

SINBOV: Sistema inteligente baseado em Programação Linear para complementação nutricional de bovinos leiteiros

Gustavo Henrique Maldaner Baumgratz¹, Rodrigo Lange¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul
Campus Ibirubá – RS – Brasil

gushenriquemb@hotmail.com, rodrigo.lange@ibiruba.ifrs.edu.br

Abstract. *The Brazilian dairy industry faces significant challenges in diet formulation due to inadequate nutritional management and high feed costs. Traditional methods often rely on generic formulations that overlook individual animal variability, potentially leading to nutritional imbalances. This work presents SINBOV (Intelligent System for Bovine Nutrition), a computational tool that implements two Linear Programming models to optimize feed supplementation for dairy cattle. The system segments herds into productive groups based on milk yield and lactation stage, and automatically determines the optimal combination of available feed ingredients to meet specific nutritional requirements at minimal cost. Validation is based on technical-nutritional parameters recognized in the field of animal nutrition, and the results demonstrate that the system can generate nutritionally adequate and economically efficient supplementation strategies aligned with the practical demands of dairy production systems.*

Resumo. *A pecuária leiteira brasileira enfrenta desafios significativos na formulação de dietas devido a práticas nutricionais inadequadas e elevados custos de alimentação. Métodos tradicionais geralmente utilizam formulações genéricas que desconsideram a variabilidade individual entre os animais, o que pode acarretar desequilíbrios nutricionais. Este trabalho apresenta o SINBOV (Sistema Inteligente para Nutrição de Bovinos), uma ferramenta computacional que apresenta dois modelos matemáticos de Programação Linear para otimizar a complementação alimentar de bovinos leiteiros. O sistema segmenta o rebanho em grupos produtivos baseados na produção de leite e estágio de lactação, determinando automaticamente a combinação ideal de ingredientes disponíveis para atender às exigências nutricionais específicas, com minimização de custos. A validação baseia-se em parâmetros técnico-nutricionais reconhecidos na área de nutrição animal, e os resultados obtidos demonstram que o sistema é capaz de gerar complementações nutricionalmente adequadas e com bom desempenho econômico, alinhadas às exigências práticas dos sistemas de produção leiteira.*

1. Introdução

O Brasil ocupa posição de destaque na pecuária leiteira, sendo o quinto maior produtor mundial de leite e um dos principais segmentos da agropecuária nacional, com

impacto relevante na segurança alimentar e na geração de empregos (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2016). Apesar dos avanços no setor, o país ainda enfrenta desafios em comparação a outras nações, devido à carência de especialização e a práticas de manejo e nutrição inadequadas (LOPES, 2017).

A nutrição adequada é um fator determinante para o desempenho produtivo e reprodutivo dos bovinos leiteiros. Considerando que os custos com alimentação representam cerca de 70% do custo total da produção de leite, estratégias que otimizem esse aspecto são fundamentais para a sustentabilidade econômica das propriedades (SAHMAN et al., 2009). Nesse sentido, a formulação de dietas balanceadas, capazes de atender às exigências nutricionais dos animais com o menor custo possível, configura-se como um dos principais desafios da produção leiteira moderna (SAXENA; KHANNA, 2015; SANTIAGO, 2021).

Entretanto, os métodos tradicionais de formulação de dietas frequentemente adotam abordagens genéricas, desconsiderando as variações entre os animais. A elaboração baseada na média do rebanho pode resultar em deficiências ou excessos nutricionais, o que prejudica o desempenho e aumenta os custos (PETRY; PAGLIARINI, 2009; SANTIAGO, 2021). Para lidar com essas diferenças, autores como Sniffen e Chalupa (2015) e Santiago (2021) sugerem a segmentação do rebanho em grupos de produção, a fim de otimizar a utilização de nutrientes e melhorar os resultados zootécnicos e econômicos.

Nesse contexto, a aplicação de técnicas de Pesquisa Operacional (PO), como a Programação Linear (PL), mostra-se eficaz na formulação de dietas balanceadas, tanto para humanos quanto para animais (IDEHARA; RODRIGUES, 2011). Especificamente, a PL permite a construção de modelos matemáticos capazes de considerar múltiplas restrições e objetivos, buscando a alocação ideal de recursos escassos e a otimização dos resultados de acordo com critérios previamente definidos (HILLIER; LIEBERMAN, 2013; PASSOS, 2000; SHAMBLIN; STEVENS, 1979).

Diante do exposto, estabeleceu-se como principal objetivo deste trabalho o desenvolvimento de um método para definição de dietas complementares ótimas para vacas leiteiras por meio de técnicas de Programação Linear. Esse método foi integrado a um sistema denominado *Sistema Inteligente para Nutrição de Bovinos (SINBOV)*, o qual permite diversas parametrizações e customizações com o objetivo de atender às exigências nutricionais de diferentes grupos produtivos. O sistema pode ser parametrizado com informações sobre ingredientes já disponíveis em uma propriedade, minimizando o custo da complementação e, conseqüentemente, da dieta total.

Cabe ressaltar que este trabalho não abrange a formulação completa de todas as dietas possíveis para bovinos leiteiros, conforme preconizado na literatura. A definição das dietas base, bem como a avaliação da qualidade das dietas complementadas, permanece sob responsabilidade do médico-veterinário. Para validar a abordagem computacional, consultou-se um profissional da área de nutrição animal, utilizando como referência as diretrizes estabelecidas pelo National Academies of Sciences, Engineering and Medicine (2021) e National Research Council (2001).

Também é importante destacar que o *SINBOV* tem como principal finalidade viabilizar a inserção de dados para demonstração do método proposto e validação de suas características essenciais. Portanto, trata-se de um protótipo funcional, e não de um sis-

tema completo e totalmente desenvolvido, estando questões como aquelas relacionadas à análise de requisitos fora do escopo deste trabalho.

Ressalta-se, ainda, que a aplicação prática das complementações nutricionais diretamente em rebanhos não foi realizada devido à exigência de autorização prévia do Comitê de Ética no Uso de Animais (CEUA) do Instituto Federal do Rio Grande do Sul (IFRS). Diante dessa condição, optou-se por concentrar este trabalho no desenvolvimento computacional do sistema e na simulação das formulações nutricionais, sem sua aplicação direta em rebanhos durante a elaboração do estudo.

No restante deste documento, são apresentados os fundamentos teóricos relacionados à nutrição de bovinos leiteiros e à formulação de dietas (Seção 2), seguidos da formulação matemática dos modelos de otimização utilizados, com os diferentes métodos aplicados ao planejamento alimentar (Seção 3). Em seguida, descreve-se o desenvolvimento do SINBOV, com destaque para sua arquitetura, tecnologias empregadas e funcionamento (Seção 4). Na sequência, os resultados obtidos são analisados na Seção 5. Por fim, a Seção 6 apresenta as considerações finais, bem como as limitações do estudo e sugestões para trabalhos futuros.

2. Fundamentação Teórica

O embasamento teórico deste trabalho envolve três aspectos principais, discutidos nesta seção: a complementação da dieta de bovinos leiteiros (Seção 2.1), a segmentação dos animais em grupos produtivos (Seção 2.2) e o uso de ferramentas da Pesquisa Operacional, com foco na Programação Linear na elaboração de dietas (Seção 2.3).

Além dos assuntos acima, esta seção também apresenta a compilação dos trabalhos da literatura que serviram de referência para a construção desta proposta (Seção 2.4).

2.1. Complementação da dieta bovina total

A formulação de dietas para bovinos leiteiros exige conhecimento tanto das exigências nutricionais dos animais quanto da composição dos ingredientes disponíveis, com especial atenção à matéria seca, energia e proteína (IDEHARA; RODRIGUES, 2011; TOMICH et al., 2015). Esses valores são obtidos por meio de análises químicas e de modelos matemáticos baseados no metabolismo animal, que consideram fatores como peso corporal, produção de leite, estágio de lactação e ambiente (SANTIAGO, 2021; FOX; TYLUTKI; CHASE, 2004).

O *National Research Council (NRC)* é uma das principais referências na definição dessas exigências, incorporando avanços científicos e tecnológicos ao longo dos anos (TOMICH et al., 2015; National Research Council, 2001). Essas diretrizes têm sido amplamente utilizadas para o balanceamento de dietas voltadas à manutenção, produção e saúde dos animais.

Apesar da disponibilidade de ferramentas computacionais para formulação de dietas, muitas delas ainda adotam valores médios do rebanho como referência, desconsiderando variações individuais ou por grupos de exigência (ROSSOW; ALY, 2013; SOEST, 1994). Essa abordagem simplificada pode resultar em deficiências ou excessos nutricionais, afetando a eficiência alimentar, a produção de leite e a saúde dos animais.

Segundo Santiago (2021), práticas de nutrição mais precisas exigem atenção ao valor real dos alimentos utilizados, além de conhecimento técnico e capacidade crítica do profissional responsável. A diferença entre a dieta planejada e a efetivamente consumida também deve ser considerada, o que reforça a importância da supervisão contínua e de ajustes dinâmicos.

Diante da complexidade envolvida na nutrição de bovinos leiteiros, o uso de modelos matemáticos de otimização surge como uma alternativa eficiente para apoiar decisões nutricionais e econômicas. Esses modelos permitem formular dietas que atendam às exigências específicas dos diferentes grupos de animais, promovendo o uso racional dos ingredientes disponíveis e minimizando custos sem comprometer o desempenho produtivo (IDEHARA; RODRIGUES, 2011; THOMAS; KEBREAB, 2020).

2.2. Grupos Produtivos

As exigências nutricionais dos bovinos leiteiros variam significativamente ao longo da lactação, sendo influenciadas principalmente pela produção de leite e pelo estágio fisiológico de cada animal. Essa variabilidade torna desafiadora a formulação de dietas únicas que atendam de forma eficiente a todo o rebanho (Merck Veterinary Manual, 2021).

Uma estratégia amplamente recomendada para lidar com essa heterogeneidade é o agrupamento de vacas em lotes com características semelhantes, como produção, estágio de lactação ou condição corporal (SNIFFEN; CHALUPA, 2015; SALMAN; OSMARI; SANTOS, 2011). Essa segmentação permite o ajuste mais preciso das dietas, favorecendo tanto o atendimento das exigências nutricionais quanto a otimização do uso de recursos alimentares. Além disso, o agrupamento nutricional facilita a alocação aprimorada de nutrientes devido à diminuição da variância das exigências nutricionais dentro de cada grupo (Dairy Global, 2020).

Ao reduzir a variabilidade dentro dos grupos, o sistema de alimentação torna-se mais racional, preciso e econômico. Assim, o agrupamento de animais constitui uma etapa essencial para o sucesso da complementação nutricional, servindo de base para estratégias mais eficientes de formulação e fornecimento de dietas. Estudos demonstram que o agrupamento de vacas pode resultar em melhorias na saúde das vacas, aumento da produção, redução da incidência de distúrbios metabólicos e aumento da renda sobre os custos de alimentação (Hubbard Feeds, 2021).

