo os de rosca dupla preferidos para formulações mais complexas ou com alto teor de gordura, devido à sua maior capacidade de mistura e controle de processo (ROKEY et al., 2010). As extrusoras de rosca simples são mais comuns na indústria *pet food*, enquanto as de rosca dupla são bastante utilizadas na produção de rações para peixes (NIELSEN et al., 2025).

Na seção 4 deste texto será apresentada uma análise detalhada sobre os fatores associados à matéria-prima e aos parâmetros do processo que influenciam a extrusão de *pet food*, a qualidade do produto acabado e estabilidade do processo.

2.4. Secagem

Imediatamente após saída da matriz, os extrudados são direcionados ao secador, geralmente por transporte pneumático. A secagem é fundamental para inibir o crescimento de micro-organismos e reações indesejadas e consequentemente aumentar o tempo de prateleira do produto. Dentro do canhão da extrusora, os croquetes têm umidade ideal entre 23 e 28% (ROKEY, 2010), e após a secagem, entre 5 e 10% em base úmida (BALLER, 2020). A redução da atividade de água (A_w) também tem papel crucial na redução do crescimento de mofo e bactérias. Segundo Rokey et al. (2010), não há atividade bacteriológica em um produto com A_w menor que 0,65, e não há atividade fúngica com A_w menor que 0,60.

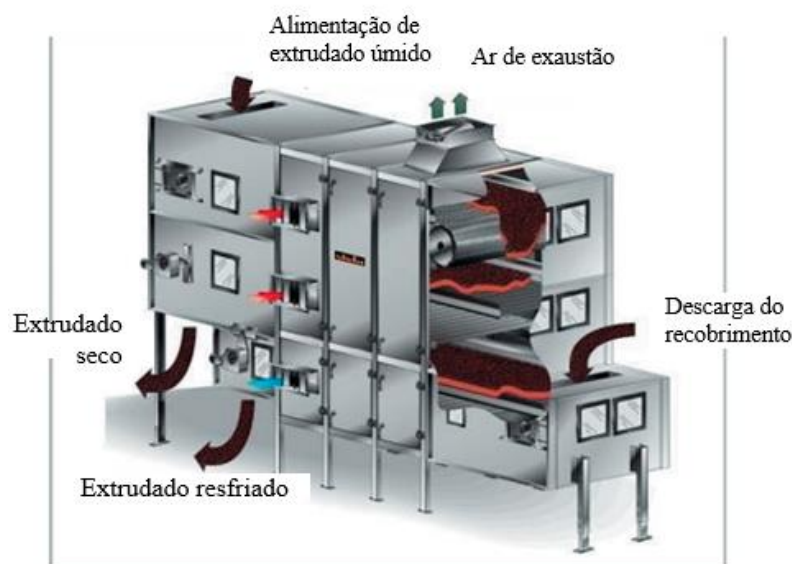
Com a expansão dos *kibbles* na matriz da extrusora, parte da umidade é evaporada instantaneamente com a súbita queda de pressão. O transporte pneumático de produto até o secador também é responsável pela perda de 1 a 2% de umidade, segundo Rokey et al. (2010). A aspiração do produto tem duas principais vantagens sobre o simples transporte por esteiras ou elevadores: maior separação de aglomerados e maior sanitização da área próxima à matriz (ROKEY et al., 2010).

O secador mais utilizado na indústria *pet food* é o contínuo de esteiras horizontais (COSTA, 2015). A figura 5 ilustra esse secador. Nesse sistema, o produto extrudado é distribuído sobre uma correia transportadora que se desloca ao longo da câmara de secagem, enquanto um fluxo de ar aquecido — geralmente em contracorrente, com velocidades entre 40 e 60 metros por minuto e temperaturas variando de 90°C a 140°C — atravessa o leito de produto, promovendo a evaporação da umidade. Parte do ar é exaurido para remover o vapor gerado, enquanto o restante é misturado com ar fresco, reaquecido e recirculado, otimizando o consumo energético (ROKEY et al., 2010; CARCIOFI, 2016)

Segundo Brennan (2006), as esteiras desses secadores, nas diferentes indústrias do contexto alimentício, possuem largura média de 2 a 3 m e podem atingir até 50 m de comprimento. O produto é inicialmente distribuído sobre a esteira em camadas com espessura típica entre 75 mm e 150 mm, garantindo que as partículas formem um leito poroso para permitir a passagem do ar aquecido. Durante o processo, o fluxo de ar é direcionado através da esteira e do produto, geralmente ascendente nas etapas iniciais e descendente nas etapas finais, otimizando a transferência de calor e a remoção de umidade. À medida que ocorre a redução de volume por perda de água, a camada de produto se torna mais fina, diminuindo a eficiência do uso da esteira em secadores de estágio único. É comum a operação deste secador em múltiplos passes para melhorar a eficiência energética em que o produto é redistribuído em

uma camada mais grossa da primeira esteira para a segunda. Neste processo, novas superfícies são expostas ao ar de secagem, com a redistribuição do particulado de um estágio a outro, otimizando ainda mais a remoção de umidade (BRENNAN, 2006)

Figura 5. Esquema de secador de esteiras de múltiplos passos



Fonte: Adaptado de YEMMAK, s.d

A otimização e uniformidade da secagem passa por um controle da temperatura dos queimadores, velocidade das esteiras, profundidade e espalhamento do leito e velocidade do ar, ajustados conforme as características físico-químicas desejadas do alimento. Umidade inicial, formato, densidade e tamanho dos *kibbles* influenciam diretamente a curva de secagem do produto (ROKEY et al., 2010).

2.5. Recobrimento

A fim de aumentar a aceitabilidade e palatabilidade do alimento extrudado, além de enriquecê-lo com nutrientes fundamentais como gordura, muitas fábricas de *pet food* utilizam da operação do recobrimento em seu processo industrial após a etapa de secagem, para otimizar a absorção de líquidos em um produto ainda quente (ROKEY et al., 2010). Embora a inclusão de gordura como aditivo líquido na etapa de extrusão seja importante para a lubrificação da massa plasticizada, valores superiores a 5% podem afetar a qualidade dos extrudados. Dessa forma, o processo de produção de *pet food* conta tradicionalmente com uma operação de recobrimento de óleos e palatilizantes por meio de uma pulverização no extrudado seco,

permitindo sua absorção pela estrutura porosa do produto. A capacidade de absorção depende da área superficial das partículas: quanto menor o diâmetro, maior a absorção. Com essa técnica, é possível aplicar entre 3% e 20% de gordura, garantindo melhor desempenho e sabor no alimento final (VOIESTSKA et al., 2019).

O equipamento de recobrimento geralmente é um tambor cilíndrico rotativo, onde o produto é pulverizado com uma névoa de gordura ou polvilhado com pó aromatizante. Esses tambores são aquecidos para evitar a solidificação da gordura, enquanto tanques de aquecimento mantêm o líquido a cerca de 60 °C, garantindo fluidez e uniformidade na aplicação. A inclusão é controlada por dispositivos de medição, como células de carga para aferição da massa do extrudado e dosagem dos pós e medidores de vazão para a dosagem de líquidos, assegurando a proporção correta entre grânulos e pulverizado (ROKEY et al., 2010)

Para aplicações de 1 a 5% de gordura, utilizam-se bicos pulverizadores internos; já para níveis superiores, são empregados bicos de fluxo contínuo. Alternativamente, sistemas com discos giratórios criam uma “cortina” líquida, eliminando a necessidade de bicos. Tecnologias mais recentes incluem misturadores de alta velocidade, que reduzem o tempo de ciclo para 5 a 30 s, transformando processos em batelada em sistemas quase contínuos. Além dos métodos atmosféricos, sistemas de infusão a vácuo oferecem vantagens significativas, permitindo a incorporação de até 40% de líquidos e garantindo penetração do recobrimento na estrutura do *kibble*, enquanto processos convencionais limitam-se à cobertura superficial (ROKEY et al., 2010).

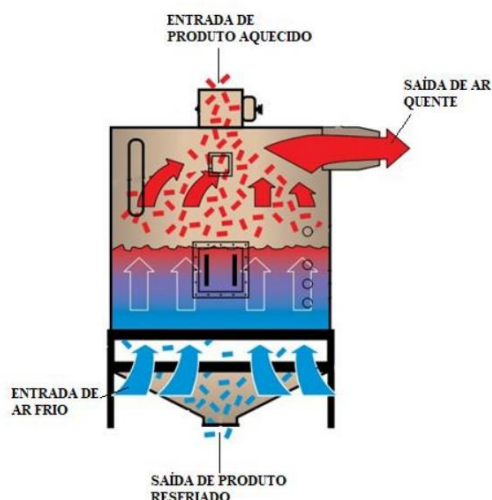
2.6. Resfriamento

O resfriamento do extrudado engordurado é fundamental para garantia da segurança do alimento na embalagem do produto. Envasar ou armazenar produto ainda quente pode resultar na condensação da umidade residual e vapor presente no ar quente, quando em contato com a parede fria da embalagem ou silo, criando áreas úmidas que favorecem o crescimento de mofo e bactérias (ROKEY et al., 2010).

