


DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO PARA MEDIÇÃO CONTÍNUA DE RAÇÃO EM AVIÁRIOS**DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED SYSTEM FOR CONTINUOUS FEED MEASUREMENT IN POULTRY HOUSES** <https://doi.org/10.63330/aurumpub.052-002>**João Pedro Muniz Reis**

Graduado em Engenharia Eletrônica pela Universidade Federal de Sergipe
E-mail: joao.pedromr06@gmail.com

Mário Cupertino da Silva Júnior

Doutor em Engenharia Agrícola
Professor Associado na Universidade Federal de Sergipe
E-mail: mariocupertino@academico.ufs.br

Claudson Oliveira Brito

Doutor em Zootecnia
Professor Associado na Universidade Federal de Sergipe
E-mail: claudson@academico.ufs.br

Adson Andrade Barros

Graduado em Engenharia Agrícola
Mestrando em Desenvolvimento e Meio Ambiente na Universidade Federal de Sergipe
E-mail: adsonandrade@academico.ufs.br

RESUMO

O crescimento da produção avícola e a necessidade de aumento da produtividade têm impulsionado o desenvolvimento de tecnologias voltadas à automação do manejo alimentar. Entretanto, muitas soluções disponíveis apresentam elevado custo de implementação, dificultando sua adoção por pequenos e médios produtores. Nesse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema automatizado de baixo custo para medição contínua de ração em comedouros avícolas. O sistema desenvolvido utiliza células de carga do tipo strain gauge associadas a uma ponte de Wheatstone, circuito de condicionamento de sinal baseado no amplificador de instrumentação AD620 e aquisição de dados realizada por microcontrolador ESP32. Também foram estudadas técnicas de compensação térmica, amplificação em múltiplos estágios e métodos de estabilização das medições. Os experimentos realizados demonstraram comportamento aproximadamente linear do sistema na faixa de medição entre 0 e 1 kg, validando a utilização da regressão linear para modelagem da relação entre massa e tensão de saída. Entretanto, observou-se que limitações mecânicas da estrutura utilizada influenciaram a estabilidade das medições, além da presença de efeitos de drifting e ruídos associados às conexões elétricas e às variações térmicas do circuito. Apesar das limitações

identificadas, os resultados indicam que o sistema desenvolvido apresenta potencial para aplicações de monitoramento contínuo de baixo custo em sistemas avícolas, especialmente em aplicações que não demandem elevada precisão metrológica.

Palavras-chave: Automação avícola; Célula de carga; Medição de peso; Ponte de Wheatstone; Instrumentação eletrônica.

ABSTRACT

The growth of poultry production and the increasing need for higher productivity have driven the development of technologies aimed at automating feed management. However, many of the available solutions present high implementation costs, making their adoption difficult for small and medium-sized producers. In this context, this study proposes the development of a low-cost automated system for continuous feed measurement in poultry feeders. The developed system uses strain gauge load cells associated with a Wheatstone bridge, a signal conditioning circuit based on the AD620 instrumentation amplifier, and data acquisition performed by an ESP32 microcontroller. Thermal compensation techniques, multi-stage amplification, and measurement stabilization methods were also investigated. The experiments conducted demonstrated an approximately linear behavior of the system within the measurement range from 0 to 1 kg, validating the use of linear regression to model the relationship between mass and output voltage. However, it was observed that mechanical limitations of the structure used influenced measurement stability, in addition to the presence of drifting effects and noise associated with electrical connections and thermal variations in the circuit. Despite the identified limitations, the results indicate that the developed system has potential for low-cost continuous monitoring applications in poultry systems, especially in applications that do not require high metrological precision.

Keywords: Poultry automation; Load cell; Weight measurement; Wheatstone bridge; Electronic instrumentation.

1 INTRODUÇÃO

A produção de frango de corte experimentou uma transformação significativa desde o final da Segunda Guerra Mundial, impulsionada por uma crescente demanda por proteínas devido ao aumento populacional. O concurso "Chicken of Tomorrow Contest", criado para premiar o frango mais gordo cultivado no menor tempo possível, desempenhou um papel crucial na evolução das técnicas de produção, estabelecendo novos padrões na indústria avícola. Esta competição marcou o início de uma era de inovações que resultaram em um aumento impressionante de cerca de 400% na massa corporal dos frangos e uma

redução significativa no ciclo de crescimento, que passou de aproximadamente 70 a 80 dias na década de 1950 para apenas 35 a 45 dias atualmente (M J Zuidhof, 2014). Esse progresso contribuiu para o aumento contínuo do consumo de carne de frango em todo o mundo. De acordo com dados do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, a carne de frango de corte está projetada para ser a segunda proteína mais consumida globalmente, ficando atrás apenas da carne vermelha (USDA, 2024).

Este desenvolvimento da indústria avícola também se reflete no Brasil. Atualmente, o país é um dos maiores produtores de carne de frango e ovos do mundo, apresentando crescimento contínuo na produção ao longo dos anos. Entre 2010 e 2020, a produção brasileira de carne de frango aumentou cerca de 17%, alcançando quase 14 milhões de toneladas (ABPA, 2021). Esse crescimento está relacionado, entre outros fatores, ao aprimoramento das práticas de manejo, ao monitoramento da alimentação das aves e à adoção de tecnologias de automação nos sistemas produtivos. A automatização desses processos contribui para o aumento da produtividade, maior padronização da produção e redução de custos operacionais. Além disso, o controle de fatores ambientais, como temperatura, umidade e ventilação, auxilia na redução do estresse das aves e favorece o consumo adequado de ração. Nesse contexto, o monitoramento da alimentação torna-se importante para acompanhar o desempenho produtivo e as condições de criação das aves.

A busca pela automatização de processos e pelo uso de tecnologias na produção avícola tem aumentado nos últimos anos, contribuindo diretamente para o aumento da produtividade do setor. Entretanto, o custo das tecnologias adotadas no país muitas vezes não condiz com a realidade de produtores de pequeno e médio porte. Sem o investimento necessário, muitos ainda utilizam métodos manuais, mais suscetíveis a erros e que demandam maior esforço operacional no dia a dia. A ausência de sistemas automatizados de medição pode resultar em decisões inadequadas de manejo, desperdício de ração e prejuízos no ciclo de crescimento das aves.

