

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA POLITECNICA E DE ARTES / ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO

Projeto Final de Curso

JOÃO VICTOR SANTOS RAMOS
TULHO PEREIRA DOS SANTOS

**Proposta de Sistema Automatizado para Alimentação
Individual de Bovinos Leiteiros em Função do Desempenho
Produtivo**

Projeto Final de Curso como parte dos requisitos para
obtenção do título de bacharel em Engenharia de
Controle e Automação apresentado à Pontifícia
Universidade Católica de Goiás.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. ANTONIO MARCOS MELO MEDEIROS – Orientador.
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS-PUC GOIÁS.

Prof. Dr. CASSIO HIDEKI FUJISAWA – Orientador.
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS-PUC GOIÁS.

Prof. Dr. WANDERSON RAINER HILARIO ARAUJO – Avaliador.
PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS-PUC GOIÁS.

Goiânia, 05 de dezembro de 2025.

Proposta de Sistema Automatizado para Alimentação Individual de Bovinos Leiteiros em Função do Desempenho Produtivo

Tulho Pereira dos Santos
Escola Politécnica e de Artes
Pontifícia Universidade Católica de
Goiás
Goiânia, Brasil
tulho26pereira@gmail.com

Jão Victor Santos Ramos
Escola Politécnica e de Artes
Pontifícia Universidade Católica de
Goiás
Goiânia, Brasil
jvictorramos06@gmail.com

Antonio Marcos Melo Medeiros
Escola Politécnica e de Artes
Pontifícia Universidade Católica de
Goiás
Goiânia, Brasil
marcosmelo@pucgoias.edu.br

Cassio Hideki Fujisawa
Escola Politécnica e de Artes
Pontifícia Universidade Católica de
Goiás
Goiânia, Brasil
hideki@pucgoias.edu.br

Wanderson Rainer Hilario Araujo
Escola Politécnica e de Artes
Pontifícia Universidade Católica de
Goiás
Goiânia, Brasil
rainer@pucgoias.edu.br

Abstract— *Modern dairy farming faces challenges related to labor shortages, high production costs, and the need to increase the efficiency of production systems. This paper presents the development of an automated feed dosing system for lactating dairy cows, aiming to reduce waste, optimize feeding management, and minimize reliance on intensive labor. The system uses sensors and actuators to individually adjust the amount of feed provided to each animal based on its productive performance, following the principles of precision livestock farming. Preliminary results indicate that automation contributes to feed standardization, improved animal welfare, and increased production efficiency, highlighting its potential to modernize dairy farm management.*

Keywords— *precision livestock farming, automation, feed management, lactating dairy cows, production efficiency.*

Resumo – *A moderna pecuária leiteira enfrenta desafios relacionados à escassez de mão de obra, altos custos de produção e à necessidade de aumentar a eficiência dos sistemas de produção. Este artigo apresenta o desenvolvimento de um sistema automatizado de dosagem de ração para vacas leiteiras em lactação, visando reduzir o desperdício, otimizar o manejo alimentar e minimizar a dependência de mão de obra intensiva. O sistema utiliza sensores e atuadores para ajustar individualmente a quantidade de ração fornecida a cada animal com base em seu desempenho produtivo, seguindo os princípios da pecuária de precisão (precision livestock farming). Os resultados preliminares indicam que a automação contribui para a padronização da alimentação, melhoria do bem-estar animal e aumento da eficiência de produção, destacando seu potencial para modernizar a gestão das fazendas leiteiras.*

Palavras-chave— *pecuária de precisão, automação, manejo alimentar, vacas leiteiras em lactação, eficiência produtiva*

I. INTRODUÇÃO

O setor de pecuária leiteira é um pilar do agronegócio nacional e possui uma relevância socioeconômica inquestionável, sobretudo no estado de Goiás. O estado se

consolida como uma potência leiteira, ocupando a quarta posição no ranking nacional de produção e sendo responsável por aproximadamente **9% do volume total** de leite do país. Tal volume não apenas abastece o mercado interno, mas sustenta a presença de grandes laticínios na região e gera mais de 220 mil empregos diretos e indiretos, conferindo à cadeia produtiva um papel vital para a economia goiana [1].

Apesar de sua importância, a pecuária leiteira moderna enfrenta desafios crescentes, como a escassez de mão de obra qualificada e a pressão por maior eficiência operacional dos sistemas produtivos.

Nesse contexto, o elevado custo de produção emerge como o obstáculo financeiro mais crítico para a sustentabilidade da atividade. A alimentação animal, em particular, configura-se como o principal dispêndio, representando cerca de **50% da renda bruta** em propriedades leiteiras bem estruturadas, conforme dados do Projeto Campo Futuro [2].

A automação do processo de fornecimento de ração concentrada surge como uma alternativa promissora para reduzir desperdícios e otimizar o manejo alimentar. A utilização de tecnologias automatizadas na pecuária leiteira tem se mostrado eficaz na padronização dos processos, na melhoria do bem-estar animal e no aumento da produtividade por unidade de mão de obra.

O avanço das tecnologias de automação e controle permite o desenvolvimento de sistemas inteligentes capazes de ajustar o fornecimento de concentrado de forma individualizada, conforme o desempenho produtivo de cada animal. Essa abordagem se insere no conceito de pecuária de precisão, que utiliza sensores e algoritmos para coleta e análise de dados em tempo real, visando otimizar o uso de recursos e o monitoramento do rebanho [3]. Além disso, tais sistemas contribuem para uma nutrição mais eficiente, reduzindo variações no desempenho e melhorando os índices zootécnicos.

A automação também auxilia na minimização de erros humanos, reduzindo a dependência de mão de obra intensiva e aumentando a precisão no manejo alimentar. O dimensionamento adequado de componentes como dosadores, silos, sensores e atuadores é fundamental para garantir a confiabilidade do sistema, prevenindo casos de subalimentação ou sobrealimentação.

Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo projetar um sistema automatizado de dosagem de ração concentrada para bovinos em lactação, visando à redução da demanda de mão de obra, otimização do processo produtivo e fornecimento individualizado e a precisão da quantidade necessária de alimento de acordo com o desempenho produtivo de cada animal.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Alimentação: como impacta na produção de leite

A alimentação exerce influência direta sobre a produtividade de vacas leiteiras, sendo a principal responsável pela variação no volume e na composição do leite. O manejo nutricional eficiente se baseia na garantia do equilíbrio entre os principais nutrientes, assegurando a máxima expressão do potencial produtivo do rebanho.

