UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA

NATHALIA DE OLIVEIRA TELESCA CAMARGO

VALIDAÇÃO DE UM SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE PRECISÃO PARA SUÍNOS EM CRESCIMENTO-TERMINAÇÃO UTILIZANDO ROBÔS ALIMENTADORES

PORTO ALEGRE
2025

NATHALIA DE OLIVEIRA TELESCA CAMARGO

VALIDAÇÃO DE UM SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE PRECISÃO PARA SUÍNOS EM CRESCIMENTO-TERMINAÇÃO UTILIZANDO ROBÔS ALIMENTADORES

Tese apresentada como requisito para obtenção do grau de doutor em Zootecnia, na Faculdade de Agronomia, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Drª. Ines Andretta

PORTO ALEGRE
2025

CIP - Catalogação na Publicação

Camargo, Nathalia de Oliveira Telesca
VALIDAÇÃO DE UM SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE PRECISÃO PARA SUÍNOS EM CRESCIMENTO-TERMINAÇÃO UTILIZANDO ROBÔS ALIMENTADORES / Nathalia de Oliveira Telesca Camargo. -- 2025.
96 f.
Orientadora: Ines Andretta.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Porto Alegre, BR-RS, 2025.

1. Suinocultura. 2. Nutrição de precisão. 3. Impacto ambiental. 4. Utilização de nutrientes. 5. Inteligência artificial. I. Andretta, Ines, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Nathalia de Oliveira Telesca Camargo
Mestre Zootecnia

TESE

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

DOUTORA EM ZOOTECNIA

Programa de Pós-Graduação em Zootecnia
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovada em: 14.08.2025
Pela Banca Examinadora

Homologado em: 09/09/2025
Por

Ines Andretta

INES ANDRETTA
PPG Zootecnia/UFRGS
Orientadora

Ines Andretta Assinado de forma digital por Ines Andretta Dados: 2025.09.10 11:07:28 -03'00'

INES ANDRETTA
Coordenadora do Programa de
Pós-Graduação em Zootecnia

Cheila Roberta Lehnen

Cheila Roberta Lehnen
UEPG

Diogo Magnabosco

Diogo Magnabosco
UFRGS

Luciano Hauschild

Luciano Hauschild
UNESP

gov.br Documento assinado digitalmente
PAULO VITOR DUTRA DE SOUZA
Data: 10/09/2025 11:37:33-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

PAULO VITOR DUTRA DE SOUZA
Diretor da Faculdade de Agronomia

Document ID: c10580f8-6e70-4a08-90c1-9c40d64411ef

Agradecimentos

É com o coração cheio de gratidão que escrevo essas palavras. Primeiramente, agradeço a Deus pela força, saúde e perseverança que me permitiram enfrentar os desafios ao longo desta jornada.

Aos meus pais, Rejane e Paulo, pela base sólida de amor, apoio e ensinamentos que sempre me impulsionaram a buscar os meus sonhos. Obrigada por serem meu porto seguro e por acreditarem em mim, mesmo nos momentos em que eu duvidei de mim mesma.

À memória dos meus queridos avós maternos, Ary José Telesca e Maria Noely de Oliveira Telesca, pelo exemplo de dignidade, bondade e dedicação que sempre me deram. Suas histórias e valores continuam sendo (e sempre serão) uma inspiração para mim, e levo comigo o orgulho de ter tido vocês como avós.

Aos meus avós paternos, Domírio de Ávila Camargo (*in memoriam*) e Marilene de Oliveira Camargo, pelo amor e pelas palavras de incentivo que me transmitiram em cada chamada de vídeo. Mesmo à distância, vocês conseguiram estar presentes de uma maneira especial, tornando os momentos mais leves.

À minha orientadora, Dra. Ines Andretta, pela confiança e por compartilhar seu conhecimento ao longo desta caminhada. Tuas orientações foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para meu crescimento profissional.

Ao meu supervisor de período de doutorado sanduíche, Dr. Sung Woo Kim, pela orientação valiosa e por me proporcionar uma experiência enriquecedora durante o tempo na North Carolina State University. Aos meus colegas de laboratório na NCSU, pelo acolhimento, companheirismo, pelas discussões produtivas e por tornarem o ambiente mais leve.

Aos amigos que estiveram ao meu lado, com palavras de incentivo, carinho e compreensão (não irei citar todos para não esquecer, mas vocês sabem o que significam para mim). Obrigada por me lembrarem constantemente que o equilíbrio é essencial e que, apesar das dificuldades, cada esforço vale a pena. Aos amigos que fiz nos Estados Unidos, que tornaram esta jornada muito mais leve e especial. Vocês transformaram dias comuns em memórias inesquecíveis. Sou grata por cada um de vocês e pelo impacto positivo que tiveram na minha vida durante essa etapa do período sanduíche.

À empresa Roboagro, que depositou em nós a confiança para validarmos um produto que auxilia o desenvolvimento da suinocultura do nosso país, e aos produtores

de suínos que encontrei durante estes anos de doutorado, por me “deixarem entrar” e me ensinarem o valor do trabalho árduo diário.