2.3. Pesquisa Operacional e Programação Linear

A Pesquisa Operacional (PO) é uma área da matemática aplicada voltada para a modelagem e resolução de problemas complexos de tomada de decisão, por meio de métodos quantitativos. Surgiu durante a Segunda Guerra Mundial com o objetivo de otimizar operações militares, sendo posteriormente incorporada por diversos setores, incluindo a agricultura, logística, indústria e serviços (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

A PO busca representar sistemas reais por meio de modelos matemáticos, que são representações de fenômenos expressas matematicamente e que podem ser utilizados, entre outros, para tomada de decisões com base em dados quantitativos ou para encontrar soluções "ótimas" que considerem recursos limitados e múltiplas restrições.

Dentro desse campo, destaca-se a Programação Linear (PL), uma das técnicas mais utilizadas para otimização de problemas com relações lineares entre variáveis (TAHA, 2017). A Programação Linear é um método matemático empregado para atender a uma demanda específica por meio da otimização de uma função objetivo, sujeita a um conjunto de condições previamente definidas (SHAMBLIN; STEVENS, 1979). Segundo Passos (2000), trata-se da alocação ideal de recursos escassos entre atividades concorrentes, buscando maximizar ou minimizar uma função linear composta por variáveis, respeitando um sistema de restrições também lineares.

Um modelo para Programação Linear é um tipo específico de modelo matemático no qual:

- Todas as equações e inequações são lineares;
- Existe uma função objetivo linear que se deseja maximizar ou minimizar;
- O problema está sujeito a restrições lineares.

A estrutura de um problema de PL envolve três componentes principais: variáveis de decisão, restrições e função objetivo. As variáveis de decisão representam os elementos controláveis do problema, refletindo as possíveis ações que podem ser tomadas. As restrições delimitam o espaço viável das soluções, expressando limitações sobre os recursos ou condições técnicas. A função objetivo, por sua vez, quantifica o objetivo do problema, como minimizar custos ou maximizar lucros, a ser otimizado dentro do conjunto viável (VANDERBEI, 2020).

De acordo com Hillier e Lieberman (2013), o termo "linear" indica que todas as equações envolvidas são de primeira ordem, enquanto "programação" refere-se ao planejamento sistemático de ações, e não à programação de computadores. Assim, a Programação Linear pode ser compreendida como uma ferramenta para planejar atividades de forma a obter a melhor solução possível entre as alternativas viáveis.

Vanderbei (2020) e Queiroz (2014) apresentam uma formulação genérica para problemas de PL, expressa da seguinte forma:

$$\begin{array}{ll} \text{Otimizar } z = f(x) & \text{(i)} \\ \text{sujeito a } \begin{cases} Ax \geq B & \text{(ii)} \\ x \geq 0. & \text{(iii)} \end{cases} & \text{(1)} \end{array}$$

Onde:

- (i) representa a função objetivo, que deve ser maximizada ou minimizada;
- (ii) representa o conjunto de restrições do problema;
- (iii) refere-se às condições de não negatividade das variáveis;
- As variáveis de decisão são representadas pelo vetor $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Dessa forma, a Programação Linear constitui um dos principais instrumentos da Pesquisa Operacional, voltado à resolução de problemas complexos de alocação e otimização. No contexto da formulação de dietas para ruminantes, a PL permite definir a combinação ótima de ingredientes que atenda aos requisitos nutricionais ao menor custo possível. Essa abordagem mostra-se particularmente eficaz quando há múltiplas exigências nutricionais e diversas alternativas de ingredientes (IDEHARA; RODRIGUES, 2011; QUEIROZ, 2014).

2.4. Trabalhos Correlatos

A literatura apresenta diversos estudos voltados ao desenvolvimento de dietas alimentares para o gado leiteiro, empregando diferentes abordagens. Alguns desses trabalhos se alinham aos objetivos desta pesquisa e são resumidos nesta seção. No entanto, a ideia de complementar a dieta total com ingredientes principais, visando atender aos requisitos nutricionais de diferentes grupos de animais, ainda é pouco explorada e demanda investigação mais aprofundada.

No trabalho conduzido por Santiago (2021), foi desenvolvido um aplicativo móvel para apoiar a gestão nutricional de vacas leiteiras e gerar indicadores de rentabilidade para propriedades rurais no noroeste do Rio Grande do Sul. O aplicativo visa otimizar o desempenho das dietas e monitorar custos. Entretanto, diferentemente da proposta deste trabalho, não foram aplicadas técnicas de Pesquisa Operacional na formulação das dietas. Além disso, o estudo formulou dietas completas para os grupos de animais que foram segmentados na pesquisa, sem focar na complementação com ajustes direcionados, o que pode comprometer a eficiência na prática.

Idehara e Rodrigues (2011) utilizaram Programação Linear com o algoritmo de Karmarkar para formular dietas para bovinos, com foco em minimizar os custos e atender às exigências nutricionais. Apesar da semelhança com o presente estudo em termos de abordagem matemática e uso de ingredientes disponíveis, o trabalho não considerou bovinos leiteiros, tampouco a divisão em grupos nem estratégias de complementação. Ainda assim, demonstrou que o uso de PL pode ser eficaz na formulação de dietas balanceadas e econômicas.

A pesquisa de Petry e Pagliarini (2009) também utilizou Programação Linear para criar rações destinadas a vacas leiteiras, considerando as necessidades individuais de três animais. Após o cálculo dos déficits nutricionais, alimentos concentrados foram utilizados para supri-los. Apesar de abordar a personalização da dieta, o estudo limitou-se a poucos animais e não realizou a segmentação do rebanho, o que pode dificultar sua aplicação em contextos maiores.

No estudo de Li et al. (2022), três estratégias de otimização, Programação Linear Iterativa, Programação Quadrática Sequencial e Otimização Global Determinística, foram avaliadas para formular dietas econômicas para bovinos leiteiros, com base nas diretrizes do *NRC*. Embora o trabalho contemplasse diferentes fases fisiológicas, como vacas em lactação, secas e novilhas, não houve divisão do rebanho em grupos e tampouco foi explorada a complementação nutricional, optando pela formulação da dieta total com base nos índices de cada animal.

A Tabela 1 resume os principais trabalhos relacionados ao escopo deste estudo. Observa-se que, embora utilizem Programação Linear ou abordagens similares para minimizar custos e atender a requisitos nutricionais, nenhum deles aplica técnicas de Pesquisa Operacional voltadas especificamente à complementação da dieta de bovinos leiteiros. Além disso, apenas um dos estudos considera a formulação voltada para grupos de produção, uma estratégia prática e realista para propriedades leiteiras.

Neste contexto, o presente trabalho se diferencia por propor a complementação da dieta base com a utilização de PL, utilizando ingredientes disponíveis na propriedade, seus custos individuais, restrições e a segmentação dos animais em grupos produtivos.

Tabela 1. Tabela comparativa dos trabalhos correlatos

Autores	Técnicas de PO ¹	Considera Grupos de Animais	Resumo do Trabalho
Santiago (2021)	Não há	Sim	Formular dieta de menor custo e gerenciar receita através de APP Móvel
Idehara e Rodrigues (2011)	PL	Não	Formulação de dietas com menor custo, com base nos ingredientes disponíveis
Petry e Pagliarini (2009)	PL	Não	Formular rações de menor custo considerando individualidades e o déficit nutricional dos animais
Li et al. (2022)	PL, PQS e OGD	Não	Formular rações de menor custo e avaliar as presentes técnicas de otimização

Fonte: Elaborado pelo autor

¹ PO: Pesquisa Operacional; Não há: Não se aplicou técnicas de PO; PL: Programação Linear; PQS: Programação Quadrática Sequencial; OGD: Otimização Global Determinística.

Assim como parte dos estudos correlatos, a validação nutricional é fundamentada nas recomendações do *National Research Council (NRC)*, com o intuito de fornecer uma dieta adequada à maior parte do rebanho, promovendo redução de custos e ganhos em produtividade.

3. Formulação e Implementação do Modelo para Planejamento Alimentar Bovino

O principal objetivo deste trabalho é propor modelos matemáticos que permitam formular dietas complementares destinadas a bovinos leiteiros.

Estes modelos consideram que uma dieta bovina base, fornecida a todos os animais de um rebanho, deve ser complementada com nutrientes que são deficitários para cada grupo produtivo.

Aqui serão apresentados dois modelos construídos no âmbito deste trabalho. Ambos fornecem dietas complementares para grupos produtivos distintos, sendo que estas têm o menor custo possível, respeitando os limites definidos previamente.

O primeiro modelo, denominado Modelo por Restrições (Seção 3.2), adota uma abordagem clássica da Programação Linear, impondo limites mínimos e máximos sobre o fornecimento de cada nutriente. Essa estrutura garante que a complementação atenda às exigências nutricionais sem ultrapassá-las além de um intervalo previamente definido, permitindo um controle rigoroso sobre a formulação da dieta.

O segundo modelo, denominado Modelo com Penalizações (Seção 3.3), representa uma evolução mais flexível e realista. Em vez de impor limites rígidos, ele incorpora penalizações diretamente na função objetivo, tratando o excesso de nutrientes, de forma ponderada, como preferência indesejável. Essa abordagem orienta o modelo a buscar soluções mais equilibradas entre custo, simplicidade operacional e precisão nutricional.

No restante desta Seção serão apresentadas as premissas e o embasamento técnico para a definição dos modelos, seguido do Modelo por Restrições e do Modelo com Penalizações. Por fim, são apresentadas comparações e considerações sobre os resultados obtidos com o uso dos modelos.

É importante destacar que a execução dos modelos em ferramentas matemáticas específicas será discutida na Seção 4.1.

3.1. Premissas e Informações Técnicas

A formulação matemática foi fundamentada em um levantamento técnico realizado junto a profissional da área de nutrição animal, que orientou a seleção dos nutrientes prioritários, a inclusão dos ingredientes e os critérios operacionais adotados no sistema. Este levantamento incluiu entrevistas que objetivaram a compreensão das práticas atuais de formulação de dietas para bovinos leiteiros e a identificação dos nutrientes de maior relevância prática.

Por indicação do auxílio de profissional da área, também houve uso de material da literatura especializada que traz práticas profissionais e orientações consolidadas, especialmente os fornecidos nos livros National Academies of Sciences, Engineering and Medicine (2021) e National Research Council (2001).

Com base nessas fontes, foram considerados os seguintes nutrientes na formulação: Matéria Seca (MS), Proteína Bruta (PB), Fibra em Detergente Neutro (FDN), Fibra em Detergente Ácido (FDA), Nutrientes Digestíveis Totais (NDT) e Amido. Esses nutrientes foram escolhidos devido à sua importância para o desempenho produtivo e o equilíbrio nutricional dos animais.

