

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
INSTITUTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

GEOVANE YUJI APARECIDO SAKATA

**Desenvolvimento de infraestrutura IOT para monitoramento das condições
ambientais na avicultura**

**SOROCABA -SP
2025**

GEOVANE YUJI APARECIDO SAKATA

Desenvolvimento de infraestrutura IOT para monitoramento das condições ambientais na avicultura

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Eletrônicos

Orientador: Prof. Dr. Flávio José de Oliveira Morais

Coorientador: Dr. Luiz Fernando Pinto de Oliveira

SOROCABA -SP

2025

S158d

Sakata, Geovane Yuji Aparecido

Desenvolvimento de infraestrutura IoT para monitoramento das condições ambientais na avicultura / Geovane Yuji Aparecido Sakata.

-- Sorocaba, 2025

54 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba

Orientador: Flávio José de Oliveira Morais

Coorientador: Luiz Fernando Pinto de Oliveira

1. Aves Criação. 2. Internet das coisas. 3. Redes de sensores sem fio. 4. Sistemas embarcados (Computadores). I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO


TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Desenvolvimento de infraestrutura IOT para monitoramento das condições ambientais na avicultura

AUTOR: GEOVANE YUJI APARECIDO SAKATA


ORIENTADOR: FLÁVIO JOSÉ DE OLIVEIRA MORAIS

COORIENTADOR: LUIZ FERNANDO PINTO DE OLIVEIRA


Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, área: Sistemas Eletrônicos pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **FLAVIO JOSE DE OLIVEIRA MORAIS**
Data: 31/05/2025 15:37:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. FLÁVIO JOSÉ DE OLIVEIRA MORAIS (Participação Virtual)
Coordenadoria do Curso de Engenharia de Biosistemas / Faculdade de Ciências e Engenharia de Tupã - UNESP

Documento assinado digitalmente
 **CLEBER ALEXANDRE DE AMORIM**
Data: 02/06/2025 15:16:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. CLEBER ALEXANDRE DE AMORIM (Participação Virtual)
Engenharia Rural / UNESP / Tupã (SP)

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ FERNANDO CAPARROZ DUARTE**
Data: 31/05/2025 15:43:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. LUÍS FERNANDO CAPARROZ DUARTE (Participação Virtual)
DAELE-CP / UTFPR

Sorocaba, 30 de maio de 2025

SAKATA, Geovane Yuji Aparecido. **Desenvolvimento de infraestrutura IOT para monitoramento das condições ambientais na avicultura**. 2025. 54p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2025.

RESUMO

A Indústria 4.0, baseada em tecnologias como IoT, IA e Big Data, torna os processos mais eficientes e integrados, sendo especialmente promissora para o agronegócio, setor com grande importância na economia brasileira. Apesar de seu potencial, a adoção dessas tecnologias por pequenos e médios produtores avícolas brasileiros ainda é limitada, devido a barreiras como infraestrutura, conectividade reduzida e restrições financeiras. Na avicultura, o uso de sensores e monitoramento remoto permite controlar variáveis ambientais que afetam diretamente a produção. A automação melhora a eficiência, garante rastreabilidade e qualidade dos produtos, e pode transformar granjas convencionais em sistemas inteligentes e sustentáveis. Diante desse cenário, este trabalho propôs o desenvolvimento de uma prova de conceito teórica de uma arquitetura IoT voltada ao monitoramento remoto de variáveis ambientais em galpões avícolas, considerando especialmente as necessidades e limitações. O sistema foi estruturado com base em uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) composta por módulos sensores e um módulo interrogador central, que realiza a coleta e transmissão dos dados via comunicação RS-485 e LoRa®, respectivamente. Foram definidos os requisitos técnicos da solução, selecionados os sensores e microcontroladores adequados, e desenvolvidos os esquemáticos eletrônicos e layouts de PCB, com ênfase em baixo custo, baixo consumo energético e robustez. A arquitetura proposta mostrou-se viável para aplicações futuras em campo, com potencial para melhorar o bem-estar animal, a produtividade e a sustentabilidade da produção avícola nacional.

Palavras-Chave: Avicultura. Indústria 4.0. *Internet of Things*. Redes de sensores sem fio. Sistemas embarcados.

SAKATA, Geovane Yuji Aparecido. **Development of IOT infrastructure for environmental monitoring in poultry farming**. 2025. 54p. Master's thesis (Master's degree in Electrical Engineering) – Institute of Science and Technology, São Paulo State University, Sorocaba, 2025.

ABSTRACT

Industry 4.0, based on technologies such as IoT, Artificial Intelligence, and Big Data, enhances process efficiency and integration, proving especially promising for agribusiness, a sector of great importance to the Brazilian economy. Despite its potential, the adoption of these technologies by small and medium-sized poultry producers in Brazil remains limited due to barriers such as infrastructure deficiencies, limited connectivity, and financial constraints. In poultry farming, the use of sensors and remote monitoring allows for the control of environmental variables that directly affect production. Automation improves operational efficiency, ensures traceability and product quality, and has the potential to transform conventional farms into intelligent and sustainable systems. Given this context, this work proposed the development of a theoretical proof of concept for an IoT architecture aimed at the remote monitoring of environmental variables in poultry houses, with special attention to the needs and limitations of small and medium producers. The system was structured based on a Wireless Sensor Network (WSN) composed of sensor modules and a central interrogator module, responsible for collecting and transmitting data via RS-485 and LoRa® communication, respectively. Technical requirements were defined, appropriate sensors and microcontrollers were selected, and electronic schematics and PCB layouts were developed, emphasizing low cost, low energy consumption, and robustness. The proposed architecture proved to be feasible for future field applications, with the potential to improve animal welfare, productivity, and the sustainability of poultry production in Brazil.

Key-Words: Poultry farming. Industry 4.0. Internet of Things. Wireless sensor networks. Embedded systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gráfico das Exportações Brasileiras do Agronegócio por Setores – 2024.	13
Figura 2. Diagrama dos módulos e os principais componentes utilizados. a) Nó sensor de temperatura, umidade e pressão; b) Nó sensor de amônia; c) Módulo interrogador	29
Figura 5. Funcionamento geral do sistema.	35
Figura 6. Diagrama do módulo interrogador. Vermelho: Fluxo de Alimentação; Preto: Fluxo de Dados	36
Figura 9. PCI do interrogador. Figura Direita: Face Superior, Figura Esquerda: Face Inferior	38
Figura 10. PCI do interrogador na JLCPCB. Figura Direta: Lado Superior, Figura Esquerda: Lado Inferior	39
Figura 11. Diagrama do módulo de temperatura, umidade e pressão. Vermelho: Fluxo de Alimentação; Preto: Fluxo de Dados	40
Figura 12. Diagrama do módulo de Amônia. Vermelho: Fluxo de Alimentação; Preto: Fluxo de Dados	41
Figura 17. PCI do nó sensor de temperatura, umidade e pressão Figura direta: Face Superior, Figura Esquerda: Face Inferior	43
Figura 18. PCI do nó sensor de Amônia. Figura direita: Face Superior, Figura Esquerda: Face Inferior	43
Figura 19. PCI do nó sensor de temperatura, umidade e pressão na JLCPCB. Figura Direita: Face Superior, Figura Esquerda: Face Inferior	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparativo técnico entre tecnologias de comunicação sem fio para IoT.	18
Tabela 2. Artigos selecionados na pesquisa bibliográfica com suas principais contribuições.	24
Tabela 3. Características dos microcontroladores selecionados.....	27
Tabela 4. Características dos sensores selecionados. Temperatura (T), Umidade (U), Amônia (NH ₃).....	28
Tabela 5. Parâmetros ambientais e seus efeitos sobre o desempenho produtivo na avicultura.	32

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	11
2.1	Objetivo Principal	11
2.2	Objetivo Específicos	11
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1	Agronegócio e avicultura no Brasil	12
3.2	Índices de conforto térmico	14
3.3	Concentrações de Amônia	14
3.4	Indústria 4.0	16
3.5	Internet das coisas e Computação em nuvem	16
3.6	Rede de Sensores Sem Fio	19
3.7	Aplicações de tecnologias 4.0 na avicultura	20
3.8	Amplificadores Operacionais	22
4	MATERIAIS E MÉTODO	23
4.1	Análise das Variáveis Ambientais	23
4.2	Definição dos Requisitos Técnicos e Operacionais da Solução	25
4.3	Criação dos Diagramas e Seleção dos Componentes	26
4.4	Desenvolvimento do <i>layout</i> da PCI do Interrogador	29
4.5	Desenvolvimento do <i>layout</i> da PCI do Nó Sensor	30
4.6	Considerações técnicas de implantação	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1	Variáveis Ambientais na Avicultura	32
5.2	Definição do funcionamento do Sistema	35
5.3	PCI do módulo interrogador	36
5.4	PCI dos Nós Sensores	39
5.5	Levantamento de estudos com aplicação em ambientes reais	44
6	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0 é um conceito que foi introduzido na Alemanha no ano de 2011 e atualmente tem ganhado cada vez mais popularidade. Isso se deve principalmente pelas vantagens proporcionadas em sua aplicação, já que é possível alcançar uma cadeia produtiva industrial mais rápida, autônoma e eficiente, além disso, pode ser integrado nos mais diversos setores (RODRIGUES; QUEIROGA; MILHOSSI, 2022). Essa evolução tecnológica é viável em diversos setores, incluindo o agronegócio, que é fundamental para a economia brasileira, representando 26,6% do PIB em 2020 e mantendo crescimento mesmo durante a pandemia (RODRIGUES; QUEIROGA; MILHOSSI, 2022; FERREIRA et al., 2022).

A Indústria 4.0 integra tecnologias como Inteligência Artificial (IA), *Big Data*, Internet das Coisas (*IoT*) e sistemas ciberfísicos, unindo o mundo físico e biológico ao digital (MARQUES, 2017). Contudo, apenas 5% das empresas brasileiras estão adaptadas a essas inovações, representando uma oportunidade significativa para o desenvolvimento do agronegócio. Este setor enfrenta desafios como o aumento da população global, que deverá alcançar 9,6 bilhões em 2050, e as mudanças climáticas, que afetam diretamente a produção agropecuária (ABRANCHES, 2022; FONSECA et al., 2022).

No setor avícola, a evolução tecnológica, combinada com avanços em sensoriamento e soluções digitais, oferece novas oportunidades para otimizar a produção. A busca por maior eficiência na produção de ovos e carne de aves torna a adoção de tecnologias 4.0 uma necessidade. Em 2024, o Brasil se destacou como o terceiro maior produtor mundial de carne de frango e manteve a liderança nas exportações do setor. Além disso, alcançou a quinta posição na produção global de ovos, reforçando sua importância estratégica para a economia nacional e internacional (ABPA, 2025).

Entretanto, a maioria das granjas avícolas de pequeno e médio porte ainda não adota tecnologias modernas, criando espaço para inovações (SINGH, 2020). Para potencializar os resultados, é essencial entender e monitorar as variáveis que impactam a produção, especialmente as condições ambientais. O uso de tecnologias como monitoramento remoto e IA permite criar fazendas avícolas inteligentes, onde sensores coletam dados em tempo real, possibilitando a análise de padrões e a tomada de decisões informadas (OJO, 2022).

As condições microclimáticas têm um papel significativo na produção, e o monitoramento de índices de conforto, como o índice de temperatura e umidade (ITU) e o carga térmica radiante (CTR), é fundamental para garantir um ambiente adequado (BARNABÉ et al., 2015). Sistemas que capturam e transmitem esses dados via redes sem fio podem aumentar a produtividade tanto na avicultura quanto na agricultura, uma vez que fatores como temperatura e umidade são cruciais para o desenvolvimento das culturas (FERENTINOS et al., 2017).

A aplicação dessas tecnologias não só melhora a eficiência e a sustentabilidade, mas também proporciona rastreabilidade dos produtos, assegurando qualidade e segurança ao consumidor. Portanto, desenvolver um projeto para coletar e disponibilizar essas informações remotamente pode aumentar a produtividade e beneficiar os produtores (REIS et al. 2024).

Dessa forma, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma prova de conceito teórica de uma arquitetura baseada em IoT voltada ao monitoramento remoto de variáveis ambientais em galpões avícolas. A proposta visa oferecer uma solução acessível e eficiente para pequenos e médios produtores, promovendo a inserção desse público na avicultura 4.0 e contribuindo para a modernização e sustentabilidade da cadeia produtiva avícola no Brasil.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Principal

O trabalho tem como foco desenvolver uma prova de conceito teórica de uma arquitetura IoT para o monitoramento remoto de variáveis ambientais em galpões avícolas, com o propósito de possibilitar o acesso remoto a informações ambientais críticas, apoiando os produtores tomarem decisões baseada em dados.

2.2 Objetivo Específicos

- Realizar um levantamento e análise das principais variáveis ambientais que impactam o sistema de criação de aves em galpões, com base na literatura científica e em normas técnicas aplicáveis.
- Definir os requisitos técnicos e operacionais para o desenvolvimento de uma solução IoT para monitoramento ambiental na avicultura, considerando as condições específicas de pequenos e médios produtores.

- Selecionar os sensores e os componentes eletrônicos mais adequados, levando em conta critérios como precisão, faixa de operação, consumo de energia e custo-benefício.
- Desenvolver os esquemáticos eletrônicos e os *layouts* de PCI para os módulos sensores e para o interrogador, baseando-se nas especificações levantadas.
- Realizar uma análise das limitações e desafios esperados na futura implantação prática do sistema, abordando questões como calibração de sensores, durabilidade, consumo de energia e conectividade.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Agronegócio e avicultura no Brasil

Desde 2005, o agronegócio tem sido reconhecido como um dos pilares da economia brasileira, sendo responsável por cerca de um terço do PIB do país. Essa contribuição resulta na geração de uma ampla variedade de empregos, tornando-se uma fonte significativa de renda para muitas pessoas. Para entender melhor essa realidade, é fundamental considerar o conceito de agronegócio, que vai além das práticas da agropecuária. O agronegócio abrange toda a cadeia produtiva de bens de origem agrária, que inclui desde a demanda por matérias-primas e insumos até o transporte e outras atividades (MAPA, 2017).