O equipamento mais utilizado é um resfriador vertical em contracorrente, em que o produto entra por cima em uma câmara e o ar por baixo. A figura 6 ilustra esse resfriador. São utilizados também, em menor frequência, resfriadores horizontais com esteira perfurada. Nesses casos, o produto é distribuído uniformemente sobre a esteira em camadas de 10 a 30 cm, enquanto ventiladores centrífugos puxam ar ambiente ou resfriado através da massa para remover o calor (VOIETSKA et al., 2019). O resfriamento em esteiras pode ser acoplado ao

secador horizontal, como etapa final após a secagem, para otimização de espaço e equipamento. A figura 5 ilustra um secador com esta etapa. Entretanto, para aplicações com mais de 5 a 8% de gordura como recobrimento, é preferível que o resfriamento ocorra após a aplicação da gordura, utilizando-se normalmente resfriadores verticais de contrafluxo, que evitam acúmulo de gordura nas esteiras dos resfriadores horizontais (ROKEY et al., 2010).

Figura 6. Esquema de um resfriador vertical em contracorrente



Fonte: MAGALHÃES, 2019

Após o resfriamento, a temperatura dos *pellets* não deve exceder a temperatura ambiente em mais de 10 °C, e a umidade final deve ser inferior a 14,5%. A taxa de fluxo de ar recomendada é de 0,4 a 0,5 m/s, com volume aproximado de 1500 m³/t, e o tempo de resfriamento varia entre 300 e 900 s, dependendo do tamanho dos grânulos. Embora aumentar a velocidade do ar acelere o resfriamento, isso pode endurecer a camada superficial dos *pellets*, dificultando a difusão da umidade interna. Esse fenômeno favorece a condensação, formação de microfissuras e aumento da fragilidade, o que compromete a qualidade e a vida útil do produto, tornando-o suscetível ao mofo durante o armazenamento (VOIETSKA et al., 2019).

Ainda segundo Rokey et al. (2010), é essencial realizar a separação de partículas finas ou fragmentos gerados durante as etapas de secagem, recobrimento e resfriamento, que variam entre 3 e 5%. Esses resíduos podem ser reincorporados à mistura inicial antes da extrusão, garantindo aproveitamento total da matéria-prima.

3. METODOLOGIA

Este trabalho caracteriza-se como uma revisão bibliográfica sistemática apoiada em experiência prática em indústria. A revisão sistemática consiste em um método de pesquisa que busca identificar, analisar e sintetizar a produção científica existente sobre um determinado tema, no caso, o processo de extrusão termoplástica aplicado à fabricação de *pet food*. O objetivo da revisão foi mapear o estado da arte na busca das principais variáveis da extrusão e seus impactos no processo e no produto, permeando os avanços tecnológicos e os desafios ainda presentes na área.

A execução da revisão seguiu as seguintes etapas:

- a) *Delineamento da revisão e questão de pesquisa*: para guiar a busca e seleção do material, foi estabelecida a seguinte questão central de pesquisa: "Quais são os parâmetros de processo, as propriedades dos ingredientes e os impactos na qualidade final do produto no processo de extrusão termoplástica de *pet food*, conforme documentado na literatura científica?"
- b) *Estratégia de Busca e Fontes de Dados*: a fonte primária para a coleta de materiais científicos foi a plataforma Google Acadêmico (*Google Scholar*). A escolha dessa ferramenta deveu-se à sua ampla abrangência de bases de dados, indexação de periódicos de diversas editoras e acesso a teses, dissertações e artigos de conferências. Fontes secundárias foram o *Science Direct*, portal acadêmico da editoria *Elsevier* que reúne pesquisas de ponta nas áreas de Ciência de Alimentos e Engenharia de Processos, e o *Google Books*, ferramenta estratégica para localizar livros-texto e capítulos especializados que frequentemente contêm fundamentos teóricos consolidados, descrições detalhadas de equipamentos e visões abrangentes sobre tecnologia de extrusão que não são encontradas em artigos periódicos.
- c) *Palavras-chave*: as palavras-chave utilizadas nos buscadores foram: extrusão; ração; *pet*. Em inglês: *extrusion*; *pet food*; *feed*.
- d) *Triagem e extração de dados*: Seleção de textos por títulos e resumos e extração de dados por leitura integral.
- e) *Síntese e análise dos dados*: conteúdos agrupados e dados sintetizados nas seguintes categorias:
 1. Efeitos da composição da matéria-prima (teor de amido, proteína, fibra e gordura) no comportamento durante a extrusão;
 2. Efeitos dos parâmetros de extrusão na qualidade do produto e condições do

processo.

Somada à revisão bibliográfica, o trabalho inclui direta e indiretamente conhecimento técnico teórico e prático adquirido em fábrica de *pet food* através de estágio supervisionado, fundamental para análise crítica das informações coletadas na literatura. Noções do processamento e extrusão de *pet food* foram adquiridas por meio de acompanhamento da linha de produção e diálogo com operadores, material de treinamento teórico da empresa sobre extrusão de *dry pet food*, análise de procedimentos operacionais e técnicas de resolução de problemas de processo (*troubleshooting*), e análise de variação de parâmetros de processo em diferentes formulações. As ideias construídas sem referência bibliográfica estão relacionadas a estes conhecimentos obtidos, contextualizando a teoria da literatura com os desafios e tecnologia atual da indústria.

4. ANÁLISE DA EXTRUSÃO DE *PET FOOD*

Nesta seção será discutido como os fatores associados à composição das matérias-primas e condições de processamento afetam a operação de extrusão e a qualidade do produto acabado.

4.1. Composição e matérias-primas

O processamento de *pet food* na etapa de extrusão é altamente dependente da sua composição e matérias-primas. Diferentes teores de nutrientes impactam diretamente a reologia da massa e seu processo de cocção no canhão da extrusora. Amidos, proteínas, lipídios e fibras podem ter diferentes concentrações conforme o propósito da formulação e às necessidades nutricionais atendidas. Nielsen et al. (2025) revisaram e compararam estudos de extrusão de ração para *pets* e para peixes e encontraram as seguintes faixas aproximadas de macronutrientes em *pet food*: 33-42% carboidratos, 25-35% proteínas, 8-17% lipídios e 1-15% fibras. Segundo Rokey et al. (2010), o teor de amido, principal carboidrato presente, pode variar de 5 a 60%, proteína de 25 a 70%, gordura pode ultrapassar 30% em alguns produtos e fibras podem compor grande parte da composição de fórmulas para *pets* acima do peso ou fisicamente inativos.

A tabela 1 indica os principais ingredientes das formulações de *pet food* e suas contribuições à dieta. Carciofi (2016) aponta que as principais fontes de amido utilizadas no Brasil são milho e quirera de arroz. Arnaud et al. (2023) citam que as principais matérias-primas da indústria, em quantidade absoluta, são milho, trigo, arroz e farinhas de frango. Nielsen et al. (2025) indicam as seguintes médias de grupos de ingredientes encontrados nas 15 formulações de *pet food* revisadas: 28,3% à base de milho, 23,9% farinhas proteicas, 16,7% óleos e gorduras, 11,6% à base de soja, 5,8% à base de trigo, 5,8% diversos, 2,9% à base de peixe, 2,9% à base de arroz e 2,2% à base de batata.

Tabela 1. Ingredientes das formulações de *pet food* e suas contribuições à dieta

Termo descritivo	Exemplo	Contribuição à dieta
Carne	músculo, língua, diafragma, esôfago, coração	gordura animal, proteína, energia
Resíduos cárneos	pulmão, baço, rins, cérebro, sangue, intestino	gordura animal, proteína, energia
Farinha de carne	produtos desidratados	gordura animal, proteína, energia
Far. de carne e ossos	derivados de tecidos animais	
Far. de peixes		
Far. de sangue		
Cereais	milho, trigo, aveia, cevada, glutenose de milho	amido, proteína vegetal, energia e fibra
Farelo de soja	fonte vegetal de proteína	proteína vegetal
Farinha de soja	proteína vegetal texturizada	melhorador de textura
Gordura animal	sebo, gordura de aves	Gordura, ácidos graxos essenciais, energia, palatabilidade
Gordura vegetal	óleos de soja e milho	—
Ovo	ovo em pó	proteína de alto VB
Casca de grãos	farelos, fibras	fibra dietética
Resíduos agrícolas		—
Umectantes	açúcares, sais, glicerol	reduzir a disponibilidade de água, energia
“Digest”	fígado, intestino e vísceras hidrolisadas de aves e coelhos	aroma, paladar e alguma proteína e gordura
Conservantes	benzoato de sódio; sorbato de sódio e potássio	inibem o crescimento de fungos e bactérias
Flavorizantes / corantes / aromatizantes / vitaminas / minerais / antioxidantes		

Fonte: CARCIOFI, 2016

4.1.1. Efeito do amido

O amido contribui com três propósitos à fórmula: fonte de energia, coesão do *kibble* e palatabilidade. Durante cocção na extrusão o amido passa por um processo chamado gelatinização, fundamental para garantir a digestibilidade do carboidrato aos *pets* e a aglutinação dos ingredientes. A gelatinização do amido é um processo físico-químico que ocorre quando os grânulos de amido são aquecidos em presença de água. À medida que a temperatura aumenta, acima de 55°C, os grânulos absorvem água e incham, rompendo as ligações de hidrogênio que mantêm sua estrutura cristalina. Essa ruptura faz com que o amido perca sua organização interna e se torne amorfo, liberando parte da amilose para o meio aquoso,

o que aumenta a viscosidade da mistura (SOUZA & ANDRADE, 2000).