A Matéria Seca (MS) representa a fração da dieta desprovida de água, sendo fundamental como unidade padrão de referência, pois elimina variações de umidade entre os ingredientes e permite comparações mais precisas entre os níveis nutricionais ofertados e requeridos. A Proteína Bruta (PB) é essencial para o atendimento das exigências proteicas dos animais, fundamentais para manutenção, crescimento e produção de leite. A Fibra em Detergente Neutro (FDN) e a Fibra em Detergente Ácido (FDA) são indicativos da fração fibrosa da dieta, estando associadas respectivamente à ingestão e à digestibilidade da fibra. O teor de Nutrientes Digestíveis Totais (NDT) expressa a densidade energética total da dieta, sendo amplamente utilizado na prática zootécnica para estimar o atendimento energético. Já o amido representa uma fonte de energia rapidamente fermentável, influenciando diretamente a produção de leite e o balanço energético (National Research

Council, 2001).

Dessa forma, seguindo as práticas recomendadas e o material especializado consultado, todos os valores nutricionais e quantidades dos ingredientes foram expressos em kg/dia na base de matéria seca (MS). A composição nutricional dos ingredientes, por sua vez, foi inserida no sistema como percentual em relação à MS (%MS), refletindo a forma usual de representação desses dados em tabelas técnicas. Durante os cálculos, o modelo realiza automaticamente as conversões necessárias, assegurando consistência interna e permitindo operar exclusivamente com dados comparáveis entre diferentes dietas e ingredientes, todos expressos na mesma unidade de medida.

A identificação de déficit nutricional ocorre quando a quantidade fornecida pela dieta base para um nutriente específico não atende aos requisitos mínimos estabelecidos para o grupo animal. Apenas nesses casos, as restrições nutricionais são aplicadas, evitando otimizações desnecessárias para nutrientes já adequadamente supridos pela dieta base.

Além dos requisitos nutricionais, outros aspectos operacionais e zootécnicos foram incorporados ao modelo, uma vez que influenciam diretamente a viabilidade da dieta proposta. Esses fatores são essenciais para a aplicabilidade do modelo em cenários reais de produção leiteira:

- Classificação dos animais em grupos produtivos com exigências nutricionais distintas: Permite a formulação personalizada das dietas, adequando-se às diferentes fases de produção, níveis de produtividade e estágios fisiológicos dos animais;
- Ingredientes disponíveis na propriedade e suas composições nutricionais: Garante que a formulação seja feita apenas com insumos acessíveis, utilizando dados confiáveis obtidos de tabelas técnicas como o NRC;
- Limites mínimos e máximos de inclusão de ingredientes: Asseguram o uso adequado de cada ingrediente, respeitando critérios técnicos como palatabilidade, balanceamento nutricional e segurança alimentar;
- Disponibilidade física de ingredientes em estoque: Evita proposições inviáveis, limitando o uso de cada ingrediente à sua quantidade efetiva disponível na propriedade;
- Minimização do custo da dieta: Orienta o modelo a buscar combinações economicamente eficientes de ingredientes, contribuindo para a sustentabilidade financeira da atividade leiteira;

Esses elementos garantem que a formulação proposta pelo modelo não apenas atenda aos requisitos nutricionais dos animais, mas também seja viável dentro da realidade operacional das propriedades leiteiras. Dessa forma, busca-se unir a precisão técnica à aplicabilidade prática, permitindo que os resultados gerados possam ser implementados com segurança e efetividade no campo.

3.2. Modelo por Restrições

O modelo por restrições adota uma abordagem clássica da Programação Linear, estabelecendo limites rígidos sobre o fornecimento de cada nutriente por meio de restrições explícitas de mínimo e máximo. Esta estrutura assegura que a complementação nutricional atenda rigorosamente às exigências dentro de intervalos previamente definidos,

garantindo controle preciso sobre a formulação da dieta sem permitir desvios significativos dos valores alvo.

Os limites mínimos e máximos ($limit_nutr_min_{g,n}$ e $limit_nutr_max_{g,n}$) representam os limites nutricionais efetivos utilizados pelo modelo de otimização. Esses valores são calculados automaticamente no *backend*, com base nos requisitos nutricionais definidos para cada grupo e nutriente, e ajustados por percentuais de tolerância técnica. Tais percentuais são definidos conforme a recomendação do profissional da área de nutrição animal, permitindo que o modelo opere com segurança dentro de faixas nutricionais adequadas, evitando tanto deficiências quanto excessos prejudiciais.

3.2.1. Variáveis de decisão e função objetivo

A variável de decisão do modelo representa as quantidades dos ingredientes utilizados na formulação da dieta complementar para cada grupo animal. Neste modelo, cada grupo g recebe uma quantidade específica do ingrediente i , expressa em quilogramas de matéria seca por animal por dia:

- $qtd_{g,i}$: variável que indica a quantidade, em quilogramas de matéria seca, do ingrediente i destinada ao grupo animal g .

A função objetivo busca minimizar o custo total da dieta complementar considerando o preço por quilograma de cada ingrediente multiplicado pela quantidade utilizada. Esta abordagem prioriza apenas o aspecto econômico da formulação.

$$\min \sum_{g \in G} \sum_{i \in I} preco_i \cdot qtd_{g,i} \quad (2)$$

Onde:

- G : conjunto de grupos de animais;
- I : conjunto de ingredientes disponíveis;
- $preco_i$: preço por quilograma do ingrediente i ;
- $qtd_{g,i}$: variável que indica a quantidade, em quilogramas de matéria seca, do ingrediente i destinada ao grupo animal g .

3.2.2. Restrição de disponibilidade dos ingredientes

Esta restrição assegura que a soma das quantidades utilizadas de cada ingrediente em todos os grupos não ultrapasse a disponibilidade física existente na propriedade. Isso reflete uma limitação realista, já que os ingredientes possuem estoques limitados, o que impõe restrições práticas à formulação.

$$\sum_{g \in G} qtd_{g,i} \leq disponibilidade_i \quad \forall i \in I \quad (3)$$

Onde:

- G : conjunto de grupos de animais;
- $qtd_{g,i}$: variável que indica a quantidade, em quilogramas de matéria seca, do ingrediente i destinada ao grupo animal g ;
- $disponibilidade_i$: quantidade disponível do ingrediente i na propriedade.

3.2.3. Limite mínimo de inclusão

Esta restrição impõe que determinados ingredientes sejam incluídos com uma quantidade mínima pré-definida. O objetivo é evitar soluções com quantidades residuais que não tenham impacto prático na dieta e permitir autonomia para o usuário definir alguns ingredientes que ele entende como indispensáveis na complementação. Dessa forma, a inclusão mínima contribui para uma formulação nutricionalmente eficaz e zootecnicamente coerente. A restrição é aplicada apenas nos casos em que o limite mínimo foi definido pelo usuário e o grupo apresenta déficit nutricional.

$$qtd_{g,i} \geq limite_min_i \quad \forall g, i \text{ com } limite_min_i > 0 \wedge deficit_g \quad (4)$$

- G : conjunto de grupos de animais;
- I : conjunto de ingredientes disponíveis;
- $qtd_{g,i}$: variável que indica a quantidade, em quilogramas de matéria seca, do ingrediente i destinada ao grupo animal g ;
- $limite_min_i$: limite mínimo de inclusão para o ingrediente i ;
- $deficit_g$: condição que indica que o grupo g apresenta déficit nutricional em pelo menos um nutriente.

3.2.4. Limite máximo de inclusão

Alguns ingredientes possuem restrições máximas, seja por questões de segurança, palatabilidade ou outros fatores zootécnicos. Esta restrição garante que a quantidade do ingrediente não ultrapasse esse limite, mantendo a dieta dentro dos parâmetros aceitáveis.

$$qtd_{g,i} \leq limite_max_i \quad \forall g, i \text{ com } limite_max_i > 0 \quad (5)$$

Onde:

- G : conjunto de grupos de animais;
- I : conjunto de ingredientes disponíveis;
- $qtd_{g,i}$: variável que indica a quantidade, em quilogramas de matéria seca, do ingrediente i destinada ao grupo animal g ;
- $limite_max_i$: limite máximo de inclusão para o ingrediente i .

3.2.5. Atendimento dos requisitos nutricionais mínimos

Esta é uma das restrições centrais do modelo, responsável por garantir que a complementação alimentar atenda, no mínimo, às exigências nutricionais de cada nutriente n

para cada grupo animal g com deficiência identificada. Para esses casos, a soma da contribuição dos ingredientes complementares, acrescida da quantidade fornecida pela dieta base, deve atingir ou ultrapassar o limite mínimo estabelecido no sistema para aquele nutriente.

Cada grupo produtivo possui suas próprias exigências nutricionais mínimas, previamente definidas, e essa restrição assegura que essas necessidades sejam plenamente atendidas por meio da complementação.

$$\sum_{i \in I} \left(\frac{perc_{i,n}}{100} \cdot qtd_{g,i} \right) + d_{b_n} \geq limit_nutr_min_{g,n} \quad \forall g, n \text{ com } deficit_{g,n} \quad (6)$$

Onde:

- G : conjunto de grupos de animais;
- I : conjunto de ingredientes disponíveis;
- N : conjunto de nutrientes considerados;
- $qtd_{g,i}$: quantidade, em kg de matéria seca, do ingrediente i destinada ao grupo animal g ;
- $perc_{i,n}$: percentual do nutriente n presente no ingrediente i ;
- d_{b_n} : quantidade do nutriente n já fornecida pela dieta base;
- $limit_nutr_min_{g,n}$: quantidade mínima exigida do nutriente n para o grupo g .
- $deficit_{g,n}$: condição que indica que o grupo g apresenta déficit no nutriente n .

3.2.6. Controle dos requisitos nutricionais máximos

Para evitar excessos nutricionais que possam gerar desequilíbrios metabólicos ou desperdício de recursos, esta restrição estabelece o limite máximo permitido de cada nutriente, mesmo em casos de déficit. O valor inclui o que já é fornecido pela dieta base.

$$\sum_{i \in I} \left(\frac{perc_{i,n}}{100} \cdot qtd_{g,i} \right) + d_{b_n} \leq limit_nutr_max_{g,n} \quad \forall g, n \text{ com } deficit_{g,n} \quad (7)$$

Onde:

- G : conjunto de grupos de animais;
- I : conjunto de ingredientes disponíveis;
- N : conjunto de nutrientes considerados;
- $qtd_{g,i}$: variável que indica a quantidade, em quilogramas de matéria seca, do ingrediente i destinada ao grupo animal g ;
- $perc_{i,n}$: percentual do nutriente n presente no ingrediente i ;
- d_{b_n} : quantidade do nutriente n já fornecida pela dieta base;
- $limit_nutr_max_{g,n}$: quantidade máxima permitida do nutriente n para o grupo g .
- $deficit_{g,n}$: condição que indica que o grupo g apresenta déficit no nutriente n .

3.3. Modelo com Penalizações

O modelo com penalizações possui uma função objetivo que, além dos aspectos listados na Seção 3.1, incorpora penalizações associadas ao excesso de nutrientes fornecidos, ponderadas por um peso de prioridade nutricional atribuído a cada nutriente.

