RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese/dissertação será disponibilizado somente a partir de 29/05/2028

At the author's request, the full text of this thesis/dissertation will not be available online until May 29, 2028

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu

FCA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
UNESP | BOTUCATU

DANILO PAZIAN PAULO

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA AUTÔNOMO DE CONTROLE AMBIENTAL DE AVICULTURA DE CONFINAMENTO PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Botucatu

2026

DANILO PAZIAN PAULO

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA AUTÔNOMO DE CONTROLE AMBIENTAL DE AVICULTURA DE CONFINAMENTO PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Fernando de Lima Caneppele

Botucatu

2026

P331d

Paulo, Danilo Pazian
Desenvolvimento de sistema autônomo de controle ambiental de avicultura de confinamento para melhoria da eficiência energética. / Danilo Pazian Paulo. -- Botucatu, 2026
166 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu
Orientador: Fernando de Lima Caneppele

1. Análise energética. 2. Análise ambiental. 3. Aviários. 4. Agricultura sustentável. 5. Desenvolvimento sustentável. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

Impacto potencial desta pesquisa

Esta pesquisa apresenta impacto potencial significativo ao propor a integração entre controle ambiental de precisão e eficiência energética na avicultura intensiva, setor estratégico para a segurança alimentar global. Ao consolidar parâmetros técnicos ótimos de ambiência e desenvolver um sistema autônomo de monitoramento e atuação sobre variáveis críticas, o estudo contribui para a redução de perdas produtivas, melhoria da conversão alimentar e mitigação do estresse térmico, elevando simultaneamente o desempenho zootécnico e o bem-estar animal.

Do ponto de vista sistêmico, os resultados favorecem a racionalização do consumo de energia elétrica, a redução da pegada de carbono e o uso mais eficiente de recursos naturais, fortalecendo a sustentabilidade econômica e ambiental da atividade. Dessa forma, a pesquisa oferece subsídios técnicos para modernização de granjas, formulação de políticas públicas e investimentos em tecnologias limpas, alinhando a produção avícola aos princípios do ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável) e do ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis).

Potential Impact of this research

This research has substantial potential impact by proposing the integration of precision environmental control and energy efficiency in intensive poultry production, a strategic sector for global food security. By consolidating optimal technical parameters for housing conditions and developing an autonomous system for monitoring and acting on critical variables, the study contributes to reducing production losses, improving feed conversion, and mitigating heat stress, while simultaneously enhancing zootechnical performance and animal welfare.

From a systemic perspective, the results support the rational use of electricity, the reduction of the carbon footprint, and the more efficient use of natural resources, thereby strengthening the economic and environmental sustainability of poultry production. In this way, the research provides technical evidence to support farm modernization, public policy design, and investment in clean technologies, aligning poultry production with the principles of SDG 2 (Zero Hunger) and SDG 12 (Responsible Consumption and Production).

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

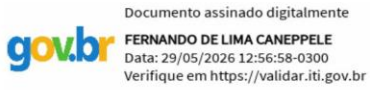
Câmpus de Botucatu

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

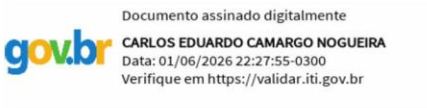
TÍTULO DA TESE: DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA AUTÔNOMO DE CONTROLE AMBIENTAL DE AVICULTURA DE CONFINAMENTO PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

AUTOR: DANILO PAZIAN PAULO
ORIENTADOR: FERNANDO DE LIMA CANEPPELE

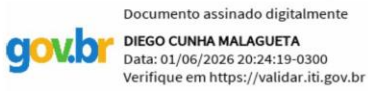
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola, pela Comissão Examinadora:



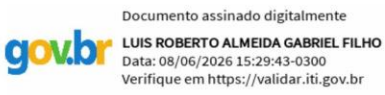
Prof. Dr. FERNANDO DE LIMA CANEPPELE (Participaçao Virtual)



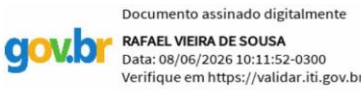
Prof. Dr. CARLOS EDUARDO CAMARGO NOGUEIRA (Participaçao Virtual)
Centro de Ciencias Exatas e Tecnológicas / Universidade Estadual do Oeste do Paraná



Prof. Dr. DIEGO CUNHA MALAGUETA (Participaçao Virtual)
Engenharia Mecânica / Universidade Federal do Rio de Janeiro



Prof. Dr. LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO (Participaçao Virtual)
Gestão, Desenvolvimento e Tecnologia / UNESP / Câmpus de Tupã - FCE



Prof. Dr. RAFAEL VIEIRA DE SOUSA (Participaçao Virtual)

Botucatu, 29 de maio de 2026.