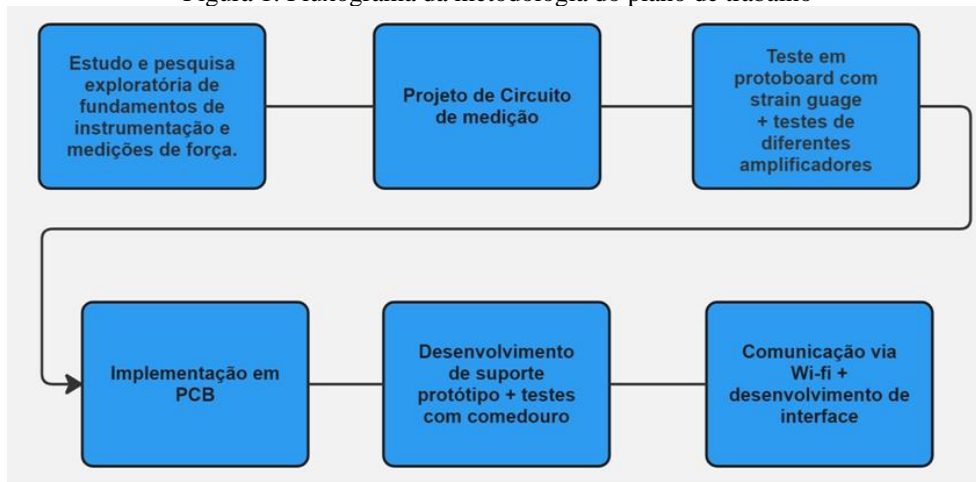
Este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema automatizado para medição contínua de ração em comedouros avícolas, priorizando baixo custo e facilidade de implementação. O objetivo é oferecer uma alternativa acessível para produtores de pequeno e médio porte, auxiliando na gestão da alimentação das aves e reduzindo a necessidade de monitoramento manual. Além disso, o sistema pode contribuir para atividades acadêmicas na área de zootecnia, tornando os processos de coleta e acompanhamento de dados mais eficientes.

Para isso, são abordados fundamentos de instrumentação eletrônica e medição de força, bem como o desenvolvimento de um sistema de monitoramento composto por dispositivos eletrônicos, diferentes métodos de comunicação de dados e uma interface gráfica para supervisão e controle. Também são realizados testes estruturais e operacionais dos comedouros e dos métodos de comunicação empregados, visando uma solução funcional e de fácil replicação.

2 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo compreende as etapas de estudo teórico, desenvolvimento eletrônico, implementação estrutural e validação experimental do sistema de monitoramento do consumo de ração. Inicialmente, foram realizados levantamentos bibliográficos sobre instrumentação eletrônica, medição de força e sistemas embarcados aplicados à automação. Em seguida, foram desenvolvidos os circuitos de aquisição de sinal, a estrutura física de suporte do comedouro e os módulos de comunicação e supervisão do sistema. A Figura 1 ilustra o fluxograma das etapas que compõem a metodologia.

Figura 1: Fluxograma da metodologia do plano de trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

2.1 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

O sistema desenvolvido tem como finalidade realizar a medição contínua da ração presente em comedouros avícolas por meio de células de carga integradas a um sistema eletrônico de aquisição e monitoramento de dados. O protótipo foi projetado buscando baixo custo, facilidade de implementação e possibilidade de replicação em sistemas de produção de pequeno e médio porte.

A estrutura do sistema é composta por células de carga do tipo strain gauge, circuito de condicionamento de sinal, microcontrolador ESP32, sistema de comunicação sem fio e interface gráfica para supervisão das medições. O desenvolvimento eletrônico foi realizado utilizando a plataforma EasyEDA, enquanto os testes experimentais e de validação ocorreram nos laboratórios do Departamento de Engenharia Elétrica.

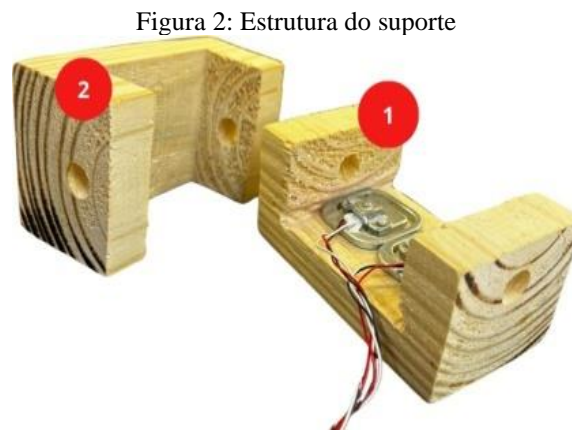
Durante o desenvolvimento, foram avaliados diferentes métodos de aquisição e amplificação do sinal proveniente das células de carga, considerando fatores como estabilidade, sensibilidade, custo e facilidade de calibração. Também foram realizados testes estruturais no suporte físico do comedouro e análises relacionadas à estabilidade das medições ao longo do tempo.

2.2 ESTRUTURA MECÂNICA DO SISTEMA

O próximo passo do desenvolvimento consistiu na definição da estrutura mecânica utilizada para fixação das células de carga no sistema de monitoramento. Como o comedouro utilizado é suspenso por correntes, existe uma força vertical aplicada entre a estrutura de sustentação e o recipiente de ração.

Dessa forma, foi projetada uma base estrutural destinada à fixação das células de carga, responsável por sustentar o conjunto suspenso pelas correntes superiores. Além disso, foi desenvolvida uma peça auxiliar para sustentação do comedouro, permitindo que a força exercida pelo peso da ração fosse transferida diretamente aos sensores.

A Figura 2 apresenta os componentes mecânicos projetados para o sistema, incluindo a base de sustentação e a peça de suporte do comedouro.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Já a Figura 3 mostra o suporte montado.

Figura 3: Suporte montado



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Com a montagem do conjunto, as células de carga passam a operar sob compressão devido à força aplicada verticalmente pelo peso do comedouro e da ração armazenada. Essa configuração permitiu a transferência da carga mecânica para os sensores de forma contínua durante os experimentos realizados.