A síntese de leite, um processo metabolicamente exigente, depende fundamentalmente da adequada oferta de energia metabolizável [4].

A deficiência energética resulta em queda imediata na produção e induz a uma maior mobilização de reservas corporais, afetando negativamente a saúde reprodutiva do animal.

Em paralelo, a proteína dietética desempenha um papel essencial. A eficiência da microbiota ruminal e a subsequente formação da proteína do leite estão diretamente relacionadas ao equilíbrio entre a proteína degradável e a não degradável fornecida no rúmen [5]. O manejo inadequado dessa proporção compromete a saúde dos microrganismos e a qualidade do produto final.

Além disso, a fibra efetiva é indispensável para a estabilidade do pH ruminal e para a produção de Ácidos Graxos Voláteis (AGV), os principais precursores energéticos da lactação. Dietas com baixa efetividade de fibra podem desestabilizar o ambiente ruminal, levando à acidose e à consequente redução do teor de gordura do leite, conforme descrito na literatura [6].

Minerais como cálcio, fósforo e magnésio, além das vitaminas lipossolúveis, são igualmente importantes para o metabolismo produtivo e para a prevenção de distúrbios metabólicos, especialmente no período de transição, onde as exigências são elevadas [7].

Por fim, a água, embora muitas vezes negligenciada, é considerada o nutriente mais crítico, visto que o leite é composto majoritariamente por ela. A restrição hídrica reduz imediatamente o consumo de matéria seca e, consequentemente, o volume de leite produzido [4].

Assim, o sucesso e a sustentabilidade dos sistemas leiteiros dependem de uma formulação de dietas que otimize a conversão alimentar, o que exige um manejo estratégico e a ponderação técnica na dosagem fornecida da ração

concentrada, controlando os custos e garantindo a saúde e a longevidade produtiva do rebanho.

B. Arquitetura Geral do Sistema Proposto

O sistema proposto tem como objetivo mitigar os desafios relacionados ao controle de custos e à dosagem precisa de ração, por meio da adoção de uma arquitetura baseada na Internet das Coisas (IoT). Essa abordagem possibilita a aquisição de dados em tempo real diretamente no comedouro, o processamento local das informações e a integração com uma plataforma centralizada, voltada à análise de dados e à tomada de decisão.

A arquitetura do sistema é estruturada em quatro camadas principais, que organizam as funções de aquisição, comunicação, processamento e interação com o usuário de forma integrada.

A camada de campo compreende os dispositivos de hardware diretamente associados ao animal e à infraestrutura de alimentação. Nessa camada, o microcontrolador ESP32 atua como unidade de processamento local, sendo responsável pela aquisição dos dados provenientes dos sensores, como a identificação do animal por meio da tecnologia RFID. Com base nessas informações e em um algoritmo previamente programado, o ESP32 realiza o acionamento dos atuadores do sistema.

Os sensores, como as células de carga, fornecem feedback contínuo sobre a quantidade de ração disponível ou efetivamente dosada. Já os atuadores, que podem ser motores de passo ou motores de corrente contínua, executam a ação física de liberação da ração concentrada no comedouro, garantindo a precisão e a repetibilidade do processo de dosagem.

A camada de comunicação é responsável por assegurar o transporte eficiente e confiável dos dados entre os diferentes componentes do sistema, sendo um elemento fundamental em soluções IoT. Para essa finalidade, foi adotado o protocolo HTTP, por meio da implementação de um servidor web no ESP32, possibilitando a troca de informações com a Interface Homem-Máquina (IHM), desenvolvida em linguagem C#. Nesse modelo, o ESP32 envia requisições contendo dados como identificação do animal, quantidade de ração dosada, consumo registrado e horário das leituras. Por outro lado, a IHM pode requisitar informações adicionais ou enviar comandos e parâmetros de configuração ao microcontrolador.

A escolha do protocolo HTTP se justifica por sua ampla adoção, facilidade de implementação e compatibilidade com diferentes infraestruturas, o que contribui para a integração, manutenção e escalabilidade do sistema.

A camada de infraestrutura e análise é responsável pela centralização e persistência das informações coletadas ao longo do tempo. Nessa camada, um banco de dados armazena de forma estruturada todos os dados transmitidos via HTTP, seja pela IHM ou diretamente pelo ESP32. Esses registros

constituem a base para a geração de relatórios, monitoramento contínuo e análise histórica do consumo alimentar e da eficiência produtiva do rebanho, possibilitando avaliações técnicas e decisões estratégicas mais assertivas.

Por fim, a camada de interface representa o ponto de interação entre o sistema e o usuário final, como o produtor rural ou o profissional responsável pelo manejo nutricional. A Interface Homem-Máquina, desenvolvida em C# e implementada como aplicação desktop ou painel visual, é responsável por processar, organizar e apresentar os dados recebidos via HTTP de maneira clara e intuitiva. Por meio da IHM, o usuário pode acompanhar em tempo real o consumo individual dos animais, verificar o desempenho do sistema, monitorar seu estado operacional e, quando necessário, enviar comandos ou ajustes de configuração ao ESP32.

III. METODOLOGIA

A metodologia adotada para o desenvolvimento do sistema automatizado de dosagem de ração foi estruturada em etapas progressivas e interdependentes, permitindo que as decisões de engenharia fossem continuamente avaliadas e validadas. Para garantir a integração entre os componentes físicos e lógicos, o desenvolvimento foi segmentado em três frentes de trabalho: projeto de hardware (eletrônica), desenvolvimento de firmware (sistema embarcado) e implementação de software de gestão (banco de dados e interface).

A. Planejamento, Diagnóstico Produtivo e Revisão Científica

O ponto de partida metodológico consistiu na compreensão do cenário produtivo da pecuária leiteira regional, caracterizado por propriedades com diferentes níveis de tecnificação, variabilidade de manejo nutricional, dependência de mão de obra humana e ausência de registros sistemáticos sobre comportamento alimentar.