A minha amada família,

Rose, Mel e Fê,

dedico

AGRADECIMENTOS

À minha esposa pelo apoio incondicional e aos meus filhos pela compreensão e paciência nos dias que fiquei ausente, mesmo estando dentro da mesma casa.
Aos meus queridos pais pelo incentivo e motivação em todo tempo.
Ao Prof. Dr. Fernando Caneppele, pela orientação, ensino e paciência.
A todos os professores e funcionários da FCA.
Aos meus amigos e parceiros de docência do IFSP – Campus Birigui que me apoiaram e incentivaram no processo de afastamento para titulação, absorvendo a carga de disciplinas que estavam sob minha responsabilidade.
Aos demais servidores do IFSP – Campus Birigui, em especial aos da Coordenadoria de Gestão Pessoal que sempre me apoiaram e auxiliaram nas questões documentais do afastamento que me permitiram concluir este doutorado.

“Porém não é nosso papel dominar todas as marés do mundo, e sim fazer o que está em nós para socorro dos anos em que fomos postos, extirpando o mal nos campos que conhecemos, para que os que viverem depois tenham terra limpa para cultivar. O clima que enfrentarão não nos cabe imaginar” - Gandalf.

Tolkien, J. R. R. O retorno do rei: Terceira parte de O Senhor dos Anéis / J. R. R. Tolkien. Tradução de Ronald Kyrmse. 1. ed. Rio de Janeiro: Harper Collins Brasil, 2019. p. 1264.

RESUMO

A avicultura desempenha papel estratégico na segurança alimentar global, especialmente em países em desenvolvimento, diante do crescimento populacional e do aumento da demanda por proteínas de alto valor biológico e custo acessível. Entretanto, as mudanças climáticas, o aumento da temperatura média global e a maior frequência de eventos extremos impõem desafios significativos aos sistemas intensivos de produção, tornando o controle das variáveis ambientais nos espaços de confinamento fator determinante para a eficiência produtiva, o bem-estar animal e a sustentabilidade energética. Esta tese teve como objetivo geral desenvolver e implementar um sistema autônomo de controle ambiental para espaços de confinamento avícola, com base no sensoriamento de temperatura do ar, umidade relativa e luminosidade, atuando principalmente sobre os sistemas de ventilação, refrigeração e umidificação, visando otimizar o consumo de energia elétrica e maximizar o desempenho produtivo de frangos de corte e aves poedeiras. O trabalho foi estruturado em quatro capítulos complementares, sendo que no Capítulo 1, realizou-se uma revisão sistemática da literatura para identificar as principais variáveis ambientais que impactam a produção de aves e ovos. Foram analisados 52 artigos científicos, evidenciando-se como variáveis críticas: temperatura, umidade relativa, qualidade do ar (especialmente concentração de amônia e gás carbônico), iluminação, ventilação, densidade de alojamento, ruído e enriquecimento ambiental. Constatou-se que temperatura e qualidade do ar exercem influência direta sobre consumo de ração, conversão alimentar, ganho de peso, produção e qualidade de ovos, além da taxa de mortalidade. No Capítulo 2, desenvolveu-se nova revisão sistemática com foco na determinação dos valores ótimos de temperatura do ar, umidade relativa, concentração de amônia e luminosidade. Verificou-se que a temperatura ideal varia conforme a fase produtiva, situando-se entre 18 °C e 38 °C para frangos de corte e entre 14 °C e 28 °C para poedeiras adultas. A umidade relativa recomendada situa-se entre 50% e 70%, a concentração de amônia deve permanecer abaixo de 20 ppm e os níveis de luminosidade devem ser ajustados conforme o sistema produtivo, com cerca de 5 lux e 16 horas de luz para poedeiras e programas graduais para frangos de corte. Esses parâmetros consolidam base técnica para o manejo ambiental racional. O Capítulo 3 abordou os principais métodos de controle ambiental utilizados na avicultura. Identificou-se que o sistema Liga/Desliga ainda predomina

(aproximadamente 89% das operações), sobretudo por seu baixo custo e simplicidade operacional. Entretanto, observou-se crescente adoção de sistemas automatizados, monitoramento remoto e tecnologias baseadas em Internet das Coisas (IoT), que possibilitam maior precisão, melhor gestão energética e respostas mais rápidas às variações ambientais. No Capítulo 4 foi proposta e desenvolvida a arquitetura de um sistema autônomo de controle ambiental, integrando sensores, aquisição de dados e lógica de atuação direcionada. O sistema foi concebido para operar com base em índices biometeorológicos, como o Índice de Temperatura de Globo Negro e Umidade (ITGU), permitindo decisões automatizadas voltadas à manutenção do conforto térmico com racionalização do consumo energético. A proposta demonstra viabilidade técnica para aplicação tanto em sistemas de frangos de corte quanto de poedeiras, contribuindo para maior estabilidade produtiva frente às variações climáticas externas. De forma integrada, a tese evidencia que o aprimoramento do controle ambiental em instalações avícolas não apenas melhora indicadores zootécnicos, mas também reduz desperdícios energéticos, perdas produtivas e impactos ambientais. Ao promover eficiência energética associada ao bem-estar animal, o estudo contribui diretamente para o fortalecimento da agricultura sustentável e para a consolidação de práticas alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, especialmente o ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável) e o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis). Conclui-se que a modernização tecnológica da ambiência avícola, fundamentada em critérios científicos, sensoriamento contínuo e automação inteligente, constitui estratégia essencial para aumentar a competitividade do setor, reduzir a vulnerabilidade às mudanças climáticas e assegurar produção de proteína animal de forma economicamente viável, ambientalmente responsável e socialmente sustentável.