2.3 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE FORÇA

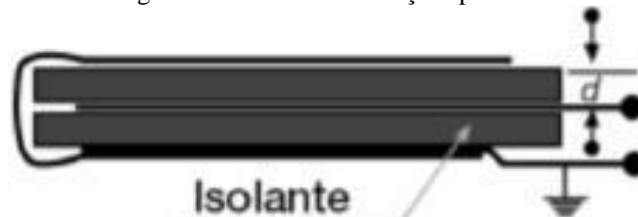
a) Transdutores de força

Inicialmente, foram estudados diferentes tipos de transdutores aplicáveis à medição de força, considerando fatores como precisão, estabilidade, custo e viabilidade para medições contínuas. Entre as tecnologias analisadas destacam-se os sensores piezoelétricos (PZT), os sensores capacitivos e os resistores sensíveis à força (Force Sensitive Resistor – FSR).

Os sensores piezoelétricos apresentam excelente resposta para medições dinâmicas e transitórios rápidos de força, sendo amplamente utilizados em aplicações de vibração e impacto. Entretanto, devido à dificuldade de utilização em medições estáticas contínuas, sua aplicação mostrou-se inadequada para a proposta deste trabalho.

Os transdutores capacitivos (Figura 4) operam com base na variação da capacitância entre placas condutoras paralelas submetidas à deformação mecânica. Quando ocorre aproximação entre as placas devido à aplicação de força ou pressão, há aumento da capacitância elétrica do sistema, permitindo a conversão da deformação em sinal mensurável.

Figura 4: Transdutor de força capacitivo



Fonte: (Alexandre Balbinot, Valner João Brusamarello, 2019)

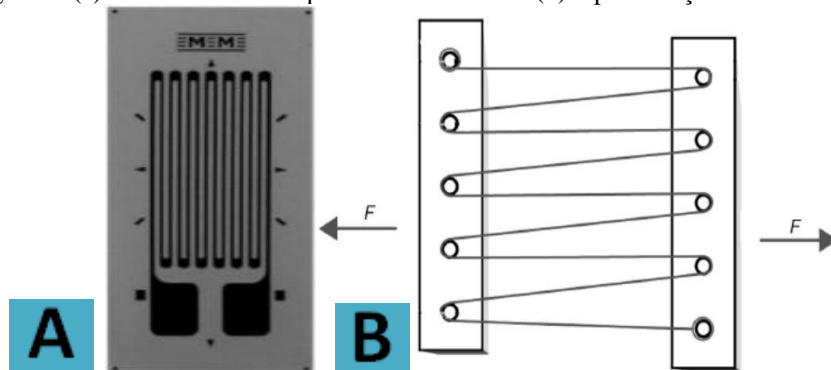
Outra alternativa analisada foram os resistores sensíveis à força (FSR), dispositivos cuja resistência elétrica varia conforme a pressão aplicada sobre sua superfície. Apesar do baixo custo e da facilidade de integração eletrônica, esses sensores apresentam menor precisão quando comparados a outras tecnologias de medição de força.

Dentre as tecnologias estudadas, optou-se pela utilização de extensômetros resistivos (strain gauges), devido à maior precisão, ampla disponibilidade comercial e facilidade de integração em sistemas eletrônicos de aquisição de dados. Esses sensores operam com base na variação da resistência elétrica provocada pela deformação mecânica do material em que estão fixados. Essa relação entre deformação e variação de resistência é conhecida como fator gauge.

Os extensômetros são compostos por trilhas metálicas extremamente finas depositadas sobre uma base isolante. Quando submetidos à deformação mecânica, ocorre alteração do comprimento e da seção transversal do material condutor, resultando em variação da resistência elétrica.

A Figura 5 apresenta exemplos construtivos de extensômetros resistivos, incluindo o extensômetro do tipo folha uniaxial e a representação simplificada de um extensômetro de fio.

Figura 5: (a) extensômetro do tipo folha uniaxial E e (b) representação de extensômetro de fio.



Fonte: (Alexandre Balbinot, Valner João Brusamarello, 2019)

Os extensômetros resistivos encontram-se amplamente difundidos em células de carga comerciais, disponíveis em diferentes geometrias e configurações estruturais. Essas variações buscam atender aplicações específicas relacionadas à faixa de medição, direção da força aplicada e compensação térmica.

A Figura 6 apresenta exemplos de células de carga comerciais utilizadas em aplicações de medição de força.

Figura 6: Diferentes configurações comerciais de células de carga.



Fonte: (AEP TRASNDUCERS)

b) Células de carga e ponte de Wheatstone

Para este trabalho foram utilizadas células de carga comerciais de 50 kg (Figura 7), compostas internamente por extensômetros resistivos já configurados em ponte de Wheatstone. Essa configuração permite a detecção de pequenas variações de resistência associadas à deformação mecânica, resultando em uma variação diferencial de tensão na saída do sensor.

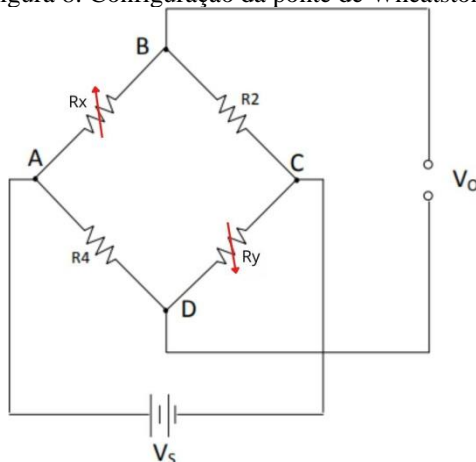
Figura 7 Célula de carga comercial de 50 kg.



Fonte: (Alexandre Balbinot, Valner João Brusamarello, 2019)

Para aumentar a sensibilidade do sistema e melhorar a leitura das pequenas variações de tensão, foi utilizada a configuração de ponte de Wheatstone com excitação simétrica (Figura 8). Essa abordagem proporciona maior estabilidade da medição e melhor resposta do sistema frente a variações de carga.

Figura 8: Configuração da ponte de Wheatstone.