Foi realizado um levantamento teórico envolvendo nutrição animal, automação rural, sensoramento, IoT e manejo alimentar individualizado, permitindo identificar lacunas tecnológicas relacionadas à dosagem, monitoramento e tomada de decisão. Esse diagnóstico evidenciou que o manejo alimentar ainda é manual, dependendo quase exclusivamente da estimativa visual e da experiência empírica do tratador, sem o auxílio de instrumentos de medição gravimétrica, o que compromete severamente a repetibilidade das doses fornecidas [8]. A dosagem é estimada visualmente ou por recipientes volumétricos (como baldes), método que negligencia variações na densidade da ração e impossibilita a garantia da massa exata fornecida, resultando em discrepâncias entre o planejado pelo nutricionista e o executado no cocho. Há desperdício relevante de concentrado, um insumo de alto valor agregado, decorrente da dosagem irregular e do fornecimento de quantidades superiores à capacidade de ingestão instantânea do animal, resultando em perdas financeiras diretas [9]. Animais de maior produtividade são subalimentados: Recebendo uma dieta padronizada que não supre sua elevada demanda metabólica, o que cria um gargalo nutricional e

impede a expressão plena do seu potencial genético de produção leiteira. Registros são inexistentes ou não padronizados: O que inviabiliza a rastreabilidade do processo produtivo e impede a correlação precisa entre o consumo de insumos e o desempenho individual de cada animal.

Essas constatações fundamentaram a necessidade de um sistema automatizado, inteligente, reproduzível e economicamente viável.

B. Implementação do Sistema Proposto

1. Hardware

A escolha pelo uso do microcontrolador ESP32 fundamentou-se em quatro atributos tecnológicos essenciais para a automação do processo de dosagem e monitoramento alimentar.

O ESP32 possui módulo Wi-Fi integrado, eliminando a necessidade de componentes adicionais para comunicação sem fio. Essa característica possibilita o envio contínuo de dados entre o sistema embarcado e a IHM, desde que exista infraestrutura de rede disponível na propriedade rural. Apesar de ambientes rurais apresentarem maiores distâncias físicas entre instalações, a comunicação pode ser garantida mediante o uso de roteadores industriais, repetidores, antenas direcionais ou redes locais estruturadas. Assim, obtém-se cobertura estável, baixa latência e custo reduzido, tornando o protocolo HTTP adequado para o transporte de informações relacionadas à identificação animal, dosagem, consumo e geração de alertas.

Suporte consolidado ao protocolo HTTP com biblioteca nativa e ampla documentação para implementação de comunicação via HTTP, permitindo que o dispositivo atue como cliente ou servidor web. Isso simplifica o desenvolvimento e a integração com a IHM desenvolvida em C#, o banco de dados PostgreSQL e demais aplicações do ecossistema. O uso de JSON como padrão de troca de mensagens garante interoperabilidade, organização da informação, facilidade de depuração e escalabilidade futura, dispensando intermediadores como brokers, APIs externas ou protocolos proprietários [9].

Alta capacidade de processamento para computação de borda com arquitetura dual-core e recursos de memória superiores aos de microcontroladores convencionais, o ESP32 possibilita a execução de rotinas de análise diretamente no dispositivo. Isso inclui filtragem de ruídos de sensores, cálculos de dosagem, validação de presença do animal, detecção de anomalias e decisões operacionais em tempo real. Ao realizar essas tarefas na borda, reduz-se o volume de dados trafegados, diminui-se a dependência da IHM e do banco de dados e aumenta-se a resiliência do sistema diante de eventuais instabilidades de rede, um cenário comum em áreas rurais.

Baixo consumo energético projetado para aplicações IoT, o ESP32 oferece modos de economia de energia e gerenciamento inteligente de processamento, possibilitando operação contínua com consumo reduzido. Essa característica é estratégica em propriedades rurais, onde pontos de alimentação elétrica podem ser escassos ou sujeitos a interrupções. O baixo consumo favorece o uso de baterias, nobreaks ou sistemas fotovoltaicos, aumentando a autonomia, reduzindo custos de manutenção e garantindo continuidade operacional.

O dispositivo disponibiliza interfaces como I2C, SPI, UART, ADC, PWM e GPIO, permitindo integração direta com leitores RFID, células de carga, sensores ambientais, balanças, motores e demais atuadores do sistema. Essa versatilidade facilita a adaptação do projeto a diferentes estruturas produtivas e amplia perspectivas de expansão futura, possibilitando a inclusão de novos sensores sem necessidade de reformulação total da arquitetura embarcada.

Para operacionalizar o protótipo, foi estabelecido um mapeamento rigoroso dos pinos, visando separar os barramentos de comunicação digital das entradas analógicas e saídas de potência.

A Tabela 1 apresenta os GPIO's que foram utilizados para desenvolvimento do protótipo.

Tabela 1. Mapeamento de GPIO's utilizados do ESP32

Componente	GPIO
HX711 - DT	34
HX711 - SCK	12
POTÊNCIOMETRO	35(ADC)
MOTOR	5
RFID MFRC522 – SDA	14
RFID MFRC522 – RST	27
SPI – SCK	18
SPI – MOSI	23
SPI – MISO	19

2. Software

Para viabilizar o controle centralizado e a rastreabilidade do processo de alimentação, foi desenvolvido um conjunto de soluções de software integradas. Esta camada do projeto é responsável por receber os sinais brutos capturados pelo ESP32.

O desenvolvimento do sistema embarcado iniciou-se pela implementação e integração dos drivers responsáveis pela comunicação com os periféricos utilizados no protótipo. Foram adotadas bibliotecas consolidadas para o leitor RFID (MFRC522) e para o módulo HX711, garantindo abstração de baixo nível, estabilidade operacional e padronização no acesso às medições. Esses drivers permitem realizar leitura

periódica, verificação de disponibilidade do dispositivo, gerenciamento de buffers e tratamento de erros de comunicação, assegurando que somente dados válidos sejam transmitidos à IHM. Além disso, a utilização de SPI, ADC e GPIO do ESP32 demonstra aderência às interfaces industriais mais empregadas em aplicações de automação rural.

A calibração da balança digital, associada ao módulo HX711, foi realizada por meio de uma rotina específica implementada em um código independente do firmware principal do sistema. Essa abordagem permitiu maior controle do procedimento e evitou interferências de outras tarefas durante o ajuste do sensor. Inicialmente, um copo medidor vazio foi posicionado sobre a célula de carga para a execução da tara, eliminando a influência do peso do recipiente e dos elementos estruturais do conjunto. Em seguida, o copo foi preenchido com 200 ml de água, correspondentes aproximadamente a 200 g, utilizados como massa de referência.

Durante o processo, o valor bruto fornecido pelo HX711 foi acompanhado por meio do monitor serial do microcontrolador. Esse valor foi empregado no cálculo do fator de calibração, obtido pela divisão da leitura registrada pelo peso de referência de 200 g, permitindo a correta conversão das medições para unidades de massa. Após a determinação do fator, o valor foi incorporado ao firmware principal do sistema, possibilitando medições mais precisas durante a operação. Esse procedimento pode ser reexecutado sempre que necessário, assegurando a confiabilidade e a repetibilidade das leituras ao longo do tempo.

