

Pecuária de Precisão com IoT e Machine Learning: Uma Revisão Sistemática

Matusalen Costa Alves^{1,2}, Fabrício de Carvalho Mota^{1,2}
Cairon Ferreira Prado^{1,2}, Pedro Henrique Valentino^{1,2}
Iallen Gábio de Sousa Santos^{1,2}, Jonathas Jivago de Almeida Cruz^{1,2}

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI)
Avenida Rio dos Matos, S/N, Bairro Germano – 64.260-000 – Piri-piri – PI – Brasil

²Laboratório de Pesquisa e Estudos em Computação (LAPEC)
Piauí, Brasil

{matusalen, fabricio, cairon, pedro, j.jivago, iallen}@ifpi.edu.br

Abstract. *The aim of this study is to synthesize a taxonomy of the state of the art of the Internet of Things and Machine Learning applied to Precision Livestock Farming. The systematic review, conducted according to the PRISMA protocol, explores works from 2015 to 2025 retrieved from the IEEE Xplore and Scopus databases, which offered 2,282 selected articles. The results indicate a predominance of research with cattle and two main approaches: computer vision for behavioral analysis and wearable sensors with Machine Learning algorithms for physiological assessment. The study presents emerging trends and highlights challenges in Precision Livestock Farming, such as energy autonomy and limitations of field implementation.*

Resumo. *O objetivo deste estudo é sintetizar uma taxonomia do estado da arte da Internet das Coisas e do Aprendizado de Máquina aplicados na Pecuária de Precisão. A revisão sistemática, conduzida segundo o protocolo PRISMA, explora trabalhos no intervalo 2015 e 2025 recuperados das bases IEEE Xplore e Scopus, que ofereceram em 2.282 artigos selecionados. Os resultados indicam predominância de pesquisas com bovinos e duas abordagens principais: visão computacional para análise comportamental e sensores vestíveis com algoritmos de Machine Learning para avaliação fisiológica. O estudo apresenta tendências emergentes e destaca desafios da Pecuária de Precisão, como a autonomia energética e as limitações de implantação em campo.*

1. Introdução

A pecuária moderna enfrenta uma pressão crescente para atender à demanda global por alimentos de origem animal, ao mesmo tempo em que precisa garantir a sustentabilidade de suas operações e elevados padrões de bem-estar dos mesmos. Nesse contexto, a Pecuária de Precisão (*Precision Livestock Farming* – PLF) configura-se como um novo paradigma tecnológico que promove a transição de uma gestão reativa, fundada em observações pontuais, para uma abordagem proativa e orientada por dados [Berckmans 2017].

A base tecnológica da PLF é baseada na união entre a Internet das Coisas (IoT) e o Aprendizado de Máquina (ML). Dispositivos de IoT, como sensores vestíveis (brincos

e coleiras), *bolus* ruminais e câmeras, possibilitam a coleta contínua de dados fisiológicos e comportamentais do rebanho. Em seguida, algoritmos de ML, enquanto ramificação da Inteligência Artificial (IA), são empregados para analisar tais dados, identificar padrões complexos, prever eventos críticos (como o período de estro ou o surgimento de enfermidades) e gerar insights operacionais que subsidiem a tomada de decisão do produtor [Amrani et al. 2025].

A aplicação integrada dessas tecnologias já evidencia potencial reconhecido na literatura, conforme destacado por [Amrani et al. 2025]. Todavia, a rápida expansão das pesquisas gerou um corpo de conhecimento amplo e heterogêneo, o que torna desafiadora a identificação, por parte de novos pesquisadores e profissionais da indústria, das práticas populares, das arquiteturas consolidadas e dos futuros direcionamentos apontados pela literatura. A necessidade de sistematizar esse campo revela-se, portanto, essencial. Conforme observa [Kaur and Kaur 2022], a análise de dados coletados por sensores possibilita que produtores “reconheçam, prevejam e evitem o surto de doenças”, reforçando a importância de consolidar o conhecimento sobre tais ferramentas.