As penalizações representam preferências explícitas incorporadas ao modelo com o objetivo de orientar a solução para resultados mais desejáveis do ponto de vista prático e zootécnico. Elas não impõem restrições rígidas, mas atuam como incentivos ou desincentivos dentro da função objetivo, guiando o algoritmo de otimização a favorecer dietas que sejam, por exemplo, mais equilibradas nutricionalmente e com menor risco de excesso de nutrientes. No presente modelo, foram aplicadas penalizações relacionadas ao excesso de nutrientes fornecidos em relação ao requisito nutricional necessário, ponderadas conforme a importância de cada nutriente para o equilíbrio nutricional.

3.3.1. Variáveis de decisão e função objetivo

As variáveis de decisão do modelo representam as quantidades dos ingredientes utilizados na formulação da dieta complementar para cada grupo animal, bem como o eventual excesso de nutrientes fornecido além do requisito mínimo. Neste modelo, cada grupo g recebe uma quantidade específica do ingrediente i , expressa em quilogramas de matéria seca por animal por dia:

- $qtd_{g,i}$: variável que indica a quantidade, em quilogramas de matéria seca, do ingrediente i destinada ao grupo animal g .
- $excesso_{g,n}$: variável que representa a quantidade excedente do nutriente n fornecida ao grupo g , além do mínimo necessário.

A função objetivo busca minimizar o custo total da dieta complementar para todos os grupos, combinando dois componentes principais: (i) o custo monetário associado à quantidade de cada ingrediente utilizado, refletindo o impacto econômico direto; e (ii) uma penalização ponderada sobre o excesso de nutrientes fornecidos além do necessário, considerando o peso relativo de cada nutriente.

$$\min \sum_{g \in G} \sum_{i \in I} preco_i \cdot qtd_{g,i} + \sum_{g \in G} \sum_{n \in N} peso_{n,n} \cdot excesso_{g,n} \quad (8)$$

Onde:

- G : conjunto de grupos de animais;
- I : conjunto de ingredientes disponíveis;
- N : conjunto de nutrientes considerados;
- $qtd_{g,i}$: variável que indica a quantidade, em quilogramas de matéria seca, do ingrediente i destinada ao grupo g ;
- $preco_i$: preço por quilograma do ingrediente i ;
- $peso_{n,n}$: peso atribuído ao nutriente n (prioridade zootécnica na penalização);
- $excesso_{g,n}$: variável que representa a quantidade excedente do nutriente n fornecida ao grupo g além do necessário.

Os pesos nutricionais utilizados no modelo foram definidos com base em orientações de um profissional da área de nutrição animal. O parâmetro $peso_{n_n}$ permite ajustar a penalização por excesso de nutrientes de acordo com sua relevância em uma dieta, atribuindo maior peso a nutrientes considerados críticos, como proteína bruta, amido e matéria seca. Essa calibragem orienta o modelo a buscar soluções que priorizem o equilíbrio nutricional de forma prática e tecnicamente embasada, evitando excessos desnecessários e promovendo dietas mais ajustadas às exigências reais dos animais.

Essa formulação expressa um compromisso entre custo, equilíbrio nutricional e aplicabilidade prática, orientando o modelo a gerar soluções viáveis e tecnicamente fundamentadas.

3.3.2. Restrição de disponibilidade dos ingredientes

Esta restrição assegura que a soma das quantidades utilizadas de cada ingrediente em todos os grupos não ultrapasse a disponibilidade física existente na propriedade. Isso reflete uma limitação realista, já que os ingredientes possuem estoques limitados, o que impõe restrições práticas à formulação.

$$\sum_{g \in G} qtd_{g,i} \leq disponibilidade_i \quad \forall i \in I \quad (9)$$

Onde:

- G : conjunto de grupos de animais;
- I : conjunto de ingredientes disponíveis;
- $qtd_{g,i}$: variável que indica a quantidade, em quilogramas de matéria seca, do ingrediente i destinada ao grupo g ;
- $disponibilidade_i$: quantidade disponível do ingrediente i na propriedade.

3.3.3. Limite mínimo de inclusão

Esta restrição impõe que determinados ingredientes sejam incluídos com uma quantidade mínima pré-definida. O objetivo é evitar soluções com quantidades residuais que não tenham impacto prático na dieta e permitir autonomia para o usuário definir alguns ingredientes que ele entende como indispensáveis na complementação. Dessa forma, a inclusão mínima contribui para uma formulação nutricionalmente eficaz e zootecnicamente coerente. A restrição é aplicada apenas nos casos em que o limite mínimo foi definido pelo usuário e o grupo apresenta déficit nutricional.

$$qtd_{g,i} \geq limite_min_i \quad \forall g, i \text{ com } limite_min_i > 0 \wedge deficit_g \quad (10)$$

Onde:

- G : conjunto de grupos de animais;
- I : conjunto de ingredientes disponíveis;
- $qtd_{g,i}$: variável que indica a quantidade, em quilogramas de matéria seca, do ingrediente i destinada ao grupo animal g ;

- $limite_min_i$: limite mínimo de inclusão para o ingrediente i ;
- $deficit_g$: condição que indica que o grupo g possui déficit nutricional em pelo menos um nutriente.

3.3.4. Limite máximo de inclusão

Alguns ingredientes possuem restrições máximas, seja por questões de segurança, palatabilidade ou outros fatores zootécnicos. Esta restrição garante que a quantidade do ingrediente não ultrapasse esse limite, mantendo a dieta dentro dos parâmetros aceitáveis.

$$qtd_{g,i} \leq limite_max_i \quad \forall g, i \text{ com } limite_max_i > 0 \quad (11)$$

Onde:

- G : conjunto de grupos de animais;
- I : conjunto de ingredientes disponíveis;
- $qtd_{g,i}$: variável que indica a quantidade, em quilogramas de matéria seca, do ingrediente i destinada ao grupo animal g ;
- $limite_max_i$: limite máximo de inclusão para o ingrediente i .

3.3.5. Atendimento dos requisitos nutricionais

Esta é a principal restrição do modelo, que assegura que a soma da contribuição dos ingredientes na dieta complementar, somada à dieta base já fornecida, atinja ou ultrapasse a quantidade mínima necessária para cada nutriente em cada grupo. A aplicação desta restrição ocorre apenas para nutrientes e grupos onde se identifica déficit nutricional, evitando otimizações desnecessárias.

Cada grupo produtivo possui suas próprias exigências nutricionais mínimas, que devem ser satisfeitas na complementação. As restrições do modelo garantem que as quantidades de nutrientes fornecidos pelos ingredientes complementares somadas ao que já está presente na dieta base atinjam os níveis requeridos para cada nutriente.

$$\sum_{i \in I} \left(\frac{perc_{i,n}}{100} \cdot qtd_{g,i} \right) + d_{b_n} \geq qtd_nec_{g,n} \quad \forall g, n \text{ com } deficit_{g,n} \quad (12)$$

Onde:

- G : conjunto de grupos de animais;
- I : conjunto de ingredientes disponíveis;
- N : conjunto de nutrientes considerados;
- $qtd_{g,i}$: quantidade, em kg de matéria seca, do ingrediente i destinada ao grupo g ;
- $perc_{i,n}$: percentual do nutriente n presente no ingrediente i ;
- d_{b_n} : quantidade do nutriente n já fornecida pela dieta base;
- $qtd_nec_{g,n}$: quantidade mínima requerida do nutriente n para o grupo g ;
- $deficit_{g,n}$: condição que indica que o grupo g apresenta déficit no nutriente n .

3.3.6. Cálculo do excesso de nutrientes

Para controlar a qualidade nutricional da dieta e evitar desperdícios, esta restrição calcula o excesso de nutrientes fornecido em relação ao requisito mínimo. Tal excesso é penalizado na função objetivo, com peso proporcional à importância do nutriente, para incentivar o modelo a buscar dietas que atendam precisamente às exigências nutricionais, sem superdimensionamento.

$$excesso_{g,n} \geq \sum_{i \in I} \left(\frac{perc_{i,n}}{100} \cdot qtd_{g,i} \right) + d_{b_n} - qtd_{nec_{g,n}} \quad \forall g, n \quad (13)$$

Onde:

- I : conjunto de ingredientes disponíveis;
- G : conjunto de grupos de animais;
- N : conjunto de nutrientes considerados;
- $qtd_{g,i}$: variável que indica a quantidade, em quilogramas de matéria seca, do ingrediente i destinada ao grupo animal g ;
- $perc_{i,n}$: percentual do nutriente n presente no ingrediente i ;
- d_{b_n} : quantidade do nutriente n já fornecida pela dieta base;
- $qtd_{nec_{g,n}}$: quantidade mínima requerida do nutriente n para o grupo g .
- $excesso_{g,n}$: variável que representa a quantidade excedente do nutriente n fornecida ao grupo g , além do mínimo necessário.

3.4. Considerações sobre os Modelos

Os modelos matemáticos propostos tratam a formulação de dietas complementares para bovinos leiteiros sob enfoques distintos. O Modelo por Restrições impõe limites absolutos aos parâmetros nutricionais; essa estrutura garante previsibilidade e segurança no atendimento das exigências, com menor complexidade computacional quando há solução viável.

O Modelo com Penalizações adota uma abordagem mais flexível, incorporando penalidades na função objetivo em vez de impor restrições rígidas. Penalizações por excessos nutricionais, com peso proporcional à importância do nutriente, reduzem desperdícios sem comprometer a viabilidade e permitem dar maior enfoque aos nutrientes prioritários dentro da dieta. Essa estrutura se ajusta melhor à variabilidade prática das propriedades leiteiras.

A evolução do modelo por restrições para o modelo com penalizações foi motivada por observações práticas durante o desenvolvimento e testes dos algoritmos. Verificou-se que a rigidez das restrições pode inviabilizar soluções ou gerar dietas pouco operacionais. Com penalizações, o modelo adapta-se melhor a diferentes contextos, mantendo os objetivos nutricionais como prioridade.

Ambos os modelos compartilham características fundamentais que garantem sua aplicabilidade prática: consideram a disponibilidade real dos ingredientes, respeitam limites técnicos de inclusão, incorporam custos econômicos reais e mantêm foco no atendimento das exigências nutricionais específicas de cada grupo produtivo.

Os resultados comparativos entre os dois modelos, abordando custo, simplicidade, desempenho nutricional e viabilidade computacional, serão apresentados detalhadamente na Seção 5.

4. Sistema Inteligente para Nutrição de Bovinos

O *Sistema Inteligente para Nutrição de Bovinos (SINBOV)* foi desenvolvido com o objetivo de automatizar o processo de complementação de dietas para bovinos leiteiros, considerando exigências nutricionais específicas e dados operacionais de propriedades leiteiras. A ferramenta alia técnicas de otimização com tecnologias de desenvolvimento de software, integrando modelagem matemática, banco de dados, interface gráfica e algoritmos de processamento de dados zootécnicos.