A viscosidade da massa, por sua vez, rege a queda de pressão, atrito e energia mecânica específica (SME) demandada no motor do canhão. Na matriz, governa a expansão do *kibble*. No canhão, o tempo de residência (KRISTIAWAN et al., 2019). O amido gelatinizado com alta umidade contribui para a expansão do *kibble*, tornando-o leve e poroso (ALVARENGA & ALDRICH, 2020). Amidos com maior teor de amilopectina tendem a promover maior expansão e textura mais macia, enquanto aqueles com mais amilose conferem estrutura mais firme. O grau de moagem também é determinante: partículas finas favorecem maior gelatinização e digestibilidade, enquanto moagem grossa pode manter parte do amido resistente, alterando a textura e até a resposta glicêmica do animal (OLIVEIRA, 2019).

Formulações com alto teor de amido requerem muita água no pré-condicionador para hidratar adequadamente a massa. O arroz é um destes exemplos, que é uma fonte de amido com tendência a aglutinar e grudar quando gelatinizado devido à alta viscosidade. Seus grânulos são pequenos e compactos (3-8 µm), difíceis de hidratar, com uma umidade requerida de 36-38% e temperatura de 75-85 °C para iniciar cozimento. Já o milho, por outro lado, necessita de 30-32% de umidade e 72-75 °C para iniciar cocção. A estratégia neste caso é diminuir a intensidade de mistura (velocidade dos eixos de mistura) do pré-condicionador para evitar o cozimento em excesso na extrusora, que pode gelatinizar o amido cedo demais no processo, aumentar demais a viscosidade da massa e gerar oscilações na carga do motor. Por outro lado, o milho fornece boa capacidade de expansão e é um bom elemento coesivo da massa, assim como a farinha de trigo e as tuberculosas.

4.1.2. Efeito das proteínas

Proteínas de origem vegetal, como soja e glúten de cereais, não tem todos os aminoácidos de que gatos e cães necessitam. Dessa forma, há a necessidade de inclusão de proteínas animais, como a farinha de vísceras de frango, que contribuem com um perfil completo destes aminoácidos chamados essenciais e que cães e gatos não produzem, como histidina, lisina e metionina. Segundo Rokey et al. (2010), as proteínas de origem animal não contribuem estruturalmente à extrusão, pois geralmente já estão desnaturadas devido ao seu alto grau de processamento térmico. Esta característica classifica-as como não funcionais – não solúveis em água e que não tem mais papel biológico ativo. Já as proteínas de origem vegetal são consideradas funcionais e solúveis em água, impactando fortemente nos aspectos estruturais da massa extrusada. Elas contribuem com a coesão e expansão do *kibble*, porém

necessitam de mais água para hidratação e cocção para evitar aglutinação da massa, assim como os amidos.

Nielsen et al. (2025) descreve que as proteínas são grandes contribuintes do caráter viscoelástico da massa, devido à desnaturação decorrente do calor e cisalhamento. Tal processo gera uma rede de moléculas interligadas que aumentam a viscosidade e elasticidade do meio, com a hidratação das proteínas e competição por água com o amido. Ahmad et al. (2019) avaliaram a viscosidade aparente de misturas proteicas com um reômetro capilar e encontraram maior viscosidade da massa com alto teor de proteína concentrada de soja, em comparação com massas com alto teor de proteína concentrada de peixe. Os autores também constataram que a mistura com proteína de soja obteve maior taxa de expansão e menor densidade e dureza, devido à transformação termomecânica incompleta.

Proteínas não funcionais já entram na extrusora desnaturadas, sem causar aumento da viscosidade de massa com o aumento de pressão e temperatura. Com isso, em formulações com alto teor destas proteínas o SME gerado é baixo e a gelatinização do amido pode ser comprometida. Uma estratégia para contornar este problema é a aplicação de energia mecânica, como o aumento da velocidade da rosca ou diminuição da vazão de alimentação, que aumenta o tempo de residência no canhão).

Proteínas funcionais são mais pegajosas e solúveis. Formulações ricas em proteínas vegetais, de tal forma, necessitam de maior hidratação. Porém, mais água no pré-condicionador significa maior risco de instabilidade do processo, ao gelatinizar o amido cedo demais. Para evitar este risco, utiliza-se menor intensidade de mistura no pré-condicionador.

4.1.3. Efeito dos lipídios

Dentro do canhão da extrusora, os lipídios atuam primariamente como agentes lubrificantes. A adição de gordura reveste o particulado e as superfícies metálicas, reduzindo o atrito interno e o cisalhamento. Este efeito resulta em uma diminuição da SME (kWh/ton) consumida pelo motor da extrusora (ILO et al., 2000). Consequentemente, a redução do cisalhamento leva a uma menor geração de calor por energia dissipativa, resultando em uma massa com temperatura e pressão internas mais baixas no momento da saída pela matriz. Entretanto, teores muito elevados de lipídios podem prejudicar o cozimento da massa.

Paralelamente, os lipídios interferem na hidratação e gelatinização do amido. A formação de complexos amilo-lipídios, especialmente a altas temperaturas altas e baixas umidades, inibe a expansão completa dos grânulos de amido, resultando em uma massa com

menor viscosidade aparente, menor capacidade de retenção de vapor de água e menor elasticidade (ROKEY et al., 2010; MERCIER *apud* ILO et al., 2000). O efeito cumulativo da lubrificação em excesso e da inibição da gelatinização é um prejuízo direto à expansão do grão. A expansão ótima depende da vaporização instantânea da água superaquecida quando a massa sai da matriz. Com uma massa menos viscosa e sob menor pressão, a força para expandir a estrutura celular é insuficiente, resultando em um produto mais denso e duro (HARPER & Clark, 1989).

A menor expansão do *kibble* também prejudica a absorção de gordura e palatabilizantes na etapa de recobrimento, onde é incluída a maior fração de lipídios. A menor porosidade dos grânulos, devido à evaporação *flash* reduzida, diminui a capacidade de penetração dos líquidos. Por outro lado, inclusões muito baixas de gordura implicam em um *kibble* muito expandido, crocante, mas quebradiço de baixa densidade (ILO et al., 2000).

Outro impacto de gorduras na qualidade do extrudado é a oxidação lipídica (rancificação). O processo de extrusão, com suas altas temperaturas, pode acelerar essa degradação se as gorduras não forem protegidas por antioxidantes. Um produto acabado com gordura oxidada torna-se não apenas impalatável, mas também prejudicial à saúde do animal. LIN et al. (1997) demonstrou que a adição de sebo bovino como fonte de gordura é menos prejudicial que o óleo de frango neste quesito: a gordura sólida derrete apenas na extrusora, onde tem efeito lubrificante, sem oxidar previamente. Além disso, segundo ROKEY et al. (2010), o impacto na expansão é mais proeminente em gorduras puras adicionadas, em comparação com lipídios presentes como componentes em certos ingredientes como soja, canola e outros grãos oleaginosos.

4.1.4. Efeito das fibras

As fibras dietéticas dividem-se em insolúveis e solúveis. As fibras insolúveis, como a celulose, atuam como partículas inertes dentro da extrusora, elevando a viscosidade aparente e o atrito, ao aumentar a resistência mecânica sem contribuir com elasticidade (NIELSEN et al., 2025). Tal fato pode contribuir com uma maior SME e carga do motor, além de impedir uma boa expansão do *kibble* sob um teor elevado do nutriente (acima de 15%). A celulose, por sua alta cristalinidade e resistência à gelatinização, fragmenta-se mecanicamente, mas suas partículas podem atuar como pontos de nucleação ou, em excesso, como descontinuidades que prejudicam a formação de uma matriz proteico-amilácea coesa e expansível e dão aspecto seco ao *kibble* (FRAME, 1999). Esta fragmentação mecânica também pode gerar excesso de finos

em etapas posteriores à extrusão, problema típico da indústria *pet food*.