Neste contexto, entende-se que uma revisão dessa interseção será relevante para leitores interessados em compreender como tais conceitos vêm sendo aplicados em um cenário emergente, caracterizado por um novo mundo digital baseado em IA e dispositivos da IoT. Assim, estabelece-se como objetivo deste trabalho sintetizar o estado da arte das aplicações de IoT e ML no monitoramento da PLF. Por meio de um protocolo rigoroso de busca e análise, busca-se responder uma questão fulcral acerca das tendências de pesquisa, das tecnologias mais empregadas em cada aplicação e os direcionamentos interpretáveis.

A estrutura deste artigo está organizada da seguinte forma: a Seção 2 detalha a metodologia empregada para a condução desta revisão. A Seção 3 apresenta e analisa os resultados obtidos. A Seção 4 discute as implicações dos achados e a Seção 5 conclui o trabalho, resumindo as contribuições.

2. Metodologia

Este trabalho é uma revisão sistemática quantitativa da literatura baseada nas diretrizes do *Preferred Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) [Moher et al. 2015] e do manual Cochrane [Higgins et al. 2019]. Por natureza, é uma pesquisa que sintetiza dados de múltiplos estudos para responder a questão de pesquisa fundamental de forma rigorosa e objetiva: Qual é o estado da arte da aplicação integrada de sistemas de IoT e ML para o monitoramento da PLF? O escopo não inclui a avaliação formal do risco de viés ou da qualidade metodológica de cada estudo primário individualmente. Os instrumentos utilizados para coletar os dados para gerar os resultados foram: resumo, título e palavras-chave.

A questão de pesquisa apresentada leva a objetivos específicos para o entendimento, como: (a) descrever o panorama da pesquisa em termos de evolução temporal e foco por espécie animal; (b) identificar as arquiteturas de hardware e software predominantes para as principais aplicações; e (c) consolidar as direções para pesquisas futuras apontadas pela literatura.

A metodologia PICO (População, Intervenção, Comparação, Resultados) relacionada a este objetivo é a seguinte: **População:** Trabalhos publicados na literatura envolvendo espécies de pecuária (bovinos, suínos, aves, etc.); **Intervenção:** Artigos que

apresentam a aplicação integrada de IoT para coleta de dados e ML para análise; **Comparaçã**o: Análise de diferentes tipos de sensores e algoritmos aplicados a problemas similares; **Resultados**: Aplicações desenvolvidas, desafios tecnológicos e tendências de pesquisa identificadas.

A busca na literatura foi realizada nas bases de dados IEEE Xplore e Scopus, compreendendo artigos de conferência (*conference papers*) e periódicos (*articles*) publicados entre janeiro de 2015 e setembro de 2025 em inglês. A Figura 1 ilustra imagneticamente o processo de triagem realizada.