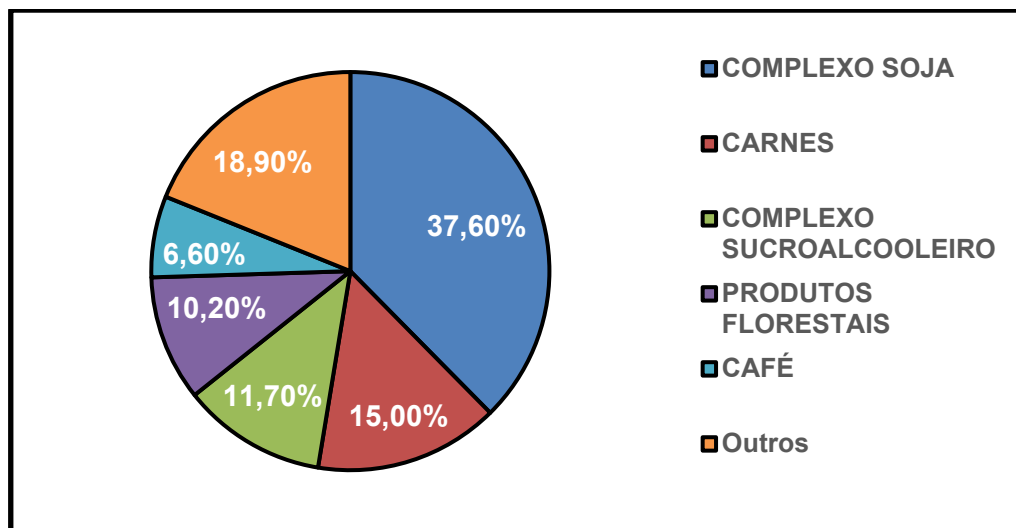
A produção de bens agropecuários apresenta características distintas, uma vez que é fortemente influenciada pelas condições climáticas. Essa dependência gera sazonalidade no setor, resultando em variações de preços ao longo do ano. Outro fator relevante é a influência de aspectos biológicos; produtos agropecuários podem sofrer diminuição na qualidade e na quantidade devido a pragas e doenças, o que leva ao aumento dos custos para mitigar essas perdas. Além disso, os produtos do sistema agroindustrial possuem alta perecibilidade, ou seja, normalmente têm uma vida útil limitada (ARAÚJO, 2007).

Atualmente, o Brasil é visto como um protagonista na agricultura tropical, destacando-se na produção de uma variedade de produtos. Entre eles estão os derivados do complexo soja, café, algodão, fibras têxteis vegetais, madeira (incluindo papel e celulose), açúcar, álcool, frutas, hortaliças, carnes e derivados de

animais, além de borracha natural. Esses itens têm grande relevância para as exportações brasileiras (FERREIRA et al., 2022).

Na Figura 1, são apresentados os setores com maior impacto nas exportações do agronegócio no ano de 2024, totalizando US\$ 125.892.497.437. Em 2023, a avicultura de corte registrou um valor de produção de R\$ 91,65 bilhões (14,83 milhões de toneladas de carne), ficando atrás apenas dos Estados Unidos e se destacando como o maior exportador, enquanto a avicultura de ovos alcançou R\$ 24,53 bilhões (52,45 bilhões de unidades de ovos produzidos) (ABPA, 2024; BRASIL, 2024).

Figura 1. Gráfico das Exportações Brasileiras do Agronegócio por Setores – 2024.



Fonte: Adaptado de (BRASIL, 2024)

Apesar dos avanços, a realidade dos pequenos e médios produtores de aves no Brasil ainda possui diversos desafios estruturais. Muitos enfrentam limitações quanto ao acesso a tecnologias digitais, infraestrutura elétrica precária, conectividade reduzida e baixa capacitação técnica. A adoção de sistemas IoT por esses produtores é restrita devido à escassez de capital, falta de suporte técnico e dificuldades de operação em galpões com poeira e umidade (SCHNEIDER et al, 2025).

Reconhecendo esse cenário, órgãos como o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e Embrapa vêm promovendo ações voltadas à digitalização no campo, com destaque para o Plano Nacional de Conectividade Rural, que busca ampliar o acesso à internet em regiões agrícolas e incentivar a adoção de tecnologias 4.0 na

produção agropecuária. Nesse contexto, a avicultura nacional apresenta oportunidades para a incorporação de soluções de monitoramento ambiental baseadas em IoT, sobretudo quando adaptadas à realidade dos pequenos e médios produtores. (RATHMANN et al., 2021).

3.2 Índices de conforto térmico

Os índices de conforto térmico são combinações de diversos fatores ambientais que influenciam a sensação de bem-estar dos habitantes, resultando em um valor que ajuda a avaliar se um local é adequado para determinada atividade. Entre os principais índices estão o ITU, o Índice de Temperatura de Globo e Umidade (ITGU) e o CTR.

O ITU relaciona a temperatura do ar à umidade relativa, sendo fácil de calcular e amplamente utilizado em atividades pecuárias, pois exige apenas o monitoramento dessas duas variáveis (THOM, 1958). No entanto, sua eficiência diminui em ambientes com alta radiação ou forte movimentação de ar, motivo pelo qual é frequentemente utilizado em conjunto com o CTR e o ITGU (BUFFINGTON et al., 1981).

Para calcular o ITGU, são necessários os dados da temperatura de globo negro e da temperatura de ponto de orvalho, que é obtida a partir da umidade relativa e da temperatura do ar. A temperatura de globo negro é medida com termômetros dentro de uma esfera oca de cobre de 15 cm de diâmetro, pintada de preto fosco (ABREU, 1998).

O CTR também utiliza a temperatura de globo negro e a temperatura do ar, mas inclui a velocidade do vento como um parâmetro, sendo essa medida realizada com anemômetros de diferentes modelos (ESMAY, 1982). Com o aumento das variáveis consideradas nos cálculos, a complexidade na obtenção dos dados também cresce. Assim, a escolha do índice a ser utilizado para a avaliação depende das especificidades da aplicação.

3.3 Concentrações de Amônia

A amônia (NH_3) é um dos principais gases tóxicos presentes em instalações avícolas, representando sérios riscos à saúde das aves, dos trabalhadores e ao meio ambiente. Sua formação está relacionada principalmente à decomposição microbiana do ácido úrico e ureia presentes nas excretas das aves,

especialmente em ambientes com alta umidade e pH alcalino. Estudos demonstram que fatores como pH, atividade enzimática, temperatura, umidade relativa, ventilação, tipo e idade da cama, manejo dos dejetos e idade das aves influenciam significativamente a taxa de emissão de NH_3 (NASSEM & ANNIE, 2018).

No cenário do meio ambiente, a amônia desempenha um papel relevante na formação de material particulado fino ($\text{PM}_{2.5}$), em que esse compromete a qualidade do ar e representa um risco à saúde pública. Ao reagir com óxidos de nitrogênio e enxofre na atmosfera, o NH_3 produz partículas que podem se depositar nos pulmões, agravando doenças respiratórias. Além disso, a amônia contribui para a acidificação do solo, a eutrofização de ambientes aquáticos e o aumento de nitratos nas águas subterrâneas (XIN et al. 2011; LI et al., 2013).

Para os colaboradores, a exposição prolongada ao NH_3 está associada a diversos sintomas respiratórios, como tosse crônica, irritação nos olhos e nas vias aéreas, além da função pulmonar reduzida, podendo ser intensificados os efeitos durante o inverno, quando a ventilação é reduzida (NASSEM & ANNIE, 2018).

Nas aves, o NH_3 compromete as estruturas ciliadas da mucosa traqueal, reduzindo a proteção contra agentes patogênicos e favorecendo o surgimento de infecções respiratórias. Também pode causar lesões na pele e nas patas, além de interferir no desempenho produtivo, embora alguns estudos não tenham detectado perdas significativas em parâmetros como ganho de peso ou conversão alimentar em exposições de até 60 ppm (AZIZ & BARNES, 2010; BEKER et al., 2004; NASSEM & ANNIE, 2018).

De forma geral, recomenda-se que a concentração de amônia em aviários não ultrapasse 25 ppm. Idealmente, os níveis de exposição devem permanecer abaixo de 10 ppm. No entanto, exposições temporárias de até 25 ppm são consideradas seguras e não apresentam riscos significativos à saúde. A *Occupational Safety and Health Administration (OSHUA)* dos Estados Unidos estabelece como limite de exposição ocupacional 50 ppm por um período de até 8 horas, ou alternativamente, 35 mg/m^3 em exposição diária contínua. Concentrações a partir desses valores já podem causar irritações nos olhos, nariz e garganta, mesmo em exposições de curta duração (NASSEM & ANNIE, 2018).

Em relação à impactos na produtividade MILES et al. (2004) avaliaram os efeitos do NH_3 em frangos de corte modernos, com peso corporal final (PCF) de 3.200 g aos 7 dias de idade. Os resultados indicaram que concentrações de NH_3 de

50 e 75 ppm reduziram o PCF em 6% e 9%, respectivamente, em comparação com o grupo controle (0 ppm). Além disso, a mortalidade foi significativamente maior no grupo exposto a 75 ppm, com 13,9% de mortalidade, em comparação com 5,8% no grupo controle.

3.4 Indústria 4.0

O setor industrial sempre esteve associado ao desenvolvimento econômico do país. Durante o século XVIII, ocorreram transformações significativas na indústria, que levaram ao aumento da produtividade, marcando o início da primeira revolução industrial. Essa fase é caracterizada pelo uso de máquinas a vapor para realizar tarefas anteriormente executadas por trabalho manual (SANTOS et al., 2018).

A segunda revolução industrial teve início no começo do século XX, destacando-se pela implementação da divisão do trabalho, o que possibilitou a produção em massa. No final do século XX, especificamente na década de 1970, surgiu a terceira revolução industrial, que introduziu a tecnologia da informação e a eletrônica na produção, promovendo uma indústria mais automatizada (SANTOS et al., 2018).

Finalmente, em 2011, na feira de Hannover, foi apresentada a quarta revolução industrial, que visa tornar o sistema produtivo mais inteligente e capaz de resolver problemas sem a necessidade de intervenção humana. Essa nova fase requer uma troca contínua de informações ao longo de toda a cadeia produtiva, viabilizada pelas chamadas tecnologias 4.0, que são essenciais para alcançar esse nível de autonomia. Entre os principais pilares estão a Internet das Coisas e a Computação em Nuvem (KOCH et al., 2014).

3.5 Internet das coisas e Computação em nuvem

A Internet das Coisas é uma solução que permite a comunicação sem fio entre dispositivos. Esse conceito se refere à conexão de objetos à internet, possibilitando a troca de dados entre eles. Essa interconexão é realizada por meio de sensores, dispositivos embarcados, tecnologias de comunicação e protocolos de internet, formando um sistema onde o mundo físico e o digital se entrelaçam. Atualmente, a adoção da *IoT* está crescendo rapidamente, impulsionada pelas

diversas aplicações tecnológicas que oferece (MEKKI et al., 2019; CONDRY & NELSON, 2016; BORGIA, 2014).

Embora a *IoT* permita uma comunicação ágil e de fácil acesso, com a capacidade de transferir dados a longas distâncias, ela também gera uma grande quantidade de informações em alta velocidade, frequentemente categorizadas como *big data* (EMMER et al., 2017). Os dados coletados sobre variáveis ambientais fornecem informações valiosas sobre o ambiente monitorado, tornando essencial seu armazenamento e interpretação, uma vez que essas variáveis podem impactar significativamente a produção (BAKER, 2014; CHASE et al., 2018).

Uma solução eficaz para o armazenamento dessa grande quantidade de dados gerados pelos dispositivos *IoT* é a computação em nuvem. Este modelo de computação permite que o usuário acesse um vasto volume de dados e várias aplicações utilizando apenas um dispositivo conectado à internet (PERISSINOTO & MOTA, 2007; SILVA, 2010).

A computação em nuvem possibilita a adaptação *online* do ambiente, permitindo que o volume de dados armazenados cresça sem prejudicar a execução das atividades. Essa característica a torna especialmente atraente para as empresas, pois elimina a necessidade de um planejamento prévio para expansão do banco de dados. Assim, as empresas podem iniciar com um armazenamento modesto e aumentá-lo conforme a demanda (PUTHAL et al., 2015; SASIKALA, 2013).

A integração entre computação em nuvem e Internet das Coisas forma um paradigma conhecido como *CloudIoT*, que envolve o armazenamento e processamento em nuvem dos dados coletados pelos dispositivos inteligentes. Esse paradigma, apresenta aplicações inovadoras, desafios e uma necessidade de pesquisa aprofundada, uma vez que existem poucas análises detalhadas sobre o assunto (BOTTA, 2015).

A tecnologia de comunicação utilizada deve ser selecionada de forma compatível com a aplicação da infraestrutura *IoT*. Fatores como alcance, consumo de energia, taxa de transmissão, número de dispositivos conectados e custo são decisivos para a viabilidade da aplicação. A Tabela 1 apresenta um comparativo técnico de algumas tecnologias: ZigBee, Sigfox, Bluetooth, LoRa e Wi-Fi.

Tabela 1. Comparativo técnico entre tecnologias de comunicação sem fio para IoT.

Tecnologia	Alcance (m)	Taxa de Dados (kbps)	Consumo (mW)	Latência (ms)	Tamanho da Rede (nós)
ZigBee	1-100	20-250	36,9	30	65.000
Sigfox	3.000-5.000	0.01-1	122	3.700	1.000.000
Bluetooth	10-50	1.000	215	<10	8
LoRa	5.000	0,3-50	100	297	10.000
Wi-Fi	100	11.000-600.000	835	50	32

Fonte: RUIZ-GARCIA et al. (2009); ROUTIS & ROUSSAKI (2023); JAWAD et al. (2017); SAAVEDRA et al. (2022); ALQURASHI et al. (2023); TZOUNIS et al. (2017); LORA ALLIANCE (2023); LEE et al. (2007); GAST et al. (2005).

O protocolo ZigBee, baseado na norma IEEE 802.15.4, opera nas faixas de 2,4 GHz, 915 MHz e 868 MHz, oferecendo baixo consumo de energia (36,9 mW) e baixa latência (30 ms), com alcance de até 100 metros e taxa de dados de até 250 kbps. Sua principal limitação para o ambiente agrícola está na cobertura reduzida, embora seja útil em cenários internos e de curta distância, como estufas ou galpões compactos (RUIZ-GARCIA et al., 2009; ABBASI et al., 2014; ROUTIS & ROUSSAKI, 2023)

O Sigfox é uma tecnologia LPWAN de ultra banda estreita com cobertura de até 50 km e consumo extremamente baixo (122 mW), mas com taxa de transmissão muito limitada (até 1 kbps) e alta latência (3,7 s). É ideal para aplicações que não demandam respostas em tempo real, como rastreamento remoto e telemetria esporádica (CARRILLO & SEKI, 2017; JAWAD et al., 2017; ALI et al., 2017; SAAVEDRA et al., 2022).

Bluetooth, com alcance entre 10 e 50 metros, apresenta elevada taxa de dados (1 Mbps), baixa latência (<10 ms) e consumo moderado (215 mW). No entanto, sua baixa capacidade de rede (até 8 nós) e suscetibilidade à interferência limitam seu uso em redes agrícolas maiores (RUIZ-GARCIA et al., 2009; CARRILLO & SEKI, 2017; ROUTIS & ROUSSAKI, 2023; JAWAD et al., 2017).