Já as fibras solúveis, como as inulinas e pectinas, apresentam alta capacidade de absorção de água e solubilização sob calor e cisalhamento. Sua incorporação pode aumentar a viscosidade da massa, especialmente em condições de baixa fricção (NIELSEN et al., 2025), o que pode ser benéfico para melhorar a textura, mas, se não balanceada, pode limitar a expansão ao restringir a vaporização súbita da água na saída da matriz, resultando em produtos mais densos. Monti et al. (2016) estudou o impacto da inclusão de alto teor de fibras insolúveis (fibra de goiaba, cana-de-açúcar e farelo de trigo) na extrusão de ração para cães e concluiu que houve incremento da energia demandada, redução da gelatinização do amido (competição por água entre fibra e amido), menor expansão do produto e maior densidade e dureza. Donadelli et al. (2021) comparou a inclusão de miscanto, polpa de beterraba e celulose como fontes de fibra e avaliou que a SME foi maior com polpa de beterraba, com maior teor de fibras insolúveis que as outras duas. Ambos os estudos também concluíram que as características do *kibble* formado são fortemente dependentes do tipo e granulometria da fibra – quanto mais fino, menor impacto na extrusão.

Durante estágio, constatou-se que formulações com maior conteúdo de fibras requereram mais água no processamento. No caso das solúveis, devido à competição por hidratação com o amido e no caso das insolúveis, devido ao aumento de viscosidade da massa (e das solúveis também). A maior inclusão de água pode gerar problemas de aglutinação da massa e croquetes macios demais, implicando em distorções de formato (*kibbles* ovalizados ou chanfrados). Uma alternativa à expansão dificultada é a redução da área aberta da matriz ($<150 \text{ mm}^2/\text{T.h}$). Velocidades de rosca mais baixas são preferíveis para evitar atrito excessivo, uma vez que a SME gerada já é elevada.

A tabela 2 resume os principais macronutrientes e seus efeitos sobre as condições do processo e ao produto.

Tabela 2. Resumo dos macronutrientes e efeitos ao processo e produto

Macronutriente	Exemplos	Efeitos ao processo e produto
Amidos	Milho, arroz, trigo	Aumento da viscosidade (gelatinização do amido); Teor de amilopectina determina a expansão do <i>kibble</i>
Proteínas funcionais (vegetais)	Soja, glúten de cereais	Aumento da viscosidade (desnaturação das proteínas); Necessitam mais água
Proteínas não funcionais (animais)	Farinha de vísceras, farinha de sangue	Necessitam energia mecânica
Lipídios	Óleos de soja, gordura de frango	Redução da SME (lubrificação); Prejuízo à expansão (> 5%)
Fibras insolúveis	Celulose	Resistência à gelatinização, partículas inertes; Aumento da viscosidade (resistência mecânica); Fragmentação mecânica
Fibras solúveis	Polpa de beterraba, cana-de-açúcar, farelo de trigo	Competição por água: redução da gelatinização do amido; Necessitam mais água

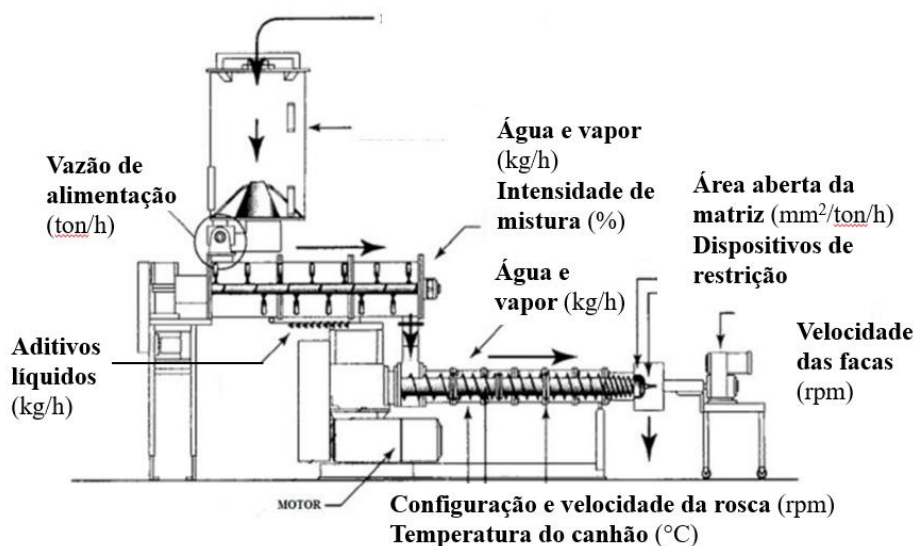
Fonte: Autoria própria

4.2. Efeitos dos parâmetros de processo

A figura 7 mostra as principais variáveis independentes na extrusora. Essas variáveis impactam as variáveis dependentes do processo e os parâmetros de qualidade do extrudado. As principais variáveis dependentes são a energia mecânica específica (SME) (kWh/ton); a energia térmica específica (STE) (kWh/ton); a pressão interna (bar); a temperatura na descarga do pré-condicionador (°C) e a carga do motor (A). Já os parâmetros de qualidade do extrudado são o formato e tamanho do *kibble*; a taxa de gelatinização; taxa de expansão; densidade aparente e específica e dureza. As próximas seções do texto descrevem as correlações das variáveis

independentes e dependentes na etapa de e os impactos na qualidade do extrudado.

Figura 7. Parâmetros independentes da extrusora



Fonte: Adaptado de MAGALHÃES, 2019

4.2.1. Umidade da massa

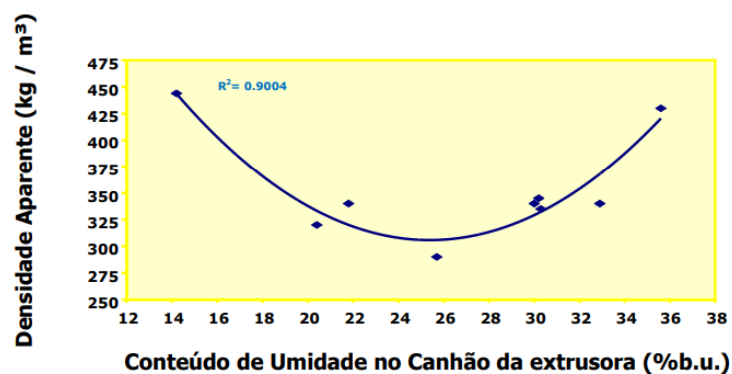
Os parâmetros de processo independentes que influenciam a umidade da massa são a vazão de água e vapor no pré-condicionador e na extrusora; inclusão de líquidos (gordura, óleos); inclusão de carne fresca e inclusão de resíduo extrudado reciclado. A água atua como um agente plastificante, diminuindo a viscosidade da massa e lubrificando sua passagem pela rosca. Pouca umidade pode gerar altas taxas de cisalhamento, aumentando o SME e a carga mecânica do motor. Por outro lado, muita umidade pode gerar textura inadequada do extrudado e instabilidades de processo. Valores típicos de umidade no conteúdo da massa são de 20 a 30% (NIELSEN et al., 2025).

O máximo de umidade que o vapor pode fornecer a massa no pré-condicionador é cerca de 7%. A gelatinização do amido e o pré-cozimento da massa devem iniciar com a hidratação da mistura nesta etapa, otimizando a extrusão ao demandar menor carga termomecânica para cocção no canhão (ROKEY et al., 2010). Como heurística de processo, utiliza-se a regra de inclusão de 80% de água e vapor no pré-condicionador e 20% na extrusora. A água fornece umidade, enquanto o vapor fornece fundamentalmente energia térmica.

Baller et al. (2018) avaliaram a alteração de propriedades físicas e químicas do extrudado com a variação da umidade na extrusão de ração para gatos. Os autores identificaram

uma redução quadrática para a densidade aparente, com um ponto mínimo em 286 g/kg de umidade. Um incremento quadrático também foi observado para a taxa de expansão radial e de comprimento, com maiores valores entre 280 e 320 g/kg. Já a SME, a temperatura e pressão na matriz reduziram com o aumento da inclusão de água. Estes resultados confirmam a teoria de que a água é um agente plastificante da massa, reduzindo o atrito na rosca da extrusora e, conseqüentemente, a carga termomecânica. A figura 8 ilustra o comportamento da densidade aparente com variação da umidade e corrobora com os resultados encontrados pelos autores. Os autores também mencionam que a taxa de gelatinização do amido é estável para valores até 350 g/kg de água e, acima disso, é decrescente. Os resultados demonstram que uma menor densidade aparente do *kibble* significa um cozimento otimizado e maior expansão, com valores muito altos de umidade podendo prejudicar a cocção.