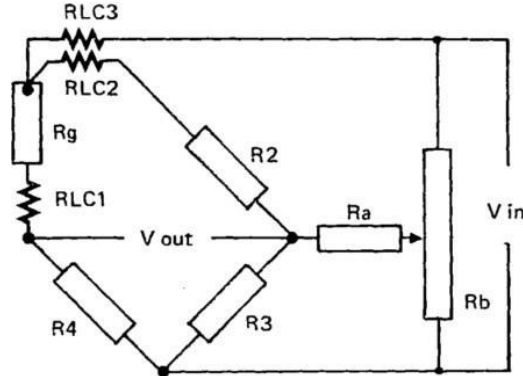


Fonte: (POPLE VICKERS SHIPBUILDING GROUP LTD, 1978)

É comum que células de carga comerciais sejam descritas como configurações de meia ponte com três fios, conforme apresentado em seus datasheets. Esses três terminais estão associados à compensação das resistências dos condutores, minimizando erros introduzidos pela variação dos cabos de conexão.

Nos testes iniciais, observou-se que variações mecânicas nos cabos influenciavam as medições devido à alteração da resistência elétrica dos fios. Esse efeito foi reduzido com a utilização da configuração de três fios na ponte de Wheatstone, melhorando a estabilidade das leituras, conforme ilustra a Figura 9.

Figura 9: Ponte de Wheatstone a três fios com calibração.



Fonte: (POPLE VICKERS SHIPBUILDING GROUP LTD, 1978)

c) Compensação térmica e aquisição de sinal

A saída da ponte apresenta baixa amplitude, sendo necessário o uso de um circuito de condicionamento de sinal. Para isso, foi utilizado o amplificador de instrumentação AD620, escolhido devido à sua alta rejeição de ruído em modo comum e baixo deslocamento de offset em função da temperatura.

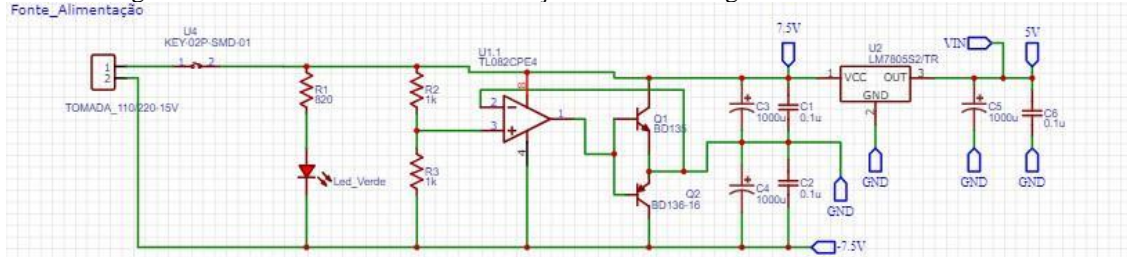
O sinal amplificado é então encaminhado ao conversor analógico-digital interno do microcontrolador ESP32, responsável pela digitalização e processamento dos dados.

Em aplicações de pesagem utilizando células de carga, é comum a utilização de módulos dedicados de aquisição, como o HX711 e o ADS1230, amplamente empregados devido à elevada resolução dos conversores analógico-digitais integrados. Entretanto, neste trabalho optou-se pela utilização do conversor analógico-digital interno do ESP32 em conjunto com amplificação analógica baseada no AD620 e no TL082. Essa abordagem permitiu maior flexibilidade no desenvolvimento do circuito e compatibilidade com a alimentação simétrica utilizada no sistema.

A influência térmica representa um dos principais fatores capazes de comprometer a estabilidade e a precisão de sistemas de medição baseados em extensômetros resistivos. Em aplicações de medição contínua, fatores como variação térmica e instabilidade do circuito podem influenciar diretamente a precisão das leituras realizadas.

Para mitigar esses efeitos, foram consideradas técnicas de compensação térmica baseadas na própria ponte de Wheatstone (Figura 10), por meio da utilização de quatro extensômetros. Nesse arranjo, dois extensômetros são posicionados na região de deformação e dois em regiões não sujeitas à carga mecânica, permitindo que variações térmicas sejam compensadas na saída diferencial.

Figura 12: Circuito da fonte de alimentação simétrica e regulador de tensão do sistema



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na entrada do circuito é utilizado um conector de alimentação do tipo jack, acompanhado de uma chave liga/desliga para controle da energização do sistema. Um LED indicador foi adicionado para sinalizar a presença de alimentação.

O circuito utiliza um amplificador operacional TL082 associado aos transistores BD135 e BD136 para implementação da fonte simétrica. O arranjo permite gerar os níveis de tensão positivos e negativos necessários para alimentação da ponte de Wheatstone e do circuito de condicionamento analógico. Os capacitores eletrolíticos presentes na saída são utilizados para filtragem e estabilização da tensão, reduzindo oscilações e ruídos provenientes da fonte de entrada.

Para a alimentação do ESP32, foi empregado o regulador linear LM7805, responsável por converter a tensão de entrada em uma saída estável de 5 V. Capacitores cerâmicos e eletrolíticos foram adicionados próximos ao regulador para melhorar a estabilidade do circuito e minimizar ruídos na alimentação.

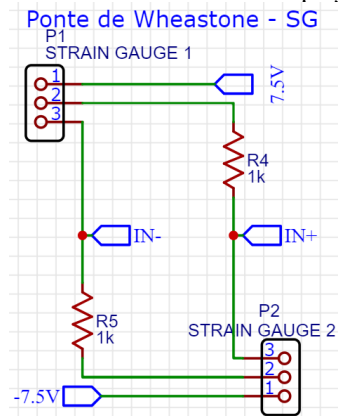
A utilização dessa configuração permitiu alimentar simultaneamente a etapa analógica e a etapa digital do sistema utilizando apenas uma única fonte externa de 15 V, simplificando a implementação do protótipo e reduzindo os custos do projeto.

b) Ponte de wheatstone.

Embora a literatura apresente diferentes configurações de ponte de Wheatstone com três fios e técnicas de calibração de alta precisão, neste trabalho foi adotada inicialmente uma configuração simplificada de três fios, visando facilitar a implementação e reduzir a complexidade do sistema. Essa abordagem mostrou-se adequada para os testes preliminares do protótipo e permitiu avaliar o comportamento das células de carga em condições reais de operação.