O protocolo LoRa, amplamente utilizado em ambientes agrícolas, oferece comunicação bidirecional de longo alcance (até 5 km) com baixa taxa de dados (0,3 a 50 kbps) e consumo moderado (~100 mW). Se destaca pela robustez contra interferências e alta escalabilidade da rede, sendo adequado para monitoramento

ambiental em larga escala (TZOUNIS et al.; 2017; MEKKI et al., 2019, CORREIA et al., 2023).

Wi-Fi, apesar de ser amplamente difundido, apresenta consumo elevado (835 mW) e alcance limitado (até 100 m), o que o torna mais apropriado para aplicações localizadas com disponibilidade de energia, como galpões com infraestrutura elétrica robusta. Seu alto *throughput* (até 600 Mbps) é vantajoso em aplicações que demandam transmissão de grandes volumes de dados em tempo real (ABBASI et al., 2014; WANG et al., 2006).

3.6 Rede de Sensores Sem Fio

Entre as diversas aplicações das tecnologias contemporâneas, destacam-se as Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), que têm a capacidade de conectar a produção rural ao ambiente externo. Essa tecnologia combina elementos de comunicação em rede, processamento computacional, automação, armazenamento de informações, controle e sensoriamento. Com as RSSF, é possível monitorar e controlar ambientes específicos, muitas vezes sem a necessidade de intervenção humana direta (EMMER et al., 2017; SILVA, 2010).

Os dispositivos utilizados nas RSSF são conhecidos como nós sensores, cuja instalação pode ser feita de forma aleatória ou homogênea no local. Os dados coletados por esses dispositivos são processados localmente e, por meio de comunicação sem fio, são enviados tanto para o nó solicitante quanto para uma estação base. A partir dessas informações, as decisões necessárias podem ser tomadas e implementadas (PANTAZIS et al., 2013).

A maneira como esses nós são organizados em campo determina a topologia da rede, impactando sua eficiência, cobertura, consumo de energia e robustez. Na topologia em estrela, cada nó se conecta diretamente a um gateway central. Essa configuração é simples, possui baixa latência, mas depende da proximidade de cada nó ao gateway e compromete a operação em caso de falha do nó central.

A topologia em malha (*mesh*), permite que os nós se comuniquem entre si e repassem dados de outros dispositivos, aumentando a robustez e a escalabilidade da rede, embora exija maior consumo de energia e processamento. Já a topologia em árvore organiza os nós em níveis hierárquicos, o que facilita a expansão da rede, mas a torna vulnerável a falhas nos ramos intermediários. Em ambientes estreitos,

como corredores ou túneis, a topologia linear pode ser útil, apesar da pouca tolerância a falhas. Por fim, as topologias híbridas, que combinam elementos das demais, oferecem maior flexibilidade para adaptação às condições específicas do ambiente de aplicação (NAVARRO et al., 2020).

3.7 Aplicações de tecnologias 4.0 na avicultura

As principais aplicações que dependem da coleta com precisão de variáveis ambientais incluem os Sistemas de Monitoramento Autônomo e as Aplicações de Inteligência Artificial. Os Sistemas de Monitoramento Autônomo utilizam sensores e tecnologias de *IoT* para rastrear e controlar variáveis como temperatura, umidade e níveis de alimentação, permitindo um gerenciamento eficiente e em tempo real das condições em ambientes como granjas avícolas (LEITE et al., 2025).

Por outro lado, as Aplicações de Inteligência Artificial, como redes neurais e algoritmos de aprendizado de máquina, analisam os dados coletados para otimizar o ambiente, prever necessidades e melhorar a tomada de decisões. Essa combinação de tecnologias proporciona um manejo mais eficaz e sustentável, assegurando o bem-estar dos animais e aumentando a eficiência da produção (CRUZ et al., 2024).

Um exemplo notável dentro dos Sistemas de Monitoramento Autônomo é o projeto "*Smart Chicken Farm Monitoring System*" (ALI et al., 2020). Este sistema foi desenvolvido para monitorar e controlar o ambiente do aviário. Utilizando a plataforma em nuvem *Blynk* e sensores *IoT*, ele coleta dados de temperatura, umidade e peso das aves por meio de sensores como o DHT11 e uma célula de carga. Os dados são enviados e armazenados na nuvem, permitindo que os produtores acessem informações em tempo real, assegurando condições adequadas e evitando problemas de saúde.

Outro projeto relevante é o trabalho de WICAKSONO et al. (2017), intitulado "*Design and Analysis Automatic Temperature Control in The Broiler Poultry Farm Based on Wireless Sensor Network*". Este sistema faz uso de uma rede de sensores sem fio para monitorar continuamente a temperatura em diferentes áreas da granja. Equipado com um Arduino Nano e um módulo Xbee, ele coleta dados do sensor DHT11 e controla um ventilador através de um relé, garantindo que as

condições de temperatura se mantenham dentro dos padrões ideais para o bem-estar das aves.

Adicionalmente, o projeto "*Smart Chicken Farming: Monitoring System for Temperature, Ammonia Levels, Feed in Chicken Farms*" de BUDIARTO et al. (2020) utiliza o Raspberry Pi 3 como servidor central. Esse dispositivo coleta dados de sensores como o DHT22, que mede temperatura e umidade, um sensor de peso para monitorar a disponibilidade de alimentos e um sensor MQ-137 para detectar níveis de amônia. A comunicação é facilitada pela tecnologia *General Packet Radio Service (GPRS)*, permitindo a transmissão em tempo real dos dados, o que ajuda os produtores a manterem um ambiente saudável para os frangos. Quando os níveis de amônia atingem valores críticos, o sistema notifica os usuários para que realizem a limpeza do local, garantindo a saúde das aves.

Na esfera das Aplicações de Inteligência Artificial, o artigo de RIBEIRO et al. (2019), "*Generating action plans for poultry management using artificial neural networks*", foca no controle ambiental do criadouro utilizando redes neurais artificiais (RNAs). O sistema é capaz de aprender a partir do conhecimento de especialistas, permitindo ajustes mais precisos nas condições do galpão, como temperatura e ventilação, e promovendo um ambiente ideal para o crescimento das aves.

Outro trabalho importante é o de LIU et al. (2021), que desenvolveram um sistema para a identificação de aves mortas usando um algoritmo de aprendizado profundo. Este sistema, que emprega uma rede neural convolucional (*CNN*), analisa imagens em tempo real para detectar automaticamente aves mortas, reduzindo significativamente o tempo e o esforço necessários para a remoção, e melhorando a eficiência operacional.

O estudo de CUAN et al. (2022) destaca o uso de *deep learning* para a detecção automática da doença de Newcastle em aves. Várias arquiteturas de redes neurais, como *LSTM*, *BiLSTM* e *CRNN*, foram aplicadas para analisar sinais sonoros, possibilitando uma detecção mais precisa da doença e contribuindo para a saúde das aves.

Finalmente, o modelo de FERALDI et al. (2022), "*Machine Learning Model for Temperature and Humidity Automatic Control in Smart Poultry Farm*", utiliza o algoritmo *KNN* (K-ésimo vizinho mais próximo) para controlar automaticamente a temperatura e umidade em galpões avícolas. O sistema se baseia em dados

históricos para determinar as condições ideais, proporcionando um ambiente estável e otimizado para as aves e, assim, aumentando a eficiência da produção.

Essas aplicações demonstram a necessidade do desenvolvimento de módulos com a capacidade de coleta precisa de dados para aprimorar a eficiência e o bem-estar na produção avícola, possibilitando um manejo mais eficaz e sustentável.

3.8 Amplificadores Operacionais

Os amplificadores operacionais são dispositivos eletrônicos com diversas aplicações incluindo a amplificação de sinais, controle de processos, gerar ondas senoidais e realizar operações matemáticas como adição, subtração, multiplicação, divisão, integração e diferenciação (STOUT, 1982).

O amplificador operacional ideal possui como características fundamentais: um ganho de tensão diferencial infinito, ganho de modo comum igual a zero, saída nula quando a entrada for zero, impedância de entrada infinita, impedância de saída nula, faixa de passagem infinita e estabilidade de fase. Além disso, ele não sofre variações de tensão de saída com alterações de temperatura. No entanto, amplificadores operacionais reais apresentam limitações em relação a esses parâmetros ideais, e é importante ressaltar que, apesar disso, os avanços tecnológicos têm possibilitado melhorias constantes nas suas características (STOUT, 1982).

Em amplificadores operacionais reais, alguns aspectos precisam ser observados. O ganho de malha aberta, que é a relação entre a variação da tensão de saída e a de entrada, pode variar de alguns milhares a valores muito altos em amplificadores sofisticados. A tensão de *offset* é uma característica importante que ocorre devido a imperfeições nos dispositivos de entrada, resultando em uma saída diferente de zero quando as entradas estão no mesmo potencial, variando de 1 mV a 100 mV em amplificadores comerciais. Já a corrente de *offset* resulta de correntes de polarização nas entradas, podendo ser ligeiramente diferentes em amplificadores com FETs ou transistores bipolares (PERTENCE JR, 2003).

A faixa de passagem de um amplificador é definida pela frequência em que o ganho de tensão atinge o valor unitário (*Unit-Gain Crossover Frequency*), que pode variar entre 1 kHz e 100 MHz em amplificadores reais. O Slew Rate é outro parâmetro importante, que descreve a capacidade do amplificador de acompanhar

sinais rápidos. Caso o sinal ultrapasse a capacidade do amplificador, a saída pode se distorcer, formando uma onda triangular. O Slew Rate é expresso em $V/\mu s$ e pode variar entre amplificadores monolíticos (valores mais baixos) e híbridos (valores mais altos) (PERTENCE JR, 2003).

Além disso, a impedância de entrada de amplificadores operacionais reais é muito alta, variando entre $10^8 \Omega$ e $10^{13} \Omega$, dependendo da tecnologia utilizada (monolíticos ou FETs), enquanto a impedância de saída não é nula e pode variar entre alguns ohms e até $3 k\Omega$, o que impacta a interação com circuitos subsequentes (PERTENCE JR, 2003).

4 MATERIAIS E MÉTODO

4.1 Análise das Variáveis Ambientais

Inicialmente, foi realizada uma análise de materiais recentes e clássicos relacionados aos temas abordados pela pesquisa, com o objetivo de estabelecer uma fundamentação teórica, tanto bibliográfica quanto documental. Assim, termos como: ambiência na avicultura, variáveis ambientais galpões avícolas, *IoT poultry*, internet das coisas, *environmental monitoring broilers* foram pesquisados em diversas bases de dados acadêmicas populares, incluindo *IEEE Xplore*, *Google Scholar*, *Scopus* e *ScienceDirect*, buscando-se adquirir uma quantidade adequada de insumos para uma leitura e compreensão mais aprofundada do tema.

As pesquisas bibliográficas consistiram no estudo de materiais já publicados sobre o assunto, incluindo publicações avulsas, artigos, livros, teses e dissertações, entre outros. Essa técnica foi utilizada com o intuito de fornecer ao pesquisador uma visão mais ampla sobre o tema (BOCCATO, 2006).

Em seguida, foram selecionados 10 artigos publicados entre os anos de 2020 e 2025, focado em estudos que apresentaram dados quantitativos sobre os efeitos de variáveis ambientais na avicultura.

Para auxiliar a análise dos resultados, os artigos foram classificados pelo tipo de estudo, sendo considerado a metodologia e objetivos. Foram adotadas cinco categorias: revisões sistemáticas, estudos experimentais, estudos observacionais, estudos tecnológicos e relatórios técnicos. As revisões se referem a análises da literatura que tenham ou não critérios estruturados de seleção. Os estudos experimentais envolvem a manipulação de variáveis em condições controladas ou

de campo, sendo observado os efeitos diretos. Os estudos observacionais analisam cenários reais, sem intervenção direta, com foco em padrões e correlações. Já os estudos tecnológicos concentram-se na aplicação ou desenvolvimento de soluções para o monitoramento ambiental, propondo novas possibilidades. Por fim, os relatórios técnicos consistem em documentos práticos, com dados aplicáveis ao contexto produtivo.

A Tabela 2 resume a classificação dos artigos, suas principais contribuições e as variáveis ambientais analisadas em cada um.

Tabela 2. Artigos selecionados na pesquisa bibliográfica com suas principais contribuições.

Referência	Tipo de Estudo	Contribuições	Variáveis
ABO-AL-ELA et al. (2021)	Revisão Narrativa	Estratégias como nano-suplementação e manejo da luz para reduzir estresse oxidativo e melhorar saúde.	Temperatura, luz, densidade, qualidade do ar
AHMED et al. (2021)	Estudo Tecnológico	Framework com IoT e ML para detecção precoce de doenças; alta acurácia com dados sintéticos.	Movimento, saúde (IoT)
OLIVEIRA et al. (2021)	Revisão Sistemática	Revisão sobre formação, medição e controle da emissão de amônia em camas aviárias.	Amônia, umidade, pH, temperatura
WU et al. (2022)	Revisão Narrativa	Aplicações de IA, sensores e robótica para automação e manejo ambiental na avicultura.	Temperatura, umidade, gases, comportamento
FAROOQ (2022)	Revisão Sistemática	Panorama do uso de IoT na pecuária; destaca integração com 5G e blockchain.	Temperatura, rastreamento
KUMAR et al. (2023)	Estudo Tecnológico	Sistema IoT com sensores, controle automático e envio de alertas para melhorar a produção.	Temperatura, umidade, amônia, alimentação
MADKOUR et al. (2022)	Revisão Científica	Uso de bioativos e condicionamento térmico para mitigar estresse por calor.	Temperatura, estresse térmico, nutrição
OLUWAGBENGA & FRALEY (2023)	Revisão Sistemática	Efeitos do estresse térmico e estratégias epigenéticas e de manejo para mitigação.	Temperatura, umidade
ALI et al. (2024)	Estudo Tecnológico	Sistema inteligente que aprende com o operador e automatiza o controle ambiental.	Temperatura, umidade, gases, luz, água
BIST et al. (2024)	Revisão Sistemática	Estratégias sustentáveis na avicultura com foco em bem-estar, manejo e tecnologia.	Temperatura, ventilação, manejo

Sendo assim, possibilitou-se a identificação das variáveis ambientais críticas nos sistemas produtivos, compreensão dos métodos de monitoramento utilizados e dos impactos diretos e indiretos sobre o desempenho animal, bem-estar, sustentabilidade e eficiência produtiva.