Figura 8. Relação entre umidade acumulada no canhão e densidade aparente do extrudado

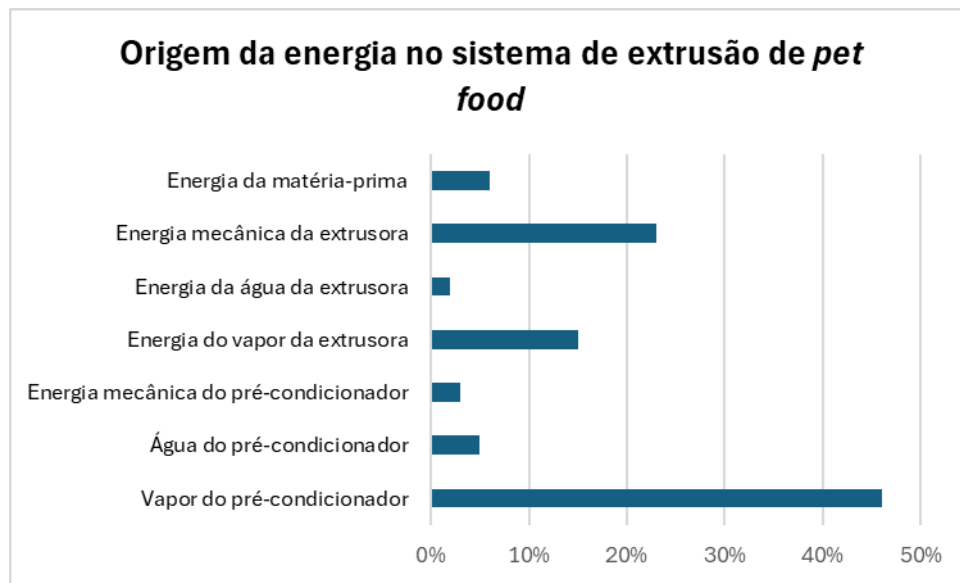


Fonte: CARCIOFI, 2016

4.2.2. Carga térmica

A energia térmica específica (STE) do sistema é gerada fundamentalmente pela vazão de água e pelo vapor no pré-condicionador e canhão. A figura 9 mostra a origem da energia no sistema de extrusão. Segundo Carciofi (2016), 46% da energia é gerada pelo vapor adicionado diretamente à massa no pré-condicionador. O vapor no canhão também tem impacto significativo, de 15%, e a água aquecida tem impacto total de 7%.

Figura 9. Origem da energia no sistema de extrusão de *pet food*



Fonte: Adaptado de CARCIOFI, 2016

Pacheco et al. (2018) e Baller et al. (2021) avaliaram o impacto da aplicação de energia térmica na extrusão de *pet food*. Pacheco et al. (2018) analisaram parâmetros de processo e qualidade do produto acabado variando a injeção de vapor no pré-condicionador a fim de obter seis cargas de STE distintas, medidas a partir da temperatura de descarga da massa no pré-condicionador (45°C, 55°C, 65°C, 75°C, 85°C e 95°C). Os parâmetros mecânicos de todas as seis extrusões foram os mesmos: velocidade do eixo de mistura do pré-condicionador de 45,5 rpm, velocidade da rosca de 643 rpm e velocidade das facas de 1026 rpm (mesma extrusora, rosca simples). Constatou-se uma redução quadrática da SME demandada com aumento de STE e um aumento linear da energia específica total (TSE). O aumento de STE implicou também em uma maior taxa de gelatinização do amido (após secagem) e expansão do *kibble*, além de menor dureza. Baller et al. (2021) replicou o experimento na mesma extrusora com leves alterações nas condições mecânicas do processo (velocidade do eixo de mistura do pré-condicionador de 46,2 rpm, velocidade da rosca de 643 rpm e velocidade das facas de 1656 rpm) para uma diferente formulação. Obtiveram resultados semelhantes de SME e TSE com o aumento de STE, somados a uma redução da carga do motor e pressão da massa antes da matriz, além de correlações similares para a taxa de gelatinização do amido e expansão do *kibble*. Rokey et al. (2010) também afirmaram que maiores temperaturas da massa na descarga do pré-condicionador são favoráveis à otimização do processo, sendo a faixa ideal entre 70 e 90°C.

A taxa de cozimento da massa também é influenciada pela velocidade dos eixos de

mistura do pré-condicionador. A intensidade da mistura atua diretamente sobre o grau de hidratação, dispersão térmica e pré-gelatinização da massa. Em equipamentos modernos, tecnologias como o sistema HIP (Pré-condicionador de alta intensidade) permitem separar as funções de mistura e transporte por meio de dois eixos independentes: um dedicado à agitação vigorosa para maximizar a transferência de calor e umidade, e outro responsável por modular o tempo de residência, garantindo maior controle do ponto de cozimento antes da entrada no canhão. Essa capacidade de ajustar simultaneamente intensidade de mistura e retenção melhora a uniformidade térmica, reduz a energia mecânica requerida no processo e otimiza a qualidade física do extrudado (JOSEPH, 2021; ROKEY et al., 2010). O estudo de Chaabani et al.. (2022) confirma esses princípios ao demonstrar que intensidades altas de mistura no pré-condicionador aumentam a eficiência de pré-cozimento e favorecem a gelatinização completa no canhão.

As extrusoras podem conter camisas para controle de temperatura nas diferentes zonas. Podem ser utilizados fluidos de aquecimento ou arrefecimento como água, vapor e óleo ou até mesmo aquecimento elétrico direto em algumas regiões do canhão. A evolução da temperatura na rosca é fundamental para o controle e estabilidade da extrusão, e a temperatura da matriz é um dos pontos críticos de controle (PCC) do processo, responsável pela eliminação de patógenos como a *Salmonella*. No caso de ração seca para cães e gatos, a faixa de temperatura final é 140°C a 160°C (PEIN, 2025; TRAN, 2008).

As condições severas de temperatura, umidade e cisalhamento na extrusão podem degradar vitaminas termolábeis, especialmente as do complexo B, vitamina A e vitamina E. Conforme descrito por Harper & Clark (1979), a combinação de calor úmido e energia mecânica acelera reações de oxidação e decomposição, reduzindo a atividade biológica desses micronutrientes. Rokey et al.. (2010) reforçam que, embora o pré-condicionamento e a extrusão sejam essenciais para melhorar digestibilidade, gelatinização do amido e segurança microbiológica, esses estágios também criam um ambiente propenso à perda vitamínica. Para mitigar tais efeitos, a indústria adota estratégias como a superfortificação (adicionar níveis mais altos para compensar perdas), o uso de vitaminas encapsuladas ou de formas mais estáveis (como acetatos ou palmitatos), além da aplicação dos nutrientes na etapa de recobrimento.

4.2.3. Carga mecânica

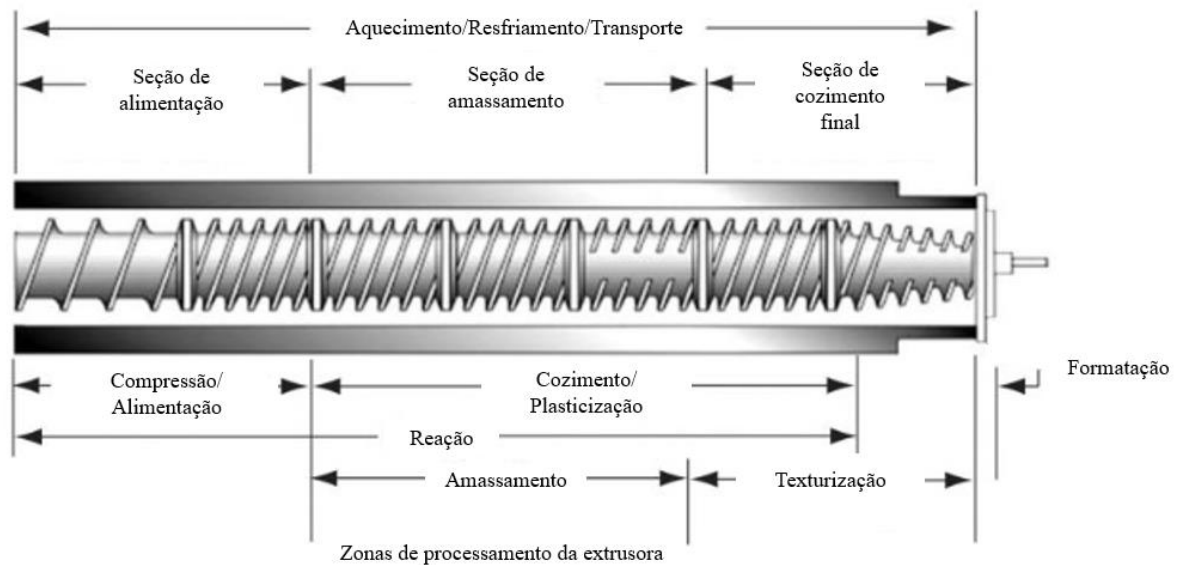
A maior fração de energia mecânica aplicada ao processo está no canhão, como revelado por Carciofi (2016) na figura 9. As principais variáveis independentes que impactam

na SME são a configuração e velocidade da rosca, o *Back Pressure Valve* (BPV) e a configuração da matriz (destacada na seção 4.2.4).