A configuração desenvolvida é apresentada na Figura 13. Nela, duas células de carga do tipo strain gauge são conectadas formando uma ponte de Wheatstone parcialmente balanceada. Os terminais superiores da ponte são alimentados com tensão positiva de +7,5 V, enquanto os terminais inferiores são conectados à alimentação negativa de -7,5 V. Os pontos centrais da ponte correspondem às saídas diferenciais IN+ e IN-, utilizadas posteriormente na etapa de condicionamento de sinal com o amplificador de instrumentação.

Figura 13: Ponte de Wheatstone projetada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No circuito apresentado, os resistores R4 e R5, ambos de 1 k Ω , atuam na composição da ponte juntamente com os strain gauges conectados nos terminais P1 e P2. Essa configuração permite a obtenção de um sinal diferencial proporcional às variações de resistência provocadas pela deformação mecânica aplicada às células de carga.

A utilização da configuração de três fios contribui para reduzir parcialmente os efeitos da resistência dos cabos de conexão sobre a medição, melhorando a estabilidade das leituras em comparação com ligações convencionais de dois fios. Entretanto, durante os testes e a utilização contínua do sistema, será avaliada a necessidade de adoção de outras topologias de ponte e métodos de calibração mais avançados, caso sejam observadas limitações relacionadas à precisão ou estabilidade das medições ao longo do tempo.

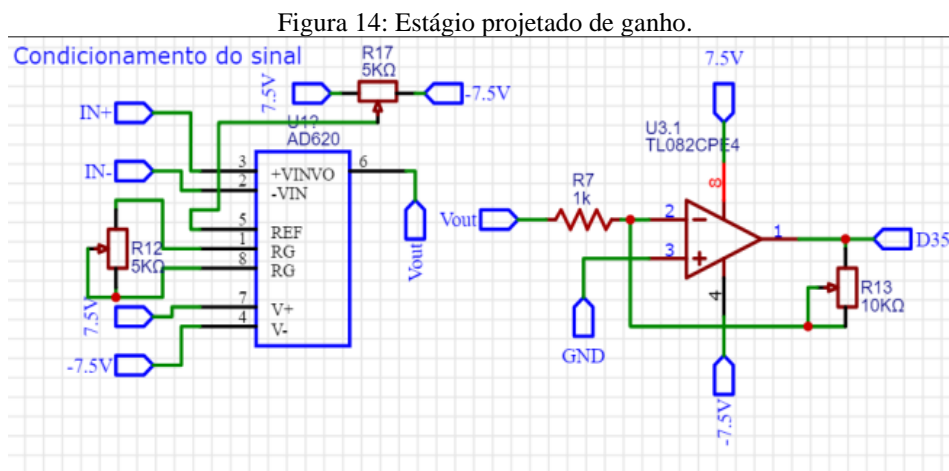
c) Condicionamento de sinal

O estágio de condicionamento de sinal constitui uma das etapas mais importantes do sistema desenvolvido, pois é responsável pelo tratamento dos sinais elétricos provenientes da ponte de Wheatstone antes de sua aquisição pelo microcontrolador. Como discutido anteriormente, os sinais gerados pelas células de carga possuem amplitude muito reduzida, exigindo técnicas adequadas de amplificação e filtragem para permitir medições confiáveis.

Amplificadores de instrumentação são amplamente utilizados em aplicações envolvendo pequenos sinais diferenciais devido à sua elevada impedância de entrada e alta rejeição de ruído em modo comum. Entretanto, mesmo esses dispositivos estão sujeitos a imperfeições associadas a fatores externos, principalmente variações térmicas. Durante os testes experimentais, observou-se o fenômeno de drifting de offset, caracterizado pela variação da tensão de saída em função da temperatura ambiente. Dessa forma, mesmo para uma carga constante aplicada ao sistema, pequenas variações nas medições foram identificadas, comportamento também descrito nos datasheets dos componentes utilizados (Devices, 2005; Instruments, 1999).

Embora amplificadores da família INA apresentem excelente desempenho em termos de rejeição de modo comum, o amplificador AD620 mostrou-se mais adequado para a aplicação proposta. Essa escolha foi motivada principalmente pelo menor drifting de offset térmico apresentado pelo componente, aproximadamente $0,6 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, enquanto o INA126 apresenta valor em torno de $3,0 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Além disso, o AD620 possui menor custo, fator importante considerando a proposta de desenvolvimento de um sistema de baixo custo.

A Figura 14 apresenta o circuito de condicionamento de sinal desenvolvido para o sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No primeiro estágio do circuito é utilizado o amplificador de instrumentação AD620, responsável pela amplificação inicial do sinal diferencial proveniente da ponte de Wheatstone, conectado às entradas $\text{IN}+$ e $\text{IN}-$. O ganho do AD620 é definido pelo resistor conectado entre os terminais RG do componente, representado no circuito pelo resistor R12 de $5 \text{ k}\Omega$. A alimentação do circuito é realizada por fonte simétrica de $\pm 7,5 \text{ V}$, permitindo operação adequada para sinais diferenciais próximos do nível de referência.

Como a variação do sinal proveniente das células de carga é extremamente pequena, optou-se por não utilizar um ganho excessivamente elevado no primeiro estágio de amplificação. Essa estratégia busca evitar a amplificação significativa de ruídos e oscilações indesejadas presentes no sistema.