Palavras-chave: análise energética; análise ambiental; aviários; agricultura sustentável; desenvolvimento sustentável.

ABSTRACT

Poultry production plays a strategic role in global food security, especially in developing countries, in the context of population growth and increasing demand for high biological-value proteins at affordable cost. However, climate change, rising mean global temperatures, and the higher frequency of extreme weather events pose major challenges to intensive production systems, making the control of environmental variables in confined spaces a determining factor for productive efficiency, animal welfare, and energy sustainability. This thesis aimed to develop and implement an autonomous environmental control system for poultry confinement facilities, based on sensing air temperature, relative humidity, and light intensity, acting primarily on ventilation, cooling, and humidification systems in order to optimize electricity consumption and maximize the productive performance of broilers and laying hens. The work was structured into four complementary chapters. In Chapter 1, a systematic literature review was conducted to identify the main environmental variables that affect poultry and egg production. A total of 52 scientific articles were analyzed, highlighting as critical variables: temperature, relative humidity, air quality (especially ammonia and carbon dioxide concentration), lighting, ventilation, stocking density, noise, and environmental enrichment. It was found that temperature and air quality directly influence feed intake, feed conversion, weight gain, egg production and quality, as well as mortality rate. In Chapter 2, a second systematic review was carried out focusing on the determination of optimal values for air temperature, relative humidity, ammonia concentration, and light intensity. It was observed that the ideal temperature range varies according to the production phase, lying between 18 °C and 38 °C for broilers and between 14 °C and 28 °C for adult laying hens. Recommended relative humidity ranges from 50% to 70%, ammonia concentration should remain below 20 ppm, and light levels must be adjusted according to the production system, with approximately 5 lux and 16 hours of light for laying hens and gradual lighting programs for broilers. These parameters provide a consolidated technical basis for rational environmental management. Chapter 3 addressed the main environmental control methods used in poultry production. It was identified that simple on/off control systems still predominate (approximately 89% of operations), mainly due to their low cost and operational simplicity. Nevertheless, a growing adoption of automated systems, remote monitoring, and Internet of Things (IoT)-based technologies has been observed, which enable

greater precision, improved energy management, and faster responses to environmental fluctuations. In Chapter 4, the architecture of an autonomous environmental control system was proposed and developed, integrating sensors, data acquisition, and targeted control logic. The system was designed to operate based on biometeorological indices, such as the Black Globe Humidity Index (BGHI), allowing automated decisions aimed at maintaining thermal comfort while rationalizing energy consumption. The proposed system demonstrates technical feasibility for application in both broiler and layer production systems, contributing to greater production stability under variable external climatic conditions. Taken together, the thesis shows that improving environmental control in poultry facilities not only enhances zootechnical performance indicators but also reduces energy waste, production losses, and environmental impacts. By promoting energy efficiency in association with animal welfare, the study directly contributes to strengthening sustainable agriculture and consolidating practices aligned with the United Nations Sustainable Development Goals, especially SDG 2 (Zero Hunger and Sustainable Agriculture) and SDG 12 (Responsible Consumption and Production). It is concluded that the technological modernization of poultry housing environments, grounded in scientific criteria, continuous sensing, and intelligent automation, is an essential strategy to increase the sector's competitiveness, reduce vulnerability to climate change, and ensure animal protein production that is economically viable, environmentally responsible, and socially sustainable.

Keywords: energy analysis; environmental analysis; aviaries; sustainable agriculture; sustainable development.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Capítulo 1 – Principais variáveis ambientais de controle para produção de aves e ovos

Figura 1 - Crescimento populacional mundial de 1950 a 2023 35

Figura 2 - Crescimento populacional de 1950 a 2025 36

Figura 3 - Exportações brasileiras de carne de frango por região em 2024 37

Figura 4 - Variáveis ambientais mais estudadas 42

Figura 5 - Variáveis produtivas mais encontradas na revisão 43

Figura 6 - Número de publicações por ano 46

Figura 7 - Pesquisadores com mais artigos 47

Capítulo 2 – Valores ótimos de temperatura do ar, umidade relativa do ar, e luminosidade para produção de aves e ovos

Figura 1 - Variáveis produtivas mais usadas como parâmetro 61

Figura 2 - Objetivos dos trabalhos com valores referenciados 63

Figura 3 - Quantidade de trabalhos por escopo estudado 64

Figura 4 - Gráfico da quantidade de trabalhos por ano de publicação 65

Figura 5 - Gráfico da quantidade de trabalhos por tipo/finalidade de ave 66

Figura 6 - Gráfico do número de trabalhos por pesquisador 67

Capítulo 3 – Estudo dos principais métodos de controle das variáveis ambientais dos espaços de confinamento de aves

