



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

MARIA SIMONE MENDES PEIXOTO

AGRICULTURA DIGITAL 4.0 EM *COMPOST BARN*: MONITORAMENTO
AMBIENTAL E SOLUÇÕES DE MANEJO BASEADAS EM
MICROCONTROLADORES

FORTALEZA
2025

MARIA SIMONE MENDES PEIXOTO

AGRICULTURA DIGITAL 4.0 EM *COMPOST BARN*: MONITORAMENTO AMBIENTAL
E SOLUÇÕES DE MANEJO BASEADAS EM MICROCONTROLADORES

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutora em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas. Linha de pesquisa: Ambiência agrícola.

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Delfino Barbosa Filho.

Coorientador: Prof. Dr. Flávio Alves Damasceno.

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P431a Peixoto, Maria Simone Mendes.

Agricultura digital 4.0 em compost barn: monitoramento ambiental e soluções de manejo baseadas em microcontroladores / Maria Simone Mendes Peixoto. – 2025.
179 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. José Antonio Delfino Barbosa Filho.

Coorientação: Prof. Dr. Flávio Alves Damasceno.

1. estresse térmico. 2. IoT. 3. sensores. 4. vacas leiteiras. 5. zootecnia de precisão. I. Título.

CDD 630

MARIA SIMONE MENDES PEIXOTO

AGRICULTURA DIGITAL 4.0 EM *COMPOST BARN*: MONITORAMENTO AMBIENTAL
E SOLUÇÕES DE MANEJO BASEADAS EM MICROCONTROLADORES

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutora em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas. Linha de pesquisa: Ambiência agrícola.

Aprovada em: 23/05/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Antonio Delfino Barbosa Filho
(Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Flávio Alves Damasceno
(Coorientador)
Universidade Federal de Lavras (UFLA)

Prof. Dr. Robinson Osorio Hernández
Universidad Nacional de Colombia (UNAL)

Prof. Dr. Frederico Márcio Corrêa Vieira
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR)

Prof. Dr. Nítalo André Farias Machado
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Prof. Dr. Marcos Vinícius da Silva
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

A Deus.

Aos meus pais, Peixoto e Maria do Socorro.

À minha querida avó, Carmelita Mendes.

*Ao meu esposo, Ravel, e à nossa amada filha,
Amira.*

DEDICO!

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro para a manutenção da bolsa de auxílio.

Ao Prof. Dr. José Antonio Delfino Barbosa Filho, pelas valiosas contribuições que me foram repassadas para o melhor desenvolvimento da pesquisa e, em especial, pelos ensinamentos e colaborações durante toda a minha jornada científica.

Ao Prof. Dr. Flávio Alves Damasceno, pelo seu empenho em contribuir para o meu crescimento pessoal e profissional, especialmente pelas contribuições ao projeto de tese.

Aos professores participantes da banca examinadora: Dr. Robinson Osorio Hernández, Dr. Frederico Márcio Corrêa Vieira, Dr. Nitalo André Farias Machado e Dr. Marcos Vinícius da Silva, pelo incentivo e interesse, expressos como forma de enriquecimento do trabalho. Agradeço imensamente também pelo apoio do prof. Dr. Carlos Alberto Viliotti.

Ao Prof. Dr. Jairo Alexander Osório Saraz, pela orientação e incentivo durante minha estadia de pesquisa na Universidad Nacional de Colombia.

Ao companheiro de pesquisa Felipe Obando, pelas contribuições científicas e pela gratificante recepção em seu país.

Ao Núcleo de Estudos em Ambiência Agrícola e Bem-Estar Animal (NEAMBE), pelas valiosas contribuições para a pesquisa. Em especial, agradeço às bolsistas de iniciação científica Beatriz, Jennifer, Mayara e Sarah, que auxiliaram nas atividades realizadas a campo.

Ao meu esposo, Ravel Sales Viana de Mesquita, pelo apoio incondicional e por sempre me dar forças. Aos meus sogros, Macilon e Adriana, pelo carinho e incentivo. Aos meus irmãos amados, Carlim e Davi, e à minha estimada cunhada, Layna Silva.

Aos amigos da sala de estudos do DENA, pela amizade e apoio: João José, Luiza, Alex, Liah, Wilson, Vinícius, Lilian, Walisson e Isabela.

Aos produtores de leite e seus colaboradores envolvidos na pesquisa, por cederem suas instalações para a realização do estudo e por dedicarem parte de seu tempo às atividades desenvolvidas.

A todos que contribuíram para que eu chegasse a este momento tão especial, meu muito obrigada!

“A curiosidade é mais importante do que o conhecimento.”