4.2 Definição dos Requisitos Técnicos e Operacionais da Solução

A definição dos requisitos técnicos e operacionais da solução proposta levou em consideração as necessidades específicas dos pequenos e médios produtores de aves, que enfrentam barreiras como conectividade limitada, instalações elétricas precárias, restrições financeiras e ausência de suporte técnico especializado. Segundo Schneider et al. (2025), embora esses produtores utilizem ferramentas básicas de comunicação, a adoção de tecnologias avançadas, como sistemas *IoT*, é baixa devido à escassez de capital, infraestrutura deficiente e capacitação técnica limitada. Isso reforça a necessidade de uma arquitetura que combine baixo custo, baixo consumo de energia, facilidade de instalação e robustez operacional.

Dessa forma, optou-se por uma RSSF composto por dois tipos de *hardware*: os nós sensores, responsáveis pela coleta de variáveis ambientais, e o módulo interrogador, que centraliza, processa e disponibiliza as informações na *internet*.

A primeira característica determinada para a rede foi a definição das variáveis de interesse a serem coletadas com base na pesquisa bibliográfica realizada, em que foram selecionadas a Temperatura, Umidade, Pressão e Amônia. Essas variáveis impactam diretamente o desempenho das aves e a saúde dos trabalhadores do galpão, exigindo monitoramento contínuo. Adicionalmente, foi considerada a possibilidade de ampliar o sistema futuramente para inclusão de novas variáveis, garantindo escalabilidade à solução.

Após essa etapa, o método de comunicação escolhido para a comunicação interna, dentro do galpão, foi adotado a interface RS-485, uma vez que essa tecnologia oferece transmissão com baixo nível de ruído, proporcionando maior precisão nos dados mesmo em instalações adversas, já que é um ambiente que pode ter poeira e alta umidade.

Já para a comunicação do módulo interrogador com sistemas externos optou-se pelo uso da tecnologia *LoRa*®, que oferece transmissão a longas

distâncias com consumo energético reduzido, sendo ideal para regiões rurais com baixa cobertura de rede celular ou Wi-Fi. A LoRa opera em banda de frequência de 400 MHz, tem alcance que pode ultrapassar 5 km em campo aberto e consome menos de 10 μ A em modo de espera, permitindo a transmissão dos dados monitorados para acesso remoto, mesmo em locais com infraestrutura limitada (EBYTE, 2021).

4.3 Criação dos Diagramas e Seleção dos Componentes

A criação de diagramas esquemáticos dos módulos foi executada para facilitar a visualização dos materiais necessários à construção da Rede de Sensores Sem Fio, sendo definido suas funções específicas.

No módulo dos nós sensores, a função central estabelecida foi a coleta de dados das variáveis ambientais e sua transmissão ao módulo interrogador. Para atender a essa finalidade, identificou-se a necessidade de integrar três subsistemas fundamentais: o subsistema do microcontrolador, o subsistema de sensoriamento e o subsistema de comunicação.

No módulo interrogador, foram atribuídas as funções de receber e enviar informações aos nós sensores, estabelecer comunicação com o computador controlador e disponibilizar os dados ao usuário de forma acessível e de forma rápida. Com base nessas funções, os subsistemas integrantes do interrogador foram definidos como o subsistema do microcontrolado, subsistema de comunicação e o subsistema de gerenciamento de energia.

A inclusão de um subsistema dedicado à alimentação justifica-se pela necessidade de prover energia aos nós sensores com estabilidade e segurança, reduzindo a dependência de fontes individuais e facilitando o controle centralizado da rede.

Com as funções específicas definidas, foi possível iniciar a seleção dos componentes, conforme as funcionalidades determinadas para cada aplicação. Como critérios de escolha, foram delineados componentes com ultra baixo consumo de energia e baixo custo. Além disso, a qualidade dos componentes também foi determinante nessa seleção, visando alcançar módulos embarcados de baixo custo e com ultra baixo consumo de energia.

A escolha dos materiais iniciou-se pela seleção do microcontrolador, responsável por efetuar o controle de todo o dispositivo. Para os nós sensores, no

caso do módulo de temperatura, umidade e pressão, foi escolhido o microcontrolador MSP430FR2422, uma vez que não é necessária muita precisão no conversor analógico/digital, pois os sensores utilizados são digitais. Já para o módulo de amônia, optou-se pelo MSP430AFE223, pois requer maior definição para a conversão das variáveis, visto que não é um sensor digital. Para o módulo interrogador, foi escolhido o microcontrolador MSP430FR2355 da *Texas Instruments*®, que, de acordo com as informações fornecidas pelo fabricante, atendia aos critérios previamente definidos e possui duas portas com comunicação *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART)* para a comunicação.

A

Tabela 3 apresenta as principais características técnicas de cada microcontrolador, incluindo a tensão de entrada, consumo de corrente, conversor analógico digital, interface de comunicação e número de portas *UARTs*.

Tabela 3. Características dos microcontroladores selecionados.

Microcontrolador	Tensão de Entrada	Consumo	Conversor Analógico Digital	Comunicação	Número de <i>UART</i>
MSP430FR2422	1,8-3,6 V	120 μ A/MHz (típico)	10 bits	UART, SPI, I ² C	1
MSP430AFE223	1,8-3,6 V	220 μ A/MHz (típico)	24 bits	UART, SPI, I ² C	1
MSP430FR2355	1,8-3,6 V	142 μ A/MHz (típico)	12 bits	UART, SPI, I ² C	2

Fonte: TEXAS INSTRUMENTS (2018); TEXAS INSTRUMENTS (2019); TEXAS INSTRUMENTS (2021).

Após isso, foram selecionados os componentes do subsistema de gerenciamento de energia, sendo o interrogador o responsável por alimentar os nós sensores. Para a alimentação dos módulos, foram escolhidas três opções de fontes de tensão da *Hi-Link*®: HLK-PM01, HLK-5M05 e HLK-10M05. Identificou-se, então, a necessidade de utilizar um regulador de tensão, já que a alimentação do microcontrolador deve ser de 3,3 V, valor que pode não ser o mesmo fornecido pelas fontes. Assim, foi determinado o uso do regulador de tensão TPS70930 da *Texas Instruments*®, que mantém a saída estabilizada em 3 V.

Para o subsistema de comunicação do interrogador com a *internet*, foi selecionado o módulo de comunicação E32-433T20D da *Ebyte Electronic Technology*®, que oferece suporte à comunicação via *LoRa*, já que possui um alto

alcance teórico (5 km) e um baixo consumo ($\sim 4 \mu\text{A}$) em *stand-by*, com uma tensão de alimentação ideal em 3.3V, a mesma que o microcontrolador. Entre os módulos sensores e o interrogador, foi escolhido o THVD1450 para a comunicação RS-485 que é utilizando fio, já que os módulos sensores não ficariam tão distantes.

Com a definição dos componentes do subsistema de comunicação concluída, iniciou-se à seleção dos componentes do subsistema de sensoriamento, presente exclusivamente nos nós sensores. Optou-se por sensores com baixo consumo de energia e custo acessível.

Os sensores escolhidos foram: HDC1080 para coleta de dados de temperatura e umidade, BME280-DS002 para temperatura, umidade e pressão, LMT85 para temperatura e MQ-137 para concentração de amônia. A Tabela 4 apresenta as principais características técnicas de cada sensor, incluindo variáveis monitoradas, tensão de entrada, consumo de corrente, precisão, interface de comunicação e faixa operacional.

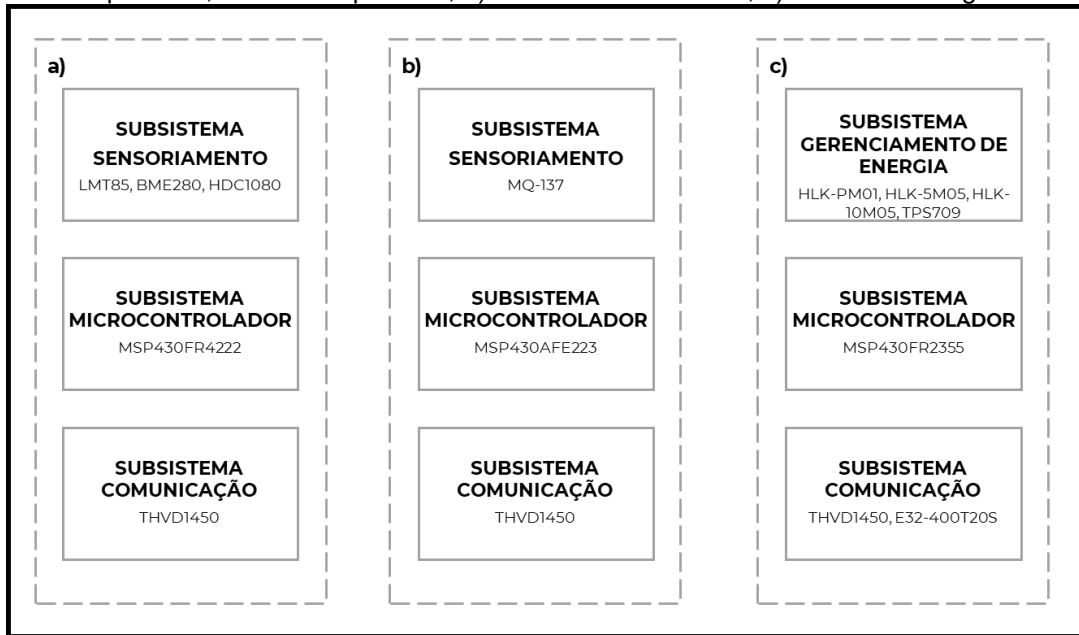
Tabela 4. Características dos sensores selecionados. Temperatura (T), Umidade (U), Amônia (NH₃).

Sensor	Variáveis	Tensão de Entrada	Consumo	Acurácia	Comunicação
HDC1080	T e U	2,7-5,5V	0,10-1,30 μA	T: $\pm 0,2^\circ\text{C}$; U: $\pm 2\%$	I ² C
BME280	T, U e P	1,71-3,6 V	0,10-3,60 μA	T: $\pm 0,5^\circ\text{C}$; U: $\pm 3\%$; P: $\pm 1,0 \text{ hPa}$	I ² C/SPI
LMT85	T	-0,3-6,0 V	5,40 μA	$\pm 0,4^\circ\text{C}$	Analógico
MQ-137	NH ₃	5,0 V	180 mA	> 2%	Analógico

Fonte: BOSCH SENSORTEC (2024); TEXAS INSTRUMENTS (2016); TEXAS INSTRUMENTS (2017); WINSEN ELECTRONICS (2015); TANG & HU (2022).

Por fim, após a definição dos componentes, foram elaborados os diagramas com os principais elementos de cada subsistema, apresentados na Figura 2.

Figura 2. Diagrama dos módulos e os principais componentes utilizados. a) Nó sensor de temperatura, umidade e pressão; b) Nó sensor de amônia; c) Módulo interrogador



Fonte: Autor

A Figura 2 apresenta a organização dos principais componentes de cada um dos módulos desenvolvidos, separados em seus respectivos subsistemas. No item (a), é mostrado o nó sensor responsável pela coleta de temperatura, umidade e pressão, com os sensores BME280, HDC1080 e LMT85 e a comunicação RS-485, utilizado para o envio dos dados ao interrogador. No item (b), está representado o nó de amônia, onde além do sensor MQ-137, possui a comunicação RS-485. Por fim, no item (c), é apresentado o módulo interrogador, composto pelo microcontrolador MSP430FR2355, sistema de comunicação (RS-485 para os sensores e LoRa para o envio dos dados à internet) e o sistema de alimentação, responsável por fornecer energia aos nós sensores. A divisão por subsistemas foi adotada para facilitar o entendimento da estrutura funcional de cada módulo e auxiliar nas etapas de projeto, montagem e depuração da rede.

4.4 Desenvolvimento do *layout* da PCI do Interrogador

Após a seleção dos componentes, iniciou-se a etapa de desenvolvimento da placa de circuito impresso (PCI) do interrogador. Para o projeto do *layout* da PCI, foi utilizado o *software* livre *KiCad*®, que oferece todas as funcionalidades necessárias para o desenvolvimento do projeto de forma gratuita, sendo um *software* de código aberto.

O processo de obtenção do *layout* da PCI divide-se em duas etapas principais: o desenvolvimento do esquemático e o desenho da própria PCI. A primeira etapa, o desenvolvimento do esquemático, consiste na representação gráfica dos circuitos, destacando as conexões necessárias para o funcionamento de cada componente. Já a segunda etapa, o desenho da PCI, refere-se ao desenvolvimento das ligações estabelecidas no esquemático, que serão impressas na placa de cobre.

Primeiramente foi desenvolvido o sistema do microcontrolador sendo utilizado o MSP430FR2355. Foram adicionados o JTAG, o cristal oscilador de 32 kHz e os componentes passivos recomendados pelo *datasheet*. O JTAG é o responsável por permitir a comunicação entre o microcontrolador e um computador, possibilitando o armazenamento do *firmware* desenvolvido para a aplicação. O cristal oscilador, por sua vez, foi incluído para medir intervalos de tempo.

Em seguida, foi desenvolvido o sistema de gerenciamento de energia, com componentes dispostos de maneira a permitir a escolha da fonte de alimentação do dispositivo, facilitando o uso em testes. Para evitar que a aplicação ficasse restrita a uma tensão de entrada pré-definida de uma das fontes, foi adicionado o regulador de tensão TPS70930, permitindo uma maior flexibilidade na faixa de tensão de entrada, ampliando as possibilidades de aplicação.

No caso do sistema de comunicação, efetuou-se apenas a adição do módulo E32433T20D no esquemático já desenvolvido para o nó sensor, já que o interrogador tem a função de receber e enviar informações mutuamente.

Após o desenvolvimento do esquemático dos sistemas do interrogador, possibilitou-se a elaboração da PCI do módulo, sendo realizada a confecção em duas camadas (*double-layer*), o projeto foi enviado para confecção em empresas especializadas. O pedido foi realizado junto à JLCPCB®.

4.5 Desenvolvimento do *layout* da PCI do Nó Sensor

Após a elaboração da PCI do interrogador, foi desenvolvido o *layout* do interrogador. O desenvolvimento do esquemático dos nós sensores começou com a elaboração do subsistema do microcontrolador para o módulo de temperatura, umidade e pressão, e o módulo de amônia. O JTAG é o responsável por permitir a comunicação entre o microcontrolador e um computador, possibilitando o

armazenamento do *firmware* desenvolvido para a aplicação. O cristal oscilador, por sua vez, foi incluído para medir intervalos de tempo.

Posteriormente, foi projetado o subsistema de comunicação, conectado ao microcontrolador para permitir a comunicação via RS-485 com o interrogador. Por fim, para os nós sensores, foi integrado ao subsistema de sensoriamento à placa, utilizando os sensores HDC1080, BME280-DS002, LMT85 e o MQ-137 para a captura de dados ambientais.