Figura 1 - Sistemas/variáveis mais controlados 81

Figura 2 - Métodos de controle abordados 83

Figura 3 - Trabalhos analisados por ano de publicação 86

Figura 4 - Variáveis ambientais mais monitoradas 87

Figura 5 - Quantidade de trabalhos analisados por tipo/finalidade de ave 88

Figura 6 - Tipo de monitoramento apresentado nos trabalhos analisados 89

Figura 7 - Plataforma/serviço de dados em nuvem 89

Figura 8 - Validação do sistema proposto 90

Figura 9 - Nuvem das palavras-chave das publicações 93

Capítulo 4 – Elaboração de protótipo de controle ambiental avícola, aquisição e análise dos dados obtidos

Figura 1 – Fluxograma do processo de controle 112

Figura 2 – Desenho da maquete usada para teste em bancada 114

Figura 3 – Maquete montada e com revestimento 118

Figura 4 – Vedação do telhado com borracha NBR 119

Figura 5 – Instalação dos conjuntos do sistema de resfriamento 119

Figura 6 – Anteparo para redução do espaço de controle da maquete 120

Figura 7 – Instalação dos sensores internos 121

Figura 8 – Parte externa do sistema de umidificação 121

Figura 9 – Parte interna do sistema de umidificação 122

Figura 10 – Sensor de temperatura e umidade relativa externas 122

Figura 11 – Esquemático do circuito de controle e sinais 123

Figura 12 – Placa de prototipagem para ESP32 124

Figura 13 – Esquemático do circuito de acionamentos 125

Figura 14 – Wattímetro digital e fontes de alimentação 124

Figura 15 – Tgn x Tbs e dados da regressão ajustada 128

Figura 16 – Análise gráfica dos resíduos do modelo linear 129

Figura 17 – Gráfico dos dados corrigidos pela regressão de Deming 130

Figura 18 – Gráfico de análise de Bland-Altman de Tgn_{corr} x Tbs 131

Figura 19 – Gráfico da regressão linear entre P_{watti} e P_{ref} 134

Figura 20 – Gráficos da análise de resíduos da calibração de P_{watti} 135

Figura 21 – Diagrama de Bland-Altman para P_{watti} e P_{ref} 136

Figura 22 – Erro percentual de P_{watti} em função de P_{ref} 137

Figura 23 – Conjunto Fuzzy para entrada ITGU 139

Figura 24 – Conjunto Fuzzy para entrada UR_i 140

Figura 25 – Protótipo completo para avaliação 144

Figura 26 – Camada de maravalha de madeira pinus 144

Figura 27 – Tela de monitoramento do protótipo com controle padrão 146

Figura 28 – Tela de monitoramento do protótipo com controle ITGU/Fuzzy 147

Figura 29 – Série temporal do consumo diário (kWh) e Tbs_e média (ºC) 152

Figura 30 – Relação consumo diário X carga térmica 152

Figura 31 – Boxplot do consumo diário X tratamento 153

Figura 32 – Análise dos resíduos após ajuste ao modelo GLS 155

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1 – Principais variáveis ambientais de controle para produção de aves e ovos

Tabela 1 – Quantidade de artigos encontrados por ferramenta de pesquisa/base de dados 39

Capítulo 2 – Valores ótimos de temperatura do ar, umidade relativa do ar, e luminosidade para produção de aves e ovos

Tabela 1 – Quantidade de trabalhos científicos encontrados por base de dados 58

Capítulo 3 – Estudo dos principais métodos de controle das variáveis ambientais dos espaços de confinamento de aves

Tabela 1 – Quantidade de publicações encontradas por base de dados pesquisada 78

Tabela 2 – Publicações com variável e método de controle 83

Capítulo 4 – Elaboração de protótipo de controle ambiental avícola, aquisição e análise dos dados obtidos

Tabela 1 – Conjunto de regras para lógica Fuzzy 141

Tabela 2 – Planejamento sorteado para o delineamento experimental 149

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABPA	Associação Brasileira de Proteína Animal
AIC	Critério de Informação de Akaike
BRICS	Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul
DIC	Delineamento Inteiramente Casualizado
ESG	*Environmental, Social and Governance*
GEE	Gases do Efeito Estufa
GLS	*Generalized Least Squares* - Mínimos Quadrados Generalizados
IFSP	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo
IoT	*Internet of Things*
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
ITGU	Índice de Temperatura de Globo Negro e Umidade
LCD	*Liquid Crystal Display*
LED	*Light Emitting Diode*
MAPA	Ministério da Agricultura e Pecuária
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OLS	*Ordinary Least Squares* - Mínimos Quadrados Ordinários
ONU	Organização das Nações Unidas
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
PVC	Cloreto de polivinila
RNA	Redes Neurais Artificiais
UR	Umidade Relativa do ar