Como sistemas agrícolas estão sujeitos a vibrações, interferências eletromagnéticas, variações de carga mecânica e oscilações elétricas, foram implementadas estratégias de filtragem para estabilizar os valores de entrada. No caso da célula de carga, utilizou-se média móvel com múltiplas amostragens e atraso controlado, suavizando picos não representativos e reduzindo ruído estatístico. Para dispositivos binários, como sensores de presença e acionamentos, aplicou-se filtragem temporal, evitando leituras falsas decorrentes de flutuações rápidas do sinal. Essa etapa é fundamental para impedir acionamentos indevidos, dosagens incorretas, registros inconsistentes no banco de dados e alarmes falsos na IHM.

Serviço HTTP embarcado, o ESP32 foi configurado para operar como servidor HTTP local, responsável por disponibilizar endpoints REST específicos para consulta de tag RFID, envio de parâmetros de dosagem e retorno de medições capturadas pelos sensores. Essa abordagem descentraliza o processamento, dispensa serviços externos ou brokers e permite que a IHM, desenvolvida em C#, estabeleça comunicação direta com o dispositivo embarcado. As requisições e respostas utilizam JSON como formato padrão de serialização, garantindo interoperabilidade com o banco de dados PostgreSQL e com futuras aplicações, como dashboards web ou sistemas móveis. O serviço foi estruturado para executar em tempo real, com filas internas e tratamento de concorrência, assegurando que múltiplas requisições não comprometam a precisão da medição nem o funcionamento do motor de dosagem.

A comunicação ocorre apenas via JSON, padronizando estrutura semântica, reduzindo ambiguidade e facilitando validação pela IHM.

A lógica operacional do sistema, projetada para atuar de forma autônoma e cíclica, está detalhada no fluxograma apresentado na **Fig. 1**. O diagrama ilustra a sequência de eventos e as tomadas de decisão implementadas no firmware.



Fig. 1 Fluxo lógico do sistema

1. Banco de Dados

Para garantir portabilidade, reprodutibilidade científica e implantação simplificada, adotou-se um ambiente de banco de dados baseado em Docker.

Para garantir portabilidade, reprodutibilidade científica e implantação simplificada, adotou-se um ambiente de banco de dados gerenciado por meio de contêineres Docker. Essa abordagem elimina dependências de sistema operacional, configurando o PostgreSQL em um ambiente controlado, padronizado e independente da máquina hospedeira. Além disso, o Docker possibilita definir todo o banco versão, credenciais, portas, volumes persistentes e

parâmetros de inicialização em arquivos declarativos, como **Dockerfile** ou **docker-compose.yml**, assegurando rastreabilidade metodológica e transparência no processo de implementação.

Isolamento de ambiente: Cada instância do PostgreSQL executada em Docker opera dentro de seu próprio contêiner, com biblioteca, **runtime**, rede e sistema de arquivos isolados. Esse isolamento evita conflitos com outras aplicações instaladas no computador, reduz riscos de corrompimento de dependências e garante que o desempenho do banco não seja impactado por atualizações externas. Também facilita a execução paralela de diferentes versões do banco para testes comparativos, validação de esquema ou auditoria metodológica.

A infraestrutura de banco de dados utilizada em laboratório, prototipagem e experimentação é idêntica à utilizada em uma futura implantação industrial. O mesmo arquivo **docker-compose** pode ser executado em múltiplos ambientes, garantindo que configurações de rede, portas, **encoding**, extensões e armazenamento permaneçam uniformes. Essa padronização reduz bugs difíceis de rastrear, elimina divergências de configuração e aumenta a confiabilidade dos resultados científicos e operacionais.

Caso seja necessário restaurar o sistema, trocar de servidor, formatar a máquina ou mover o projeto para outra propriedade rural, basta transferir o arquivo de configuração Docker e o volume persistente correspondente. Em poucos comandos, o banco é recriado com a mesma estrutura, tabelas, índices, permissões e dados históricos. Esse processo reduz drasticamente o tempo de manutenção, favorece escalabilidade e evita perda de dados em cenários de campo sujeitos a falhas energéticas, desgaste de hardware ou limitações de infraestrutura.

A ciência computacional exige que outros pesquisadores possam replicar experimentos, comparar metodologias e validar resultados. Com Docker, qualquer pesquisador pode reproduzir o ambiente exato utilizado no estudo, independentemente do sistema operacional ou configuração local, bastando executar o contêiner disponibilizado. Isso fortalece a credibilidade do trabalho, reduz variabilidade experimental e atende às diretrizes contemporâneas de ciência aberta e validação externa.

O banco de dados deixa de ser apenas operacional e passa a ser documentada e versionada junto ao código-fonte, permitindo controle histórico sobre alterações. Esse versionamento garante que mudanças no esquema, ajustes de performance, criação de índices ou extensões sejam rastreáveis, auditáveis e reversíveis. Além disso, facilita evolução tecnológica gradual, evitando rupturas no funcionamento da IHM ou do firmware embarcado.

O banco PostgreSQL executa em contêiner dedicado, com volume persistente configurado, impedindo perda de dados após reinicialização ou pane elétrica.

O gerenciamento foi realizado no software **DBeaver**, permitindo:

Gerenciamento do Banco de Dados no DBeaver o monitoramento, administração e exploração das informações armazenadas no PostgreSQL foram realizados por meio do software DBeaver, uma ferramenta multiplataforma amplamente utilizada em pesquisa, desenvolvimento e ambientes corporativos. Sua adoção metodológica favoreceu a organização estrutural do banco, a análise contínua da integridade dos dados e a validação dos resultados gerados pelo sistema de dosagem automática.

Consultas SQL otimizadas o DBeaver fornece um ambiente dedicado para elaboração, execução e depuração de comandos SQL, permitindo identificar gargalos, ajustar filtros, validar joins e analisar planos de execução. Isso facilita a construção de consultas eficientes para monitoramento de consumo, comparação entre animais e geração de relatórios históricos, reduzindo tempo de processamento e carga sobre o servidor.

O DBeaver permite inspecionar, criar e monitorar índices associados a tabelas, o que é fundamental para aplicações que realizam leituras frequentes, como o acompanhamento em tempo real do rebanho. A análise de seletividade e custo de acesso possibilita ajustes estruturais que melhoram o desempenho de consultas, especialmente em bases crescentes.