No caso do módulo de amônia, que requer alimentação de 5 V, foram necessários adição de dois reguladores de tensão (TPS7A25), dois conversores de tensão (LM2662M) e um amplificador operacional (TLV8811). O subsistema opera com uma entrada de 3,3 V proveniente do módulo interrogador, que é inicialmente reduzida para 2,5 V e, em seguida, elevada para 5 V. Após essa conversão, a tensão passa pelo regulador TPS7A25 para estabilizar em 5,0 V. O amplificador operacional TLV8811 é responsável pelo condicionamento do sinal, garantindo que as leituras dos sensores sejam precisas e adequadas para o processamento.

O regulador de tensão TPS7A25 opera com uma tensão de entrada variando de 2,4 V a 18 V, fornecendo uma tensão de saída fixa entre 1,25 V e 5,0 V. Sua corrente de repouso é de 2 μ A, e sua faixa de temperatura operacional vai de -40°C a +125°C.

O conversor de tensão LM2662M, configurado como duplicador de tensão positiva, aceita uma tensão de entrada entre 2,5 V e 5,5 V, com consumo máximo de 4 mA.

O amplificador operacional TLVBB11 foi configurado em modo não inversor, utilizando resistores de 220 k Ω e 22 M Ω , com uma tensão de referência de 3 V, resultando em um ganho de 101 vezes.

Embora o esquemático de cada subsistema tenha sido desenvolvido separadamente, todos foram interligados aos pinos do microcontrolador, estabelecendo a conexão completa de cada módulo.

Após a conclusão da primeira etapa, iniciou-se o desenvolvimento do layout da PCI, também utilizando o software KiCad. O *layout* é responsável por garantir que as conexões projetadas no esquemático sejam corretamente implementadas na placa de cobre, permitindo a soldagem dos componentes.

No primeiro protótipo, a PCI dos nós sensores de temperatura, umidade e pressão foi desenvolvido em duas camadas (*double-layer*), o projeto foi enviado para confecção em empresas especializadas. O pedido foi realizado junto à JLCPCB®.

Os outros módulos sensores, a PCI foi desenvolvida com uma única camada (*single-layer*), já que foi confeccionada manualmente nos laboratórios da UNESP/Tupã. Essa unidade foi utilizada para verificar a compatibilidade das medidas da PCI com os componentes.

4.6 Considerações técnicas de implantação

Para o entendimento dos possíveis desafios relacionados à implementação prática do sistema, foi realizada uma pesquisa bibliográfica voltada a estudos que utilizaram os sensores selecionados em ambientes reais, principalmente em contextos de produção animal, além de trabalhos que apresentaram metodologias de calibração apropriadas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Variáveis Ambientais na Avicultura

Um dos resultados iniciais foi a identificação das variáveis ambientais mais relevantes para o desempenho produtivo, o bem-estar animal e a sustentabilidade nos sistemas avícolas intensivos. A partir da análise dos estudos apresentados, foi conduzida uma síntese crítica das principais variáveis monitoradas, das faixas operacionais recomendadas e dos impactos potenciais associados às suas variações.

A Tabela 5 apresenta-se a análise descritiva das variáveis identificadas: temperatura, umidade relativa do ar, concentração de amônia (NH₃), gases diversos (como H₂S e VOCs), poeira em suspensão (PM2.5) e intensidade luminosa. Cada variável é discutida com base em sua faixa ideal de operação, riscos associados e impactos tanto para os animais quanto para os trabalhadores rurais.

Tabela 5. Parâmetros ambientais e seus efeitos sobre o desempenho produtivo na avicultura.

Variável	Faixa Ideal	Faixas Críticas / Risco	Impactos
Temperatura	21–24°C (adultos)	>30°C (estresse); >35°C (mortalidade);	Redução de consumo, peso, fertilidade

		<18°C	
Umidade	50–70%	<40% >75%	Gases, doenças respiratórias
Amônia (NH₃)	<20 ppm	>25 ppm (lesões); >50 ppm (imunossupressão)	Desempenho, mortalidade
Outros Gases	Mínimo possível	H ₂ S >10 ppm; VOCs variam	Toxicidade, odor, doenças crônicas
Poeira (PM2.5)	Mínimo possível	Acúmulo com idade; >95% fezes aos 28 dias	Infecções, lesões respiratórias
Luminosidade	5–20 lux	>30 lux (agressividade); <2 lux (inatividade)	Agressividade, imunidade, metabolismo

A temperatura é apontada como o principal fator ambiental para o desempenho da avicultura, especialmente em sistemas intensivos. A faixa ideal para frangos de corte varia entre 21°C e 24°C a partir da quarta semana de vida, sendo que valores superiores a 30°C provocam estresse térmico e resultam em redução do consumo alimentar, queda no ganho de peso, aumento da mortalidade e supressão da resposta imune. Porém, temperaturas inferiores a 18°C na fase inicial elevam o risco de hipotermia e comprometem o desempenho (MADKOUR et al., 2022; OLUWAGBENGA). A recorrência do estresse térmico compromete diversas funções fisiológicas das aves, afetando negativamente a integridade intestinal, a imunidade, o bem-estar e o desempenho produtivo. Valores acima do intervalo ideal provocam redução na conversão alimentar e perdas de até 32% no ganho de peso (APALOWO et al., 2024).

A umidade relativa do ar é outro fator relevante, influenciando diretamente o conforto térmico e a qualidade da cama. A faixa recomendada situa-se entre 50% e 70%, sendo que níveis inferiores a 40% promovem o ressecamento das vias aéreas e prejudicam a defesa mucociliar, enquanto valores acima de 75% dificultam a dissipação de calor e favorecem o surgimento de microrganismos patogênicos, além de intensificarem a produção de gases como a amônia (KONKOL et al., 2022). Em combinação com o calor, a umidade relativa acima de 60% compromete os mecanismos de termorregulação, reduzindo a dissipação de calor por vias não evaporativas e agravando os efeitos do estresse térmico (LIN et al., 2005).

A concentração de amônia (NH_3) nos galpões, resultante da decomposição de compostos nitrogenados, deve ser mantida abaixo de 20 ppm. Níveis superiores a 25 ppm já provocam lesões oculares, irritação das vias aéreas e imunossupressão, enquanto concentrações acima de 50 ppm acarretam quedas expressivas no desempenho produtivo e aumento na suscetibilidade a doenças respiratórias. Além disso, a amônia contribui para a degradação da qualidade da cama e compromete o ambiente ocupacional dos trabalhadores rurais, sendo associada a quadros de bronquite, conjuntivite e absenteísmo laboral (KONKOL et al., 2022).

Outros gases como o gás sulfídrico (H_2S), dióxido de carbono (CO_2) e os compostos orgânicos voláteis (VOCs), também estão presentes em ambientes mal ventilados. O H_2S , torna-se tóxico acima de 10 ppm, enquanto os VOCs, que varia os limites conforme o composto, podem causar efeitos neurotóxicos, hepáticos e interferir na palatabilidade do ambiente, sendo considerados agravantes à saúde animal e ocupacional (KONKOL et al., 2022).

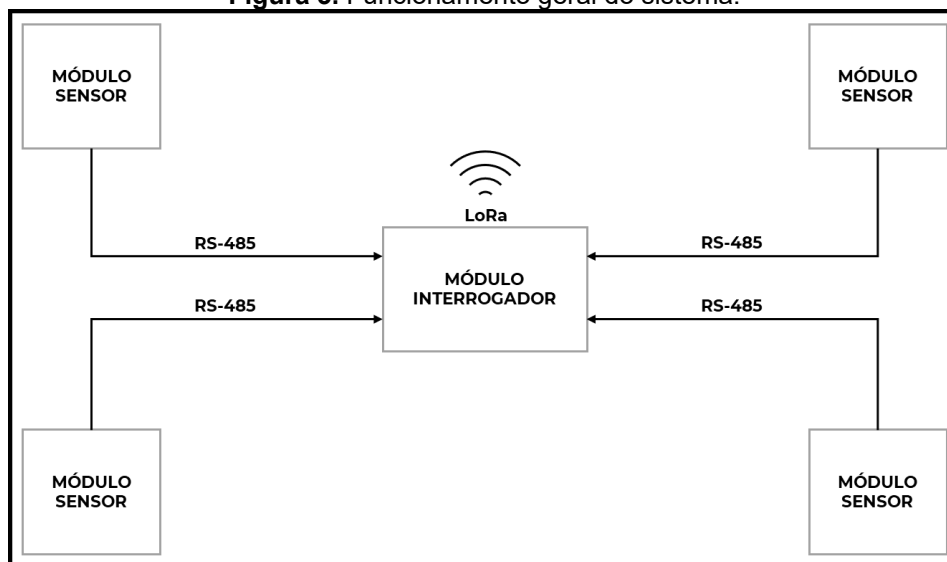
A poeira em suspensão, especialmente as partículas com diâmetro inferior a $2,5 \mu\text{m}$ (PM_{2.5}), constitui um vetor importante de vírus, bactérias e esporos fúngicos. Estudos indicam que, aos 28 dias de vida, até 95% da composição da poeira é proveniente de excretas secas, o que aumenta consideravelmente os riscos de comprometimento respiratório em aves e trabalhadores. A exposição contínua à poeira está associada à inflamação crônica das vias aéreas, aumento da susceptibilidade a infecções respiratórias, redução na eficiência alimentar e aumento da mortalidade em frangos de corte (CAMBRA-LÓPEZ et al., 2010; KONKOL et al., 2022).

Por fim, a luminosidade influencia diretamente o comportamento, metabolismo e sistema imunológico das aves. A faixa recomendada de intensidade luminosa situa-se entre 5 e 20 lux para frangos de corte, sendo que valores superiores a 30 lux favorecem comportamentos agressivos, como bicagem de penas e canibalismo, enquanto intensidades inferiores a 2 lux comprometem a locomoção e o acesso aos comedouros. Estratégias de manejo como luzes intermitentes ou monocromáticas têm sido utilizadas para promover o bem-estar e melhorar o desempenho zootécnico (ABO-AL-ELA et al., 2021).

5.2 Definição do funcionamento do Sistema

O estudo do tema permitiu a definição do planejamento para o funcionamento do sistema, sendo elaborado como uma prova de conceito teórica para uma arquitetura IoT voltada ao monitoramento remoto de variáveis ambientais em galpões avícolas. A proposta tem como objetivo atender especialmente pequenos e médios produtores, que podem enfrentar limitações relacionadas à conectividade, infraestrutura elétrica precária e restrições financeiras. A proposta do funcionamento é ilustrada pela Figura 3.

Figura 3. Funcionamento geral do sistema.



Fonte: Autor

A execução do monitoramento ocorre através de uma RSSF, na qual os dados são capturados pelos módulos sensores instalados no ambiente e enviados pela rede RS-485 até o interrogador. O interrogador, por sua vez, é capaz de se comunicar via *LoRa*, transmitindo esses dados para a nuvem, onde podem ser acessados pelos usuários em tempo real.

A topologia para a transmissão entre os módulos sensores e o interrogador foi a de barramento linear mestre-escravo via interface RS-485, na qual até 32 nós sensores podem ser interconectados em um único barramento. Esta configuração é recomendada para comunicações principalmente pelo baixo custo, ao contrário de topologias estrela ou malha, que exigem repetidores ou gerenciam colisões.

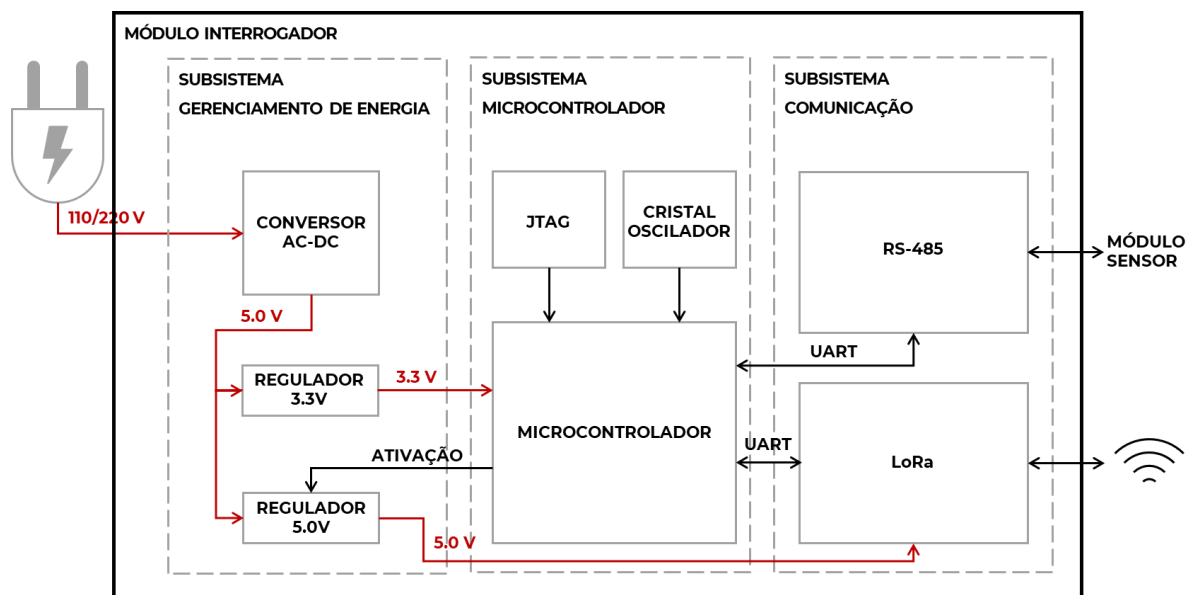
Os nós sensores são responsáveis pela coleta das principais variáveis ambientais. Cada nó é programado para operar como escravo em uma topologia mestre-escravo sobre o RS-485, respondendo mediante requisição do interrogador. Sendo a frequência de leitura dos sensores configurável.

O módulo interrogador atua como mestre da rede, sendo responsável por interrogar ciclicamente os sensores, receber os dados e realizar o envio remoto das informações para uma plataforma em nuvem. A transmissão externa utiliza tecnologia *LoRa*. Além disso, é possível a expansão do sistema com a inclusão de múltiplos interrogadores, interconectados também via RS-485, formando uma rede hierárquica de múltiplos mestres subordinados a um concentrador principal.

5.3 PCI do módulo interrogador

No desenvolvimento da PCI do interrogador, a primeira etapa envolveu a criação dos esquemáticos. A Figura 4 apresenta o diagrama com uma visão funcional do módulo interrogador, com os fluxos de alimentação em vermelho e de dados em preto, organizados em subsistemas. Esse esquema permite visualizar como o sistema se estrutura desde a alimentação até o envio de dados para a nuvem.