As extrusoras na indústria *pet food* podem ser tanto do tipo simples quanto dupla. As extrusoras de rosca simples são compostas por apenas uma rosca helicoidal, enquanto as duplas são compostas por duas roscas no mesmo canhão, que podem ser co-rotativas ou contra-rotativas, sobrepostas ou não sobrepostas. A rosca simples opera por arrasto, dependente do atrito contra o cilindro, o que a torna sensível a variações na composição da fórmula e ao desgaste da rosca, resultando em menor homogeneidade do produto e menor flexibilidade para formulações complexas. Em contraste, a de rosca dupla atua como uma bomba de deslocamento positivo, garantindo vazão constante e independente da pressão no molde, com excelente capacidade de mistura devido à interação das roscas e elementos modulares. Isso permite processar uma ampla gama de ingredientes, assegura maior uniformidade no cozimento e textura, e mantém a estabilidade operacional mesmo com o desgaste mecânico. São úteis no processamento de extrudados com inclusão de carne fresca, umidade da massa alta (até 80%), além de altos teores de gordura, proteína e fibras. As extrusoras de rosca dupla são comuns na extrusão de ração para peixes, em que as formulações contêm maior teor de proteína e gordura e menor teor de amido e, consequentemente, necessitam maior aplicação de energia mecânica. Na indústria de *pet food*, todavia, devido ao maior teor de amido e menor viscosidade da massa fluidizada, os valores de SME são mais baixos e a extrusora mais comum é a de rosca simples (BOUVIER, 2010; NIELSEN et al., 2025).

As extrusoras são compostas de múltiplos segmentos com configuração de rosca variante. A figura 10 ilustra as seções de alimentação, amassamento e cozimento final. O exemplo da figura é composto de 6 segmentos de rosca, mais o segmento na matriz. Em cada partição de segmento, há um dispositivo de restrição de abertura (*shear locks*), que atuam aumentando a pressão interna e, consequentemente, o cozimento. O primeiro segmento é de filete helicoidal único e grande, para facilitar o transporte do produto. É importante que o fluxo de produto seja contínuo na etapa inicial do canhão para não acumular produto na entrada e sobrecarregar a extrusora. O segundo, terceiro, quarto e sexto segmentos são de helicoide duplo, que aumenta o tempo de residência da massa na rosca e favorecem o cozimento. O quinto segmento tem filete da rosca cortado, para aumentar a mistura, o atrito e a cocção. Por fim, a zona da matriz tem rosca cônica e filete cortado e raso, com máximo atrito e restrição do produto, gerando alta pressão e direcionando a massa para a matriz (RIAZ & ROKEY, 2012).

Figura 10. Perfil de extrusora de rosca simples com 6 zonas e matriz



Fonte: Adaptado de RIAZ & ROKEY, 2012

Em extrusoras de rosca simples o transporte do material ao longo do canhão resulta da interação entre dois mecanismos principais de escoamento: fluxo de arraste e fluxo de contrapressão. O fluxo de arraste é o fluxo induzido pelo movimento rotacional da rosca, cujo filete helicoidal arrasta o material em direção à matriz. Sua magnitude depende da velocidade de rotação, da geometria do canal e das propriedades reológicas da massa. Já o fluxo de contrapressão é gerado pelo gradiente de pressão estabelecido pelas regiões próximas à matriz, de alta pressão, e tende a deslocar o material no sentido oposto ao arraste. O fluxo volumétrico efetivo é determinado pela diferença entre esses dois componentes, o que torna o balanço entre arraste e pressão fundamental para controlar a taxa de produção, o cisalhamento, a retenção térmica e, consequentemente, o grau de cozimento e a expansão do produto extrudado (HARPER & CLARK, 1979; BOUVIER, 2010).

O aumento da velocidade da rosca eleva simultaneamente o cisalhamento e a pressão interna do sistema, ampliando a SME transmitida ao material. Embora uma rotação maior tenda a aumentar o fluxo de arraste, a presença de restrições na rosca impede que a vazão aumente proporcionalmente, forçando a extrusora a operar com pressões mais elevadas. Esse aumento de pressão intensifica o fluxo de contrapressão e exige maior torque para manter a rotação, enquanto o cisalhamento mais intenso entre rosca, canhão e massa aumenta a dissipação viscosa e, portanto, o aquecimento, plastificação e cozimento da massa (RIAZ & ROKEY,

2012; HARPER & CLARK, 1979).

O *Back Pressure Valve* (BPV) é um dispositivo patenteado pela Wenger Manufacturing que proporciona controle de contrapressão no canhão da extrusora, posicionado imediatamente antes da matriz. Esse mecanismo permite ajustar dinamicamente a restrição ao escoamento do produto, regulando a pressão interna, o cisalhamento e a SME. Durante o arranque ou encerramento da produção, o BPV pode desviar o produto que ainda não atingiu a temperatura crítica (PCC). Em operação normal, possibilita ajustes da SME em tempo real sem depender da característica da matriz, Isso compensa variações na receita ou no processo, mantendo outros parâmetros já estáveis inalterados e sem a necessidade de alterar a configuração da rosca (ROKEY et al., 2010; WENGER MANUFACTURING). Durante o estágio, observou-se a grande utilidade do BPV para controle da densidade do extrudado, com maior ou menor energia mecânica ao variar sua abertura. Sua grande vantagem se dá na não necessidade de alteração de nenhuma configuração de rosca, matriz ou parâmetro para regular a SME, tornando muito mais fácil o atingimento deste indicador de qualidade.

4.2.4. Matriz e dispositivos

A matriz desempenha papel central na formação, estruturação e estabilidade física do *kibble*, funcionando como o elemento final de restrição que converte a massa cozida em produto com formato, densidade e textura definidos. A matriz controla a pressão interna da extrusora (sem restrição do BPV), influenciando diretamente o grau de cozimento e a SME. A resistência imposta pela matriz determina a taxa de cisalhamento e a intensidade de expansão ao sair para a atmosfera, afetando propriedades como porosidade, dureza e absorção de gordura durante o recobrimento (ROKEY et al., 2010). A geometria dos furos determina o formato do extrudado e sua área aberta (tamanho e números de orifícios) controla a pressão na placa. Menor área aberta significa maior energia mecânica. Uma restrição excessiva aumenta o torque e o consumo de energia, reduzindo a eficiência energética e a produtividade, enquanto uma restrição insuficiente reduz a qualidade da estrutura do extrudado, aumenta sua densidade e não aproveita a capacidade do motor para a cocção completa (RIAZ & ROKEY, 2012). A figura 11(a) ilustra exemplos de matrizes com diferentes formatos de orifícios.

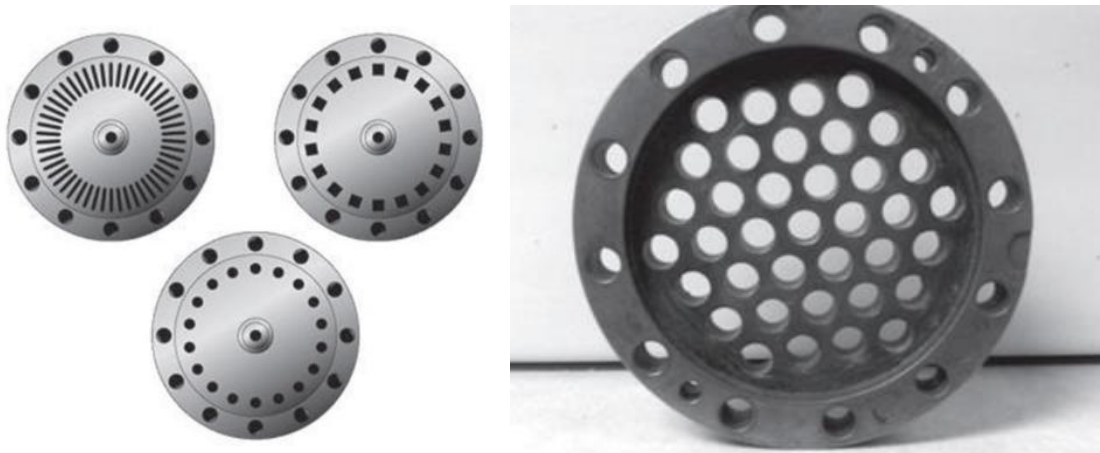
Um grande desafio enfrentado na indústria atualmente é o entupimento da matriz. Altamente influenciado pelo DGM do farelo extrudado, os furos da matriz podem ter maior ou menor tendência de entupimento a depender de sua geometria e tamanho. Carciofi (2016) aponta que a redução do DGM tem impacto na redução de incidência dos orifícios tapados,

fato também observado durante estágio quando se constatou ineficiência dos moinhos em obter o DGM correto devido a desgastes nos martelos.