A interface facilita a visualização temporal dos registros armazenados, permitindo acompanhar tendências de consumo, comportamento alimentar e ocorrências de alarmes. Esse recurso foi essencial para validação experimental do sistema, verificando se a dosagem automatizada refletia corretamente a realidade observada no campo.

Documentação automatizada do esquema: O software pode gerar relatórios estruturados contendo tabelas, relacionamentos, tipos de dados, restrições e metadados. Essa documentação sistematizada fortalece a rastreabilidade científica, favorece auditorias, facilita replicação do experimento por outros pesquisadores e auxilia futuras expansões do projeto.

A **Fig. 2** demonstra a utilização prática desta interface durante a fase de cadastramento e associação das tags RFID aos animais.

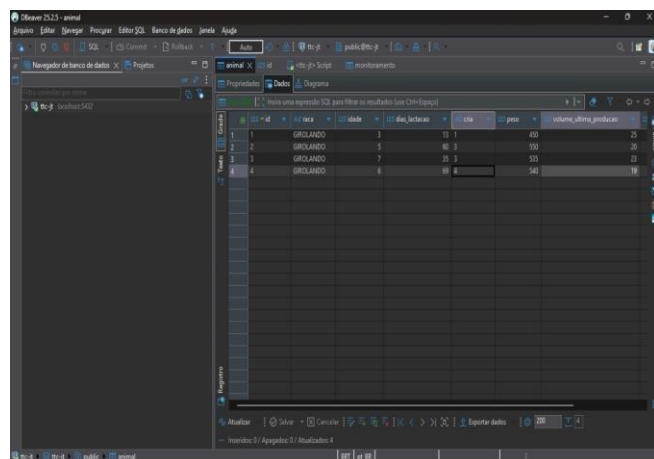


Fig. 2 Associação de tags, via Dbeaver

4. Desenvolvimento da IHM em C#

A Interface Humano-Máquina representa o elo de supervisão e tomada de decisão. A escolha metodológica pelo C# e pelo ecossistema .NET deve-se a:

A Interface Humano-Máquina (IHM) configura-se como o eixo central de supervisão operacional, acompanhamento em tempo real e suporte à tomada de decisão. A opção metodológica pelo desenvolvimento em C# e pelo ecossistema .NET fundamenta-se na maturidade da linguagem, consolidada em aplicações industriais, científicas e corporativas, o que reduz riscos de manutenção e prolonga o ciclo de vida tecnológico do projeto. O framework oferece suporte nativo a **multithreading** e operações assíncronas, permitindo o processamento simultâneo de leituras sensoriais, atualização de dashboards, comunicação com o servidor e execução de rotinas de alarme sem degradação de desempenho — fator essencial em sistemas de alimentação animal que exigem resposta imediata.

Outro critério determinante é a elevada integração com bancos de dados relacionais, facilitando consultas otimizadas, registro histórico, rastreabilidade alimentar e sincronização contínua com o ambiente Docker. A plataforma também apresenta robustez comprovada para interfaces desktop industriais, garantindo estabilidade offline, compatibilidade com hardware local, suporte a drivers e capacidade de operar em condições de conectividade variável típicas do meio rural.

Além disso, o .NET possui ampla adoção na automação agroindustrial brasileira, o que favorece disponibilidade de profissionais, continuidade de suporte técnico, interoperabilidade com sistemas já existentes em granjas e propriedades rurais, e aderência a práticas consolidadas do setor. Assim, a escolha tecnológica não é apenas funcional,

mas metodologicamente estratégica para escalabilidade, manutenção e transferência de conhecimento.

A aplicação IHM foi estruturada para atuar como núcleo de coordenação, monitoramento e análise do sistema, sendo desenvolvida no ambiente Microsoft Visual Studio. Para isso, implementa a leitura automática e periódica do banco de dados, eliminando a dependência de consultas manuais e garantindo a atualização contínua do painel supervisor. As informações recebidas são processadas e convertidas em indicadores zootécnicos, permitindo ao produtor visualizar o desempenho alimentar, a evolução de peso, o histórico de consumo e possíveis desvios comportamentais. Paralelamente, a aplicação executa cálculos nutricionais de forma automatizada, considerando parâmetros como categoria animal, ingestão diária, eficiência de conversão e metas produtivas, assegurando que a dosagem ofertada seja técnica e cientificamente adequada.

No eixo de comunicação, a IHM realiza o envio estruturado de mensagens no formato JSON ao ESP32, contendo instruções de fornecimento, parâmetros de calibração e comandos de ajuste operacional. O microcontrolador responde com mensagens igualmente padronizadas, possibilitando o recebimento de informações estruturadas, como confirmações de dosagem, alarmes, leituras de sensores e status de funcionamento. Cada evento operacional é registrado continuamente em um banco de dados PostgreSQL, garantindo rastreabilidade, histórico operacional e suporte a auditorias ou pesquisas experimentais.

Por fim, toda a lógica do sistema é disponibilizada ao usuário por meio de uma interface visual intuitiva, desenvolvida no Visual Studio e projetada para atender ao perfil de produtores rurais. O projeto prioriza clareza, navegação direta, feedback imediato e baixo requisito de alfabetização tecnológica, consolidando a aplicação não apenas como uma ferramenta computacional, mas como um instrumento de apoio à gestão nutricional eficiente e à tomada de decisão em campo.

Comunicação HTTP/JSON e Sincronização Operacional: A interação entre a IHM e o sistema embarcado ocorre por meio de uma arquitetura **request-response** baseada no protocolo HTTP, adotada por sua padronização, interoperabilidade e facilidade de integração com sistemas industriais. O fluxo operacional inicia-se quando a IHM envia uma requisição HTTP ao ESP32 solicitando a identificação do animal presente no comedouro. Após a leitura da etiqueta RFID, o microcontrolador responde com um objeto JSON contendo a tag detectada, assegurando estruturação semântica e baixo custo de parsing.

De posse da identificação, a IHM realiza uma consulta ao banco PostgreSQL via Docker, recuperando histórico alimentar, parâmetros zootécnicos e restrições nutricionais. Com essas informações, o software calcula automaticamente a dosagem adequada de ração, considerando peso, categoria produtiva, frequência de alimentação e metas do lote. Em seguida, a IHM envia ao ESP32 um novo JSON contendo a

dose prescrita e instruções operacionais, iniciando formalmente o ciclo de alimentação.