(Albert Einstein)

RESUMO

Este estudo teve como objetivo investigar aspectos estruturais e ambientais, além de propor soluções tecnológicas baseadas em microcontroladores para sistemas compost barn em propriedades leiteiras situadas no estado do Ceará, Brasil. Inicialmente, os principais conceitos, limitações e avanços do tema são apresentados. No Capítulo 1, foi avaliada a dinâmica ambiental do alojamento de vacas leiteiras por meio de geoestatística, em seis propriedades durante o período seco. Investigou-se características microclimáticas, aspectos construtivos, manejo da cama, respostas fisiológicas dos animais e o grau de satisfação dos produtores. Observou-se que os animais permaneceram sob estresse térmico severo, especialmente à tarde. Também se constatou a influência da densidade de lotação e da tipologia das instalações sobre o conforto térmico e a uniformidade da cama. Quanto ao grau de satisfação dos produtores, os entrevistados apontaram os custos de implantação como fator limitante e manifestaram alto grau de satisfação com o sistema. Os resultados mostram os desafios da adoção desse sistema para o alojamento de bovinos leiteiros em regiões de clima semiárido. No Capítulo 2, desenvolveu-se um dispositivo portátil baseado em Internet das Coisas (IoT) para sistemas compost barn. Inicialmente, foram selecionados e adquiridos os componentes eletrônicos necessários à montagem do protótipo. O desenvolvimento ocorreu de forma gradual, com três versões sucessivas: a primeira baseada em Arduino UNO R3, e as versões seguintes com ESP32, sensores adicionais e melhorias na alimentação e no display. Testes de desempenho do protótipo foram realizados em fazendas comerciais leiteiras e em laboratório situado na Universidade Federal do Ceará. Na etapa de campo, compararam-se os resultados de temperatura da cama obtidos por dispositivos convencionais e pelo protótipo, com diferenças estatísticas ($p < 0,05$) em algumas camadas, indicando a necessidade de estudos adicionais, especialmente sobre o tempo de estabilização do sensor DS18B20. Quanto ao armazenamento, não houve perdas de dados, mesmo com oscilações ou falhas na conexão, pois todas as informações foram salvas corretamente no cartão de memória. O dispositivo demonstrou desempenho satisfatório na medição de variáveis ambientais e térmicas da cama, com potencial aplicação no manejo inteligente de instalações compost barn em clima semiárido.

Palavras-chave: estresse térmico; IoT; sensores; vacas leiteiras; zootecnia de precisão.

ABSTRACT

This study aimed to investigate structural and environmental aspects, as well as to propose technological solutions based on microcontrollers for compost barn systems on dairy farms located in the state of Ceará, Brazil. Initially, the main concepts, limitations, and advancements of the topic are presented. In Chapter 1, the environmental dynamics of dairy cow housing were evaluated using geostatistics in six farms during the dry season. Microclimatic characteristics, construction aspects, bedding management, animals' physiological responses, and the degree of producer satisfaction were investigated. It was observed that the animals remained under severe heat stress, especially in the afternoon. The influence of stocking density and barn typology on thermal comfort and bedding uniformity was also confirmed. Regarding the degree of producer satisfaction, interviewees identified the implementation costs as a limiting factor but expressed a high level of satisfaction with the system. The results highlight the challenges of adopting this system for dairy cattle housing in semi-arid regions. In Chapter 2, a portable device based on the Internet of Things (IoT) was developed for compost barn systems. Initially, the necessary electronic components for assembling the prototype were selected and acquired. The development occurred gradually, with three successive versions: the first based on Arduino UNO R3, and the following versions with ESP32, additional sensors, and improvements in power supply and display. Performance tests of the prototype were carried out on commercial dairy farms and in a laboratory at the Federal University of Ceará. In the field phase, bedding temperature results obtained with conventional devices were compared to those from the proposed prototype, with statistically significant differences ($p < 0.05$) in some layers. These findings indicate the need for further studies, especially regarding the stabilization time of the DS18B20 sensor. As for data storage, no losses were recorded, even with oscillations or connection failures, as all information was successfully saved to a memory card. The device demonstrated satisfactory performance in measuring environmental and bedding thermal variables, with potential application in the intelligent management of compost barn facilities in semi-arid climates.