Harper & Clark (1979) destacam também que o acabamento superficial (polimento) dos elementos metálicos da placa modifica a dinâmica de fluxo e o estado térmico podendo promover expansão elevada ou, ao contrário, densidade elevada. Riaz & Rokey (2012) ressaltam que problemas comuns de processo como instabilidade na forma, variação de densidade e desgaste acelerado estão frequentemente associados à seleção inadequada da matriz e área aberta, ressaltando a importância da escolha da placa e área aberta. Além disso, a extensão do comprimento efetivo do orifício afeta diretamente a qualidade superficial e a susceptibilidade a fissuras do produto extrudado, como estudado por Sokhey et al., 1997. Orifícios mais longos e com acabamento apropriado tendem a produzir superfícies mais lisas e extrudados menos propensos a falhas, além de maior taxa de expansão longitudinal.

A figura 11(b) ilustra as chamadas placas de restrição (*breaker plate*), que podem se encontrar entre o final da rosca e a matriz. Conforme descrito por Harper & Clark (1979), a função primária deste componente é atuar como uma barreira que cria uma súbita restrição ao fluxo do material plastificado. Também chamados de expansores, estas placas contêm orifícios de variados diâmetros e quantidades, permitindo a aplicação de diferentes SME. Essa restrição pode ser indispensável para a geração do gradiente de pressão necessário para impulsionar a massa através dos orifícios da matriz, principalmente em formulações que necessitam energia mecânica adicional, assegurando a expansão adequada do produto. Além da pressurização, a passagem forçada da massa através dos múltiplos furos da placa de restrição promove uma homogeneização final, quebrando aglomerados remanescentes e distribuindo de modo uniforme a umidade, temperatura e viscosidade. Este processo é vital para garantir uma gelatinização do amido consistente e uma textura uniforme em cada partícula de *pet food*, além de estabilizar o motor do canhão (RIAZ & ROKEY, 2012). Na indústria, é comum a utilização dos expansores com área aberta maior que 8 mm para controle e estabilidade da carga do motor, enquanto expansores com área menor são úteis para aplicação de energia mecânica adicional.

Figura 11. Dispositivos da extrusora: (a) Matrizes; (b) Placa de restrição



Fonte: RIAZ & ROKEY, 2012

Outro dispositivo presente na seção final do canhão é a placa difusora (*diffuser/choke plate*). Imediatamente anterior à matriz e frequentemente integrada a ela como suporte ou em conjunto com a placa de restrição (que pode estar presente ou não), a placa difusora tem função de redistribuir o fluxo que emerge da placa de restrição, orientando-o de maneira uniforme por toda área aberta da matriz. Uma distribuição inadequada do fluxo resulta em disparidades de pressão entre os diferentes orifícios da matriz, causando variações inaceitáveis na taxa de extrusão, na expansão do produto e, conseqüentemente, na sua densidade final. Assim, o desenho interno desta placa é calculado para minimizar pontos mortos onde o material poderia estagnar e degradar termicamente, contaminando o produto e comprometendo sua segurança microbiológica (RIAZ & ROKEY, 2012; HARPER & CLARK, 1979).

Por fim, o sistema de corte instalado na saída da matriz desempenha papel fundamental na formação do *pellet* extrudado, influenciando tanto a estabilidade do processo quanto os atributos físicos do produto acabado. De acordo com Riaz & Rokey (2012), o corte adequado depende da interação entre a velocidade angular do conjunto de facas, o número de lâminas, o ângulo de ataque e a distância entre as facas e a superfície da matriz. Esses parâmetros determinam a frequência de corte e o padrão de cisalhamento aplicado ao extrudado imediatamente após a expansão. A figura 12 ilustra o sistema de corte.

A velocidade de corte é um dos fatores mais críticos: velocidades mais elevadas resultam em *kibbles* mais curtos e melhor uniformidade dimensional, além de promover um corte mais limpo devido ao menor tempo em que o material permanece parcialmente expandido antes de ser separado. O corte precoce reduz deformações estruturais associadas à expansão

descontrolada na saída da matriz, diminuindo a formação de caudas e irregularidades superficiais. Em contrapartida, velocidades muito baixas tendem a gerar *kibbles* mais longos, maiores diferenças de comprimento e maior incidência de bordas irregulares (GUY, 2001).

Foi observado em estágio que o número de lâminas influencia a qualidade do corte. Conjuntos com mais facas aumentam a frequência de corte e reduzem o esforço por lâmina, proporcionando superfícies mais homogêneas, melhor integridade do *kibble* e menor geração de finos. A velocidade das facas deve estar entre 800 e 1500 rpm e a quantidade de lâminas deve ser ajustada para tal. A quantidade de lâminas tem impacto na dimensão de profundidade do extrudado e tendência de ovalização e chanfro dos *kibbles*, além de sua maciez e velocidade ao sair da matriz.

Constatou-se também que a distância entre facas e matriz é outro ajuste essencial. Uma folga muito pequena causa atrito elevado, aquecimento localizado e desgaste acelerado da matriz e das lâminas. Por outro lado, uma distância excessiva produz corte impreciso, alongamento indesejado e maior taxa de finos durante transporte e secagem.

A tabela 3 resume os principais parâmetros operacionais da extrusão e seus efeitos sobre o processo e extrudado.

Figura 12. Sistema de corte da extrusão



Fonte: CARCIOFI, 2016

Tabela 3. Resumo dos parâmetros operacionais e efeitos ao processo e produto

Parâmetro na extrusão	Principais variáveis relacionadas	Principais efeitos se em falta	Principais efeitos se em excesso
Umidade	Água (pré-condicionador e extrusora)	Alta viscosidade (alto SME e carga); Alta densidade; Baixa expansão	Baixa viscosidade (baixo SME e carga); Alta densidade; Baixa expansão
Energia térmica	Água quente e vapor (pré-condicionador e extrusora)	Baixa taxa de gelatinização; Temperatura da matriz baixa (risco microbiológico)	Gelatinização cedo demais (oscilações na carga)
Energia mecânica (extrusora e matriz)	Área aberta da matriz; configuração e velocidade da rosca; BPV e expansores	Baixa taxa de gelatinização; Temperatura da matriz baixa; Alta densidade; Baixa expansão	Carga e pressão interna alta; Baixa densidade; Alta expansão

Fonte: Autoria própria

5. CONCLUSÕES

Por meio de revisão bibliográfica, compilação dos dados e síntese das informações, o presente trabalho reuniu os aspectos mais importantes da extrusão termoplástica de *pet food* disponíveis na literatura. O conhecimento prático da indústria por meio de experiência em estágio supervisionado em fábrica de alimentos secos para cães e gatos proporcionou visão crítica dos dados apresentados, adição de informações e contextualização com a operação real de extrusão de *pet food*.

Conclui-se que a extrusão não é uma operação isolada, mas um sistema complexo influenciado diretamente pelas etapas precedentes, como a moagem e a mistura. A revisão evidenciou que a granulometria das matérias-primas e a homogeneidade da mistura são cruciais para a estabilidade do processo e a qualidade final do *kibble*, impactando desde a digestibilidade até a aparência do produto.

Relativo às matérias-primas, destaca-se que a composição bioquímica tem alto impacto no comportamento reológico da massa na extrusão. O amido desempenha papel estrutural central através da gelatinização e expansão, enquanto as proteínas, dependendo de sua origem (animal ou vegetal) e funcionalidade, alteram significativamente a viscosidade e a demanda de energia mecânica. Identificou-se também que lipídios atuam como lubrificantes, reduzindo o atrito, mas podem prejudicar a expansão se em excesso, . Ainda, as fibras, insolúveis ou solúveis, modificam a textura e a densidade do extrudado, além de demandarem mais água no processamento.