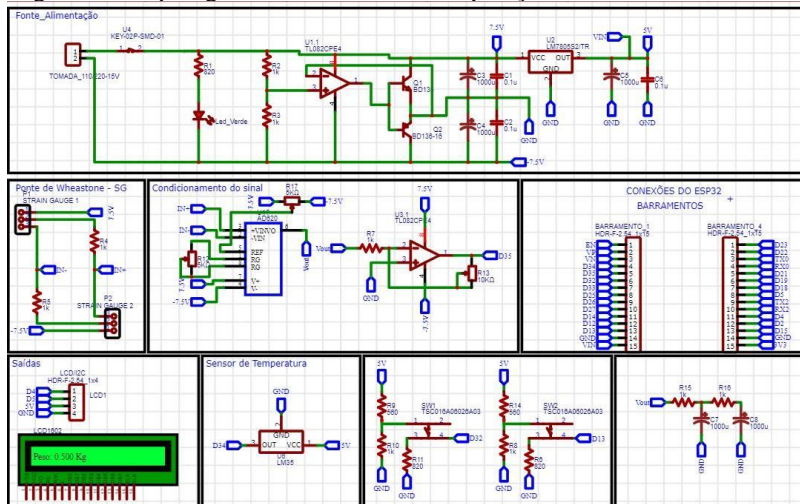
Após a amplificação inicial realizada pelo AD620, o sinal é encaminhado para um segundo estágio utilizando o amplificador operacional TL082. Nesse estágio, o circuito realiza amplificação adicional do sinal já condicionado, permitindo melhor adequação da amplitude para aquisição pelo sistema digital. Observa-se no esquemático que o TL082 está configurado com realimentação resistiva, utilizando os resistores R7 e R13, responsáveis pela definição do ganho do estágio.

A utilização de dois estágios de amplificação permitiu distribuir o ganho total do sistema, reduzindo problemas relacionados à saturação, amplificação excessiva de ruídos e instabilidade térmica observados durante os testes experimentais.

d) Topologia final do sistema

Após o desenvolvimento individual dos módulos eletrônicos, realizou-se a integração completa do sistema de aquisição de dados utilizado para o monitoramento do peso da ração nos comedouros avícolas. A Figura 15 apresenta a arquitetura final do sistema desenvolvido, reunindo os circuitos de alimentação, aquisição de sinal, condicionamento analógico, sensores auxiliares, interface de operação e módulos de processamento.

Figura 15: Topologia final do sistema de aquisição de dados desenvolvido.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na parte superior da figura é apresentada a etapa de alimentação do sistema. O circuito utiliza uma fonte externa de 15 V conectada por meio de um conector do tipo jack, acompanhada de uma chave liga/desliga e um LED indicador de funcionamento. A partir dessa alimentação, o circuito gera tensões simétricas de aproximadamente $\pm 7,5$ V para os estágios analógicos utilizando o amplificador operacional TL082 associado aos transistores BD135 e BD136. Também é utilizado um regulador linear LM7805 para obtenção da alimentação de 5 V destinada ao ESP32 e aos demais circuitos digitais.

Na região inferior esquerda encontra-se a ponte de Wheatstone implementada com células de carga do tipo strain gauge. O circuito foi desenvolvido utilizando configuração de três fios, buscando reduzir interferências relacionadas à resistência dos cabos e melhorar a estabilidade das medições. Os sinais diferenciais gerados pela ponte são encaminhados ao estágio de condicionamento de sinal.

O bloco de condicionamento é composto inicialmente pelo amplificador de instrumentação AD620, responsável pela amplificação do pequeno sinal diferencial proveniente das células de carga. O ganho do estágio é ajustado por resistor externo conectado aos terminais RG do componente. Em seguida, o sinal passa por um segundo estágio utilizando o amplificador operacional TL082, permitindo amplificação complementar do sinal antes da aquisição pelo microcontrolador.

A figura também apresenta o módulo de conexões do ESP32, utilizado para facilitar o roteamento dos sinais entre os periféricos do sistema e o microcontrolador. O ESP32 é responsável pela aquisição dos sinais analógicos, processamento das informações e gerenciamento dos dispositivos de entrada e saída.

Entre os periféricos integrados ao sistema estão o display LCD utilizado para exibição local das medições, o sensor de temperatura LM35 empregado para monitoramento térmico e futura compensação das variações observadas no circuito analógico, além dos botões destinados às funções de tara e calibração do sistema.

Observa-se ainda a presença de circuitos auxiliares de filtragem associados à alimentação, utilizando capacitores eletrolíticos e cerâmicos para redução de ruídos e estabilização das tensões do sistema.

A integração desses módulos resultou em um sistema completo de aquisição e monitoramento de peso, projetado com foco em baixo custo, facilidade de implementação e possibilidade de aplicação em sistemas de produção avícola de pequeno e médio porte.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

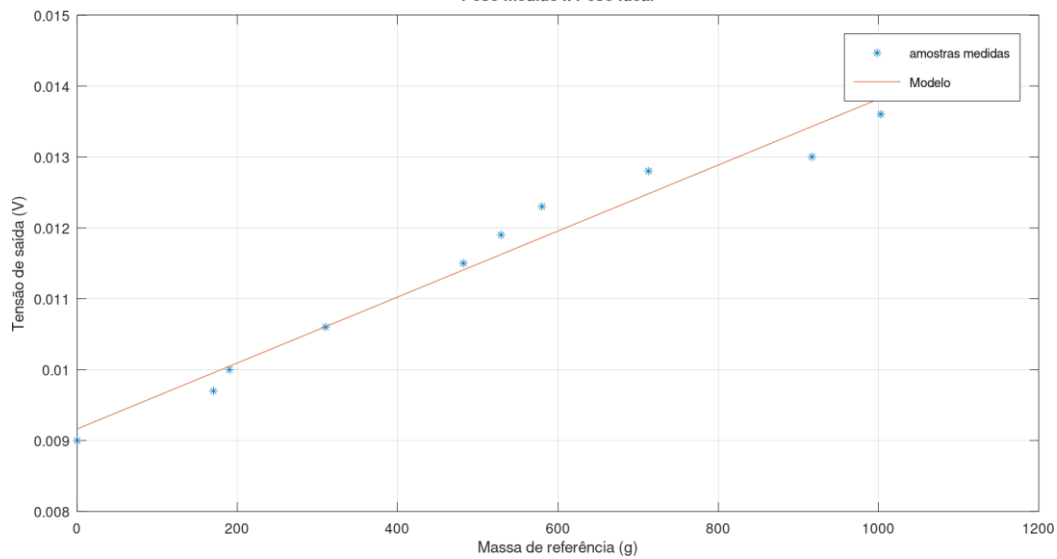
Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados com o protótipo desenvolvido. Ressalta-se que os testes foram conduzidos com o objetivo de validar as topologias eletrônicas implementadas e verificar o comportamento do sistema de aquisição de dados em condições controladas de laboratório, não sendo direcionados à aplicação definitiva em ambiente avícola.