À CAPES, pelo apoio financeiro que tornou possível a realização deste trabalho e pela oportunidade de vivenciar uma experiência acadêmica internacional durante o período de doutorado sanduíche.

Esta conquista é fruto de esforço, dedicação e aprendizado, e cada passo dado nesta jornada me fez crescer e me aproximar dos meus objetivos. A todos que, de alguma forma, fizeram parte desta trajetória, o meu mais sincero agradecimento.

VALIDAÇÃO DE UM SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE PRECISÃO PARA SUÍNOS EM CRESCIMENTO E TERMINAÇÃO UTILIZANDO ROBÔS ALIMENTADORES[1]

Autora: Nathalia de Oliveira Telesca Camargo
Orientadora: Drª Ines Andretta

Esta tese teve como objetivo avaliar a viabilidade e os impactos de estratégias de alimentação de precisão para suínos nas fases de crescimento e terminação, focando tanto no desempenho tecnológico de um sistema automático de alimentação quanto nas respostas biológicas e ambientais dos animais submetidos a um programa escalonável de alimentação de precisão. Dois experimentos foram conduzidos em condições controladas e de campo. No primeiro experimento, o robô alimentador automático demonstrou alta precisão na distribuição de milho moído e ração farelada comum, com fortes correlações entre as quantidades solicitadas e as fornecidas (r = 0,996–0,999 para milho moído; r = 0,997–0,999 para ração farelada) e baixos erros quadráticos médios de predição (MSPE), variando de 9,3–9,5% para milho moído e 7,2–7,7% para ração farelada. Na distribuição de ração peletizada, o sistema apresentou desempenho ligeiramente inferior (r = 0,901; MSPE = 22,2–22,8%), provavelmente devido a desafios físicos no fluxo dos pellets. Em todos os tipos de ração, a principal fonte de erro de predição foi atribuída à variação operacional aleatória, com viés sistemático insignificante. Esses resultados sustentam a aplicabilidade industrial do sistema e destacam seu potencial para reduzir desperdício de ração, custos de produção e excreção de nutrientes. O segundo experimento envolveu 630 suínos alocados em um programa convencional de alimentação em quatro fases ou em uma estratégia de alimentação de precisão com ajustes diários da dieta com base em curvas de alimentação pré-definidas. O desempenho zootécnico e as características de carcaça (ex.: espessura de toucinho) não diferiram entre os tratamentos. No entanto, o grupo de alimentação de precisão apresentou redução de 5% no consumo de lisina digestível no íleo (SID) ($P < 0,05$) e melhorou a eficiência de utilização de lisina SID em média 6%, atingindo 12,5% na fase final ($P < 0,05$). Além disso, menores concentrações de ureia sérica foram observadas ($P < 0,05$), indicando utilização mais eficiente de proteína. Modelagens ambientais revelaram reduções significativas no potencial de aquecimento global (até 6%), acidificação (até 3,5%), eutrofização (até 9%) e uso da terra (até 3%; $P < 0,05$). Em resumo, os resultados validam a integração da alimentação de precisão e automação como uma estratégia viável e escalonável para melhorar a eficiência nutricional e a sustentabilidade em sistemas comerciais de produção de suínos, sem comprometer o desempenho animal.

Palavras-chave: impacto ambiental, eficiência de lisina, modelagem, utilização de nutrientes, nutrição de precisão, suínos.

---

[1] Tese de doutorado em Zootecnia – Produção Animal, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil (95pg), Junho, 2025

VALIDATION OF A PRECISION FEEDING SYSTEM FOR GROWING-FINISHING PIGS USING FEEDING ROBOTS[2]

Author: Nathalia de Oliveira Telesca Camargo
Advisor: Drª Ines Andretta

This thesis aimed to evaluate the feasibility and impacts of precision feeding strategies for growing-finishing pigs, focusing on both the technological performance of an automatic feeding system and the biological and environmental responses of animals subjected to a scalable precision feeding program. Two experiments were conducted under controlled and field conditions. In the first experiment, the automatic feeding robot demonstrated high accuracy in delivering ground corn and standard mash feed, with strong correlations between requested and delivered amounts (r = 0.996–0.999 for ground corn; r = 0.997–0.999 for mash feed) and low mean squared prediction errors (MSPE), ranging from 9.3–9.5% for ground corn and 7.2–7.7% for mash feed. When dispensing pelleted feed, the system showed slightly lower performance (r = 0.901; MSPE = 22.2–22.8%), likely due to physical challenges in pellet flow. Across all feed types, the main source of prediction error was attributed to random operational variation, with negligible systematic bias. These results support the system's industrial applicability and highlight its potential to reduce feed waste, production costs, and nutrient excretion. The second experiment involved 630 pigs allocated to either a conventional four-phase feeding program or a precision feeding strategy with daily diet adjustments based on predefined feeding curves. Growth performance and carcass traits (e.g., backfat thickness) did not differ between treatments. However, the precision feeding group showed a 5% reduction in standardized ileal digestible (SID) lysine intake ($P < 0.05$) and improved SID lysine efficiency by an average of 6%, reaching up to 12.5% in the final phase ($P < 0.05$). Additionally, lower serum urea concentrations were observed ($P < 0.05$), indicating more efficient protein utilization. Environmental modeling revealed significant reductions in global warming potential (up to 6%), acidification (up to 3.5%), eutrophication (up to 9%), and land use (up to 3%; $P < 0.05$). In summary, the results validate the integration of precision feeding and automation as a viable and scalable strategy to improve nutrient efficiency and sustainability in commercial pig production systems, without compromising animal performance.