Quanto aos parâmetros operacionais, ficou evidente a importância da inter-relação entre Energia Térmica Específica (STE) e Energia Mecânica Específica (SME). A adição correta de água e vapor no pré-condicionador atua na plastificação da massa, reduzindo a carga motora e permitindo um cozimento mais eficiente através da energia térmica, o que preserva a qualidade nutricional e a integridade dos equipamentos. A configuração física da extrusora mostrou-se determinante para o controle da pressão e cisalhamento, importante para o cozimento do produto. Por fim, a configuração da matriz e seus dispositivos e sistema de corte são os responsáveis pela aplicação final de energia mecânica e formatação do extrudado, fundamentais na determinação de parâmetros de qualidade como expansão, dimensões do *kibble* e gelatinização do amido, além de configurarem-se como importante elemento de controle da carga do motor através da modulação da energia mecânica do processo.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, R.; OTERHALS, Å.; XUE, Y.; SKODVIN, T.; SAMUELSEN, T. A. **Impact of fish protein concentrate on apparent viscosity and physical properties of soy protein concentrate subjected to thermomechanical treatment**. Journal of Food Engineering, v. 259, p. 34-43, 2019.
- ALLTECH. **Agri-Food Outlook 2025**. Alltech, 2025. Disponível em: <https://www.alltech.com/agri-food-outlook/results>. Acesso em: 11/out/2025.
- ALVARENGA, I. C.; ALDRICH, C. G. **Starch characterization of commercial extruded dry pet foods**. Translational Animal Science, v. 4, n. 2, p. 1017–1022, 2020.
- ARNAUD, W. M. R.; OLIVEIRA, E. L.; LOUREIRO, B. A.; VASCONCELOS, J. S.; BARROSO, L. M. F.; SOUZA, A. P. **Composição nutricional dos alimentos industrializados, caseiros e veganos para cães e gatos: uma revisão sistemática**. Research, Society and Development, v. 12, n. 13, e115121344150, 2023.
- BALLER, M. A. **Aplicação de energia termomecânica na formação dos kibbles, palatabilidade, digestibilidade e retenção de nutrientes em alimentos extrudados para cães e gatos**. 2020. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Jaboticabal, 2020.
- BALLER, M. A.; PACHECO, P. D. G.; PERES, F. M.; MONTI, M.; CARCIOFI, A. C. **The effects of in-barrel moisture on extrusion parameters, kibble macrostructure, starch gelatinization, and palatability of a cat food**. Animal Feed Science and Technology, v. 246, p. 82-90, 2018.
- BALLER, M. A.; PACHECO, P. D. G.; VITTATAKAHASHI, A.; PUTAROV, T. C.; VASCONCELLOS, R. S.; CARCIOFI, A. C. **Effects of thermal energy on extrusion characteristics, digestibility and palatability of a dry pet food for cats**. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, v. 105, n. S1, p. 7690, 2021.
- BAZOLLI, R. S. **Influência do grau de moagem de ingredientes amiláceos utilizados em rações extrusadas sobre os aspectos digestivos e respostas metabólicas em cães**. 2007. 82 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP. Jaboticabal – SP. 2007.
- BOUVIER, J. M. **Twin screw versus single screw in feed extrusion processing**. Extrusion technology in feed and food processing. Disponível em: <https://cabidigitallibrary.org>. Acesso em: 20/nov/2025.
- BRENNAN, J. G. **Food processing handbook**. 1. ed. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006. 912 p.
- CARCIOFI, A. C. **Extrusão termoplástica de alimentos para cães e gatos**. Departamento de Clínica e Cirurgia Veterinária, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP – Campus de Jaboticabal, 2016. Disponível em: <https://www.fcav.unesp.br/Home/departamentos/clinicav/AULUSCAVALIERICARCIOFI/processamento-extrusao-ncg-2016.pdf>. Acesso em: 4/set/2025.
- CHAABANI, A.; LABONNE, L.; DURRIEU, V.; ROUILLY, A.; SKIBA, F.; EVON, P. **Preconditioner influence on twin-screw extrusion cooking of starch-based feed pellets: The example of Fish Feed**. Aquacultural Engineering, v. 98, p. 102268, ago. 2022.

COSTA, F. J. **Estudo dos parâmetros de secagem de produtos pet food**. 2015. 27 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

DONADELLI, R. A.; DOGAN, H.; ALDRICH, G. **The effects of fiber source on extrusion parameters and kibble structure of dry dog foods**. *Animal Feed Science and Technology*, v. 274, p. 114884, 2021.

FRAME, N. D. **Technology of Extrusion Cooking**. New York: Springer Science & Business Media, 1999. P67. P169 -171, 1999.

FUCILLINI, D. G.; VEIGA, C. H. A. **Controle da capacidade produtiva de uma fábrica de rações e concentrados: um estudo de caso**. 2014. 20 f. Custos e @gronegocio on line - v. 10, n. 4 – Out/Dez - 2014.

GUY, R. **Extrusion Cooking: Technologies and Applications**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2001.

HARPER, J. M.; CLARK, J. P. **Food extrusion**. *CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, v. 11, n. 2, p. 155-215, 1979.

ILO, S.; SCHOENLECHNER, R.; BERGHOFEN, E. **Role of lipids in the extrusion cooking processes**. *Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)*, v. 51, n. 1-2, p. 97–110, 2000.

KOCH, K. B. **Hammermills and Roller Mills**. Engormix, 17 jul. 2020. Disponível em: https://en.engormix.com/feed-machinery/feed-mills/hammermills-roller-mills_a45538/. Acesso em: 12/out/2025.

KRISTIAWAN, M.; et al. **Validation and use for product optimization of a phenomenological model for the volumetric and radial expansion indices and anisotropy factor of extruded starch**. *Journal of Food Engineering*, v. 261, p. 123–133, 2019.

LIN, S.; HSIEH, F.; HUFF, H. E. **Effects of lipids and processing conditions on lipid oxidation of extruded dry pet food during storage**. *Animal Feed Science and Technology*, v. 71, p. 283–294, 1998.

MAGALHÃES, C. C. **Parâmetros operacionais do processo de extrusão termoplástica para a produção de rações secas para animais**. 2019. 41f. Trabalho de Conclusão de Curso 48 - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal/RN, 2019.

MERENDA, M. E. Z. **Fatores relacionados ao processamento de pet food que afetam a qualidade e estrutura conformacional do produto acabado**. 2021. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2021.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. **Projeção 1º tri/25 – setor pet**. Brasília: MAPA, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-setoriais/animais-e-estimacao/2025/43a-ro-15-07-2025/release->

projecao1tri25-setor-pet.pdf. Acesso em: 12/nov/2025.

MONTI, M.; GIBSON, M.; LOUREIRO, B. A.; SÁ, F. C.; PUTAROV, T. C.; VILLAYERDE, C.; ALAVI, S.; CARCIOFI, A. C. **Influence of dietary fiber on macrostructure and processing traits of extruded dog foods**. *Animal Feed Science and Technology*, v. 220, p. 93-102, 2016.

MORELLI, G.; STEFANUTTI, D.; RICCI, R. **A survey among dog and cat owners on pet food storage and preservation in the households**. *Animals*, v. 11, n. 2, p. 273, 2021.

MOSCICKI, L. **Extrusion-cooking techniques: applications, theory and sustainability**. 1. ed. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2011. 234 p.

NIELSEN, M. K.; NIELSEN, S. K.; TAMBO, T. **A quantitative modeling perspective on extrusion processing of aquafeed & pet food**. *Food and Bioproducts Processing*, v. 153, p. 500-520, 2025.

PACHECO, P. D. G.; PUTAROV, T. C.; BALLER, M. A.; PERES, F. M.; LOUREIRO, B. A.; CARCIOFI, A. C. **Thermal energy application on extrusion and nutritional characteristics of dog foods**. *Animal Feed Science and Technology*, v. 243, p. 52-63, 2018.

RIAZ, M. N.; ROKEY, G. J. **Extrusion Problems Solved: Food, Pet food and Feed**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012.

ROKEY, G. J.; PLATTNER, B.; DE SOUZA, E. M. **Descrição do processo de extrusão do alimento**. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 39, n. 4, p. 655-663, 2010.

SILVA, P. S. M. **Processo produtivo e boas práticas de fábrica de ração**. 2022. 62f. Trabalho de curso – Graduação em Bacharelado em Zootecnia, Instituto Federal Goiano. Ceres - GO, 2022.

SOKHEY, A. S.; ALI, Y.; HANNA, M. A. **Effects of die dimensions on extruder performance**. *Journal of Food Engineering*, v. 31, n. 2, p. 251-261, fev. 1997.

SONG, P. **Pet food extruder temperature and pressure range explained**. *PetreatsMachine*, 2 abr. 2025. Disponível em: <https://petreatsmachine.com/pet-food-extruder-temperature-pressure-range/>. Acesso em: 15 nov. 2025.

SOUZA, R. C. R.; ANDRADE, C. T. **Investigação dos processos de gelatinização e extrusão de amido de milho**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 10, n. 1, p. 26-32, mar. 2000.

SPEARS, J. K.; FAHEY, G. C. **Resistant starch as related to companion animal nutrition**. *Journal of AOAC International*, v. 87, p. 787-791, 2004.

TRAN, D. Q. **Extrusion processing: effects on dry canine diets**. 2008. Proefschrift (Tese de PHD) – Wageningen University and Research Centre, Wageningen, The Netherlands.

TRUSTAR Pharma Pack Equipment Co., Ltd. *O princípio de funcionamento dos moinhos de martelo (Guia passo-a-passo)*. Ruian, China, 30 jul. 2019. Disponível em: <https://pt.trustarpack.com/info/the-working-principle-of-hammer-mills-step-by-37619463.html>. Acesso em 01/12/2025

VOIETSKA, O.; BORDUN, T.; TSIUNDYK, O. **Practical foundations of the production of pet food**. Grain Products and Mixed Fodder's, v. 19, n. 4, p. 37-45, 2020. Disponível em: <https://journals.ontu.edu.ua/index.php/gpmf/article/view/1591/1797>. Acesso em: 1/out/2025.

WENGER MANUFACTURING. **Back Pressure Valve (BPV)**. Disponível em: <https://wenger.com/extruders-dryers/upgrades/back-pressure-valve-bpv>. Acesso em: 22 nov. 2025.

YEMMAK. **Automatic moisture control for perfect pet food**. Yemmak, s.d. Disponível em: <https://www.yemmak.com/en/automatic-moisture-control-for-perfect-pet-food>. Acesso em: 2/out/2025.