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL 29
CONTEXTUALIZAÇÃO 29
JUSTIFICATIVA 31
OBJETIVOS DA TESE 33
Objetivo geral 33
Objetivos específicos 33
CAPÍTULO 1 - PRINCIPAIS VARIÁVEIS AMBIENTAIS DE CONTROLE PARA PRODUÇÃO DE AVES E OVOS 34
1.1 INTRODUÇÃO 35
1.1.1 Contextualização 35
1.1.2 Justificativa 37
1.1.3 Objetivos do capítulo 38
1.2 MATERIAL E MÉTODOS 38
1.2.1 Bases de dados consultadas 38
1.2.2 Critérios de seleção de estudos 39
1.3 RESULTADOS 40
1.3.1 Variáveis identificadas 40
1.3.2 Importância de cada variável 44
1.4 DISCUSSÃO 45
1.4.1 Análise dos resultados 45
1.4.2 Implicações para a produção avícola 47
1.5 CONCLUSÃO 48
REFERÊNCIAS 50
CAPÍTULO 2 - VALORES ÓTIMOS DE TEMPERATURA DO AR, UMIDADE RELATIVA DO AR E LUMINOSIDADE PARA PRODUÇÃO DE AVES E OVOS 53
2.1 INTRODUÇÃO 54
2.1.1 Contextualização 54
2.1.2 Justificativa 55
2.1.3 Objetivos do capítulo 56
2.2 MATERIAL E MÉTODOS 57
2.2.1 Bases de dados consultadas 57

2.2.2 Critérios de seleção de estudos 58
2.3 RESULTADOS 59
2.3.1 Valores mais encontrados 59
2.3.2 As referências mais encontradas 62
2.4 DISCUSSÃO 64
2.4.1 Análise dos resultados 64
2.4.2 Implicações para a produção avícola 67
2.5 CONCLUSÃO 68
REFERÊNCIAS 69
CAPÍTULO 3 - ESTUDO DOS PRINCIPAIS MÉTODOS DE CONTROLE DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS DOS ESPAÇOS DE CONFINAMENTO DE AVES 73
3.1 INTRODUÇÃO 74
3.1.1 Contextualização 74
3.1.2 Justificativa 75
3.1.3 Objetivos do capítulo 76
3.2 MATERIAL E MÉTODOS 77
3.2.1 Bases de dados consultadas 77
3.2.2 Critérios de seleção de estudos 78
3.3 RESULTADOS 79
3.3.1 As variáveis controladas mais frequentes 80
3.3.2 Métodos de controle mais utilizados 81
3.4 DISCUSSÃO 86
3.4.1 Análise dos resultados 86
3.4.2 Implicações para a produção avícola 91
3.5 CONCLUSÃO 94
REFERÊNCIAS 95
CAPÍTULO 4 - ELABORAÇÃO DE PROTÓTIPO DE CONTROLE AMBIENTAL AVÍCOLA, AQUISIÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS OBTIDOS 104
4.1 INTRODUÇÃO 105
4.1.1 Contextualização 105
4.1.2 Justificativa 107
4.1.3 Objetivos do capítulo 108
4.2 MATERIAL E MÉTODOS 109

4.2.1 Índice de temperatura de globo negro e umidade 109
4.2.2 Proposta de controle 111
4.2.3 Protótipo de bancada para avaliação 113
4.3 RESULTADOS 117
4.3.1 Montagem do protótipo 117
4.3.2 Desenvolvimento dos circuitos elétricos e *softwares* de controle 123
4.3.3 Análise de calibração do sensor de temperatura de globo negro (Tgn) em relação ao sensor de temperatura de bulbo seco (Tbs) 127
4.3.4 Calibração do instrumento de medição de potência (wattímetro) 132
4.3.5 Controlador ITGU/Fuzzy 137
4.3.5.1 *Fuzzificação das entradas* 138
4.3.5.2 *Variáveis de saída e base de regras Fuzzy* 140
4.3.5.3 *Inferência e defuzzificação* 142
4.3.6 Controlador padrão 142
4.3.7 Comparação do consumo diário de energia entre métodos 144
4.3.7.1 *Procedimentos experimentais e aquisição de dados* 145
4.3.7.2 *Delineamento experimental e construção das métricas* 148
4.3.7.3 *Metodologia de análise estatística* 150
4.3.7.4 *Análise estatística dos resultados* 151
4.4 CONCLUSÃO 157
REFERÊNCIAS 160
CONSIDERAÇÕES FINAIS 164
REFERÊNCIAS 165

INTRODUÇÃO GERAL

CONTEXTUALIZAÇÃO

As mudanças climáticas são definidas como uma alteração significativa de longo prazo nos padrões e aspectos relacionados do sistema climático global (Carvalho *et al.*, 2025). Embora o clima da Terra tenha passado por modificações naturais ao longo de sua história geológica, estudos atuais evidenciam o impacto das atividades humanas no clima, sendo que o período mais recente, conhecido como Antropoceno, é caracterizado pela influência humana mais significativa (Hodecker-Dietrich; Aumond, 2024).