Keywords: heat stress; IoT; sensors; dairy cows; precision livestock farming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Localização geográfica das fazendas (A), expressa no mapa conforme a classificação de KöpLpen (B), a elevação ao nível do mar (C) e a distribuição por mesorregião do estado (D)	60
Figura 2 - Fluxograma representativo da coleta de dados nas fazendas selecionadas	63
Figura 3 - Mensuração da variável velocidade do ar em galpões compost barn	65
Figura 4 - Coleta de dados para avaliação da qualidade da cama em compost barn	66
Figura 5- Esquema da área construtiva dos galpões referentes às fazendas (A a F), e respectivas áreas designadas como grade amostral para análise geoestatística da TSC (°C) e da Vv (m s ⁻¹)	67
Figura 6 - Mensuração de variáveis fisiológicas em vacas leiteiras confinadas em sistema compost barn.....	69
Figura 7- Instalação compost barn da fazenda A, situada no município de Iguatu, Ceará, Brasil	72
Figura 8 - Instalação compost barn da fazenda B, situada no município de Quixadá, Ceará, Brasil.....	73
Figura 9 - Instalação compost barn da fazenda C, situada no município de Quixadá, Ceará, Brasil.....	74
Figura 10 - Instalação compost barn da fazenda D, situada no município de Beberibe, Ceará, Brasil.....	75
Figura 11 - Instalação compost barn da fazenda E, situada no município de Marco, Ceará, Brasil	75
Figura 12 - Instalação compost barn da fazenda F, situada no município de Madalena, Ceará, Brasil.....	76
Figura 13 - Variação do Índice de temperatura e umidade (ITU) ao longo do dia, em galpões compost barn, durante o período seco no estado do Ceará	80
Figura 14 - Variação da entalpia específica (h, kJ/kg de ar seco) e do Índice de Temperatura e Umidade (ITU), em galpões compost barn (A a F), durante o período seco no estado do Ceará	

.....	83
Figura 15 - Distribuição espacial da temperatura da superfície da cama (TSC, °C) no galpão da Fazenda A, avaliada durante os turnos da manhã e da tarde	92
Figura 16 - Distribuição espacial da temperatura da superfície da cama (TSC, °C) no galpão da Fazenda B, avaliada durante os turnos da manhã e da tarde	93
Figura 17 - Distribuição espacial da temperatura da superfície da cama (TSC, °C) no galpão da Fazenda C, avaliada durante os turnos da manhã e da tarde	94
Figura 18 - Distribuição espacial da temperatura da superfície da cama (TSC, °C) no galpão da Fazenda D, avaliada durante os turnos da manhã e da tarde	95
Figura 19 - Distribuição espacial da temperatura da superfície da cama (TSC, °C) no galpão da Fazenda E, avaliada durante os turnos da manhã e da tarde	96
Figura 20 - Distribuição espacial da temperatura da superfície da cama (TSC, °C) no galpão da Fazenda F, avaliada durante os turnos da manhã e da tarde	97
Figura 21 - Distribuição espacial da velocidade dos ventos (V_v , m s ⁻¹) no galpão da Fazenda A, avaliada durante os turnos da manhã e da tarde	99
Figura 22 - Distribuição espacial da velocidade dos ventos (V_v , m s ⁻¹) no galpão da Fazenda B, avaliada durante os turnos da manhã e da tarde	100
Figura 23 - Distribuição espacial da velocidade dos ventos (V_v , m s ⁻¹) no galpão da Fazenda C, avaliada durante os turnos da manhã e da tarde	101
Figura 24 - Distribuição espacial da velocidade dos ventos (V_v , m s ⁻¹) no galpão da Fazenda D, avaliada durante os turnos da manhã e da tarde	102
Figura 25 - Distribuição espacial da velocidade dos ventos (V_v , m s ⁻¹) no galpão da Fazenda E, avaliada durante os turnos da manhã e da tarde	103
Figura 26 - Distribuição espacial da velocidade dos ventos (V_v , m s ⁻¹) no galpão da Fazenda F, avaliada durante os turnos da manhã e da tarde	104
Figura 27 - Termogramas obtidos em vacas leiteiras das raças Girolando (1) e Guzolando (2), confinadas em galpões compost barn no estado do Ceará, Brasil	110
Figura 28 - Etapas do processo de prototipagem eletrônica	126
Figura 29 - Produto Mínimo Viável (MVP) utilizado em teste inicial (primeira versão) em	