Durante a etapa física de fornecimento, o ESP32 executa a dosagem e realiza monitoramento em tempo real, utilizando sensores para mensurar consumo, sobras, tempo de alimentação e comportamento do animal. Finalizado o processo, o microcontrolador transmite à IHM um JSON contendo o resultado da operação, incluindo validações, alarmes, desvios ou interrupções não planejadas.

A aplicação interpreta a resposta, registra o evento no banco de dados e sincroniza o histórico alimentar do animal, preservando rastreabilidade, auditoria e suporte a análises estatísticas posteriores. Esse modelo de comunicação garante integridade transacional, baixa latência, escalabilidade e sincronização contínua entre software supervisor, hardware embarcado e infraestrutura de armazenamento, permitindo controle nutricional preciso e tomada de decisão baseada em dados.

Esse fluxo evita dependência de MQTT, brokers externos ou servidores adicionais, reduzindo custo e complexidade.

O uso de JSON facilita leitura humana, depuração e integração futura com aplicativos móveis ou dashboards web.

Validação Experimental, Simulação e Refinamento: A validação do sistema foi estruturada metodologicamente em três estágios progressivos: testes laboratoriais, simulações controladas e experimentação em ambiente real permitindo identificar limitações, ajustar parâmetros operacionais e consolidar a confiabilidade do protótipo antes de sua aplicação produtiva.

1 - Testes laboratoriais: A primeira etapa ocorreu em bancada, com condições controladas de energia, rede e instrumentação. Nessa fase, priorizou-se a verificação individual de componentes e a estabilidade da integração embarcada-software. As principais atividades envolveram:

Calibração da célula de carga, utilizando massas-padrão certificadas, curvas de linearidade e repetibilidade, assegurando erro inferior ao limite aceitável para pesagem zootécnica;

Testes elétricos e de ruído, avaliando interferência eletromagnética, blindagem, estabilidade de leitura analógica e variação do ADC sob diferentes cargas e condições de alimentação;

Estresse de comunicação HTTP, incluindo requisições sequenciais, concorrentes e de grande volume, analisando latência, perda de pacotes, consistência dos JSONs e integridade transacional com o banco Docker/PostgreSQL;

Os resultados desta etapa forneceram os parâmetros de referência para configuração de timeout, frequência de leitura, taxa de amostragem, filtragem digital e política de retransmissão, servindo como base para os ensaios seguintes.

2 - Testes de integração: Após a etapa laboratorial, iniciou-se a validação integrada da arquitetura — banco de dados Docker/PostgreSQL, IHM desenvolvida em C# e sistema embarcado ESP32. O objetivo dessa fase foi garantir interoperabilidade, estabilidade operacional contínua e coerência lógica no fluxo de informações entre todas as camadas do sistema.

Os testes contemplaram três dimensões principais:

Integração banco de dados + IHM + ESP32, verificando o ciclo completo de alimentação: leitura da tag RFID pelo microcontrolador, transmissão via HTTP, interpretação pela IHM, cálculo da dosagem, envio de JSON ao ESP32, atualização do banco e posterior consulta histórica pelo operador. Avaliou-se também a sincronização temporal entre os registros, assegurando rastreabilidade alimentar e identificação inequívoca do animal.

Concorrência de requisições, simulando múltiplos acessos simultâneos da IHM ao ESP32 e ao banco de dados, representando picos operacionais como horários de manejo, ordenha ou suplementação coletiva. Foram aplicados testes de carga com múltiplas threads, requisições paralelas HTTP e consultas SQL sobre o PostgreSQL, a fim de observar enfileiramento, bloqueios, escalonamento de recursos e impacto no tempo de resposta.

Consistência transacional, analisando atomicidade, integridade referencial e ausência de duplicidade ou perda de registros. Eventos como desconexão Wi-Fi, falha durante escrita no banco, timeout de servidor ou envio repetido de JSON foram propositalmente induzidos para verificar mecanismos de **rollback**, **commit** seguro, detecção de conflito, versionamento e tolerância a falhas. As **constraints** definidas na modelagem — chaves primárias, estrangeiras, triggers e políticas ON DELETE/UPDATE — foram monitoradas para garantir que nenhum cenário gerasse inconsistência alimentar ou identificação equivocada do animal.

3 - Testes operacionais simulados: Concluída a estabilidade da integração sistêmica, avançou-se para testes operacionais simulados, cujo propósito foi reproduzir cenários de manejo alimentar antes da implantação em ambiente rural. Essa etapa permitiu avaliar a resposta dinâmica do sistema frente a diferentes comportamentos do animal e situações de campo, sem comprometer a segurança biológica ou a infraestrutura produtiva.

Os ensaios foram estruturados em cinco categorias experimentais:

Dosagem completa, em que o ESP32 liberava integralmente o volume calculado pela IHM, representando um animal que consome toda a quantidade prescrita. Nesses testes, avaliou-se correlação entre massa registrada pela célula de carga, tempo total de permanência, atualização automática no banco Docker/PostgreSQL e feedback final via JSON.

Dosagem parcial, simulando interrupção voluntária do consumo, animal afastando-se do cocho ou liberação fracionada de ração. O objetivo foi verificar se o sistema reconhecia consumo incompleto, recalculava a diferença, identificava necessidade de nova coleta e armazenava registro consistente sem sobrescrever eventos anteriores.

Ausência de consumo, cenário importante para detecção precoce de enfermidades, estresse térmico ou falhas mecânicas. Foram analisados timeout de presença, mensagens de exceção, retorno estruturado ao IHM, geração de alerta, preservação transacional e ausência de registros falsos positivos.

Repetições consecutivas, avaliando comportamento de animais que retornam ao sistema em curto intervalo de tempo. Testou-se prevenção de superdosagem, verificação temporal mínima, histórico recente de alimentação, comparação com limites zootécnicos e resposta coerente do microcontrolador.

Análises temporais, medindo latência fim a fim (IHM → ESP32 → banco), variação de processamento em horários de pico, intervalo entre pesagens, estabilidade de **throughput** HTTP e impacto do crescimento da base de dados no desempenho das consultas.

Todos os resultados foram documentados sistematicamente, incluindo tabelas, curvas temporais, logs estruturados, capturas de pacotes e métricas de desempenho. A partir dessa documentação, aplicaram-se ajustes iterativos na filtragem de sensores, nas tolerâncias de pesagem, nos parâmetros de timeout, na normalização de dados, nas políticas de **retry** e na interface de visualização da IHM. Essa etapa consolidou a maturidade operacional do protótipo antes da validação em ambiente produtivo.