O método desenvolvido realiza a complementação de uma dieta base previamente fornecida aos animais, buscando atender aos requisitos nutricionais específicos de diferentes grupos produtivos, utilizando técnicas de Programação Linear para minimizar o custo total de alimentação. O sistema é composto por um *backend* integrado a banco de dados, uma interface gráfica (*GUI*) para gerenciamento dos dados e um módulo de otimização responsável pela formulação da dieta complementar.

Cabe destacar que o escopo deste trabalho está limitado ao desenvolvimento computacional de uma ferramenta básica que utiliza os modelos matemáticos descritos na Seção 3 para elaboração de dietas complementares. A formulação total da dieta, bem como sua validação zootécnica prática em campo, não são objetos desta pesquisa. De forma semelhante, questões relacionadas à Engenharia de Software como modelagem do sistema e validação com usuários fogem do escopo do trabalho.

4.1. Estrutura e Tecnologias

A implementação computacional foi realizada integralmente na linguagem de programação *Python* (Python Software Foundation, 2024), escolhida por sua ampla aceitação na área científica, vasta disponibilidade de bibliotecas específicas para otimização e facilidade de integração com banco de dados e interfaces gráficas. Essa escolha também permitiu maior flexibilidade e escalabilidade para eventuais aprimoramentos futuros.

O *SINBOV* foi desenvolvido com uma arquitetura modular, composta por quatro componentes interligados: interface gráfica, banco de dados, módulo de otimização e lógica de integração. A interface gráfica (*GUI*) permite que o usuário realize o cadastro e manutenção dos ingredientes, nutrientes, dados zootécnicos dos animais, requisitos nutricionais dos grupos e a dieta base. Também possibilita a visualização dos resultados das dietas complementadas, com apresentação em dashboard e relatório detalhado.

Os dados são armazenados em um banco de dados relacional *PostgreSQL* (PostgreSQL Global Development Group, 2024), garantindo robustez, integridade dos registros e eficiência nas consultas realizadas pelas diversas rotinas internas da aplicação.

O módulo de otimização é responsável por estruturar e resolver o problema de Programação Linear para a formulação da dieta complementar. Inicialmente, a modelagem matemática foi construída na linguagem *AMPL* (A Mathematical Programming Language) (FOURER; GAY; KERNIGHAN, 2002), amplamente utilizada em modelagem de problemas de otimização. A integração entre o modelo em *AMPL* e o ambiente

Python foi realizada por meio da biblioteca `amplpy` (AMPL Optimization Inc., 2024), permitindo o carregamento dinâmico de dados diretamente do banco de dados e a execução do modelo de forma automatizada na aplicação, eliminando a necessidade de arquivos intermediários.

Para a resolução do problema, foi utilizado o solver *Gurobi* (Gurobi Optimization, LLC, 2024), em razão de seu reconhecido desempenho e eficiência na resolução de problemas de Programação Linear, o que garante agilidade mesmo em cenários com múltiplos grupos e diversas variáveis.

A Figura 1 apresenta o fluxo operacional resumido do sistema, destacando de forma simplificada as principais interações entre os módulos e ferramentas empregadas na sua implementação. O detalhamento completo de cada etapa desse fluxo, incluindo a sequência de cadastros e processamento interno, será apresentado na Seção 4.2.

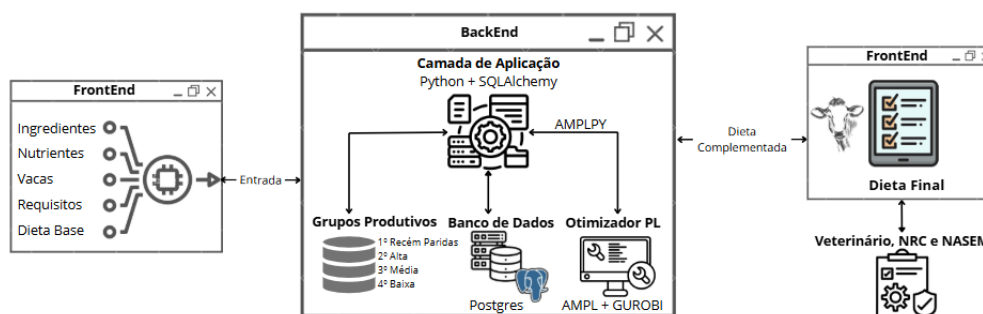


Figura 1. Arquitetura geral do SINBOV

Fonte: O Autor

4.2. Cadastro e Fluxo de Funcionamento

O funcionamento do *SINBOV* tem como premissa o cadastro dos dados técnicos essenciais por meio da interface gráfica desenvolvida, visando agilizar o trabalho técnico em propriedades leiteiras, oferecer maior precisão nas decisões nutricionais e reduzir o tempo gasto com cálculos manuais e ajustes empíricos.

Nessa etapa, é possível realizar diversas parametrizações fundamentais para o correto funcionamento do módulo de otimização, incluindo informações que refletem as condições atuais da propriedade. Isso abrange os ingredientes, suas composições nutricionais, dados zootécnicos dos animais, requisitos nutricionais por grupo e a dieta base fornecida ao rebanho.

Essas informações são organizadas nos seguintes cadastros:

- **Ingredientes:** Nome, custo por quilograma, limites mínimo e máximo de inclusão e disponibilidade em estoque.
- **Nutrientes:** Conjunto de nutrientes considerados na formulação da dieta, como Matéria Seca, Amido, Proteína Bruta (PB), FDN, FDA, NDT, entre outros, conforme orientações técnicas.
- **Composição dos ingredientes:** Percentual de cada nutriente presente em cada ingrediente, expresso em relação à matéria seca (%MS), formando a matriz nutricional utilizada na otimização.

- Animais: Identificação, produção de leite, dias em lactação, dias em gestação, peso e paridade, dados importantes para a segmentação produtiva.
- Requisitos nutricionais: Valores mínimos diários de cada nutriente, definidos com base em características produtivas e fisiológicas dos grupos animais.
- Dieta base: Combinação alimentar fornecida atualmente ao rebanho, utilizada como ponto de partida para a complementação.

Todas as informações nutricionais são padronizadas em quilogramas de matéria seca por animal/dia, assegurando consistência nas unidades e compatibilidade com os parâmetros utilizados na formulação da dieta por meio do modelo matemático.

Após o carregamento dos dados, o sistema prossegue para as etapas de segmentação dos animais, otimização da dieta e visualização dos resultados, conforme descrito nas seções a seguir.

4.3. Segmentação dos Grupos Produtivos

A segmentação dos animais é realizada automaticamente pelo sistema e constitui etapa fundamental para o funcionamento da ferramenta, já que os requisitos nutricionais variam de acordo com o estágio produtivo e o desempenho dos animais.

Diferentemente de abordagens fixas com grupos predefinidos, foi implementado um modelo dinâmico que utiliza dados individuais de produção de leite e estágio de lactação para classificar os animais em grupos produtivos. A lógica de segmentação considera critérios baseados em dias de lactação e na comparação da produção individual com a média do rebanho, sendo que os intervalos de dias utilizados para cada grupo foram definidos com base nas recomendações da Salman, Osmari e Santos (2011), enquanto os cálculos relativos às médias e aos desvios foram adaptados pelo autor para maior aderência ao método de complementação.

A Tabela 2 sintetiza os critérios de segmentação aplicados:

Tabela 2. Critérios para separação dos grupos de bovinos leiteiros

Grupo de Animais	Critério de Separação
Vacas recém-paridas	Primeiros 30 dias pós-parto
Alta produção	Produção $> \mu + X\%$ ou até 90 dias em lactação
Média produção	Produção entre $\mu - X\%$ e $\mu + X\%$
Baixa produção	Produção $< \mu - X\%$ ou nos 30 dias anteriores à secagem

Fonte: Adaptado de Salman, Osmari e Santos (2011), com ajustes do autor relativos à média do rebanho.

O parâmetro X , correspondente ao percentual de desvio em relação à média de produção μ , é configurável pelo usuário, variando usualmente entre 5% e 10%, proporcionando flexibilidade para diferentes realidades produtivas.

4.4. Execução da Otimização e Visualização dos Resultados

Com todos os dados e parâmetros previamente cadastrados, o modelo de otimização é estruturado automaticamente com base em Programação Linear. As restrições

são configuradas dinamicamente, levando em consideração apenas os grupos cuja dieta base apresenta deficiência em um ou mais nutrientes, evitando ajustes desnecessários e melhorando a eficiência computacional.

A avaliação da necessidade de complementação é integrada ao próprio modelo, que analisa se a dieta base atende às exigências nutricionais mínimas. Quando há déficit, as restrições correspondentes são ativadas, e o sistema formula uma dieta complementar específica para cada grupo.

A execução do modelo ocorre via biblioteca `amplpy`, que conecta o ambiente *Python* ao modelo em *AMPL*, com resolução pelo solver *Gurobi*, responsável por encontrar a combinação ótima de ingredientes que satisfaça as exigências ao menor custo.

A saída do modelo apresenta as quantidades de cada ingrediente (kg de MS por animal/dia) que devem ser adicionadas à dieta base. O sistema converte automaticamente esses valores para kg de alimento na forma natural por animal/dia, facilitando sua aplicação prática no manejo nutricional e visualização correta dos resultados. Com isso, os resultados finais são armazenados no banco de dados e disponibilizados ao usuário tanto por meio de relatório técnico quanto via *dashboard* interativo.

A Figura 2 ilustra essas duas interfaces do *SINBOV*: o *dashboard*, que exibe um resumo geral do rebanho e das dietas complementadas, e o relatório técnico detalhado, que apresenta os índices nutricionais da dieta otimizada em comparação com a dieta base e os requisitos definidos.

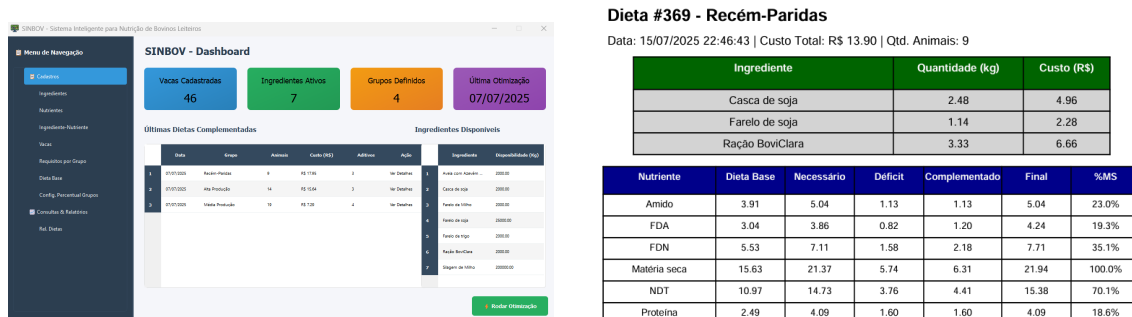


Figura 2. Visões do SINBOV: Dashboard e Relatório técnico

Todo o processo pode ser posteriormente revisado e validado pelo profissional da área de nutrição animal, com suporte técnico fundamentado nas recomendações do National Academies of Sciences, Engineering and Medicine (2021) e National Research Council (2001) utilizados como referência.