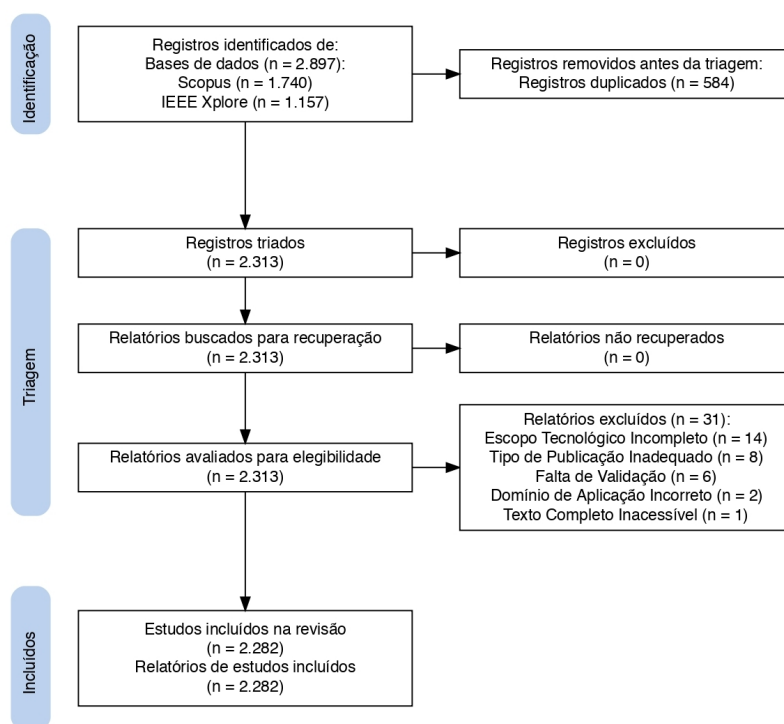


Figure 1. Fluxograma PRISMA do processo de seleção dos estudos.

Na base Scopus, foram recuperados 1.740 artigos, aplicando-se a seguinte query: *TITLE-ABS-KEY(("embedded system*" OR IoT OR "Internet of Things" OR microcontroller OR "sensor network*" OR "edge computing" OR "wearable device*" OR "LP-WAN" OR LoRa* OR NB-IoT OR "SigFox") AND (livestock OR cattle OR swine OR poultry OR "animal farming" OR pig OR sheep OR goat OR ruminant* OR equin* OR dairy OR "animal husbandry" OR "precision livestock farming" OR "PLF") AND (monitoring OR tracking OR management OR "early detection" OR classification OR prediction OR diagnosis OR behaviour OR welfare OR "health assessment")) AND (LIMIT-TO(DOCTYPE,"cp") OR LIMIT-TO(DOCTYPE,"ar")) AND (PUBYEAR > 2014 AND PUBYEAR < 2026).*

Na base IEEE Xplore, foram encontrados 1.157 artigos, com a seguinte query e filtros aplicados para *Conferences* e *Journals* no período de 2015-2025: *((("embedded system*" OR IoT OR "Internet of Things" OR microcontroller OR "sensor network*" OR "edge computing" OR "wearable device*" OR "LPWAN" OR LoRa* OR NB-IoT OR "Sig-Fox") AND (livestock OR cattle OR swine OR poultry OR "animal farming" OR pig OR sheep OR goat OR ruminant* OR equin* OR dairy OR "animal husbandry" OR "precision*

livestock farming" OR "PLF") AND (monitoring OR tracking OR management OR "early detection" OR classification OR prediction OR diagnosis OR behaviour OR welfare OR "health assessment"))).

A busca inicial resultou em um total de 2.897 registros. Um processo computacional foi executado para unir os resultados e remover duplicatas, utilizando uma abordagem de múltiplas etapas que incluiu correspondência exata de DOI e título, seguida por uma análise de similaridade textual (*fuzzy matching*), que resultou em 2.313 artigos. Após a remoção das duplicatas, a triagem dos artigos foi realizada em pares por dois revisores independentes para minimizar erros e garantir a aderência aos critérios de elegibilidade, com as divergências sendo resolvidas por um terceiro revisor.

Os critérios de inclusão (CI) aplicados foram: (i) Ser um estudo primário; (ii) Apresentar explicitamente a combinação de IoT e ML; (iii) Ter como domínio de aplicação a pecuária. Foram excluídos (CE): (i) Escopo Tecnológico Incompleto; (ii) Tipo de Publicação Inadequado; (iii) Falta de Validação; (iv) Domínio de Aplicação Incorreto; (v) Texto Completo Inacessível. Ao final deste processo 2.282 artigos foram selecionados para a extração de dados e análise.

3. Resultados

A busca sistemática foi realizada entre o dia 1 janeiro de 2015 e o dia 30 setembro de 2025. Nesta Seção, descreveremos os resultados encontrados para responder as questões de pesquisa mencionadas na metodologia.