IV. RESULTADOS

A partir da implementação do protótipo do sistema automatizado de dosagem de ração. A validação do projeto foi conduzida em ambiente controlado (bancada), visando verificar a conformidade com os requisitos funcionais estabelecidos anteriormente. Os testes foram estruturados para avaliar isoladamente o desempenho dos subsistemas críticos como sensoramento de peso, identificação RFID e acionamento do motor e, posteriormente, a operação integrada do conjunto, focando em métricas de exatidão, repetibilidade e tempo de resposta do sistema.

A. Montagem e arquitetura do sistema

A primeira etapa dos resultados consistiu na integração física e eletrônica dos componentes. O protótipo foi montado consolidando o microcontrolador ESP32, o módulo leitor RFID RC522, motor e o conjunto de célula de carga com o módulo amplificador HX711 em uma estrutura funcional.

A Fig. 3 mostra a arquitetura de hardware que foi utilizada

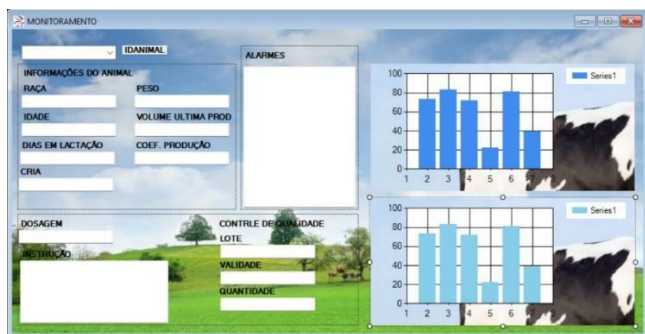


Fig. 5 Layout da Interface Homem-Máquina para monitoramento

A análise do layout da IHM destaca a integração de funcionalidades essenciais para a Pecuária de Precisão:

Painel de Identificação Zootécnica (Superior Esquerdo): Através do campo chave "IDANIMAL", a IHM permite carregar e exibir parâmetros individuais como Raça, Peso, Idade e Dias em Lactação. Esta funcionalidade válida a capacidade do sistema em operar com manejo individualizado, fornecendo ao operador os dados necessários para validar a dosagem;

Rastreabilidade e Controle de Insumos (Inferior Central): A seção dedicada ao "Controle de Qualidade" (Lote, Validade) introduz o registro digital de insumos, recurso inexistente no manejo manual, mitigando riscos de fornecimento de ração vencida ou imprópria;

Visualização Gráfica e Alarmes (Direita): A interface conta com gráficos de barras para acompanhamento visual de tendências (como histórico de produção/consumo) e uma área dedicada a "Alarmes", projetada para alertar o operador imediatamente sobre falhas de comunicação ou erros no processo.

Esta estruturação da IHM valida o requisito de usabilidade e organização da informação.

C. Estruturação e Persistência de Dados

Para sustentar a lógica de decisão do sistema e garantir a integridade das informações visualizadas na IHM, foi implementado um banco de dados relacional. Esta etapa foi crucial para viabilizar o manejo individualizado, permitindo que o software associe um identificador único (ID) a um conjunto específico de parâmetros zootécnicos.

A Fig. 6 apresenta a estrutura da tabela principal do sistema (animal), gerenciada através da ferramenta DBeaver. A imagem evidencia a população de dados reais utilizados durante os testes de validação.

id	raca	idade	dias_lactacao	peso	volume_ultima_producao
1	GIROLANDO	3	11	1	430
2	GIROLANDO	5	30	2	150
3	GIROLANDO	7	30	2	150
4	GIROLANDO	8	30	2	150

Fig. 6 Tabela de dados "animal" estruturada com parâmetros produtivos.

A análise da estrutura de dados confirma a capacidade do sistema em armazenar e processar variáveis determinantes para a nutrição de precisão:

Parâmetros de Cálculo: As colunas peso e volume_ultima_producao (visíveis na Fig. 5) servem como variáveis de entrada para o algoritmo de dosagem. É a partir desses valores armazenados que o microcontrolador define a quantidade exata de ração a ser liberada, substituindo a estimativa visual subjetiva;

Gestão de Ciclo Produtivo: O campo dias_lactacao permite que o sistema ajuste a dieta conforme a fase do animal (pico de lactação, meio ou final), prevenindo a subalimentação em momentos críticos;

Padronização Racial: O registro da raca (ex: Girolando, conforme observado nos dados) permite a aplicação de fatores de correção específicos para o perfil genético do rebanho.

A implementação deste banco de dados soluciona diretamente o problema de "registros inexistentes" diagnosticado na fase metodológica, estabelecendo uma base sólida para a rastreabilidade e o histórico produtivo da propriedade.

D. Validação Funcional e Análise de Dados em Tempo Real

Após a estruturação do banco de dados e da interface gráfica, foram realizados ensaios de operação integrada em laboratório com variáveis geradas de forma artificial. O objetivo desta etapa foi validar o fluxo completo da informação: desde a consulta dos dados do animal no servidor até a exibição dos parâmetros de controle e alertas na IHM.

A Fig. 7 apresenta o resultado deste ensaio, exibindo a IHM em pleno funcionamento após a seleção do animal de identificação "4" (o mesmo observado anteriormente na tabela do banco de dados).

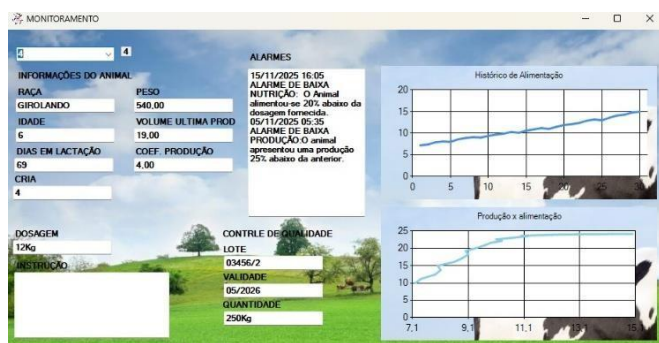


Fig. 7 IHM em operação exibindo dados recuperados, alarmes ativos e curvas de tendencia

A análise dos dados apresentados na tela comprova a eficácia da integração do sistema em três níveis críticos:

Integridade da Recuperação de Dados: Ao selecionar o ID "4", o sistema recuperou corretamente os dados estáticos (Raça Girlando, Idade 6) e dinâmicos (Peso 540kg, Dias em Lactação 69). A consistência desses valores com os registros do banco de dados valida a comunicação SQL e a lógica de **data binding** da aplicação;

Inteligência do Sistema (Gestão de Alarmes): O painel de "Alarmes" demonstrou a capacidade do algoritmo em processar o histórico do animal. O sistema gerou alertas automáticos de "Baixa Nutrição" (ingestão 20% abaixo da meta) e "Baixa Produção" (queda de 25%). Este resultado é fundamental, pois comprova que o sistema cumpre o requisito de auxílio à tomada de decisão, alertando o produtor sobre problemas que passariam despercebidos no manejo visual;

Análise de Tendências: Os gráficos de "Histórico de Alimentação" e "Produção x Alimentação" foram gerados com sucesso, permitindo a visualização da curva de resposta do animal. Isso atende ao requisito de rastreabilidade, permitindo correlacionar o investimento em ração com o retorno em leite.