Keywords: environmental impact, lysine efficiency, modeling, nutrient utilization, precision nutrition, swine.

---

[2] PhD thesis in Animal Science, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil. (95pg), Junho, 2025.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I ---------- 11
INTRODUÇÃO ---------- 12
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ---------- 13
1.1 Produção de suínos ---------- 13
1.2 Conceito de exigências nutricionais e sua importância na produção---------- 14
1.3 Sistema convencional de produção de suínos---------- 16
1.4 Nutrição de precisão na suinocultura---------- 17
2. OBJETIVOS ---------- 19
CAPÍTULO II ---------- 20
Abstract ---------- 21
Introduction ---------- 22
Material and Methods ---------- 23
Results ---------- 27
Discussion ---------- 30
Conclusions ---------- 34
Tables ---------- 37
Figures ---------- 43
CAPÍTULO III ---------- 49
Abstract ---------- 50
Introduction ---------- 52
Material and Methods ---------- 53
Results ---------- 58
Discussion ---------- 60
References ---------- 64
Tables ---------- 68
Figures ---------- 72
CAPÍTULO IV ---------- 76
3. CONSIDERAÇÕES FINAIS ---------- 77
4. REFERÊNCIAS ---------- 79
Annex (supplementary material) ---------- 84

RELAÇÃO DE TABELAS

CAPÍTULO II **Pg**

Table 1. Accuracy of the feeder supplying the mashed corn---------- 37
Table 2. Accuracy of the feeder in delivering mashed corn---------- 38
Table 3. Accuracy of the feeder supplying the mashed feed---------- 39
Table 4. Accuracy of the feeder in delivering mashed feed---------- 40
Table 5. Accuracy of the feeder supplying the pelleted feed---------- 41
Table 6. Accuracy of the feeder in delivering pelleted feed---------- 42

CAPÍTULO III

Table 1. Nutritional composition of experimental diets across swine growth phases (as-fed basis) ---------- 68
Table 2. Body weight (BW) and backfat thickness (BT) of growing pigs reared under conventional phase-feeding or precision feeding programs---------- 69
Table 3. Growth performance of growing pigs reared under conventional phase-feeding or precision feeding programs---------- 70
Table 4. Serum biochemical responses in growing pigs reared under conventional phase-feeding (control) or precision feeding programs---------- 71

RELAÇÃO DE FIGURAS

CAPÍTULO II **Pg**

Figure 1. Schematic representation of the experimental equipment composed of two silos (A and B)---------- 24
Figure 2. Agreement between requested and delivered amounts of mashed corn via silo A (A), silo B (B), and the combined compartments (C)---------- 43
Figure 3. Partitioning of the mean squared prediction error (MSPE[1]) for mashed corn delivery by the feeder---------- 44
Figure 4. Agreement between requested and delivered amounts of mashed feed via silo A (A), silo B (B), and the combined compartments (C)---------- 45
Figure 5. Partitioning of the mean squared prediction error (MSPE[1]) for mashed feed delivery by the feeder---------- 46
Figure 6. Agreement between requested and delivered amounts of pelleted feed via silo A (A), silo B (B), and the combined silos (C)---------- 47
Figure 7. Partitioning of the mean squared prediction error (MSPE[1]) for pelleted feed delivery by the feeder---------- 48

CAPÍTULO III

Figure 1. Standard ileal digestible (SID) lysine levels in diets for pigs reared under conventional phase-feeding or precision feeding programs---------- 72
Figure 2. Daily standard ileal digestible (SID) lysine intake in pigs reared under conventional phase-feeding or precision feeding programs---------- 73
Figure 3. Standard ileal digestible (SID) lysine efficiency to weight gain in pigs reared under conventional phase-feeding or precision feeding programs--------- 74
Figure 4. Change (%) attributed to precision feeding programs on the potential environmental impacts of feeding growing-finishing pigs---------- 75

RELAÇÃO DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ADG – Average Daily Gain