A Figura 2 apresenta o panorama geral da pesquisa no que tange a evolução anual do número de publicações e as principais espécies abordadas, respondendo à nossa primeira questão específica de pesquisa: (objetivo específico a) descrever o panorama da pesquisa em termos de evolução temporal e foco por espécie animal.

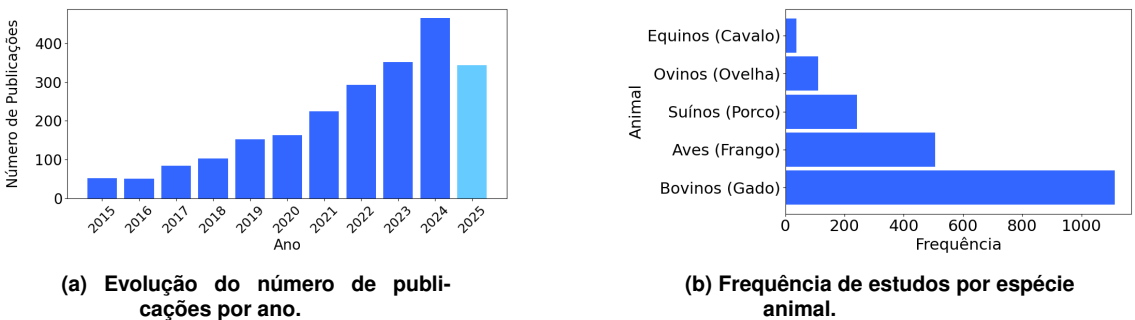


Figure 2. Panorama de número anual de publicações e de espécies abordadas nos trabalhos revisados.

A Figura 2a demonstra a evolução temporal das publicações que revela um crescimento do interesse da comunidade científica sobre o tema. Observa-se um aumento consistente ano a ano, culminando em um pico de mais de 400 publicações em 2024. A barra referente a 2025, embora represente dados parciais, já indica a manutenção de um alto volume de pesquisa, o que confirma a atualidade e a rápida expansão da área.

A Figura 2b detalha a distribuição dos estudos por espécie animal. Fica evidente a predominância de pesquisas focadas em bovinos (gado) que supera mais de 1.000 artigos

dedicados. Em seguida, destacam-se os trabalhos em aves (frango) e suínos (porco). Espécies como ovinos, equinos e caprinos, embora presentes, representam uma fração menor do corpo de pesquisa, sinalizando potenciais áreas para futuras investigações.

Para responder à segunda questão específica de pesquisa: (objetivo específico b) identificar as arquiteturas de hardware (sensores IoT) e software (algoritmos de ML) predominantes para as principais aplicações (saúde, reprodução, comportamento), foram gerados dois mapas de calor (*heatmaps*).

O primeiro *heatmap* está apresentado na Figura 3 e detalha a frequência com que diferentes famílias de algoritmos de ML são aplicadas a problemas específicos. A análise revela um foco predominante no monitoramento de Saúde (Geral), onde se destaca o uso de CNNs e Modelos de Visão em 50 artigos e Redes Neurais em geral em 41 artigos.

Esta tendência de uso de modelos baseados em visão computacional também é evidente na Detecção de Doenças, com frequência de 31 artigos, o que indica o crescente uso de câmeras para análise de postura e comportamento.

Em contraste, algoritmos como Modelos de Árvore como *Random Forest* e *Decision Tree* e *Support Vector Machine* demonstram ser abordagens consolidadas para problemas como Monitoramento de Peso e Reprodução (Cio/Estro), que frequentemente se baseiam em dados de sensores vestíveis.