5. Resultados e Discussões

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do *SINBOV* em um rebanho leiteiro, evidenciando a formulação automática de dietas complementares para diferentes grupos produtivos. Os dados de entrada foram definidos em consulta com um profissional da área de nutrição animal, abrangendo a caracterização do rebanho, a definição da dieta base, os requisitos nutricionais e a análise econômica das complementações geradas.

5.1. Caracterização do Rebanho e Segmentação dos Grupos

Com base nos dados zootécnicos coletados, o sistema realizou automaticamente a segmentação dos animais em quatro grupos produtivos distintos. Para definição dos limites de classificação, foi adotado o valor de $X = 10\%$, conforme metodologia descrita na Seção 4.3. A Tabela 3 apresenta as médias dos principais parâmetros para cada grupo.

Tabela 3. Características médias dos grupos produtivos

Grupo	Produção Leite (kg/dia)	Dias Lactação	Peso (kg)	Prenhez Dias	Paridade
Alta Produção	33,96	58,36	594,64	60,00	3,29
Baixa Produção	21,88	263,75	543,75	227,50	3,50
Média Produção	28,76	162,16	578,68	135,32	2,68
Recém-Paridas	31,77	14,89	592,22	10,22	1,56
Média do Rebanho	29,09	124,79	577,32	108,26	2,76

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

A segmentação evidenciou a diversidade produtiva dentro do rebanho. O grupo de alta produção concentra animais em pico de lactação, enquanto o grupo de recém-paridas reúne vacas com elevada produção inicial e demandas específicas. Já os grupos de média e baixa produção representam estágios intermediários e finais da lactação, respectivamente, refletindo distintas exigências nutricionais.

5.2. Composição Nutricional dos Ingredientes

A composição nutricional dos ingredientes utilizados na formulação foi determinada com base em dados provenientes da literatura técnica especializada e validada por um profissional da área de nutrição animal. Foram adotados os mesmos percentuais utilizados por esse profissional na formulação de dietas por meio do software comercial de uso próprio, assegurando a padronização dos valores e a compatibilidade entre os dados empregados no sistema. A Tabela 4 apresenta os valores expressos em percentual da matéria seca (%MS), conforme utilizados nesse processo.

Tabela 4. Composição nutricional dos ingredientes utilizados (%MS)

Ingrediente	MS	Proteína	Amido	NDT	FDN	FDA
Farelo de soja	90,92	52,78	0,59	82,86	16,97	7,36
Farelo de milho	87,48	7,65	75,03	88,13	6,65	2,61
Farelo de trigo	88,80	17,00	21,80	74,39	44,00	15,00
Casca de soja	92,59	15,21	1,70	45,33	65,90	41,20
Silagem de milho	39,54	8,61	32,69	66,95	38,82	21,71
Aveia com azevém	18,00	24,00	2,92	63,84	41,54	24,51
Ração BoviClara	89,60	23,60	36,32	84,20	16,60	6,15

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

A diversidade de ingredientes disponíveis proporcionou flexibilidade ao sistema na escolha de combinações nutricionalmente equilibradas e economicamente viáveis, favorecendo ajustes adequados às exigências de cada grupo animal.

5.3. Formulação da Dieta Base

A dieta base foi formulada por um profissional da área de nutrição animal para atender integralmente aos requisitos nutricionais do grupo de baixa produção. Essa formulação serviu como referência para os demais grupos, permitindo ao sistema identificar as necessidades adicionais e gerar dietas complementares via otimização. A dieta definida pode ser consultada nos relatórios técnicos apresentados na Seção 5.4.

A escolha do grupo de baixa produção como base foi estratégica, por apresentar menores exigências nutricionais e possibilitar uma formulação mais simples e econômica. A partir da configuração inicial descrita na Seção 4.2, o sistema concentrou o processo de otimização na suplementação dos grupos com maior demanda, como média e alta produção e recém-paridas.

5.4. Resultados da Complementação Nutricional

O *SINBOV* identificou déficits nutricionais em três grupos produtivos: recém-paridas, média produção e alta produção, gerando automaticamente as complementações necessárias através dos modelos de Programação Linear descritos na Seção 3. A avaliação dos resultados foi estruturada em duas abordagens de otimização distintas, o Modelo por Restrições (MPR) (Seção 3.2) e o Modelo com Penalizações (MCP) (Seção 3.3), testados sob dois cenários específicos de disponibilidade de ingredientes.

O primeiro cenário simulou condições ideais de formulação, considerando livre disponibilidade de todos os ingredientes listados na Tabela 4, sem qualquer limitação quantitativa ou operacional. Este cenário permitiu avaliar o desempenho puro dos algoritmos de otimização, possibilitando a seleção irrestrita de ingredientes para atender aos requisitos nutricionais estabelecidos.

O segundo cenário reproduziu limitações práticas comuns em propriedades leiteiras, aplicando restrições específicas sobre um subconjunto de ingredientes previamente selecionados. Estas restrições incluíram limites mínimos e máximos de inclusão para quatro ingredientes estratégicos: Casca de Soja (0,00 a 1,00 kg), Silagem de Milho (0,00 a 5,00 kg), Aveia com Azevém Pastagem (5,00 a 22,00 kg) e Ração BoviClara (0,00 a 6,00 kg). As limitações foram definidas com base nas orientações do profissional da área de nutrição animal, refletindo disponibilidades reais e práticas de manejo alimentar.

Para garantir a viabilidade matemática das soluções, foram adotadas diferentes estratégias de tolerância nutricional. No primeiro cenário, o modelo por restrições operou com faixas de 5% acima e 2,5% abaixo dos valores de referência nutricional. No segundo cenário, devido às limitações impostas pelos ingredientes, a tolerância foi ampliada para 20% acima e 2,5% abaixo dos requisitos, assegurando a existência de soluções factíveis. O modelo com penalizações priorizou nutrientes essenciais (Matéria Seca, Proteína e Amido) através de pesos específicos, mantendo flexibilidade para nutrientes secundários (FDN, FDA e NDT).

5.4.1. Complementações para Recém-Paridas

Dieta #375 - Recém-Paridas

Data: 17/07/2025 19:10:18 | Custo Total: R\$ 13.90 | Qtd. Animais: 9

Ingrediente	Quantidade (kg)	Custo (R\$)
Casca de soja	2.48	4.96
Farelo de soja	1.14	2.28
Ração BoviClara	3.33	6.66

Nutriente	Dieta Base	Necessário	Deficit	Complementado	Final	%MS
Amido	3.91	5.04	1.13	1.13	5.04	23.0%
FDA	3.04	3.86	0.82	1.20	4.24	19.3%
FDN	5.53	7.11	1.58	2.18	7.71	35.1%
Matéria seca	15.63	21.37	5.74	6.31	21.94	100.0%
NDT	10.97	14.73	3.76	4.41	15.38	70.1%
Proteína	2.49	4.09	1.60	1.60	4.09	18.6%

Figura 3. Cenário 1 (MCP)

Dieta #387 - Recém-Paridas

Data: 17/07/2025 19:54:38 | Custo Total: R\$ 12.62 | Qtd. Animais: 9

Ingrediente	Quantidade (kg)	Custo (R\$)
Casca de soja	1.99	3.98
Farelo de soja	1.35	2.70
Ração BoviClara	2.97	5.94

Nutriente	Dieta Base	Necessário	Deficit	Complementado	Final	%MS
Amido	3.91	5.04	1.13	1.00	4.91	23.0%
FDA	3.04	3.86	0.82	1.01	4.05	19.0%
FDN	5.53	7.11	1.58	1.86	7.39	34.6%
Matéria seca	15.63	21.37	5.74	5.73	21.36	100.0%
NDT	10.97	14.73	3.76	4.09	15.06	70.5%
Proteína	2.49	4.09	1.60	1.56	4.05	18.9%

Figura 4. Cenário 1 (MPR)

Dieta #447 - Recém-Paridas

Data: 18/07/2025 12:16:59 | Custo Total: R\$ 14.76 | Qtd. Animais: 9

Ingrediente	Quantidade (kg)	Custo (R\$)
Aveia com Azevém Pastagem	5.00	1.00
Casca de soja	1.00	2.00
Ração BoviClara	5.88	11.76

Nutriente	Dieta Base	Necessário	Deficit	Complementado	Final	%MS
Amido	3.91	5.04	1.13	1.96	5.87	25.8%
FDA	3.04	3.86	0.82	0.93	3.97	17.5%
FDN	5.53	7.11	1.58	1.86	7.39	32.5%
Matéria seca	15.63	21.37	5.74	7.10	22.73	100.0%
NDT	10.97	14.73	3.76	5.43	16.40	72.2%
Proteína	2.49	4.09	1.60	1.60	4.09	18.0%

Figura 5. Cenário 2 (MCP)

Dieta #456 - Recém-Paridas

Data: 18/07/2025 13:12:51 | Custo Total: R\$ 13.49 | Qtd. Animais: 9

Ingrediente	Quantidade (kg)	Custo (R\$)
Aveia com Azevém Pastagem	5.00	1.00
Casca de soja	0.55	1.10
Ração BoviClara	5.70	11.40

Nutriente	Dieta Base	Necessário	Deficit	Complementado	Final	%MS
Amido	3.91	5.04	1.13	1.89	5.80	26.2%
FDA	3.04	3.86	0.82	0.74	3.78	17.1%
FDN	5.53	7.11	1.58	1.56	7.09	32.0%
Matéria seca	15.63	21.37	5.74	6.51	22.14	100.0%
NDT	10.97	14.73	3.76	5.10	16.07	72.6%
Proteína	2.49	4.09	1.60	1.50	3.99	18.0%

Figura 6. Cenário 2 (MPR)

As complementações para recém-paridas foram geradas considerando as elevadas exigências nutricionais características desta categoria, especialmente relacionadas à recuperação pós-parto e início da lactação. Os modelos de otimização demonstraram capacidade de atender adequadamente a estas demandas específicas, embora com estratégias diferenciadas de formulação.

No cenário de livre disponibilidade (Figuras 3 e 4), observou-se comportamento distinto entre os modelos. O modelo com penalizações priorizou o atendimento rigoroso aos requisitos nutricionais, resultando em formulações com maior precisão no balanceamento de nutrientes críticos, porém com custos superiores. O modelo por restrições demonstrou maior flexibilidade econômica, operando dentro das faixas de tolerância estabelecidas e alcançando reduções de custo sem comprometer a adequação nutricional.

No cenário restritivo (Figuras 5 e 6), as limitações de ingredientes impactaram significativamente as estratégias de formulação. O modelo com penalizações manteve sua característica de precisão nutricional, adaptando-se às restrições através de ajustes nas proporções dos ingredientes disponíveis. O modelo por restrições apresentou maior sensibilidade às limitações, exigindo ampliação das faixas de tolerância para viabilizar soluções matemáticas factíveis.