Figura 4. Diagrama do módulo interrogador. Vermelho: Fluxo de Alimentação; Preto: Fluxo de Dados



Fonte: Autor

A primeira etapa de implementação foi a conexão do microcontrolador MSP430FR2355, selecionado principalmente por compatibilidade com múltiplas interfaces seriais, o que possibilita a comunicação entre os módulos sensores e a *internet*. O cristal oscilador de 32,768 kHz foi conectado ao microcontrolador para precisão nos temporizadores internos e estabilidade em modos de operação de baixo consumo. Além disso, foi incorporada a interface JTAG para permitir a programação e a depuração do código embarcado.

No subsistema de gerenciamento de energia, foram utilizados três conversores AC-DC da série Hi-Link®: HLK-PM01, HLK-5M05 e HLK-10M05. A inclusão dessas opções no projeto proporciona flexibilidade para diferentes aplicações da rede RSSF, permitindo a escolha do modelo mais adequado conforme a demanda energética do sistema. Para assegurar tensões compatíveis com os requisitos para cada subsistema, foram utilizados reguladores TPS709, sendo um dedicado à geração de 3,3 V (TPS70933) para o microcontrolador e dos transceptores RS-485 (THVD1450), e outro à geração de 5,0 V (TPS70950) para a alimentação exclusiva do módulo LoRa (E32-400T20S), o que permite reduzir ruídos e ativar/desativar o módulo controlado pelo pino do microcontrolador, contribuindo para o baixo consumo total.

O módulo E32-400T20S foi adotado para comunicação sem fio, utilizando a tecnologia LoRa. Sua integração se dá via interface UART com o MSP430, e os modos de operação podem ser definidos por pinos de controle. A escolha do LoRa se deve ao seu alcance estendido, baixo consumo e à possibilidade de comunicação em regiões com baixa cobertura de rede convencional, uma realidade comum entre pequenos e médios produtores.

Para a comunicação interna entre dispositivos do galpão, foram utilizados dois transceptores RS-485, permitindo a conexão com até 32 módulos sensores e possibilitando a interligação com outro módulo interrogador. O barramento RS-485 foi escolhido por sua imunidade a ruídos e robustez em ambientes com poeira e umidade.

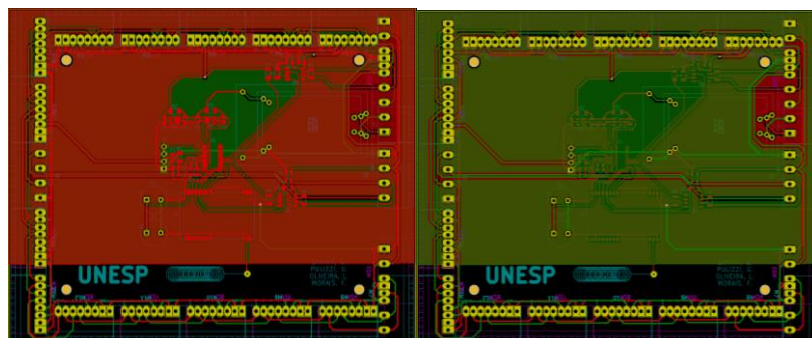
A conexão entre os subsistemas pode ser observada na Figura 4. O fluxo de alimentação (vermelho) se inicia no subsistema de gerenciamento de energia a partir da conexão com a rede elétrica. A energia é convertida pelos módulos AC-DC e distribuída aos demais subsistemas: 3,3 V para o microcontrolador e os transceptores RS-485 e 5,0 V para o módulo LoR.

O fluxo de dados (preto), mostra caminhos de comunicação bidirecional. Observamos que há uma via dupla entre o módulo LoRa e a nuvem/plataforma remota, permitindo o envio e recebimento de informações. Da mesma forma, o barramento RS-485 estabelece a comunicação bidirecional com os módulos sensores, possibilitando tanto a recepção quanto o envio de comandos ou configurações. Os dados trafegam até o microcontrolador via interface UART, que é responsável por processar e centralizar as informações.

Além desses fluxos, há também um sinal de controle vindo do microcontrolador para o pino de habilitação (EN) do regulador responsável pelo módulo LoRa, permitindo que este seja ligado ou desligado conforme a necessidade da aplicação, contribuindo para a otimização do consumo de energia.

A finalização do desenvolvimento do esquemático possibilitou o *design* da PCI. O procedimento adotado consistiu na elaboração da PCI em duas camadas, o que otimizou o aproveitamento do espaço do *hardware*. A Figura 5 mostra, o *layout* da PCI do interrogador, com a camada superior e a camada inferior finalizadas, que teve como dimensões 115,06 x 140,35 mm.

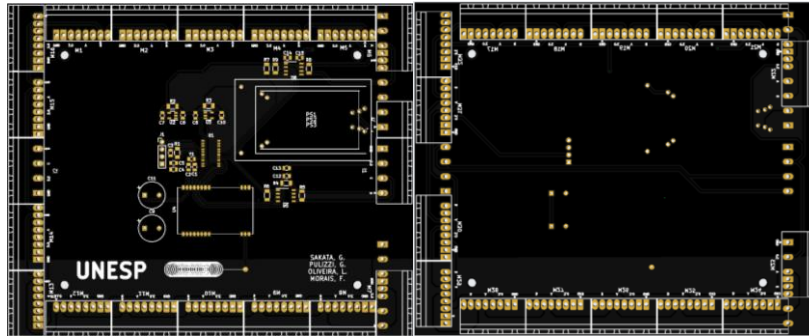
Figura 5. PCI do interrogador. Figura Direita: Face Superior, Figura Esquerda: Face Inferior



Fonte: Autor

O desenho desenvolvido foi enviado para a JLCPCB® com o intuito de ter um equipamento final com maior qualidade, já que essa é uma empresa especializada na confecção de placas de circuito impresso, o pedido está sendo exibido na Figura 6.

Figura 6. PCI do interrogador na JLCPCB. Figura Direta: Lado Superior, Figura Esquerda: Lado Inferior



Fonte: Autor

A arquitetura final do módulo interrogador foi desenvolvida com base nos requisitos técnicos e operacionais previamente definidos, buscando atender aos desafios característicos dos ambientes de pequenos e médios produtores. A combinação entre a comunicação RS-485 para a rede interna e a tecnologia LoRa para a transmissão externa dos dados se mostrou teoricamente adequada para garantir a operação do sistema em locais com infraestrutura limitada, mantendo a confiabilidade da comunicação.

A interface RS-485 demonstrou ser apropriada para uso dentro do galpão, por reduzir ruídos em condições adversas, como presença de poeira, alta umidade e distâncias maiores entre os dispositivos. Já o LoRa atende à demanda por transmissão remota de dados com baixo consumo de energia, sem a necessidade de Wi-Fi ou rede celular, o que o torna viável para regiões rurais com conectividade limitada.

Com relação aos critérios de baixo custo e escalabilidade, a escolha do microcontrolador MSP430FR2355, e os outros componentes do módulo, resultou em uma arquitetura eficiente em termos energéticos e com a possibilidade de desligamento seletivo de blocos quando não utilizados e funcionamento em *stand-by*. Além disso, a presença de dois canais RS-485 independentes aumentou a flexibilidade da solução, permitindo tanto a interligação entre múltiplos interrogadores.

5.4 PCI dos Nós Sensores

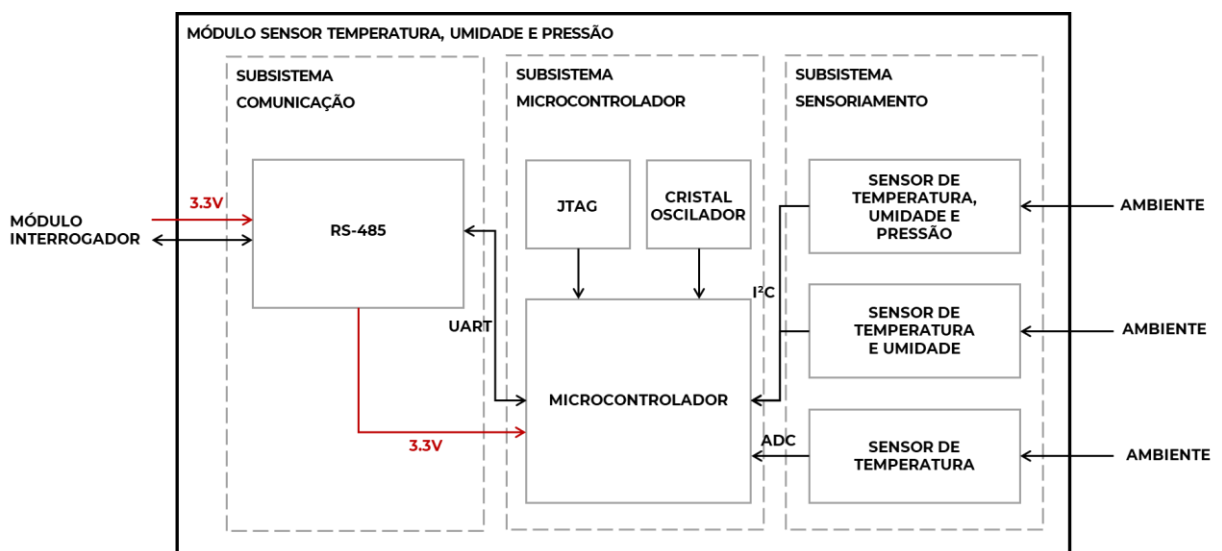
Com base na proposta teórica da arquitetura, os nós sensores foram desenvolvidos para realizar a coleta das variáveis ambientais críticas no galpão

avícola e transmitir esses dados via RS-485 ao módulo interrogador. Cada nó sensor opera de forma autônoma, possuindo microcontrolador dedicado, interface de comunicação e circuito de sensoriamento, com adaptações específicas conforme a variável monitorada.

Foram elaboradas duas versões: um módulo para medição de temperatura, umidade e pressão e outro para amônia. Cada módulo foi projetado com subsistemas específicos, de acordo com as exigências de cada variável monitorada.

A Figura 7 apresenta o diagrama funcional do módulo sensor de temperatura, umidade e pressão. O circuito é composto por sensores digitais e analógicos, organizados em subsistemas distintos para comunicação, microcontrolador e sensoriamento. O fluxo de alimentação (em vermelho) percorre desde a entrada de 3,3 V até os componentes internos, enquanto o fluxo de dados (em preto) segue da leitura dos sensores até o envio ou recebimento via interface RS-485.

Figura 7. Diagrama do módulo de temperatura, umidade e pressão. Vermelho: Fluxo de Alimentação; Preto: Fluxo de Dados

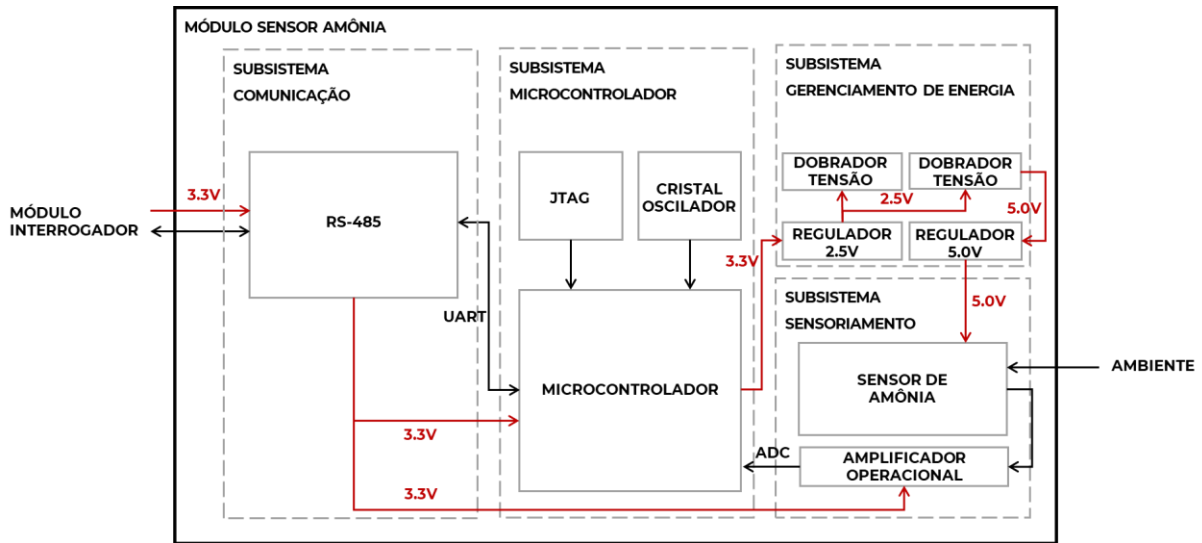


Fonte: Autor

A Figura 8 ilustra o diagrama funcional do módulo sensor de amônia, que exige um circuito de condicionamento analógico para o sensor MQ-137. Além dos subsistemas de comunicação e controle, esse módulo tem a etapa adicional de amplificação e filtragem do sinal, garantindo maior precisão nas leituras. Também se

destaca o subsistema de gerenciamento de energia, que converte a tensão recebida do interrogador para os níveis necessários ao funcionamento do sensor.

Figura 8. Diagrama do módulo de Amônia. Vermelho: Fluxo de Alimentação; Preto: Fluxo de Dados



Fonte: Autor

A estruturação dos módulos seguiu os mesmos utilizados no interrogador, começando pela definição do microcontrolador. No módulo de temperatura, umidade e pressão, foi utilizado o MSP430FR2422, que possui capacidade de operar com sensores digitais e o baixo consumo energético. Já no módulo de amônia, optou-se pelo MSP430AFE223, pois seu conversor analógico-digital de até 24 bits é essencial para leituras precisas do sensor MQ-137, que fornece saída analógica proporcional à concentração de gás.

Ambos os módulos foram equipados com cristal oscilador de 32,768 kHz para garantir precisão nos temporizadores internos e estabilidade nos modos de baixo consumo. A interface JTAG foi incluída para possibilitar gravação e depuração do *firmware* embarcado.

O subsistema de comunicação foi padronizado para todos os nós sensores, utilizando o transceptor THVD1450, para a comunicação RS-485 com o módulo interrogador e permite a alimentação dos nós pela própria rede, dispensando fontes individuais para cada módulo. Essa configuração reduz custos e facilita a instalação em locais de difícil acesso elétrico.

Para o módulo de amônia, foi necessária uma etapa adicional de gerenciamento de energia, devido o requisito de alimentação em 5,0 V do sensor MQ-137. Para isso, foram incorporados dois dobradores de tensão LM2662M e dois reguladores TPS7A25. A arquitetura converte os 3,3 V recebidos do interrogador para 2,5 V, depois eleva a tensão para 5,0 V e finalmente estabiliza com o outro regulador. Dessa forma garante teoricamente a estabilidade no funcionamento do sensor, além de permitir seu controle via pino de habilitação.