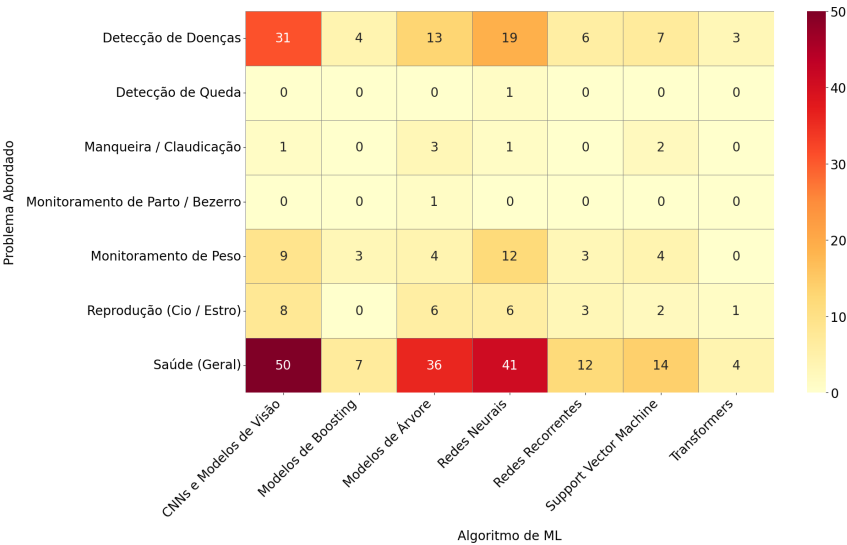


Figure 3. Mapa de calor da frequência de técnicas de ML por problema abordado.

De forma complementar, a Figura 4 mapeia a relação entre os tipos de sensores utilizados e os algoritmos de ML. A sinergia mais forte observada é entre Visão Computacional (Câmera/Imagem) e CNNs e Modelos de Visão que ocorre em 84 artigos, o que infere esta como a principal combinação tecnológica baseada em imagem.

Outra abordagem proeminente é o uso de Sensores de Movimento, frequentemente combinados com Modelos de Árvore 17 vezes nos trabalhos, o que demonstra uma abordagem clássica e robusta para análise de dados de séries temporais. É notável também o uso de Sensores de Temperatura, que são analisados por uma gama diversificada de algoritmos, incluindo Modelos de Árvore (25 dos trabalhos) e CNNs em 19 destes, este

último associado ao uso de câmeras termográficas para detecção de inflamações.

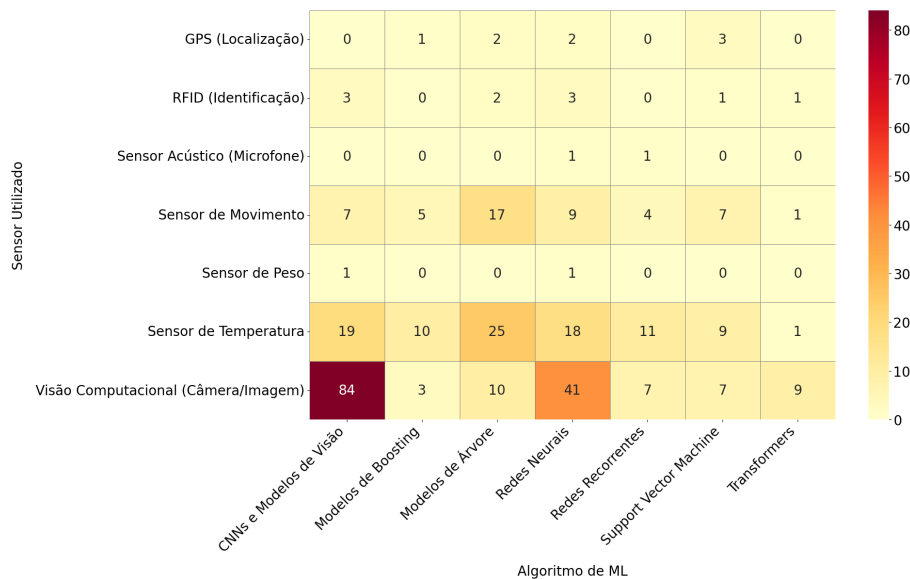


Figure 4. Mapa de calor da frequência de sensores utilizados por algoritmo de ML.