ADFI – Average Daily Feed Intake

BW – Body Weight

FCR – Feed Conversion Ratio

FI – Feed Intake

G:F – Gain to Feed

WG – Weight Gain

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

O principal desafio dos profissionais do setor suinícola é conseguir produzir proteína com o menor custo possível, e ao mesmo tempo pensar na sustentabilidade do sistema. De acordo com o Relatório Anual de 2024 da Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA, 2024), o Brasil manteve sua posição como o quarto maior produtor mundial de carne suína. Em 2023, a produção brasileira de carne suína foi estimada em 5,156 milhões de toneladas, representando um aumento de até 3,47% em relação a 2022. As exportações também apresentaram crescimento significativo, com um aumento de 9,82% em comparação ao ano anterior, consolidando o Brasil como importante no ranking do mercado global de carne suína (ABPA, 2024). No entanto, a competitividade do setor está intrinsecamente ligada à sustentabilidade. Estudos demonstram que a adoção de nutrição de precisão pode reduzir em até 6% as emissões de CO_2-eq e em 5% a eutrofização e acidificação por kg de carne produzida, em comparação com sistemas convencionais (Andretta et al., 2021). Assim, o equilíbrio entre eficiência econômica e preservação ambiental se torna não apenas uma demanda do mercado, mas uma estratégia essencial para a longevidade do setor. Os avanços tecnológicos e melhorias constantes na produção animal são os responsáveis por esta atual posição, pois só assim é possível reduzir os custos produtivos e entregar ao consumidor um produto de qualidade.

Neste contexto de crescimento do setor, surgem alternativas que auxiliam o produtor e a indústria, dentre elas, a nutrição de precisão, um conceito que está cada vez mais pesquisado, pois possibilita um menor custo com alimentação, ao passo que entrega aos animais exatamente os nutrientes necessários para o desenvolvimento corporal do animal e posterior produção de carne. Implementar um programa de nutrição de precisão no dia a dia das granjas não é uma tarefa fácil, principalmente devido à variabilidade de cada animal. Geralmente, em granjas comerciais, utiliza-se o mesmo tipo de dieta para todos os animais, mudando somente a cada troca de fase, não levando em conta que as exigências nutricionais para cada animal vão mudando a cada dia. Essa nutrição por fases que é utilizada na suinocultura, pode levar a um desperdício de nutrientes via urina e fezes, pois os animais recebem uma quantidade maior do que a exigida (Hauschild et al., 2010). Além disso, estudos de simulação, como o realizado por Pomar et al. (2011), estimaram que a nutrição de precisão pode

reduzir em até 38% a excreção de nitrogênio e em 10% os custos de alimentação, quando comparada a sistemas convencionais de alimentação por fases. No entanto, embora esses resultados sejam promissores, a adoção em larga escala ainda enfrenta desafios, como o alto custo dos equipamentos, a necessidade de dados individuais dos animais e a complexidade da gestão diária desses sistemas (Andretta et al., 2016). Portanto, este projeto foi desenvolvido com o propósito de avaliar e validar o impacto de um novo sistema de alimentação de precisão para suínos nas fases de crescimento e terminação, utilizando um robô alimentador, a fim de quantificar os benefícios deste equipamento sobre as respostas bioquímicas, ambientais e de desempenho desses animais.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Produção de suínos

A suinocultura tem desempenhado um papel crucial na produção de proteína animal em nível global, sendo um dos setores de maior relevância na economia agrícola de diversos países. No Brasil, a suinocultura vem se destacando como uma das principais atividades do agronegócio, com um crescimento contínuo na produção e exportação de carne suína. A expansão do setor se deve, em grande parte, à adoção de novas tecnologias em áreas como genética, nutrição, manejo e automação de processos. O uso de alimentação de precisão, monitoramento digital dos animais e técnicas de reprodução são exemplos de inovações tecnológicas que têm contribuído para o aumento da eficiência e da sustentabilidade da produção.

Entretanto, apesar dos avanços, há desafios que precisam ser enfrentados para garantir o crescimento sustentável da suinocultura. A melhoria da qualidade da carne, a redução do impacto ambiental e o aumento da eficiência no uso de recursos, como água e energia, são questões fundamentais. Tecnologias emergentes, como inteligência artificial, robôs alimentadores automatizados e análise de *big data*, podem desempenhar um papel transformador, permitindo ajustes mais precisos nas dietas e melhorias no bem-estar animal.

A alimentação, sendo um dos principais pilares na produção animal, é diretamente responsável pelo desempenho dos animais e, consequentemente, pelo

retorno econômico. Atualmente, representa quase 75% do custo total de produção (USDA/FAS), tornando-se um ponto chave na gestão da suinocultura. No Brasil, o milho e a soja dominam a formulação das rações devido à sua alta disponibilidade e valor nutricional, mas a recente escalada dos preços desses insumos, provocada por fatores como mudanças climáticas e instabilidade nas safras, tem pressionado ainda mais os custos de produção.

A busca por tecnologias de alimentação de precisão, que otimizam o uso de ingredientes e minimizam desperdícios, tornou-se estratégica para reduzir esses custos sem comprometer o desempenho animal. De acordo com Banhazi et al., (2012), o conceito de Pecuária de Precisão (PLF: Precision Livestock Farming), é uma abordagem que incorpora tecnologias de informação e comunicação (TIC) para otimizar os processos agropecuários. Essas inovações não apenas aumentam a eficiência alimentar, mas também promovem sustentabilidade, diminuindo o impacto ambiental. Sistemas baseados em inteligência artificial (IA) e machine learning (ML) permitem o monitoramento em tempo real do comportamento e da saúde dos animais, enquanto robôs alimentadores automatizados garantem precisão na distribuição de ração, reduzindo perdas. Além disso, essas tecnologias auxiliam na tomada de decisões, como o planejamento de dietas mais eficientes e a detecção precoce de problemas sanitários. Ao combinar essas tecnologias, a PLF transforma a pecuária em uma atividade altamente tecnificada, eficiente e sustentável, consolidando-se como peça-chave na produção animal do futuro (BANHAZI et al., 2012).