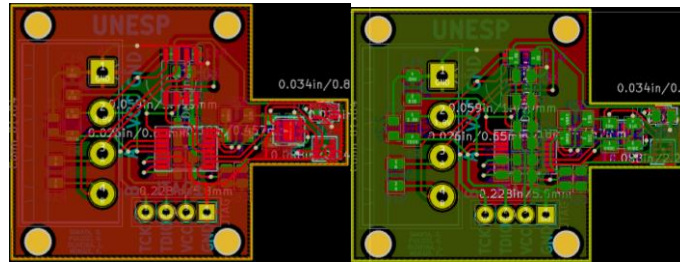
O subsistema de sensoriamento foi o último a ser implementado. No módulo de temperatura, umidade e pressão, os sensores utilizados são digitais, conectados diretamente ao barramento I²C do microcontrolador, sendo apenas o LMT85 analógico. Já no módulo de amônia, foi adotado o MQ-137.

O sinal analógico do sensor de amônia é passado por um amplificador operacional TLV8811, que condiciona o sinal para que ele atinja o intervalo ideal de entrada do microcontrolador e garante baixa interferência por ruído. O resistor de carga foi isolado da impedância de entrada do microcontrolador, evitando erros por divisões de tensão indesejadas.

Com a resistência de carga ajustada para que a concentração máxima de 500 ppm de amônia seja 600 mV (tensão de referência máxima do microcontrolador utilizado), foi possível calcular que o sistema é capaz de detectar variações inferiores a 0,01 ppm. Essa precisão é compatível com as exigências estabelecidas na literatura, que recomendam não ultrapassar o limite de 25 ppm em ambientes controlados.

Após a conclusão dos esquemáticos, obteve-se o layout da PCI referente ao módulo de temperatura, umidade e pressão, apresentado na Figura 9. Esse módulo integra sensores digitais e analógicos, com distribuição otimizada dos componentes, visando à compactação e à organização funcional do circuito. O desenho final da placa apresentou dimensões aproximadas de 31,65 mm × 42 mm.

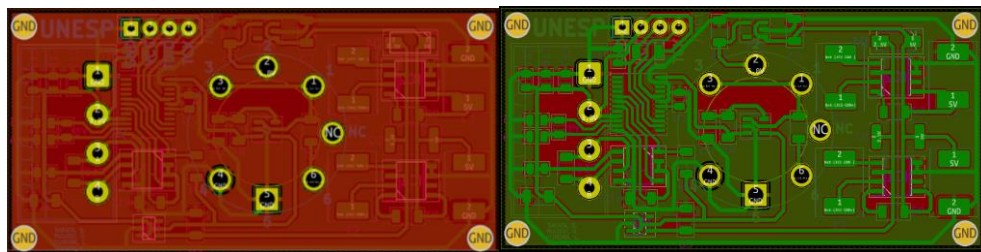
Figura 9. PCI do nó sensor de temperatura, umidade e pressão Figura direita: Face Superior, Figura Esquerda: Face Inferior



Fonte: Autor

A Figura 10 exibe o layout do módulo dedicado à medição de amônia. Por se tratar de um circuito que requer condicionamento analógico do sinal proveniente do sensor MQ-137, a placa apresenta maior área ocupada e espaçamento entre trilhas, visando a estabilidade do sinal e o controle de ruído. A PCI final projetada possui dimensões aproximadas de 32,22 mm × 64,91 mm.

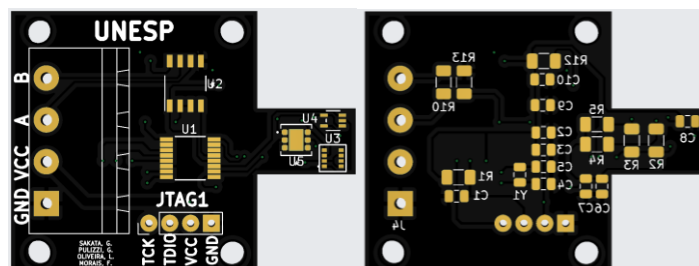
Figura 10. PCI do nó sensor de Amônia. Figura direita: Face Superior, Figura Esquerda: Face Inferior



Fonte: Autor

O desenho desenvolvido do módulo de temperatura, umidade e pressão foi enviado para a JLCPCB®, o resultado está sendo exibido na Figura 11.

Figura 11. PCI do nó sensor de temperatura, umidade e pressão na JLCPCB. Figura Direita: Face Superior, Figura Esquerda: Face Inferior



Fonte: Autor

A criação dos nós sensores foram seguindo os requisitos propostos, utilizando componentes com baixo consumo de energia e baixo custo, além de permitir a escalabilidade já que pode ser utilizados diferentes módulos sensores com o mesmo interrogador. As PCIs desenvolvidas confirmam a viabilidade teórica do sistema, tornando-o passível de fabricação futura e testes em campo.

5.5 Levantamento de estudos com aplicação em ambientes reais

Por fim, como parte dos resultados, foi realizada uma análise de estudos que aplicaram sensores e módulos similares aos utilizados neste projeto, especialmente em ambientes de produção animal ou contextos similares. Essa etapa teve como objetivo verificar a viabilidade prática dos dispositivos e suas limitações.

No estudo desenvolvido por Oliveira et al. (2025), foi proposto um sistema embarcado de baixo custo denominado ES_LC, com base no microcontrolador ESP32 e utilizando o sensor BME280 para monitoramento de temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica. O sistema foi testado por 21 dias em ambiente de criação animal, com envio de dados a cada minuto. Os resultados indicaram taxa de sucesso de transmissão (DTSR) de 94,04%, e RMSE variando entre 0,26 °C e 2,46 °C para temperatura, além de 4,37% a 16,20% para umidade relativa. Observou-se aumento do erro sob alta umidade, o que levou os autores a aplicarem curvas de calibração individualizadas, com R^2 acima de 0,98. O estudo conclui que a solução é viável técnica e economicamente para instalações avícolas, mesmo com infraestrutura limitada.

No trabalho de Godinho et al. (2025), foi desenvolvido um sistema sem fio de monitoramento e controle para ambientes avícolas, utilizando uma rede de nós sensores distribuídos. Os dispositivos coletavam dados de temperatura, umidade, dióxido de carbono e amônia, sendo enviados via Wi-Fi para uma central responsável por processar as informações e acionar atuadores. Durante os testes em campo, o sistema demonstrou confiabilidade na comunicação, mesmo sob interferências e variações de distância, sendo eficaz na manutenção dos parâmetros ambientais dentro dos limites estabelecidos. A proposta mostrou-se de baixo custo, tecnicamente robusta e adequada à realidade da avicultura intensiva.

Para aplicações voltadas à detecção de amônia, o estudo de Hofstetter et al. (2021) desenvolveu um sistema automatizado de geração de gás baseado em Arduino, utilizando o sensor MQ-137. O sistema operava com soluções líquidas de

amônia a 2% e 10%, liberadas por umidificadores ultrassônicos conforme as leituras em tempo real. O MQ-137 apresentou precisão média de 1,4% em relação a um analisador infravermelho (FTIR), com variações entre 0,2% e 2,4%. As leituras foram realizadas a 26,7 °C e 15% de umidade relativa, com média de concentração de 65,4 ppm e desvio padrão de 1,9 a 2,2 ppm. Apesar do bom desempenho, os autores ressaltaram a sensibilidade do sensor à umidade, exigindo recalibração frequente em faixas de 11% a 37%. O sensor permaneceu estável após mais de 1000 horas de uso contínuo a 50 ppm, superando o desempenho de sensores comerciais como o MX6, que apresentou erro de 7,9%.

Com relação à comunicação sem fio, Rehan et al. (2021) realizaram um estudo experimental detalhado com o módulo E32-433T20DC (semelhante ao E32-400T20S), com foco na eficiência energética em aplicações IoT alimentadas por bateria. Os autores testaram quatro modos operacionais: normal, *sleep*, *power saving* e *wake-up*. O consumo foi monitorado com osciloscópio de alta precisão, revelando que o módulo apresenta consumo insignificante no modo *sleep*, transições rápidas entre os modos e eficiência significativa em modo *power saving* sem comprometer o desempenho. O estudo conclui que o módulo é uma solução altamente viável para sistemas remotos com autonomia energética, reforçando sua aplicabilidade para zonas rurais com infraestrutura limitada.

A revisão dos estudos permite verificar que os sensores e módulos de comunicação utilizados neste projeto possuem desempenho validado em aplicações reais, reforçando a viabilidade da arquitetura proposta. O sensor MQ-137, embora sensível à umidade, mostrou estabilidade e precisão compatíveis com os requisitos da avicultura, sobretudo com manutenção periódica. O módulo E32-400T20S, embora não encontrado um estudo específico na literatura, possui equivalentes validados quanto à eficiência energética e estabilidade de comunicação.

6 CONCLUSÃO

O trabalho apresentou o desenvolvimento de uma prova de conceito teórica para uma arquitetura IoT aplicada ao monitoramento remoto de variáveis ambientais em galpões avícolas. A proposta visa promover uma solução adaptada à realidade de pequenos e médios produtores, considerando aspectos como limitações de infraestrutura e conectividade. O projeto evidencia a viabilidade teórica

para o desenvolvimento de uma rede de sensores sem fio para monitoramento ambiental em galpões de criação avícola, utilizando redes de sensores sem fio, comunicação via RS-485 e transmissão de dados por *LoRa* para a nuvem.

A arquitetura foi composta por uma rede de sensores interligados por RS-485, com um módulo interrogador central responsável por receber os dados e transmiti-los remotamente via LoRa. Os módulos sensores foram projetados para medir variáveis críticas como temperatura, umidade, pressão atmosférica e concentração de amônia, com sensores de baixo consumo e custo acessível. Já o interrogador foi dimensionado para operar de forma centralizada, com capacidade de comunicação e gerenciamento de energia, priorizando confiabilidade e escalabilidade.

O sistema ainda pode ser expandido para o monitoramento de outras variáveis, como a luminosidade, que influencia diretamente nos índices de conforto térmico. Também é importante que, em etapas futuras, sejam realizados testes com protótipos em campo para validar o funcionamento real do sistema e fazer os ajustes necessários. Esses testes são essenciais para confirmar o desempenho, a durabilidade e a precisão das leituras em situações práticas.

Foi realizada ainda uma análise crítica de estudos com sensores e tecnologias similares aplicadas em ambientes reais, demonstrando a viabilidade prática da solução proposta, ainda que limitada aos testes de bancada na presente etapa.

Com isso, o projeto contribui como base para aplicações mais modernas na avicultura, mostrando que é possível utilizar tecnologias acessíveis e eficientes para melhorar o manejo e os resultados dentro das granjas. Como trabalho futuro, recomenda-se a realização de testes de campo, a integração com atuadores e a análise de desempenho energético e comunicacional em ambientes operacionais.

REFERÊNCIAS

- ABBASI, A. Z. et al. A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. **Computer Standards & Interfaces**, v. 36, n. 2, p. 263-270, 2014.
- ABPA – Brazilian Association of Animal Protein. **Relatório Anual 2025**. 2025. Disponível em: < <https://abpa-br.org/wp-content/uploads/2025/04/ABPA.-Relatorio-Anual-2025.pdf>>. Acesso em: abr. 2025.
- ABO-AL-ELA, H. G. et al. Stress and immunity in poultry: light management and nanotechnology as effective immune enhancers to fight stress. **Cell Stress and Chaperones**, v. 26, n. 3, p. 457-472, 2021.
- ABRANCHES, M. O.; SILVA, G. A. M.; TAVARES, Q. G.; PAULA, L. B.; SANTOS, L. C. Efeito do uso de Bioestimulantes na cultura do feijão vagem (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Científica Rural**. Bagé-RS, v. 24, n. 1, p. 1-11. 2022. Disponível em: <<http://revista.urcamp.tche.br/index.php/RCR/article/view/4024/pdf>>. Acesso em: 24 abr 2022.
- ABREU, P.G. **Sistemas de aquecimento em piso, com resistência elétrica, para criação de aves**. Viçosa: UFV, 1994. 82 p. Tese (Mestrado) - Construções Rurais e Ambiência, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 1994.
- AHADUZZAMAN, M. et al. Characterization of poultry house dust using chemometrics and scanning electron microscopy imaging. **Poultry science**, v. 100, n. 7, p. 101188, 2021.
- AHMED, G. et al. An approach towards IoT-based predictive service for early detection of diseases in poultry chickens. **Sustainability**, v. 13, n. 23, p. 13396, 2021.
- ALI, A. et al. Technologies and challenges in developing machine-to-machine applications: A survey. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 83, p. 124-139, 2017.
- ALI, M. L.; RAHMAN, M. A.; TAUJUDDIN, N.S. A. M. Smart Chicken Farm Monitoring System. **Evolution in Electrical and Electronic Engineering**, v. 1, n. 1, p. 317-325, 2020.
- ALQURASHI, H.; BOUABDALLAH, F.; KHAIRULLAH, E. SCAP SigFox: A scalable communication protocol for low-power wide-area IoT networks. **Sensors**, v. 23, n. 7, p. 3732, 2023.
- APALOWO, O. O.; EKUNSEITAN, D. A.; FASINA, Y. O. Impact of heat stress on broiler chicken production. **Poultry**, v. 3, n. 2, p. 107-128, 2024.
- ARAÚJO, M. J. **Fundamentos de agronegócios**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2007.
- AZIZ, T.; BARNES, H. John. Harmful effects of ammonia on birds. 2010.

BARNABÉ, J. M. C.; PANDORFI, H.; ALMEIDA, G. L. P.; GUISELINI, C.; JACOB, A. L. Conforto térmico e desempenho de bezerras Girolando alojadas em abrigos individuais com diferentes coberturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.19, n.5, p.481–488, 2015.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/18071929/agriambi.v19n5p481-488>.

BAKER, E. "Open source data Logger for low-cost environmental monitoring". **Biodiversity Data Journal**. v.2. ed. 1059. Fev. 2014.

DOI: <https://doi.org/10.3897/BDJ.2.e1059>.

BEKER, A. et al. Atmospheric ammonia concentration effects on broiler growth and performance. **Journal of Applied Poultry Research**, v. 13, n. 1, p. 5-9, 2004.

BOCCATO, V. R. C. Metodologia da pesquisa bibliográfica na área odontológica e o artigo científico como forma de comunicação. **Rev. Odontol.** Univ. Cidade São Paulo, São Paulo, v. 18, n. 3, p. 265-274, 2006.