Para aprofundar a análise das arquiteturas de hardware (objetivo b), a Figura 5 detalha as plataformas de borda e microcontroladores mais utilizados nos estudos. Fica evidente a dominância de microcontroladores de baixo custo, com "Microcontrolador (Genérico)", Arduino e plataformas ESP (ESP32/ESP8266) liderando as menções. Isso sugere que uma grande parte da pesquisa se concentra em dispositivos para coleta de dados e tarefas simples.

Em paralelo, a presença significativa de plataformas mais poderosas como Raspberry Pi e, notavelmente, Nvidia Jetson (que utiliza IA na arquitetura de borda) sinaliza uma forte tendência em direção à execução de modelos de ML diretamente no dispositivo, especialmente para aplicações de visão computacional.

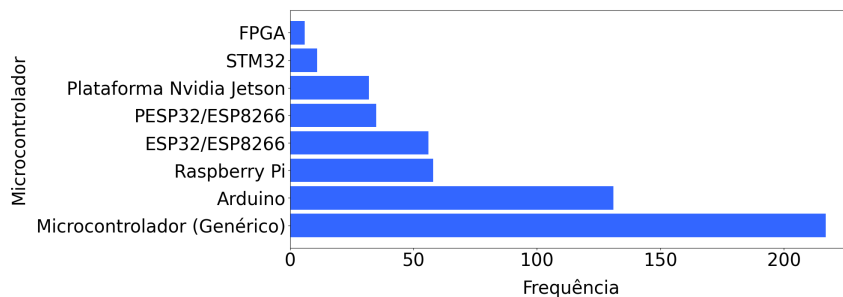


Figure 5. Arquiteturas de borda e microcontroladores mencionados nos artigos.

No que tange à comunicação, a Figura 6 ilustra os protocolos e tecnologias mais prevalentes. Embora o termo genérico WSN (Wireless Sensor Network) seja o mais frequente, a análise das tecnologias específicas revela a dominância de LoRa/LoRaWAN como a principal solução para comunicação de longo alcance e baixo consumo (LPWAN).

modelos mais eficientes. Em segundo lugar, a viabilidade prática domina a discussão, focada em *realtime* (tempo real), *cost* (custo), *energy* (energia) e *power* (potência/bateria), o que evidencia que a pesquisa está focada em superar os gargalos de implantação em campo e autonomia energética. Finalmente, a nuvem aponta as aplicações específicas mais ativas, como o monitoramento de *disease* (doença), *water* (água), *milk* (leite) e *humidity* (umidade).

4. Discussão

Esta revisão sistemática teve como objetivo mapear as aplicações de IoT e ML na PLF, com vistas à identificação das abordagens mais recorrentes, à elucidação de tendências e à delimitação de lacunas na literatura. A análise dos resultados proporciona uma visão abrangente do cenário de pesquisa que pode orientar futuros trabalhos na área.

Os achados referentes ao objetivo específico (a) evidenciaram uma concentração da pesquisa em bovinos, que representam quase metade dos artigos analisados e superam amplamente a representação de aves e suínos. Tal foco reflete o elevado valor econômico da indústria de carne e laticínios, em que o retorno potencial sobre o investimento (ROI) em tecnologias de monitoramento é mais expressivo [Bauerdick et al. 2022, Vuppalapati et al. 2025]. A observação sugere que a aplicação dessas tecnologias em outras espécies, como ovinos e caprinos, permanece como área promissora para exploração e desenvolvimento.

A concentração massiva de estudos em bovinos, como apontam os achados e [Bauerdick et al. 2022], está ligada ao ROI. Contudo, nossos resultados permitem refinar essa conclusão, uma vez que também revelam que o foco não é apenas em bovinos, mas especificamente no uso de modelos complexos (CNNs, Redes Neurais) para "Saúde Geral" e "Detecção de Doenças". Isso se alinha ao fato de que, na pecuária de corte e leite, a detecção precoce de uma doença (que pode contaminar o rebanho) ou a identificação precisa do período de estro (que otimiza a inseminação) têm um impacto financeiro imediato e quantificável, justificando o alto investimento em pesquisa e desenvolvimento que outras espécies, como caprinos, ainda não recebem em escala similar.