1.2 Conceito de exigências nutricionais e sua importância na produção de suínos

O conceito de exigência nutricional é um dos alicerces fundamentais na produção animal, especialmente na suinocultura, onde o equilíbrio entre a oferta adequada de nutrientes e o desempenho dos animais está diretamente relacionado à rentabilidade do sistema produtivo. Nutrir, no contexto da ciência animal, implica fornecer nutrientes em quantidade e qualidade ideais para que os suínos não apenas mantenham suas funções vitais básicas, mas também maximizem a eficiência na produção de carne. Esses nutrientes incluem aminoácidos essenciais, energia, vitaminas, minerais e água, todos indispensáveis para o crescimento e a saúde dos animais.

Compreender as exigências nutricionais dos suínos é essencial para tornar os sistemas produtivos mais eficientes e competitivos. Essas exigências representam a quantidade ideal de um nutriente que deve ser oferecida diariamente para atingir objetivos específicos de produção, como maximizar o ganho de peso, melhorar a conversão alimentar ou otimizar a composição corporal. No entanto, esses parâmetros variam com base em fatores como sexo, linhagem genética, fase de desenvolvimento (creche, crescimento ou terminação), estado de saúde, condições ambientais e qualidade dos ingredientes utilizados nas dietas (ROSTAGNO et al., 2017).

No Brasil, onde a suinocultura desempenha um papel significativo no agronegócio, atender com precisão às necessidades nutricionais dos animais é fundamental para reduzir custos e aumentar a lucratividade do setor. A alimentação, que representa quase 75% dos custos de produção, exige formulações racionais e ajustadas às flutuações no preço de insumos como milho e soja. A precisão na formulação dos programas nutricionais é, portanto, essencial para evitar desperdícios e garantir maior retorno econômico.

Atualmente, as exigências nutricionais são geralmente estabelecidas para populações inteiras de suínos, utilizando métodos fatoriais ou empíricos, que, embora eficazes, não consideram a variabilidade individual dentro dos rebanhos (POMAR et al., 2009). O método empírico baseia-se em experimentos de dose-resposta para determinar a quantidade de nutrientes que otimiza parâmetros produtivos, enquanto o método fatorial integra exigências para manutenção e produção, mas também não aborda as diferenças individuais entre os animais (SAKOMURA & ROSTAGNO, 2007). Essa abordagem generalista ignora a significativa variação na eficiência com que os animais utilizam os nutrientes, o que impacta diretamente na produtividade e na rentabilidade.

Para enfrentar essa variabilidade, surge a nutrição de precisão como uma solução inovadora e promissora. Essa abordagem permite ajustar a oferta de nutrientes de maneira personalizada, considerando as necessidades individuais dos animais em tempo real. Tecnologias avançadas, como robôs alimentadores automáticos e sistemas de monitoramento digital, têm revolucionado a gestão nutricional na suinocultura. Esses sistemas permitem a identificação de padrões de consumo e desempenho, possibilitando ajustes contínuos nas dietas e maximizando a eficiência alimentar.

Ao adotar essas tecnologias, os produtores não apenas reduzem custos, mas também tornam suas operações mais sustentáveis, minimizando o desperdício de recursos e os impactos ambientais. Portanto, o aprofundamento no conhecimento das exigências nutricionais e a integração de soluções baseadas em inteligência artificial são cruciais para enfrentar os desafios da suinocultura moderna, garantindo a competitividade e a sustentabilidade do setor.

1.3 Sistema convencional de produção de suínos

Na produção industrial de suínos em larga escala, a alimentação dos animais é realizada com base no sistema de fases, que consiste em fornecer dietas específicas para cada fase de produção, visando atender às exigências nutricionais diárias para o crescimento dos suínos. Essas dietas são formuladas para diferentes fases de produção, ajustando os níveis de nutrientes conforme as necessidades médias do grupo de animais. O desempenho econômico e ambiental do sistema é amplamente atribuído ao desempenho zootécnico dos animais e à eficácia do plano alimentar adotado em cada fase (POMAR et al., 2014).