BORGIA, E. "The Internet of Things vision: Key features applications and open issues". **Comput. Commun.** v. 54. p. 1-31. Dez. 2014.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2014.09.008>.

BOSCH SENSORTEC. **BME280 Digital humidity, pressure and temperature sensor**. 2024.

BOTTA, A.; DONATO, W.; PERSICO, V.; PESCAPÉ, A. "Integration of Cloud Computing and Internet of Things: a Survey," **Journal of Future Generation Computer Systems**, p. 1-54, 2015.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2015.09.021>.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **AGROSTAT - Estatísticas de comércio exterior do agronegócio brasileiro**. 2024. Disponível em: <<https://indicadores.agricultura.gov.br/QvAjaxZfc/QvsViewClient.aspx?public=only&size=long&host=QVS%40masrv1005&name=Temp/7d63fc539e244e90876c8287458c4755.html>>. Acesso em: 04 out. 2024.

BIST, R. B. et al. Sustainable poultry farming practices: a critical review of current strategies and future prospects. **Poultry Science**, v. 103, n. 12, p. 104295, 2024.

BUDIARTO, R. et al. A. Smart chicken farming: monitoring system for temperature, ammonia levels, feed in chicken farms. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing. p. 012175, 2020.

BUFFINGTON, D. E.; COLLAZO-AROCHO, A.; CANTON, G. H.; PITT, D.; THATCHER, W. W.; COLLIER, R. J. Black globe-humid index (BGHI) as comfort equation for dairy cows. **Transactions of ASAE**. v.24, p.711-14, 1981.

DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.34325>.

CAMBRA-LÓPEZ, M. et al. Airborne particulate matter from livestock production systems: A review of an air pollution problem. **Environmental pollution**, v. 158, n. 1, p. 1-17, 2010.

CARRILLO, D.; SEKI, J. Rural area deployment of internet of things connectivity: LTE and LoRaWAN case study. In: **2017 IEEE XXIV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)**. IEEE, 2017. p. 1-4.

CORREIA, F.; ALENCAR, M.; ASSIS, K. Stochastic modeling and analysis of the energy consumption of wireless sensor networks. **IEEE Latin America Transactions**, v. 21, n. 3, p. 434-440, 2023.

CRUZ, Edmanuel et al. AI-Based Monitoring for Enhanced Poultry Flock Management. **Agriculture**, v. 14, n. 12, p. 2187, 2024.

CUAN, K. et al. Automatic Newcastle disease detection using sound technology and deep learning method. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 194, p. 106740, 2022.

CHASE, O. A.; CARVALHO, A. N.; ANDRADE, E.S.S.; ALMEIDA, J. F.; COSTA, C. T. Environmental Measurement Technology: An Approach to the Amazonian Environment. **IEEE Latin America Transactions**. v. 16, n. 4, Abr. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/TLA.2018.8362134>.

CONDY, M. W.; NELSON, C. B. "Using smart edge IoT devices for safer rapid response with industry IoT control operations". **Proc. IEEE**. v. 104, n. 5, p. 938-946, Mai. 2016. DOI: 10.1109/JPROC.2015.2513672.

EBYTE. **E32-400M20S – 433/470MHz 1W Wireless Transceiver Module based on SX1276**. Chengdu Ebyte Electronic Technology Co., Ltd., 2021

EMMER, C.; GLAESNER, K. H.; PFOUGA, A.; STJEPANDIĆ, J. "Advances in 3D Measurement Data Management for Industry 4.0". **Procedia Manufacturing**. v. 11, p. 1335 - 1342, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.262>.

ESMAY, M. L. **Principles of animal environment**. Westport: AVI Publishing Company Inc. 2.ed. p. 325, 1982.

FAROOQ, M. S. et al. A survey on the role of iot in agriculture for the implementation of smart livestock environment. **IEEE Access**, v. 10, p. 9483-9505, 2022.

FERALDI, R; ENRIKO, K. A; ESTANANTO. Machine Learning Model for Temperature and Humidity Automatic Control in Smart Poultry Farm. **2022 International Conference on Advanced Creative Networks and Intelligent Systems (ICACNIS)**. p. 1-5, 2022. DOI: 10.1109/ICACNIS57039.2022.10055302

FERENTINOS, K. P.; KATSOULAS, N.; TZOUNIS, A.; BARTAZANAS, T.; KITTAS, C. Wireless sensor networks for greenhouse climate and plant condition assessment. **Biosystems Engineering**. v.153, p.70-81, Jan. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.11.005>.

FERREIRA, I. C.; SILVA, J. C. L.; NETO, L. B. F.; SANTOS, T. J. L.; CARVALHO, J. C. A. A contribuição e relevância do agronegócio para o Brasil. *Revista CEDS, São Luís*, v. 2, n. 10, jan./jul 2022.

FONSECA, A.; ANDRADE, C.; SANTOS, J. A. Agricultural Water Security under Climate Change in the Iberian Peninsula. *Water*, v. 14, n. 5, p. 768. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/w14050768>.

GAST, M. **802.11 wireless networks: the definitive guide**. " O'Reilly Media, Inc.", 2005.

GODINHO, A. et al. Wireless Environmental Monitoring and Control in Poultry Houses: A Conceptual Study. *IoT*, v. 6, n. 2, p. 32, 2025.

HOFSTETTER, D.; FABIAN, E.; LORENZONI, A. G. Ammonia generation system for poultry health research using arduino. *Sensors*, v. 21, n. 19, p. 6664, 2021.

JAWAD, H. M. et al. Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture: A review. *Sensors*, v. 17, n. 8, p. 1781, 2017.

KOCH, V.; KUGE, S.; GEISSBAUER, R.; SCHRAUF, S. Industry 4.0: Opportunities and challenges of the industrial internet. **Stratety and Company**, 2014.

KONKOL, D. et al. Recent innovations in various methods of harmful gases conversion and its mechanism in poultry farms. *Environmental Research*, v. 214, p. 113825, 2022.

KUMAR, S. et al. IoT based automated poultry farm for layer chicken using artificial intelligence techniques. In: **2023 International Conference on Applied Intelligence and Sustainable Computing (ICAISC)**. IEEE, 2023. p. 1-7.

LEE, K. et al. IEEE standard for a smart transducer interface for sensors and actuators common functions, communication protocols, and transducer electronic data sheet (TEDS) formats. **IEEE Instrumentation and Measurement Society**, 2007.

LEITE, M. V. et al. Enhancing Environmental Control in Broiler Production: Retrieval-Augmented Generation for Improved Decision-Making with Large Language Models. **AgriEngineering**, v. 7, n. 1, p. 12, 2025

LI, H. et al. Assessment of frequent litter amendment application on ammonia emission from broilers operations. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 63, n. 4, p. 442-452, 2013.

LIN, H. et al. Thermoregulation responses of broiler chickens to humidity at different ambient temperatures. I. One week of age. *Poultry Science*, v. 84, n. 8, p. 1166-1172, 2005.

LIU, H. et al. Identifying images of dead chickens with a chicken removal system integrated with a deep learning algorithm. *Sensors*, v. 21, n. 11, p. 3579, 2021.

LORA ALLIANCE, LoRa Documentation, 2023.

MAPA. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Agropecuária puxa o PIB de 2017. Brasília, 2017.

MADKOUR, M. et al. Mitigating the detrimental effects of heat stress in poultry through thermal conditioning and nutritional manipulation. **Journal of Thermal Biology**, v. 103, p. 103169, 2022.

MARQUES, F. **A corrida da indústria 4.0**. ed. 259. Set. 2017. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/2017/09/22/a-corrida-da-industria-4-0>. Acesso em: 21 Mai. 2019.

MEKKI, K.; BAJIC, E.; CHAXEL, F.; MEYER, F. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. **ICT Express**. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005>.

MILES, D. M.; BRANTON, S. L.; LOTT, B. D. Atmospheric ammonia is detrimental to the performance of modern commercial broilers. **Poultry science**, v. 83, n. 10, p. 1650-1654, 2004.

NASSEM, S.; ANNIE, J. K. Ammonia production in poultry houses can affect health of humans, birds, and the environment—techniques for its reduction during poultry production. **Environmental Science and Pollution Research**. v. 25, p. 15296-15293, 2018.

NAVARRO, E.; COSTA, N.; PEREIRA, A. A systematic review of IoT solutions for smart farming. **Sensors**, v. 20, n. 15, p. 4231, 2020.

OLIVEIRA, C. E. A. et al. Development and Validation of Data Acquisition System for Real-Time Thermal Environment Monitoring in Animal Facilities. **AgriEngineering**, v. 7, n. 2, p. 45, 2025.

OLIVEIRA, M. D. et al. Ammonia emission in poultry facilities: a review for tropical climate areas. **Atmosphere**, v. 12, n. 9, p. 1091, 2021.

OLUWAGBENGA, E. M.; FRALEY, G. S. Heat stress and poultry production: a comprehensive review. **Poultry science**, v. 102, n. 12, p. 103141, 2023.

PANTAZIS, N. A.; NIKOLIDAKIS, S. A.; VERGADOS, D. D. “Energy-efficient routing protocols in wireless sensor networks: A survey”. **IEEE Communications surveys&tutorials**. v. 15, n.2 , p. 551-591, 2013. DOI: 10.1109/SURV.2012.062612.00084.

PERISSINOTO, M.; MOURA, D. J. Determinação do conforto térmico de vacas leiteiras utilizando a mineração de dados. **Revista Brasileira de Engenharia de Biossistemas**. v.1, p.117-126, 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2007v1n2p117-126>.

PERTENCE JR, A. **Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos-8**. Bookman Editora, 2015.

PROVOLO, G. et al. An Internet of Things framework for monitoring environmental conditions in livestock housing to improve animal welfare and assess environmental impact. **Animals**, v. 15, n. 5, p. 644, 2025.

PUTHAL, D.; SAHOO, B. P. S.; MISHRA, S.; SWAIN, S. "Cloud Computing Features, Issues, and Challenges: A Big Picture". In **International Conference on Computational Intelligence and Networks (CINE)**, p. 116-123, 2015. DOI: 10.1109/CINE.2015.31.

RATHMANN, R.; BITTENCOURT, S. R. M. de; MENDONÇA, A. M. Planos de ação tecnológica para os setores do sistema energético, agricultura, florestas e outros usos da terra. 2021.

REHAN, S.; ALKABAIR, A.; HASSAN, E. Energy Efficiency Evaluation of the E32-433T20DC Ebyte LoRa Module in Battery-Powered IoT Applications. **Int. Sci. and Technology J**, v. 25, p. 1-18, 2021.

REIS, P. N. C.; SCAVARDA, A.; MACHADO, F. V. Agricultura 4.0: O papel das tecnologias emergentes na modernização e sustentabilidade do Setor Agrícola. I **Seven Agricultural Sciences Congress**. 2024

RIBEIRO, R. et al. Generating action plans for poultry management using artificial neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 161, p. 131-140, 2019.

RODRIGUES, L. C.; QUEIROGA, A. P. G.; MILHOSSI, J. F. Indústria 4.0 e a transformação digital. **Brazilian Journal of Development**. Curitiba, v. 8, n. 2, p.14093-14101, fev. 2022.

ROUTIS, G.; ROUSSAKI, I. Low power IoT electronics in precision irrigation. **Smart Agricultural Technology**, v. 5, p. 100310, 2023.

RUIZ-GARCIA, L. et al. A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: state of the art and current trends. **sensors**, v. 9, n. 6, p. 4728-4750, 2009.

SAAVEDRA, E. et al. A universal testbed for IOT wireless technologies: Abstracting latency, error rate and stability from the IOT protocol and hardware platform. **Sensors**, v. 22, n. 11, p. 4159, 2022.

SANTOS, B. P.; ALBERTO, A.; LIMA, T. D. F. M.; CHARRUAS-SANTOS, F. M. B. Indústria 4.0: Desafios e Oportunidades. **Revista Produção e Desenvolvimento**, Rio de Janeiro, v.4. n.1, p.111-124, 2018.

SASIKALA, P. "Research challenges and potential green technological applications in cloud computing." **International Journal of Cloud Computing**, v. 2, n. 1, p. 1-19, 2013. DOI: 10.1504/IJCC.2013.050953.

SCHNEIDER, I. et al. Adoção de tecnologias digitais para a apropriação de conhecimento, tecnologia e fonte de vantagem competitiva em propriedades rurais de gestão familiar. **Revista on line de Política e Gestão Educacional**, p. e025007-e025007, 2025.

SILVA, F. H. R. **Um estudo sobre os benefícios e os riscos de segurança na utilização de Cloud Computing**; 2010. 15f. Artigo científico de conclusão de curso apresentado no Centro Universitário Augusto Motta, UNISUAM-RJ.

STOUT, D. F. **Handbook of operational amplifier circuit design**. McGraw-Hill, 1982.

TANG, S. Y.; HU, Y. H. Decomposition System that Automatically Tracks Ammonia Concentration. **Sensors and Materials**, v. 34, n. 5, 2022.

TEXAS INSTRUMENTS. **HDC1080 Low Power, High Accuracy Digital Humidity Sensor with Temperature Sensor**. 2016.

TEXAS INSTRUMENTS. **LMT85 1.8-V, SC70/TO-92/TO-92S, Analog Temperature Sensors**. 2017.

TEXAS INSTRUMENTS. **MSP430AFE2x3, MSP430AFE2x2, MSP430AFE2x1 Mixed-Signal Microcontrollers**. 2018.

TEXAS INSTRUMENTS. **MSP430FR235x, MSP430FR215x Mixed-Signal Microcontrollers**. 2019.

TEXAS INSTRUMENTS. **MSP430FR2422 Mixed-Signal Microcontroller**. 2021.

THOM, E.C. **Cooling degrees - days air conditioning, heating, and ventilating**. Transactions of the ASAE. v.55, n.7, p.65-72, 1958.

TZOUNIS, A. et al. Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. **Biosystems engineering**, v. 164, p. 31-48, 2017.

WANG, N.; ZHANG, N.; WANG, M. Wireless sensors in agriculture and food industry—Recent development and future perspective. **Computers and electronics in agriculture**, v. 50, n. 1, p. 1-14, 2006.

WICAKSONO, D; PERDANA, D.; MAYASARI, R. Design and analysis automatic temperature control in the broiler poultry farm based on wireless sensor network. **2017 2nd International conferences on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE)**. p. 450-455, 2017. DOI: 10.1109/ICITISEE.2017.8285549.

WINSEN ELECTRONICS. **MQ137 Ammonia Gas Sensor**. 2015.

WU, D. et al. Information perception in modern poultry farming: A review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 199, p. 107131, 2022.

XIN, H. et al. Environmental impacts and sustainability of egg production systems. **Poultry Science**, v. 90, n. 1, p. 263-277, 2011.