Os relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) reforçam a influência antropogênica sobre o aumento das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) (Teixeira *et al.*, 2025), resultantes principalmente da queima de combustíveis fósseis e mudanças no uso da terra e florestas (Micheletti *et al.*, 2025), acarretando no aquecimento do planeta e agravando os riscos e impactos climáticos sobre o sistema planetário (Teixeira *et al.*, 2025). Assim, é consenso entre os relatórios do IPCC que as mudanças climáticas previstas têm sua origem predominantemente antropogênica (Hodecker-Dietrich; Aumond, 2024).

As mudanças climáticas em curso e as projetadas para o futuro, trazem uma série de alterações com impactos diretos na população global. As previsões do IPCC indicam um aumento na temperatura média global até o ano 2100, com projeções mais pessimistas chegando a um aumento de 3,3°C a 5,7°C em relação ao período pré-industrial (1850-1900) (Sarnighausen *et al.*, 2024). No Brasil, projeta-se um aumento entre +2,0°C e +4,0°C até o final do século XXI (Stephá; Luiz-Silva, 2025), e até 1° a 6°C em comparação ao fim do século XX (Camargo; Basílio, 2025). Este aumento acarreta uma carga térmica maior no ambiente, com picos de estresse térmico e ondas de calor mais frequentes (Camargo; Basílio, 2025; Machado *et al.*, 2024; Sarnighausen *et al.*, 2024; Stephá; Luiz-Silva, 2025).

O aquecimento global altera o ciclo hidrológico, ou seja, as projeções indicam que os contrastes entre regiões chuvosas e secas e entre períodos chuvosos e secos deverão aumentar. Isso se traduz em redução da precipitação em algumas áreas, como a porção centro-norte do Brasil, e aumento da chuva em outras, como a região Sul e eventos de precipitação intensa em áreas como o Rio de Janeiro (Camargo;

Basílio, 2025; Stephá; Luiz-Silva, 2025). A precipitação, que já é um elemento com alta variabilidade espaço-temporal, torna-se cada vez mais irregular e com má distribuição (Lima *et al.*, 2025a; Medeiros *et al.*, 2021).

Em zonas áridas e semiáridas, a escassez de água é agravada pela variabilidade climática e pelas mudanças climáticas. A redução da precipitação e o aumento da evaporação, somados ao crescimento populacional e urbanização, intensificam a pressão sobre os recursos hídricos, aumentando a insegurança na gestão da água e a competição por este recurso (Lima *et al.*, 2025a). Assim, as irregularidades na disponibilidade hídrica causam grande vulnerabilidade social e econômica em regiões historicamente já com grandes problemas sociais e econômicos (Medeiros *et al.*, 2021).

Eventos extremos e o aumento do nível do mar podem causar danos à infraestrutura urbana e rural, uma vez que as alterações climáticas trazem consigo danos e prejuízos ambientais, materiais e humanos, que podem ser identificáveis ou subjetivos e incalculáveis (Machado *et al.*, 2024). Assim, as mudanças climáticas podem acarretar em grande vulnerabilidade hídrica e, principalmente, socioeconômica para moradores e setores produtivos de todas as atividades humanas. Porém, em países em desenvolvimento, a vulnerabilidade é exacerbada pela pobreza, desigualdade social e degradação ambiental, com menos recursos para enfrentar os desafios (Lima *et al.*, 2025a).

Não é apenas a humanidade e suas áreas povoadas que estão em risco, as mudanças climáticas levam à perda de habitats e espécies e afetam a biodiversidade e o equilíbrio ecológico, e a substituição de ambientes naturais por ocupações humanas aumentam ainda mais os impactos (Camargo; Basílio, 2025; Carvalho *et al.*, 2025; Micheletti *et al.*, 2025).

Além dos impactos diretos, as mudanças climáticas podem gerar problemas sociais como desemprego, migrações, e agravar problemas de saúde na população em geral. Uma vez que elas comprometem o desenvolvimento econômico e podem exacerbar a pobreza e a insegurança alimentar e hídrica das populações, principalmente dos países em desenvolvimento, além do fato de a instabilidade climática impactar diretamente as comunidades rurais e atividades como o turismo (Carvalho *et al.*, 2025; Ferreira *et al.*, 2022; Lima *et al.*, 2025b; Sarnighausen *et al.*, 2024).

Uma vez que a estabilidade cíclica de chuvas e a disponibilidade hídrica são determinantes para a eficiente produção agropecuária e avícola, as mudanças climáticas e os cenários de aumento de temperatura podem alterar zoneamentos agrometeorológicos e o microclima local, afetando a quantidade e qualidade de produtos vegetais e animais. Eventos extremos como secas prolongadas ou chuvas intensas causam danos significativos, como perda de safras e problemas na criação de animais devido ao estresse térmico, o que pode levar à escassez de alimentos e exigir maiores investimentos em infraestrutura, insumos e gestão hídrica (Gomes *et al.*, 2011; Medeiros *et al.*, 2021; Sarnighausen *et al.*, 2024).