No entanto, um dos principais desafios do sistema convencional é a falta de consideração da variabilidade individual dos suínos. Em rebanhos comerciais, os animais são alimentados com a mesma ração diariamente, sem levar em conta suas diferentes taxas de crescimento e capacidade de aproveitamento de nutrientes. Esse modelo de alimentação uniforme pode resultar em problemas significativos. Por exemplo, um animal pode receber menos nutrientes do que necessita, resultando em subalimentação e comprometimento de seu desempenho. Por outro lado, outro animal, no mesmo grupo e fase de crescimento, pode estar sendo superalimentado, recebendo mais nutrientes do que o necessário, o que leva a um desperdício de recursos. Esse desequilíbrio nutricional no sistema convencional não só compromete a eficiência econômica, como também impacta o bem-estar animal e a sustentabilidade ambiental. Animais submetidos a dietas com excesso de nutrientes podem apresentar distúrbios metabólicos e alterações fisiológicas, mesmo em níveis abaixo do limiar de toxicidade aguda (REMUS et al., 2015). Além disso, a superalimentação resulta em maior excreção de nutrientes que não foram aproveitados pelos suínos, o que eleva os índices de poluição ambiental, especialmente em relação à eliminação de nitrogênio e fósforo através de dejetos

(DOURMAD & JONDREVILLE, 2007). O manejo inadequado desses dejetos pode gerar sérios problemas ambientais, como a contaminação de recursos hídricos e do solo.

No Brasil, o sistema convencional de produção de suínos é amplamente adotado, sendo impulsionado pela busca de altos índices produtivos para atender à crescente demanda interna e externa por carne suína. Globalmente, países como China e Estados Unidos também utilizam amplamente o sistema convencional, enfrentando questões semelhantes, especialmente em relação ao uso excessivo de nutrientes nas dietas e a consequente geração de dejetos poluentes. Outro ponto de preocupação do sistema convencional é o custo elevado das rações, que muitas vezes são formuladas com níveis nutricionais acima das reais necessidades dos animais, como forma de garantir que todos os suínos recebam os nutrientes necessários, ainda que isso leve a um uso ineficiente de insumos (HAUSCHILD et al., 2010). Esse desperdício de nutrientes não só encarece a alimentação, como também agrava o problema ambiental, pois os nutrientes ingeridos e não aproveitados são excretados, contribuindo para a poluição.

Para otimizar a eficiência do sistema produtivo e toda a cadeia suinícola, surge a nutrição de precisão como uma alternativa promissora. Essa abordagem tem como objetivo ajustar a alimentação de acordo com as necessidades nutricionais dos suínos em tempo real, reduzindo o desperdício de nutrientes e os custos, além de minimizar os impactos ambientais e melhorar o desempenho produtivo.

1.4 Nutrição de precisão na suinocultura

Com o aumento expressivo dos custos dos principais ingredientes da ração de suínos, torna-se indispensável buscar alternativas que minimizem os prejuízos sem diminuir a eficiência na produção de carne. Nesse contexto, a nutrição emerge como um dos pilares mais importantes para o sucesso da produção suinícola. O conceito de nutrição de precisão tem ganhado destaque nos últimos anos por sua abordagem inovadora, utilizando softwares avançados, modelos matemáticos e equipamentos especializados para otimizar a utilização dos nutrientes pelos animais, como proteínas, carboidratos, lipídeos, vitaminas e minerais (NRC, 2012). Na prática, a implementação da nutrição de precisão nas granjas comerciais é um desafio,

principalmente devido à variabilidade individual dos suínos e à complexidade de se gerenciar populações grandes e heterogêneas.

Dependendo da fase de produção e das condições específicas, as necessidades por nutrientes podem variar significativamente entre os animais, o que torna crucial um ajuste mais preciso nas dietas. A implementação da nutrição de precisão enfrenta desafios como a limitação de mão de obra capacitada e a falta de equipamentos modernos nas granjas. Atualmente, muitos sistemas ainda utilizam comedouros semiautomáticos, que não conseguem ajustar a alimentação de acordo com as necessidades individuais dos animais. Apesar disso, estudos apontam que a nutrição de precisão pode trazer benefícios significativos. Em um estudo de Andretta et al. (2018), foi demonstrado que o uso dessa abordagem reduziu em até 4% o impacto potencial das mudanças climáticas e a eutrofização, além de diminuir a acidificação em até 3%, comparado ao sistema convencional. Outro estudo de Andretta et al. (2016) demonstrou que a nutrição de precisão pode reduzir a ingestão de proteínas em até 25%, diminuir a excreção de nitrogênio no meio ambiente em até 40%, e aumentar a lucratividade do sistema em quase 10%. Esses dados indicam o enorme potencial que a nutrição de precisão tem para melhorar tanto a eficiência produtiva quanto a sustentabilidade ambiental da suinocultura. Embora a suinocultura brasileira, até recentemente, não exigisse alto nível de tecnologia, a automação dos processos alimentares mostra-se essencial para melhorar o bem-estar animal, aumentar a eficiência produtiva e garantir a competitividade do setor. Por isso, investir nessas tecnologias permite uma gestão mais eficiente de nutrientes, mas também enfrenta barreiras técnicas e culturais, como a adaptação de infraestruturas e capacitação profissional para utilização de equipamentos (BANHAZI et al., 2012).

Para que essa transformação ocorra em granjas comerciais, a validação prévia dos sistemas é fundamental. Esta tese apresenta dois estudos complementares, cujo objetivo é testar e validar novo sistema operacional de alimentação de precisão para suínos nas fases de crescimento e terminação, utilizando um robô alimentador.