3.1 PESO MÉDIO X PESO IDEAL

Para validação preliminar do sistema de medição, utilizou-se como referência uma balança comercial da marca Mb House, com resolução aproximada de 1 g. Embora esse equipamento não apresente elevada precisão metrológica, sua utilização mostrou-se adequada para os objetivos deste trabalho, considerando que a aplicação proposta não demanda medições de alta exatidão.

Os ensaios experimentais foram realizados utilizando massas entre 0 g e 1 kg, sendo registradas as tensões de saída correspondentes ao sistema de aquisição desenvolvido. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 16.

Figura 16: Relação entre massa de referência e tensão de saída do sistema
 Peso medido x Peso Ideal



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 16 apresenta o comportamento experimental do sistema de medição desenvolvido, relacionando a massa de referência aplicada à tensão de saída obtida no circuito de condicionamento de sinal. O gráfico é composto por duas representações principais: os pontos experimentais obtidos durante os ensaios e a reta do modelo matemático obtido por regressão linear.

No eixo horizontal é representada a massa de referência, em gramas, abrangendo aproximadamente a faixa entre 0 g e 1200 g. Já o eixo vertical representa a tensão de saída do sistema, em volts, variando aproximadamente entre 0,008 V e 0,015 V. Observa-se que as variações de tensão encontram-se na ordem de milivolts, comportamento esperado para sistemas baseados em células de carga.

Os pontos identificados como “amostras medidas” correspondem aos valores experimentais coletados durante os testes, enquanto a linha contínua denominada “Modelo” representa a aproximação linear obtida matematicamente. Visualmente, observa-se que os pontos experimentais permanecem próximos da reta ajustada, evidenciando comportamento aproximadamente linear do sistema dentro da faixa de operação analisada.

Com o objetivo de modelar matematicamente a relação entre a tensão de saída e a massa aplicada, foi utilizada regressão linear sobre os dados experimentais, resultando no modelo apresentado pela Equação:

$$V = 0.0091651 + (4.6483e - 06) \cdot M$$

Onde:

- V representa a tensão de saída do sistema, em volts;

- M representa a massa aplicada, em gramas.

O termo constante do modelo está associado ao offset presente no circuito eletrônico, enquanto o coeficiente angular representa a sensibilidade média do sistema de medição obtida experimentalmente.

Os resultados demonstram que o protótipo apresentou resposta crescente aproximadamente linear ao longo de toda a faixa de medição entre 0 g e 1 kg. Entre os pontos medidos, destacam-se valores próximos de 0,0090 V para 0 g e aproximadamente 0,0136 V para 1000 g, indicando aumento gradual da tensão conforme o incremento da massa aplicada.

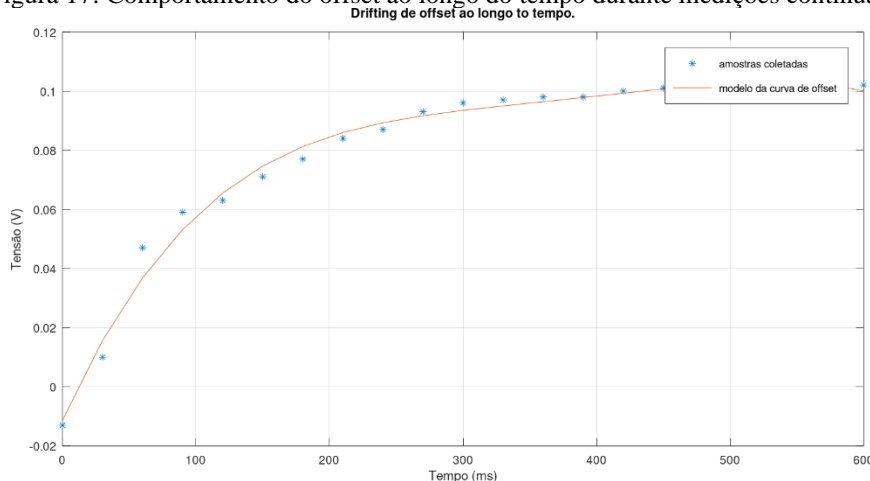
Embora o comportamento geral apresente boa linearidade, alguns desvios pontuais podem ser observados entre os dados experimentais e o modelo ajustado. Nota-se, por exemplo, que o ponto correspondente à massa próxima de 920 g apresenta valor ligeiramente inferior ao previsto pela reta de regressão, enquanto alguns pontos intermediários entre aproximadamente 500 g e 700 g encontram-se discretamente acima da curva do modelo.

Essas diferenças podem estar associadas a fatores como ruídos elétricos, limitações da resolução da balança utilizada como referência, pequenas instabilidades do circuito e efeitos de drifting observados durante os testes experimentais. Ainda assim, os desvios observados permanecem reduzidos em relação à faixa total de operação do sistema.

De forma geral, os resultados indicam que o sistema desenvolvido apresenta comportamento previsível e suficientemente estável para aplicações de monitoramento em que não sejam exigidos elevados níveis de precisão metrológica. A proximidade entre os dados experimentais e o modelo matemático validou a utilização da regressão linear como método de calibração do sistema.

Com o objetivo de investigar os efeitos relacionados à estabilidade temporal e ao drifting do circuito, também foram realizados testes de medição contínua sob condições constantes, com aquisição periódica de dados ao longo do tempo. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 17.

Figura 17: Comportamento do offset ao longo do tempo durante medições contínuas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 17 apresenta o comportamento temporal da tensão de saída do sistema durante um ensaio de medição contínua. O gráfico relaciona o tempo decorrido, representado no eixo horizontal em milissegundos (ms), com a tensão medida pelo circuito, representada no eixo vertical em volts (V).

O eixo horizontal abrange aproximadamente o intervalo entre 0 ms e 600 ms, enquanto o eixo vertical apresenta valores de tensão compreendidos aproximadamente entre $-0,02$ V e $0,12$ V. O gráfico é composto por dois conjuntos principais de informações: os pontos experimentais identificados como “amostras coletadas” e a curva contínua denominada “modelo da curva de offset”.