Em suma, as mudanças climáticas, impulsionadas significativamente pela atividade humana, trazem alterações substanciais e de longo alcance nos padrões climáticos, resultando em eventos extremos mais frequentes e intensos, aumento da temperatura, modificação na distribuição da chuva e alteração do clima local (Camargo; Basílio, 2025; Teixeira *et al.*, 2025). Essas alterações têm consequências negativas significativas em nível ambiental, social e econômico global, afetando a produção de alimentos, a disponibilidade de água, a infraestrutura, ecossistemas e aumentando a vulnerabilidade de populações e setores econômicos. Por isso, o cenário futuro exige ações urgentes e estratégias de adaptação para mitigar os impactos das alterações provocadas pelas mudanças climáticas.

JUSTIFICATIVA

As mudanças climáticas, especialmente o aumento da temperatura e a frequência de ondas de calor, afetam negativamente a produção animal, incluindo a avicultura, uma vez que as aves são sensíveis ao desconforto térmico gerado pelas alterações na temperatura do ambiente, o que frequentemente resulta em empobrecimento do desempenho produtivo das aves, seja de ovos ou proteína animal. Os cenários futuros preveem um aumento progressivo da carga térmica do ambiente, acarretando picos de estresse térmico por ondas de calor em boa parte do ano para aves poedeiras e frangos de corte (Sarnigheusen *et al.*, 2024).

Para enfrentar esses desafios e garantir o conforto térmico e o bem-estar animal, que estão intrinsecamente relacionados às mudanças climáticas e à sustentabilidade da produção, serão necessárias ações que envolvem tecnologia e recursos técnicos,

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente tese demonstrou que o controle sistemático das variáveis ambientais em espaços de confinamento avícola constitui elemento estratégico para a eficiência energética, a sustentabilidade produtiva e a segurança alimentar.

A partir das revisões sistemáticas realizadas, foram identificadas como variáveis críticas a temperatura do ar, a umidade relativa, a qualidade do ar (especialmente amônia), a iluminação e a ventilação, evidenciando sua influência direta sobre indicadores produtivos como consumo de ração, conversão alimentar, ganho de peso, produção e qualidade de ovos e taxa de mortalidade. A consolidação dos valores ótimos dessas variáveis fornece base técnica para decisões mais precisas no manejo ambiental.

Constatou-se que, embora o controle Liga/Desliga ainda predomine nos sistemas produtivos, há lacuna tecnológica relevante quanto à adoção de estratégias mais inteligentes e energeticamente eficientes. Nesse contexto, a proposição do sistema autônomo de controle ambiental apresentada neste trabalho representa avanço aplicado, ao integrar sensoriamento, monitoramento contínuo e atuação direcionada sobre ventilação e iluminação, com foco simultâneo no conforto térmico e na racionalização do consumo de energia elétrica.

Os resultados evidenciam que a melhoria do ambiente térmico não apenas eleva o desempenho zootécnico, mas também reduz desperdícios energéticos e perdas produtivas, contribuindo para menor pegada de carbono da atividade. Assim, a pesquisa se alinha diretamente ao ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ao fortalecer a eficiência e a resiliência da produção de proteína animal, e ao ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), ao promover uso mais racional de recursos energéticos e ambientais.

Conclui-se que a modernização tecnológica da ambiência avícola, fundamentada em critérios biometeorológicos e em eficiência energética, não é apenas uma alternativa técnica, mas uma necessidade estratégica frente às mudanças climáticas e à crescente demanda global por alimentos. O avanço nessa direção consolida um modelo de produção mais competitivo, sustentável e eticamente responsável.

REFERÊNCIAS

CAMARGO, A. F.; BASÍLIO, R. S. Resiliência e identidade de lugar no contexto da emergência climática global: estudo de caso comparativo Brasil e Portugal. **Sociedade & Natureza**, v. 37, n. 1, p. 1–12, 2025. Disponível em: https://seer.ufu.br/index.php/sociedadenatureza/article/view/72862. Acesso em: 18 fev. 2026.

CARVALHO, J. S.; COSTA, K. A.; QUINELATO, M. E. A. A influência do consumismo para o aumento na geração de resíduos e principais desafios para atingir as metas da agenda 2030. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 8, n. 1, p. e76996, 2025. Disponível em: https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/view/76996. Acesso em: 18 fev. 2026.

FERREIRA, J. A.; VALENTIM, J. K.; MACHADO, L. C.; OLIVEIRA, H. F. de. Elaboração de etograma para poedeiras criadas em gaiolas. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Instituto Federal de Minas Gerais, Bambuí-MG, v. 21, n. 2, p. 137–147, 2022. Disponível em: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85129954533&doi=10.5965%2F223811712122022137&partnerID=40&md5=2d8d0214a31022200594fc6e71780c03. Acesso em: 18 fev. 2026.