A análise comparativa evidenciou que ambos os modelos conseguiram formular dietas adequadas para recém-paridas, com o modelo com penalizações oferecendo maior segurança nutricional e o modelo por restrições proporcionando vantagens econômicas, especialmente no cenário de livre disponibilidade.

5.4.2. Complementações para Alta Produção

Dieta #373 - Alta Produção

Data: 17/07/2025 19:10:18 | Custo Total: R\$ 14.83 | Qtd. Animais: 14

Ingrediente	Quantidade (kg)	Custo (R\$)
Casca de soja	4.20	8.40
Farelo de soja	0.29	0.58
Ração BoviClara	2.93	5.66

Nutriente	Dieta Base	Necessário	Deficit	Complementado	Final	%MS
Amido	3.91	4.93	1.02	1.02	4.93	22.0%
FDA	3.04	4.21	1.17	1.78	4.82	21.5%
FDN	5.53	7.63	2.10	3.04	8.57	38.3%
Matéria seca	15.63	21.82	6.19	6.77	22.41	100.0%
NDT	10.97	15.02	4.05	4.19	15.16	67.7%
Proteína	2.49	3.84	1.35	1.35	3.84	17.1%

Dieta #385 - Alta Produção

Data: 17/07/2025 19:54:38 | Custo Total: R\$ 13.58 | Qtd. Animais: 14

Ingrediente	Quantidade (kg)	Custo (R\$)
Casca de soja	3.04	6.08
Farelo de soja	1.16	2.32
Ração BoviClara	2.59	5.18

Nutriente	Dieta Base	Necessário	Deficit	Complementado	Final	%MS
Amido	3.91	4.93	1.02	0.90	4.81	22.0%
FDA	3.04	4.21	1.17	1.38	4.42	20.3%
FDN	5.53	7.63	2.10	2.42	7.95	36.4%
Matéria seca	15.63	21.82	6.19	6.19	21.82	100.0%
NDT	10.97	15.02	4.05	4.10	15.07	69.1%
Proteína	2.49	3.84	1.35	1.53	4.02	18.4%

Figura 7. Cenário 1 (MCP)

Dieta #445 - Alta Produção

Data: 18/07/2025 12:16:59 | Custo Total: R\$ 17.25 | Qtd. Animais: 14

Ingrediente	Quantidade (kg)	Custo (R\$)
Aveia com Azevém Pastagem	6.64	1.33
Casca de soja	1.00	2.00
Ração BoviClara	6.00	12.00
Silagem de Milho	1.92	1.92

Nutriente	Dieta Base	Necessário	Deficit	Complementado	Final	%MS
Amido	3.91	4.93	1.02	2.25	6.16	25.8%
FDA	3.04	4.21	1.17	1.17	4.21	17.6%
FDN	5.53	7.63	2.10	2.29	7.82	32.8%
Matéria seca	15.63	21.82	6.19	8.26	23.89	100.0%
NDT	10.97	15.02	4.05	6.22	17.19	72.0%
Proteína	2.49	3.84	1.35	1.76	4.25	17.8%

Figura 9. Cenário 2 (MCP)

Figura 8. Cenário 1 (MPR)

Dieta #454 - Alta Produção

Data: 18/07/2025 13:12:51 | Custo Total: R\$ 14.94 | Qtd. Animais: 14

Ingrediente	Quantidade (kg)	Custo (R\$)
Aveia com Azevém Pastagem	8.47	1.69
Casca de soja	1.00	2.00
Ração BoviClara	5.62	11.24

Nutriente	Dieta Base	Necessário	Deficit	Complementado	Final	%MS
Amido	3.91	4.93	1.02	1.89	5.80	25.1%
FDA	3.04	4.21	1.17	1.06	4.10	17.8%
FDN	5.53	7.63	2.10	2.08	7.61	32.9%
Matéria seca	15.63	21.82	6.19	7.49	23.12	100.0%
NDT	10.97	15.02	4.05	5.63	16.60	71.8%
Proteína	2.49	3.84	1.35	1.70	4.19	18.1%

Figura 10. Cenário 2 (MPR)

O grupo de alta produção apresentou os maiores desafios de formulação, exigindo elevados aportes energéticos e proteicos para sustentar a produção leiteira. As complementações geradas demonstraram a capacidade dos modelos em atender a estas demandas complexas, evidenciando diferenças marcantes nas estratégias de otimização adotadas.

No cenário de livre disponibilidade (Figuras 7 e 8), o modelo com penalizações demonstrou preferência por ingredientes de alta densidade nutricional, especialmente aqueles ricos em proteína e energia. Esta estratégia resultou em formulações mais concentradas, com menor volume total de complementação, mas custos unitários superiores. O modelo por restrições adotou abordagem mais diversificada, distribuindo os aportes nutricionais entre diferentes ingredientes, resultando em formulações de menor custo total.

No cenário restritivo (Figuras 9 e 10), as limitações de ingredientes intensificaram as diferenças entre os modelos. O modelo com penalizações enfrentou maiores dificuldades para manter a precisão nutricional, resultando em aumentos significativos de custo para compensar as restrições impostas. O modelo por restrições demonstrou maior adaptabilidade, utilizando eficientemente os ingredientes disponíveis dentro das faixas de tolerância ampliadas.

A análise comparativa revelou que o grupo de alta produção representa o maior desafio de formulação, com ambos os modelos apresentando custos superiores em relação aos demais grupos. O modelo com penalizações mostrou-se mais adequado quando a precisão nutricional é prioritária, enquanto o modelo por restrições ofereceu melhor relação custo-benefício, especialmente sob limitações operacionais.

5.4.3. Complementações para Média Produção

Dieta #374 - Média Produção

Data: 17/07/2025 19:10:18 | Custo Total: R\$ 8.92 | Qtd. Animais: 19

Ingrediente	Quantidade (kg)	Custo (R\$)
Casca de soja	2.74	5.48
Farelo de soja	1.23	2.46
Ração BoviClara	0.49	0.98

Nutriente	Dieta Base	Necessário	Deficit	Complementado	Final	%MS
Amido	3.91	4.12	0.21	0.21	4.12	20.9%
FDA	3.04	3.75	0.71	1.15	4.19	21.3%
FDN	5.53	6.79	1.26	1.93	7.46	37.8%
Matéria seca	15.63	19.39	3.76	4.09	19.73	100.0%
NDT	10.97	13.30	2.33	2.45	13.42	68.0%
Proteína	2.49	3.57	1.08	1.08	3.57	18.1%

Dieta #386 - Média Produção

Data: 17/07/2025 19:54:38 | Custo Total: R\$ 7.79 | Qtd. Animais: 19

Ingrediente	Quantidade (kg)	Custo (R\$)
Casca de soja	2.03	4.06
Farelo de soja	1.66	3.32
Ração BoviClara	0.20	0.40

Nutriente	Dieta Base	Necessário	Deficit	Complementado	Final	%MS
Amido	3.91	4.12	0.21	0.11	4.02	20.9%
FDA	3.04	3.75	0.71	0.90	3.94	20.5%
FDN	5.53	6.79	1.26	1.53	7.06	36.8%
Matéria seca	15.63	19.39	3.76	3.57	19.20	100.0%
NDT	10.97	13.30	2.33	2.25	13.22	68.9%
Proteína	2.49	3.57	1.08	1.12	3.61	18.8%

Figura 11. Cenário 1 (MCP)

Dieta #446 - Média Produção

Data: 18/07/2025 12:16:59 | Custo Total: R\$ 9.83 | Qtd. Animais: 19

Ingrediente	Quantidade (kg)	Custo (R\$)
Aveia com Azevém Pastagem	5.00	1.00
Casca de soja	0.98	1.96
Ração BoviClara	3.43	6.86

Nutriente	Dieta Base	Necessário	Deficit	Complementado	Final	%MS
Amido	3.91	4.12	0.21	1.16	5.07	24.7%
FDA	3.04	3.75	0.71	0.79	3.83	18.6%
FDN	5.53	6.79	1.26	1.48	7.01	34.2%
Matéria seca	15.63	19.39	3.76	4.88	20.52	100.0%
NDT	10.97	13.30	2.33	3.58	14.55	70.9%
Proteína	2.49	3.57	1.08	1.08	3.57	17.4%

Figura 13. Cenário 2 (MCP)

Figura 12. Cenário 1 (MPR)

Dieta #455 - Média Produção

Data: 18/07/2025 13:12:51 | Custo Total: R\$ 8.72 | Qtd. Animais: 19

Ingrediente	Quantidade (kg)	Custo (R\$)
Aveia com Azevém Pastagem	5.54	1.11
Casca de soja	0.75	1.50
Ração BoviClara	3.05	6.10

Nutriente	Dieta Base	Necessário	Deficit	Complementado	Final	%MS
Amido	3.91	4.12	0.21	1.03	4.94	24.6%
FDA	3.04	3.75	0.71	0.70	3.74	18.6%
FDN	5.53	6.79	1.26	1.33	6.86	34.2%
Matéria seca	15.63	19.39	3.76	4.43	20.06	100.0%
NDT	10.97	13.30	2.33	3.25	14.22	70.9%
Proteína	2.49	3.57	1.08	0.99	3.48	17.4%

Figura 14. Cenário 2 (MPR)

As complementações para média produção apresentaram o melhor equilíbrio entre exigências nutricionais e viabilidade econômica, constituindo o grupo com menores custos absolutos de formulação. Os modelos demonstraram desempenho estável e consistente, evidenciando menor complexidade de formulação comparativamente aos grupos de maior demanda nutricional.

No cenário de livre disponibilidade (Figuras 11 e 12), ambos os modelos apresentaram convergência satisfatória, com diferenças de custo proporcionalmente menores que as observadas nos demais grupos. O modelo com penalizações manteve sua característica de precisão nutricional, enquanto o modelo por restrições demonstrou eficiência econômica superior, confirmando o padrão observado nos grupos anteriores.

No cenário restritivo (Figuras 13 e 14), as limitações de ingredientes impactaram moderadamente as formulações, evidenciando maior flexibilidade deste grupo em relação às restrições operacionais. O modelo com penalizações apresentou adaptação adequada às limitações, mantendo custos relativamente controlados. O modelo por restrições confirmou sua vantagem econômica, operando eficientemente dentro das faixas de tolerância estabelecidas.

A análise comparativa do grupo de média produção revelou maior estabilidade e previsibilidade nas formulações, com ambos os modelos apresentando desempenho equilibrado. Este grupo demonstrou ser o mais adequado para implementação prática, oferecendo boa relação custo-benefício e menor sensibilidade às variações operacionais.

5.5. Análise Econômica das Complementações

A análise dos custos das dietas geradas pelo *SINBOV* evidencia a capacidade do sistema em otimizar economicamente as complementações, respeitando as diferentes exigências nutricionais de cada grupo produtivo.