Os resultados obtidos através da IHM confirmam que a solução proposta não atua apenas como um mecanismo de dosagem, mas como uma ferramenta de gestão zootécnica, transformando dados brutos em informações estratégicas para a propriedade.

V. CONSIDERAÇÕES

O desenvolvimento do projeto alcançou seu objetivo principal: o dimensionamento e a validação funcional de um sistema automatizado para dosagem de concentrado em bovinos leiteiros. Esta solução de engenharia integra plataformas de hardware de baixo custo com um software de gerenciamento de dados zootécnicos. Sua concepção aborda e mitiga sistematicamente as falhas associadas ao manejo manual, como a dispersão da precisão na dosagem, a

ineficiência logística de insumos e a deficiência na coleta de dados confiáveis para rastreabilidade.

Os testes de bancada comprovaram a eficiência da arquitetura de controle, que utiliza o microcontrolador ESP32 como unidade central de processamento. A escolha pela metodologia de dosagem gravimétrica, utilizando células de carga para aquisição de peso real, demonstrou superioridade técnica em relação à abordagem volumétrica. Esta decisão de design assegurou a precisão e a repetibilidade requeridas para o fracionamento da dieta, cumprindo a precisão necessária em sistemas zootécnicos.

O subsistema de identificação por Radiofrequência (RFID) apresentou desempenho estável, um fator crítico para viabilizar a individualização do trato. Tal funcionalidade garante que o fornecimento do concentrado seja parametrizado e executado em estrita conformidade com a performance produtiva de cada indivíduo, segundo o algoritmo de lógica nutricional implementado no firmware.

No plano do software, a integração entre a Interface Homem-Máquina (IHM), desenvolvida em C#, e o banco de dados PostgreSQL, operacionalizado via contêineres Docker, supriu a demanda por rastreabilidade. O sistema demonstrou robustez na indexação de séries históricas de consumo e na emissão de alarmes automáticos – acionados por desvios como sobras excessivas ou quedas no volume de produção – , transformando dados brutos em inteligência acionável. A comunicação foi estabelecida com o protocolo HTTP e intercâmbio de dados no formato JSON, garantindo alta interoperabilidade e permitindo o monitoramento remoto das operações em tempo real.

Conclui-se que, o protótipo valida o conceito de uma ferramenta capaz de converter variáveis operacionais em informação estratégica, otimizando o coeficiente de conversão alimentar e reduzindo a dependência de esforço humano intensivo. A validação técnica dos subsistemas confirma que a aplicação de tecnologia embarcada aliada a uma camada supervisória de fácil interação configura uma alternativa tecnologicamente acessível e escalável para a modernização da infraestrutura de fazendas leiteiras.

Como sugestões para etapas futuras, recomenda-se a validação de longa duração em ambiente de campo (in situ), submetendo o sistema a ciclos operacionais completos sob condições ambientais extremas e interação animal direta. O foco será o aprimoramento da robustez eletromecânica e o desenvolvimento de protocolos de redundância de link, visando manter a integridade dos dados em cenários de conectividade instável. Esta prova de conceito estabelece, contudo, a fundação tecnológica para a automação e otimização do manejo nutricional individualizado na cadeia produtiva do leite.

REFERÊNCIAS

- [1] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), "*Pesquisa da Pecuária Municipal 2023*", IBGE, Rio de Janeiro, Brasil, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>.
- [2] Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA), "*Pecuária de leite: em dois anos consecutivos de aumento nos custos de produção, as despesas com alimentação animal foram os fatores principais para definir as margens na atividade.*" Disponível em: <https://cnabrazil.org.br/publicacoes/pecuaria-de-leite-em-dois-anos-consecutivos-de-aumento-nos-custos-de-producao-as-despesas-com-alimentacao-animal-foram-os-fatores-principais-para-definir-as-margens-na-atividade>. Acesso em: 14 Nov. 2025.
- [3] BERCKMANS, Daniel. General introduction to precision livestock farming. *Animal Frontiers*, v. 7, n. 1, p. 6-11, 2017. I. S.
- [4] National Research Council (NRC), "*Nutrient Requirements of Dairy Cattle*," 7. ed. Washington, D.C.: National Academy Press, 2001.
- [5] SANTOS, F. A. P.; HUBER, J. T.; THEURER, C. B. Dairy cattle. In: CHURCH, D. C. (Ed.). "*The Ruminant Animal: Digestive Physiology and Nutrition*". Englewood Cliffs: Waveland Press, 1998. p. 495-522.
- [6] VAN SOEST, P. J. "Nutritional Ecology of the Ruminant". 2. ed. Ithaca: Cornell University Press, 1994.
- [7] FERREIRA, A. M.; PEREIRA, M. N. "*Nutrição de Bovinos Leiteiros*". Lavras: UFLA, 2005.
- [8] N. Liu, J. Qi, X. An, e Y. Wang, "*A Review on Information Technologies Applicable to Precision Dairy Farming: Focus on Behavior, Health Monitoring, and the Precise Feeding of Dairy Cows*," *Agriculture*, vol. 13, no. 10, Art. no. 1858, 2023, doi: 10.3390/agriculture13101858.
- [9] J. P. Jaderborg, S. L. Bird, G. I. Crawford, R. S. Walker, e A. DiCostanzo, "*Influence of hay feeding method, supplement moisture, or access time on intake and waste by beef cows*," *Translational Animal Science*, vol. 5, no. 2, p. txab069, Mai., 2021.
- [10] F. Serepas *et al.*, "*Lightweight Embedded IoT Gateway for Smart Homes Based on an ESP32 Microcontroller*," *Computers*, vol. 14, no. 9, Art. no. 391, 2025, doi: 10.3390/computers14090391.