2. OBJETIVO

Este projeto de doutorado foi desenvolvido em duas etapas, cada uma com um objetivo principal. Etapa 1: Avaliar a reprodutibilidade e acurácia do fornecimento das rações pelo robô alimentador; Etapa 2: avaliar o impacto de um sistema de alimentação de precisão para suínos nas fases de crescimento e terminação e quais as respostas bioquímicas, de interesse zootécnico e ambientais serão obtidas com a utilização deste sistema de alimentação de precisão.

CAPÍTULO IV

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A alimentação de precisão representa uma abordagem promissora para a suinocultura moderna, com potencial para otimizar a eficiência produtiva e mitigar os impactos ambientais da atividade. Na primeira etapa desta tese, a utilização de tecnologias, como o robô alimentador testado, demonstrou ser viável e preciso, com baixa margem de erro na entrega das dietas, independentemente da forma física do alimento (milho moído, ração farelada ou peletizada). No entanto, variações observadas, especialmente na distribuição de ração peletizada, indicam oportunidades de melhorias no sistema. Futuras inovações tecnológicas, incluindo o uso de inteligência artificial e aprendizado de máquina, poderão aprimorar ainda mais a precisão e adaptabilidade desses equipamentos às diferentes realidades da produção.

Na segunda etapa, avaliou-se uma estratégia de alimentação de precisão aplicada em grupo, com ajustes diários pré-definidos nas dietas ao longo das fases de crescimento e terminação de suínos. Os resultados demonstraram que essa estratégia foi eficaz em reduzir a ingestão média de lisina digestível e em aumentar a eficiência de uso, sem comprometer o desempenho zootécnico. Do ponto de vista metabólico, a menor concentração de ureia sérica nos animais submetidos à alimentação de precisão sugere uma utilização mais eficiente dos nutrientes ingeridos, o que implica em umamenor excreção de compostos nitrogenados. Esse efeito fisiológico positivo, associado à ausência de prejuízos produtivos, reforça os benefícios do modelo proposto tanto para a eficiência alimentar quanto para a sustentabilidade da produção. Além disso, a redução dos impactos ambientais observada neste trabalho, como menor potencial de aquecimento global, eutrofização e uso do solo, evidencia o valor da alimentação de precisão como ferramenta estratégica para sistemas produtivos mais sustentáveis.

Dessa forma, conclui-se que o sistema de alimentação de precisão validado nesta tese é eficiente, prático e escalável, representando uma alternativa concreta para elevar o desempenho técnico e ambiental da suinocultura. Ainda assim, são necessários estudos adicionais, especialmente

em condições comerciais variadas, para consolidar a adoção dessas estratégias e aprofundar o conhecimento sobre os efeitos nutricionais, fisiológicos, ambientais e econômicos associados ao uso contínuo da alimentação de precisão.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL - ABPA. Relatório Anual 2024. São Paulo: ABPA, 2024.

ANDRETTA, I. et al. Environmental impacts of pig and poultry production: insights from a systematic review. Frontiers in Veterinary Science, Lausanne, v. 8, p. 750733, 2021.

ANDRETTA, I. et al. Environmental impacts of precision feeding programs applied in pig production. Animal, Cambridge, v. 12, n. 9, p. 1990-1998, 2018.

ANDRETTA, I. et al. Precision feeding can significantly reduce lysine intake and nitrogen excretion without compromising the performance of growing pigs. Animal, Cambridge, v. 10, n. 7, p. 1137-1147, 2016.

ANDRETTA, I. et al. The impact of feeding growing-finishing pigs with daily tailored diets using precision feeding techniques on animal performance, nutrient utilization, and body and carcass composition. Journal of Animal Science, Champaign, v. 92, n. 9, p. 3925-3936, 2014.

BANHAZI, T. M. et al. Precision Livestock Farming: An international review of scientific and commercial aspects. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, Beijing, v. 5, n. 3, p. 1-9, 2012.

BENJAMIN, M.; YIK, S. Precision livestock farming in swine welfare: A review for swine practitioners. Animals, Basel, v. 9, n. 4, p. 133, 2019.

BROSSARD, L. et al. Prise en compte de la variabilité individuelle dans l'estimation des besoins en acides aminés et dans la modélisation de la réponse des porcs en croissance aux apports alimentaires. Productions Animales, Paris, v. 25, p. 17-28, 2012.

CASEY, D. S. et al. Identification of errors and factors associated with errors in data from electronic swine feeders. Journal of Animal Science, Champaign, v. 83, n. 5, p. 969-982, 2005.

DOURMAD, I. J.; JONDREVILLE, C. Environmental impact of pig production systems. Animal Feed Science and Technology, Amsterdam, v. 137, n. 3-4, p. 187-210, 2007.

DUARTE, M. E. et al. Low crude protein formulation with supplemental amino acids for its impacts on intestinal health and growth performance of growing-finishing pigs. Journal of Animal Science and Biotechnology, London, v. 15, n. 1, p. 55, 2024.