O crescimento acelerado das publicações reflete a confluência de tecnologias-chave a partir de meados de 2010. A popularização de hardware IoT de baixo custo e longo alcance, somada à maturação de bibliotecas de Machine Learning acessíveis, atuou como um catalisador, como preconiza [Vuppalapati et al. 2025]. Essa convergência removeu barreiras de implementação, permitindo que a pesquisa avançasse de conceitos teóricos para validações práticas em campo, o que impulsionou o volume de publicações na área.

Quanto às arquiteturas tecnológicas, que tange o objetivo específico (b), constatou-se que o campo organiza-se em torno de ecossistemas de hardware e software bem estruturados. A análise das plataformas de borda evidencia um cenário dividido: uma ampla base de implementações emprega microcontroladores de baixo custo (como Arduino e ESP32) para coleta de dados, com processamento intensivo realizado na nuvem. Em paralelo, a adoção crescente de plataformas como Nvidia Jetson indica uma tendência robusta de IA na Borda, em que a inferência de modelos complexos ocorre localmente, paradigma cuja relevância para a agricultura inteligente é amplamente destacada na literatura [Mahato and Neethirajan 2025].

Essa dualidade se reflete nas combinações tecnológicas. A visão computacional (câmeras + CNNs) consolida-se como a principal abordagem para monitoramento não invasivo e em larga escala, tendência corroborada por outros estudos de mapeamento da área [Farhan et al. 2024, Faysal et al. 2021]. Já os sensores vestíveis (sensor + ML) estabelecem-se como solução para a captura de dados fisiológicos individuais precisos. No âmbito da comunicação, a prevalência de LoRa/LoRaWAN como tecnologia LP-WAN evidencia a maturidade das soluções para conexão de dispositivos em áreas rurais extensas, alinhando-se às conclusões de revisões sobre conectividade na agricultura [Parlin et al. 2025, Triantafyllou et al. 2025].

Por fim, a análise das direções de pesquisa (objetivo específico c) confirma que a pesquisa se encontra na interseção entre a validação acadêmica e a viabilidade comercial. Os resultados demonstram que, embora a busca algorítmica por *accuracy* (precisão) seja central, os termos mais proeminentes são de natureza prática e de engenharia. A ênfase em *realtime* (associado à implantação em campo), *energy* e *power* (a duração da bateria) e *cost* (custo), evidencia que os principais gargalos transcendem o desafio puramente algorítmico. A transição de protótipos funcionais, muitas vezes baseados em microcontroladores simples, para sistemas robustos, energeticamente eficientes e economicamente viáveis para grandes rebanhos permanece como o desafio central, conclusão corroborada por diversas revisões da área [Abdullahi et al. 2024, Verma et al. 2025].

Em síntese, esta revisão sistemática fornece subsídios para que pesquisadores e desenvolvedores direcionem seus esforços às lacunas identificadas, seja na exploração de novas espécies ou na mitigação dos desafios práticos de implementação.

5. Conclusão

Este trabalho se propôs a responder qual é o estado da arte da aplicação integrada de sistemas de IoT e ML na PLF. A análise dos artigos revela um campo em franca expansão, caracterizado por duas abordagens tecnológicas predominantes: a primeira, baseada em visão computacional, utiliza câmeras e Redes Neurais Convolucionais para o monitoramento não invasivo do comportamento e saúde animal; a segunda, fundamentada em sensores vestíveis, emprega acelerômetros e algoritmos de ML para a análise precisa de dados fisiológicos e de movimento.

O estado da arte, contudo, pode ser definido por seus sucessos e seus desafios. A transição da prova de conceito para a viabilidade comercial é dificultada por uma tríade de gargalos recorrentes: a duração da bateria dos dispositivos de IoT, a complexidade da implantação em campo em ambientes rústicos e a contínua busca por maior precisão nos modelos preditivos.