Os pontos experimentais encontram-se distribuídos ao longo de toda a faixa temporal analisada, apresentando tendência crescente da tensão ao longo do tempo. Observa-se que, nos instantes iniciais do experimento, ocorre uma variação mais acentuada da tensão medida, seguida por uma redução gradual da taxa de crescimento à medida que o tempo avança.

A curva contínua associada ao modelo de offset acompanha o comportamento geral das amostras experimentais, apresentando crescimento mais rápido nos instantes iniciais e tendência de estabilização em valores próximos de $0,10$ V nos instantes finais do ensaio.

Visualmente, observa-se que os pontos experimentais permanecem próximos da curva ajustada durante praticamente todo o intervalo analisado, embora pequenas diferenças possam ser percebidas em determinados trechos. Nos instantes iniciais, alguns pontos experimentais apresentam valores ligeiramente superiores à curva ajustada, enquanto em regiões intermediárias e finais as diferenças tornam-se menos perceptíveis.

Os dados apresentados evidenciam a existência de variação temporal na saída do circuito durante o processo de medição contínua, comportamento associado aos efeitos de offset e drifting observados em sistemas eletrônicos de instrumentação. Além disso, percebe-se que a intensidade da variação tende a diminuir ao longo do tempo, indicando aproximação gradual a uma condição de maior estabilidade do sinal medido.

De maneira geral, os resultados obtidos demonstram que o sistema apresenta comportamento transitório inicial seguido de tendência de estabilização, permitindo caracterizar experimentalmente a resposta temporal do circuito desenvolvido durante medições contínuas.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram estudadas e implementadas diferentes topologias aplicadas ao desenvolvimento de um sistema automatizado de medição contínua de ração para comedouros avícolas, com foco em baixo custo, facilidade de implementação e potencial aplicação em sistemas de pequeno e médio porte.

Os resultados experimentais demonstraram que o sistema desenvolvido apresentou comportamento aproximadamente linear durante os testes realizados em bancada, especialmente na faixa de medição entre 0 e 1 kg. A modelagem por regressão linear apresentou boa concordância com os dados experimentais, indicando que o circuito de aquisição e condicionamento de sinal foi capaz de realizar medições consistentes dentro da faixa analisada.

Entretanto, verificou-se que a estrutura mecânica empregada no protótipo influenciou diretamente a estabilidade e a precisão das medições. Em condições de maior deformação mecânica, foram observados efeitos de não linearidade associados principalmente às limitações estruturais do suporte utilizado, dificultando o retorno completo da estrutura ao estado inicial após a retirada da carga aplicada.

Também foram identificadas interferências relacionadas ao movimento dos cabos conectados às células de carga, provocando oscilações nas medições devido ao movimento pendular do comedouro. Esse problema foi significativamente reduzido após a fixação adequada dos fios e a integração da placa de aquisição à estrutura móvel do sistema.

Além disso, os testes permitiram observar efeitos de drifting e variações associadas à temperatura, evidenciando a importância do condicionamento de sinal e da compensação térmica em sistemas de medição baseados em strain gauges.

Apesar das limitações identificadas, os resultados obtidos demonstram a viabilidade da utilização das topologias estudadas na construção de sistemas de pesagem de baixo custo para aplicações de monitoramento contínuo em ambientes avícolas.

Por fim, o trabalho contribui para o estudo de técnicas de instrumentação aplicadas à automação avícola, fornecendo base experimental para futuros aprimoramentos relacionados à estabilidade, precisão e robustez do sistema desenvolvido.

5 PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

Embora os resultados obtidos tenham demonstrado a viabilidade do sistema proposto, diversos aspectos ainda podem ser aprimorados visando maior estabilidade, precisão e robustez operacional do protótipo.

Entre os principais pontos para trabalhos futuros destaca-se o aprofundamento dos estudos relacionados à compensação térmica das células de carga, incluindo experimentos com diferentes configurações de extensômetros e métodos de compensação aplicados à ponte de Wheatstone.

Também se mostra relevante a investigação de diferentes topologias de ponte e técnicas de calibração, buscando melhorar a estabilidade e a precisão das medições em aplicações contínuas.

Outro aspecto importante refere-se ao desenvolvimento estrutural do sistema mecânico, incluindo estudos relacionados aos materiais utilizados e às propriedades elásticas do suporte do comedouro, visando reduzir efeitos de histerese e não linearidade observados durante os experimentos.

Além disso, futuras implementações poderão incorporar técnicas adicionais de filtragem digital, processamento de sinais e compensação via software, contribuindo para maior estabilidade das medições ao longo do tempo.

Por fim, destaca-se a possibilidade de desenvolvimento de uma interface computacional para armazenamento, visualização e análise histórica dos dados coletados, permitindo a construção de bases de dados relacionadas ao consumo de ração e ao comportamento alimentar das aves.

Essas melhorias podem contribuir para o desenvolvimento de um sistema mais robusto e adequado para aplicações práticas em sistemas de produção avícola automatizados.

REFERÊNCIAS

AEP TRANSDUCERS. **Los diferentes tipos de células de carga**. Disponível em: AEP Transducers. Acesso em: 16 maio 2026.

ARAÚJO, G. A. L. **Dc-amplifier-input-offset-voltage control in a constant-temperature thermoresistive-sensor-measurement instrument**. [S.l.]: IEEE, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL (ABPA). **Relatório anual 2021**. São Paulo: ABPA, 2021. Disponível em: ABPA. Acesso em: 16 maio 2026.

BALBINOT, Alexandre; BRUSAMARELLO, Valner João. **Instrumentação e fundamentos de medidas**. Rio de Janeiro: LTC, 2019. v. 2. ISBN 978-85-216-3587-1.

SANFORD, D.; BOX, P. **Errors in shunt calibration of strain gauge circuits due to cable resistance**. Melbourne: DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 2001. Disponível em: DTIC Report. Acesso em: 16 maio 2026.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **Per capita consumption of poultry and livestock, 1960 to forecast 2025, in pounds. 2026**. Disponível em: National Chicken Council. Acesso em: 16 maio 2026.

ZUIDHOF, M. J. **Growth, efficiency, and yield of commercial broilers from 1957, 1978, and 2005**. 2014. Disponível em: PMC Article. Acesso em: 14 maio 2026.