FERREIRA, Y. M. et al. A simplified daily fit model to reduce costs and nutrient intake in growing-finishing pigs. Animals, Basel, v. 14, n. 20, p. 2922, 2024.

HAUSCHILD, L. et al. Systematic comparison of the empirical and factorial methods used to estimate the nutrient requirements of growing pigs. Animal, Cambridge, v. 4, n. 5, p. 714-723, 2010.

HAUSCHILD, L. et al. Development of sustainable precision farming systems for swine: estimating real-time individual amino acid requirements in growing-finishing pigs. Journal of Animal Science, Champaign, v. 90, n. 7, p. 2255-2263, 2012.

KIPPER, M. et al. Assessing the accuracy of measurements obtained by dual-energy X-ray absorptiometry on pig carcasses and primal cuts. Meat Science, Amsterdam, v. 148, p. 79-87, 2019.

LE BELLEGO, L. et al. Effect of high temperature and low-protein diets on the performance of growing-finishing pigs. Journal of Animal Science, Champaign, v. 80, n. 3, p. 691-701, 2002.

LLORENS, B. et al. Precision feeding as a tool to reduce the environmental footprint of pig production systems: a life cycle assessment. Journal of Animal Science, Champaign, v. 102, p. 225, 2024.

MAHAN, D. C.; SHIELDS, R. G. Jr. Essential and nonessential amino acid composition of pigs from birth to 145 kilograms of body weight, and comparison to other studies. Journal of Animal Science, Champaign, v. 76, p. 513-521, 1998.

MILLET, S. et al. Urea concentration in the blood plasma of fattening pigs: heritability and correlation with performance and carcass traits. Animal, Cambridge, v. 4, n. 4, p. 656-661, 2010.

MONTEIRO, A. N. T. R. et al. Effect of precision feeding on environmental impact of fattening pig production. HAL Archives Ouvertes, 2017. Disponível em: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01591143.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL - NRC. Nutrient Requirements of Swine. 11th ed. Washington, DC: National Academies Press, 2012.

OSPANOV, A. et al. Thermomechanical processing of components of combined feeds by the expansion method. Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences, Bratislava, v. 16, p. 296-306, 2022.

POMAR, C. et al. Feeding strategies to reduce nutrient losses and improve the sustainability of growing pigs. Frontiers in Veterinary Science, Lausanne, v. 8, p. 742220, 2021.

POMAR, C. et al. Applying precision feeding techniques in growing-finishing pig operations. Revista Brasileira de Zootecnia, Viçosa, v. 38, n. spe, p. 226-237, 2009.

POMAR, C. et al. Precision feeding can significantly reduce feeding cost and nutrient excretion in growing animals. In: SAUVANT, D. et al. (Eds.). Modelling Nutrient Digestion and Utilization in Farm Animals. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, p. 327-334, 2011.

POMAR, C. et al. The impact of daily multiphase feeding on animal performance, body composition, nitrogen and phosphorus excretions, and feed costs in growing-finishing pigs. Animal, Cambridge, v. 8, n. 5, p. 704-713, 2014.

POMAR, C.; REMUS, A. Precision Pig Feeding: A Breakthrough toward Sustainability. Animal Frontiers, Lausanne, v. 9, p. 52-59, 2019.

POMAR, C.; REMUS, A. Fundamentals, limitations and pitfalls on the development and application of precision nutrition techniques for precision livestock farming. Animal, Cambridge, v. 17, p. 100763, 2023.

REMUS, A. et al. Amino acids requirements of growing pigs differ between different factorial methods. Journal of Animal Science, Champaign, v. 93, suppl. 2, p. 49, 2015. (Abstract).

REMUS, A. et al. Pigs receiving daily tailored diets using precision-feeding techniques have different threonine requirements than pigs fed in conventional phase-feeding systems. Journal of Animal Science and Biotechnology, London, v. 10, p. 1-17, 2019.

ROSTAGNO, H. S. et al. Brazilian Tables for Poultry and Swine: Composition of Feedstuffs and Nutritional Requirements. 4th ed. Viçosa: UFV, p. 488, 2017.

SAKOMURA, N. K.; ROSTAGNO, H. S. Métodos de pesquisa em nutrição de monogástricos. Jaboticabal: Funep, p. 283, 2007.

SANTOS, L. S. D. et al. Precision feeding strategy for growing pigs under heat stress conditions. Journal of Animal Science, Champaign, v. 96, n. 11, p. 4789-4801, 2018.

SU, J. et al. Accelerating precision feeding with the internet of things for livestock: From concept to implementation. Science Bulletin, Beijing, v. 69, n. 14, p. 2156-2160, 2024.

THOMPSON, J. Nutritional precision and performance benefits: the potential of liquid feeding. Livestock Science, Amsterdam, v. 249, p. 104530, 2004.

TZANIDAKIS, C. et al. An overview of the current trends in precision pig farming technologies. Livestock Science, Amsterdam, v. 249, p. 104530, 2021.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA. Brazil Livestock and Products Annual. Washington, DC: Foreign Agricultural Service, 2023. Disponível em: https://apps.fas.usda.gov/gainfiles/.