Observa-se que o modelo com penalizações resulta em dietas de maior custo, uma vez que impõe o atendimento obrigatório a todos os requisitos nutricionais. Já o modelo por restrições trabalha com faixas mínimas e máximas de aceitação, o que proporciona maior flexibilidade na formulação. Isso permite o uso de uma menor quantidade de ingredientes na complementação e, conseqüentemente, obtendo custos mais baixos em relação ao modelo com penalizações.

5.6. Eficiência Nutricional

A avaliação da eficiência nutricional confirmou a adequação das formulações geradas pelo *SINBOV* para todos os grupos produtivos, evidenciando sua capacidade de corrigir os déficits nutricionais identificados. O modelo com penalizações manteve elevada precisão no atendimento aos requisitos nutricionais, alcançando de forma consistente os valores-alvo estabelecidos, sem gerar excessos significativos.

O modelo baseado em restrições também demonstrou eficiência na geração de dietas balanceadas, respeitando rigorosamente os limites estabelecidos para cada nutriente. Essa abordagem mostrou-se eficaz para garantir a conformidade com os requisitos técnicos, desde que os parâmetros estejam corretamente definidos e viáveis.

A validação técnica das dietas geradas foi conduzida pelo profissional da área que acompanhou o processo, confirmando que as formulações atendem aos padrões aceitáveis para bovinos leiteiros. De acordo com sua análise, as dietas produzidas pelo sistema apresentam composição nutricional compatível com os requisitos da categoria animal, considerando as limitações inerentes a um sistema automatizado de formulação.

Embora o *SINBOV* demonstre capacidade de gerar formulações nutricionalmente adequadas, sua versão atual ainda não contempla fatores cruciais para a formulação ideal de dietas para bovinos leiteiros. Elementos como interações entre nutrientes, palatabilidade dos ingredientes e características fisiológicas específicas dos animais não são considerados, o que pode resultar em formulações viáveis do ponto de vista matemático, mas com limitações práticas. Em comparação com sistemas comerciais consolidados — que integram décadas de conhecimento zootécnico e validação em campo — o *SINBOV* se apresenta como uma solução automatizada que prioriza a otimização econômica e o atendimento aos requisitos nutricionais básicos. Ainda assim, os resultados obtidos demonstram que o sistema é capaz de se aproximar dos padrões técnicos recomendados, configurando-se como uma ferramenta viável de apoio à tomada de decisões em propriedades leiteiras, sobretudo quando utilizada em conjunto com a experiência de profissionais especializados.

6. Considerações Finais

O desenvolvimento do *Sistema Inteligente para Nutrição de Bovinos (SINBOV)* demonstrou a viabilidade de aplicar técnicas de otimização matemática para automatizar a formulação de dietas complementares em propriedades leiteiras. Os resultados obtidos

evidenciaram que o sistema é capaz de gerar complementações nutricionalmente adequadas e economicamente otimizadas, respeitando as diferentes exigências dos grupos produtivos identificados. A comparação entre os modelos criados revelou características distintas, com o primeiro oferecendo eficiência econômica e o segundo aliando maior precisão nutricional com custos reduzidos.

Cabe destacar que este trabalho reafirma a relevância e o potencial da Programação Linear como ferramenta de otimização contemporânea, demonstrando que, contrariamente à percepção de que se trata de uma técnica ultrapassada, ela permanece altamente eficaz para a resolução de problemas complexos e atuais, especialmente quando aplicada a cenários com múltiplas variáveis e restrições.

Embora este trabalho tenha adotado uma metodologia focada em um conjunto específico de nutrientes, o *SINBOV* é capaz de operar com qualquer nutriente expresso em base de matéria seca, desde que os dados necessários estejam devidamente cadastrados no sistema. Isso evidencia a flexibilidade da ferramenta para diferentes abordagens nutricionais e demandas de formulação.

O sistema atual apresenta possibilidades para desenvolvimentos futuros. Uma das evoluções desejáveis é a implementação de suporte a diferentes unidades de medida, o que ampliaria a flexibilidade operacional e facilitaria a integração com diferentes práticas de manejo. Além disso, melhorias nos modelos matemáticos podem ampliar a qualidade das complementações, reduzindo excessos nutricionais e incorporando maior quantidade de dados individuais dos animais, aproximando-se dos padrões estabelecidos por softwares comerciais consolidados.

Uma evolução natural do sistema seria a transição da atual abordagem de complementação para a formulação completa de dietas, o que exigiria avanços na modelagem matemática e na incorporação de conhecimento zootécnico especializado. Nesse contexto, destaca-se a importância de implementar o cálculo automático dos requisitos nutricionais a partir de equações estabelecidas pelo National Academies of Sciences, Engineering and Medicine (2021) e National Research Council (2001), utilizando diretamente os dados individuais dos animais. Essa funcionalidade eliminaria a necessidade de definição manual dos requisitos, aumentando a precisão das formulações e reduzindo a dependência de conhecimento técnico especializado por parte do usuário.

A necessidade de validação prática dos resultados em condições reais de produção aponta para a importância de estudos complementares. Avaliações de desempenho animal, aceitabilidade das dietas e viabilidade operacional são fundamentais para consolidar a eficácia do *SINBOV* como ferramenta de apoio à tomada de decisões em propriedades leiteiras.

Por fim, o *SINBOV* representa uma contribuição significativa para a automatização de processos em nutrição animal, demonstrando que é possível integrar conhecimento técnico especializado com técnicas computacionais avançadas para gerar soluções práticas e economicamente viáveis. Os resultados obtidos estabelecem uma base sólida para desenvolvimentos futuros, que poderão expandir as funcionalidades do sistema e aprimorar sua aplicabilidade em diferentes contextos produtivos, contribuindo para a modernização e eficiência da pecuária leiteira.

Referências

- AMPL Optimization Inc. *amplpy: Python API for AMPL*. 2024. <<https://ampl.com/products/solvers/open-source/amplpy/>>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- Dairy Global. *Benefits of nutritional grouping in dairy farms*. 2020. Disponível em: <<https://www.dairyglobal.net/health-and-nutrition/health/benefits-of-nutritional-grouping-in-dairy-farms/>>. Acesso em: 10 jun. 2025.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Gado do Leite – Importância Econômica*. Brasília, 2016.
- FOURER, R.; GAY, D. M.; KERNIGHAN, B. W. *AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming*. 2. ed. Boston: Cengage Learning, 2002.
- FOX, D. G.; TYLUTKI, T. P.; CHASE, L. E. Nutrition and the environment: nutrient management strategies to reduce nutrient losses to the environment. In: *Cornell Nutrition Conference for Feed Manufacturers*. Ithaca: [s.n.], 2004. p. 1–12.
- Gurobi Optimization, LLC. *Gurobi Optimizer Reference Manual*. 2024. <<https://www.gurobi.com>>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. *Introdução à pesquisa operacional*. 9. ed. Porto Alegre: McGraw Hill Brasil, 2013.
- Hubbard Feeds. *Grouping strategies to maximize efficiency*. 2021. Disponível em: <<https://www.hubbardfeeds.com/blog/grouping-strategies-maximize-efficiency>>. Acesso em: 10 jun. 2025.
- IDEHARA, S. J.; RODRIGUES, R. C. *Otimização da alimentação bovina através de programação linear*. Pelotas, 2011.
- LI, J. et al. The application of nonlinear programming on ration formulation for dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, Elsevier, v. 105, n. 3, p. 2180–2189, 2022.
- LOPES, A. D. *Caracterização de unidades produtoras de leite na área de abrangência do escritório de desenvolvimento rural de Jaboticabal – SP*. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) — Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2017.
- Merck Veterinary Manual. *Nutritional Requirements of Dairy Cattle*. 2021. Disponível em: <<https://www.merckvetmanual.com/management-and-nutrition/nutrition-dairy-cattle/nutritional-requirements-of-dairy-cattle>>. Acesso em: 10 jun. 2025.
- National Academies of Sciences, Engineering and Medicine. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle: Eighth Revised Edition*. Washington, DC: The National Academies Press, 2021.
- National Research Council. *Nutrient requirements of dairy cattle: 2001*. 7. ed. Washington, DC: National Academies Press, 2001.
- PASSOS, E. J. P. F. d. *Programação linear como instrumento da pesquisa operacional*. São Paulo: Atlas, 2000.
- PETRY, V. J.; PAGLIARINI, M. M. *Modelo de programação linear aplicado na melhoria da produtividade leiteira*. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso.

- PostgreSQL Global Development Group. *PostgreSQL: The world's most advanced open source relational database*. 2024. <<https://www.postgresql.org>>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- Python Software Foundation. *Python Language Reference, version 3.12*. 2024. <<https://www.python.org>>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- QUEIROZ, T. A. d. *Programação Linear - Parte 1*. Catalão: [s.n.], 2014. 33 p. Disponível em: <<https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/601/o/aula1-pl-mi.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2025.
- ROSSOW, H. A.; ALY, S. S. Variation in nutrients formulated and nutrients supplied on 5 california dairies. *Journal of Dairy Science*, Elsevier, v. 96, n. 11, p. 7371–7381, 2013.
- SAHMAN, M. A. et al. Cost optimization of feed mixes by genetic algorithms. *Advances in Engineering Software*, Elsevier, v. 40, n. 10, p. 965–974, 2009.
- SALMAN, A. K. D.; OSMARI, E. K.; SANTOS, M. G. R. D. *Manual Prático para Formulação de Ração para Vacas Leiteiras*. Porto Velho, 2011.
- SANTIAGO, G. L. *Aplicativo móvel para avaliação do desempenho zootécnico e financeiro em dieta total de vacas leiteiras*. 57 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Rural) — Universidade de Cruz Alta - UNICRUZ, Cruz Alta, 2021.
- SAXENA, P.; KHANNA, N. Optimization of dairy cattle feed by nonlinear programming. In: IEEE. *2015 2nd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*. Nova Delhi, 2015. p. 1579–1584.
- SHAMBLIN, J. E.; STEVENS, G. *Pesquisa operacional: uma abordagem básica*. São Paulo: Atlas, 1979.
- SNIFFEN, C. J.; CHALUPA, W. Targeted feeding to save nutrients. In: *Proceedings of the Western Dairy Management Conference*. Nevada: [s.n.], 2015.
- SOEST, P. J. V. *Nutritional Ecology of the Ruminant*. 2. ed. Ithaca: Cornell University Press, 1994.
- TAHA, H. A. *Operations Research: An Introduction*. 10. ed. Boston: Pearson Education, 2017.
- THOMAS, C.; KEBREAB, E. Decision support systems in animal nutrition: status and future prospects. *Livestock Science*, v. 240, p. 104144, 2020.
- TOMICH, T. R. et al. Nutrição de precisão na pecuária leiteira. *Cadernos Técnicos de Veterinária e Zootecnia*, n. 79, p. 54–72, 2015.
- VANDERBEI, R. J. *Linear programming*. 5. ed. New York: Springer, 2020.