GOMES, R. C. C.; YANAGI JUNIOR, T.; LIMA, R. R. de; YANAGI, S. de N. M.; CARVALHO, V. F. de; DAMASCENO, F. A. Predição do índice de temperatura do globo negro e umidade e do impacto das variações climáticas em galpões avícolas climatizados. **Ciência Rural**, v. 41, n. 9, p. 1645–1651, 2011. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782011000900026&lng=pt&tlng=pt. Acesso em: 18 fev. 2026.

HODECKER-DIETRICH, A.; AUMOND, J. J. As mudanças climáticas e o aumento do nível dos oceanos e seus impactos nas áreas urbanas da orla NE/E de Santa Catarina. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 13, n. 1, p. 1–29, 2024. Disponível em: https://periodicos.uninove.br/geas/article/view/23742. Acesso em: 18 fev. 2026.

LIMA, A. B.; TRENTIN, I. C. L.; ROMANO, A. M.; CAVALCANTE, L. M. S.; LIMA, O. D. S. F. C. Desafios e soluções na gestão sustentável dos recursos hídricos em zonas áridas e semiáridas. **IOSR Journal of Business and Management**, v. 27, n. 1, p. 01–12, 2025a. Disponível em: https://www.iosrjournals.org/iosr-jbm/papers/Vol27-issue1/Ser-2/A2701020112.pdf. Acesso em: 18 fev. 2026.

LIMA, A. B.; TRENTIN, I. C. L.; ROMANO, A. M.; DE OLIVEIRA, D. J. L.; DA SILVA, I. T.; FRIEDRICH, N. C.; DE OLIVEIRA, D. N.; LEAL, M. da L.; MICHELETTI, Débora Hungaro; MICHELETTI, Danilo Hungaro; DA SILVA, S. C. O.; DA SILVA, E. C.; DA SILVA, M. D. C.; CAVALCANTE, L. M. S.; LIMA, O. do S. F. C. Adaptação às mudanças climáticas: estratégias sustentáveis para mitigação dos impactos ambientais em países em desenvolvimento. **IOSR Journal of Business and Management**, v. 27, n. 1, p. 59–68, 2025b. Disponível em: https://www.iosrjournals.org/iosr-jbm/papers/Vol27-issue1/Ser-1/F2701015968.pdf. Acesso em: 18 fev. 2026.

MACHADO, A. F.; FIALHO, S.; REIS, J. D. dos; SILVA, T. A.; BASTOS, G. G.; CHEVITARESE, L.; FARIA, A. L. L. de; LAVANDOSKI, J. Mudanças climáticas e eventos extremos no Rio Grande do Sul: impactos diversos quanto a produção de vinho e enoturismo no vale dos vinhedos. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v. 22, n. 8, p. e6393, 2024. Disponível em: https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/6393. Acesso em: 18 fev. 2026.

MEDEIROS, R. M. de; MARCELO FALLÉ SABOYA, L.; MORANT DE HOLANDA, R.; VIEIRA DE FRANÇA, M.; LIANA F. PEREIRA, M.; RODOLFO DE ARAÚJO, W.; CARTAXO ROLIM NETO, F.; EWEN BRAGA, S. A crise hídrica na avicultura e suas variabilidades pluviais em São Bento do Uma – Pernambuco. **RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar** - ISSN 2675-6218, v. 2, n. 4, p. e24247, 2021. Disponível em: https://recima21.com.br/index.php/recima21/article/view/247. Acesso em: 18 fev. 2026.

MICHELETTI, D. H.; LIMA, O. D. S. F. C.; TRENTIN, I. C. L.; CAVALCANTE, L. M. S.; LIMA, A. B. A transição para energias renováveis: impactos econômicos e ambientais da implementação de tecnologias sustentáveis. **IOSR Journal of Business and Management**, v. 27, n. 1, p. 13–24, 2025. Disponível em: https://www.iosrjournals.org/iosr-jbm/papers/Vol27-issue1/Ser-2/B2701021324.pdf. Acesso em: 18 fev. 2026.

SARNIGHAUSEN, V. C. R.; NORIS, F. J.; FRANCO, J. R.; CAMPOS, F. S.; NARDI JÚNIOR, G. de; SEVEGNANI, K. B.; SARTORI, D. de L. Cenários de mudanças climáticas e efeitos na entalpia como índice biometeorológicos. **Nativa**, v. 12, n. 3, p. 567–576, 2024. Disponível em: https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index .php/nativa/article/view/16222. Acesso em: 18 fev. 2026.

STEPHÁ, C. O.; LUIZ-SILVA, W. Chuvas severas na cidade do Rio de Janeiro: registros no clima presente e análise de projeções futuras de eventos extremos. **Brazilian Applied Science Review**, v. 9, n. 1, p. e76815, 2025. Disponível em: https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BASR/article/view/76815. Acesso em: 18 fev. 2026.

TEIXEIRA, R. L. P.; PESSOA, Z. S.; SANTOS, Y. C. dos. Adaptação climática e energias renováveis: uma revisão sistemática da literatura. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 14, n. 1, p. e26012, 2025. Disponível em: https://periodicos.uninove.br/geas/article/view/26012. Acesso em: 18 fev. 2026.