Ao mapear este ecossistema, esta revisão sistemática fornece um guia consolidado sobre as arquiteturas mais maduras e os obstáculos a serem superados. Assim, serve como um recurso estratégico para o direcionamento de futuras pesquisas e desenvolvimentos na PLF.

References

Abdullahi, M., Jimale, A., Ahmed, Y., and Nageye, A. (2024). Iot-based livestock tracking: Addressing challenges in somali livestock farming. *International Journal of ADVANCED AND APPLIED SCIENCES*, 11:84–91.

- Amrani, S., Medani, K., Gherbi, C., and Mabed, H. (2025). Machine learning application in software-defined networking based agricultural internet of things: A systematic literature review. *Cluster Computing*.
- Bauerdick, J., Spiekers, H., Bodensteiner, C., Theunissen, T., and Bernhardt, H. (2022). Concept of adding ground truth data for economic evaluation of silage quality in germany. *2022 ASABE Annual International Meeting*.
- Berckmans, D. (2017). General introduction to precision livestock farming. *Animal Frontiers*, 7(1):6–11.
- Farhan, M., Wijaya Thaha, G. S., Kristiadi, E. A., and Mutijarsa, K. (2024). Cattle anomaly behavior detection system based on iot and computer vision in precision livestock farming. In *2024 International Conference on Information Technology Systems and Innovation (ICITSI)*. IEEE.
- Faysal, M. A. H., Ahmed, M. R., Rahaman, M. M., and Ahmed, F. (2021). A review of groundbreaking changes in the poultry industry in bangladesh using the internet of things (iot) and computer vision technology. In *2021 International Conference on Automation, Control and Mechatronics for Industry 4.0 (ACMI)*. IEEE.
- Higgins, J., Thomas, J., Chandler, J., Cumpston, M., Li, T., Page, M., and Welch, V. (2019). *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions*. John Wiley & Sons, 2nd edition.
- Kaur, D. and Kaur, A. (2022). IoT and Machine Learning-Based Systems for Predicting Cattle Health Status for Precision Livestock Farming. In *2022 International Conference on Smart Generation Computing, Communication and Networking (SMART GENCON)*, pages 1–5.
- Mahato, S. and Neethirajan, S. (2025). Dairy digid: An edge-cloud framework for real-time cattle biometrics and health classification. *AI*, 6(9).
- Moher, D., Shamseer, L., Clarke, M., Gherzi, D., Liberati, A., Petticrew, M., Shekelle, P., and Stewart, L. A. (2015). Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (prisma-p) 2015 statement. *Systematic reviews*, 4(1):1–9.
- Parlin, A. F., Horning, N. A., Alstad, J. P., Cosentino, B. J., and Gibbs, J. P. (2025). Low-cost, lora gnss tracker for wildlife monitoring. *HardwareX*, 23:e00669.
- Triantafyllou, A., Siniosoglou, I., Argyriou, V., Goudos, S. K., Papadopoulos, G. T., Panitsidis, K., and Sarigiannidis, P. (2025). Resource efficient federated lorawan architecture for far-edge iot applications. *IEEE Access*, 13:108766–108785.
- Verma, S., Sharma, N., and Trivedi, G. (2025). Geotagging in livestock farming: Ai-based technologies, applications, and challenges. In Noor, A., Saroha, K., Pricop, E., Sen, A., and Trivedi, G., editors, *Emerging Trends and Technologies on Intelligent Systems*, pages 203–212, Singapore. Springer Nature Singapore.
- Vuppalapati, C., Ilapakurti, A., Vissapragada, S., Vuppalapati, S., Kedari, S., Kedari, S., and Vuppalapati, J. (2025). Early detection of lameness in dairy cattle using activity data, image analysis, ai and ml - an approach for improved animal welfare and economic impact. *Communications in Computer and Information Science*.