instalação compost barn no estado do Ceará	127
Figura 30 - Prototipagem de dispositivo eletrônico na Facultad de Ciencias Agrarias, sede Medellín	128
Figura 31- Esquema de hardware elaborado durante as etapas de aperfeiçoamento de prototipagem	130
Figura 32 - Design 3D personalizado de PCB utilizada na versão atualizada do protótipo ...	131
Figura 33 - Esquemático parcial desenvolvido no projeto da placa eletrônica	132
Figura 34 - Prototipagem de dispositivo eletrônico na Universidade Federal do Ceará, Brasil	135
Figura 35 - Fabricação da sonda de umidade da cama	136
Figura 36 - Materiais utilizados na simulação de um perfil de cama	137
Figura 37 - Esquema dos sensores instalados em cama de compost barn para medir condições térmicas e variáveis ambientais, com envio dos dados via Wi-Fi para plataforma em nuvem para análise em tempo real	138
Figura 38 - PCB e componentes integrados	142
Figura 39 - Teste de comunicação IoT em laboratório	143
Figura 40 - Testes periódicos referentes a comunicação de dados da sonda de umidade	145
Figura 41 - Exemplos de diferentes modos de exibição dos dados disponíveis ao usuário ...	147
Figura 42 - Armazenamento dos dados experimentais em cartão de memória SD	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores médios das variáveis ambientais e dados para avaliação da cama	77
Tabela 2 - Registros do Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e da entalpia específica (h, kJ/kg de ar seco), em galpões compost barn (A a F) durante o período seco, no estado do Ceará	82
Tabela 3 - Dados para avaliação da cama obtidos em galpões compost barn em região semiárida	84
Tabela 4 - Informações geográficas, produtivas e de manejo de galpões compost barn no Brasil utilizados no alojamento de vacas em lactação	86
Tabela 5 - Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais para as variáveis Temperatura da superfície da cama (TSC, °C) e Velocidade dos ventos (Vv, m s ⁻¹), em galpões compost barn, durante os turnos manhã e tarde.....	90
Tabela 6 - Valores médios das variáveis fisiológicas de vacas leiteiras confinadas em compost barn no nordeste brasileiro	105
Tabela 7 - Valores de temperatura superficial da cama (TSC, °C) mensurados por diferentes métodos de coleta, seguidos da média, desvio padrão e valor de significância estatística entre as amostras	140
Tabela 8 - Valores de temperatura interna da cama (TIC, °C) mensurados por diferentes métodos de coleta, seguidos da média, desvio padrão e valor de significância estatística entre as amostras	141
Tabela 9 - Lista de itens utilizados na montagem do protótipo e os seus respectivos custos .	150

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	Sistema compost barn: Um novo cenário na bovinocultura leiteira no semiárido brasileiro	17
2.1.1	<i>Manejo da cama e processo de compostagem</i>	<i>20</i>
2.1.2	<i>Conforto de vacas leiteiras em sistema compost barn</i>	<i>22</i>
2.1.3	<i>Pesquisas científicas desenvolvidas no Brasil.....</i>	<i>26</i>
2.2	Zootecnia de Precisão na pecuária leiteira	31
2.2.1	<i>Aplicações de tecnologias IoT na bovinocultura</i>	<i>34</i>
2.2.2	<i>Microeletrônica aplicada ao monitoramento em instalações compost barn</i>	<i>38</i>
	REFERÊNCIAS.....	41
3	CAPÍTULO I: TIPOLOGIA DE INSTALAÇÕES COMPOST BARN E VARIABILIDADE ESPACIAL DO AMBIENTE TÉRMICO NO NORDESTE BRASILEIRO	55
3.1	INTRODUÇÃO.....	58
3.1.1	<i>Objetivo geral</i>	<i>59</i>
3.1.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>59</i>
3.2	MATERIAL E MÉTODOS	60
3.2.1	<i>Caracterização da área experimental</i>	<i>60</i>
3.2.2	<i>Entrevista aos produtores</i>	<i>63</i>
3.2.3	<i>Parâmetros ambientais</i>	<i>64</i>
3.2.4	<i>Parâmetros de avaliação da cama</i>	<i>65</i>
3.2.5	<i>Parâmetros fisiológicos e conforto térmico de vacas leiteiras.....</i>	<i>69</i>
3.2.6	<i>Modelagem Geoestatística</i>	<i>70</i>
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	72
3.3.1	<i>Tipologia descritiva da construção das instalações</i>	<i>72</i>
3.3.2	<i>Análise das condições ambientais das instalações.....</i>	<i>77</i>

3.3.3	<i>Análise da variabilidade espacial da área de cama</i>	90
3.3.4	<i>Condições fisiológicas dos animais</i>	105
3.3.5	<i>Considerações sobre as entrevistas</i>	110
3.4	CONCLUSÃO	112
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	113
	REFERÊNCIAS	114
4	CAPÍTULO II: DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO ELETRÔNICO PARA USO EM CAMAS DE INSTALAÇÕES COMPOST BARN	121
4.1	INTRODUÇÃO	124
4.1.1	<i>Objetivo geral</i>	125
4.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	125
4.2	MATERIAL E MÉTODOS	126
4.2.1	<i>Planejamento do projeto</i>	126
4.2.2	<i>Localização dos testes iniciais</i>	129
4.2.3	<i>Descrição dos ajustes de hardware do dispositivo (MVP)</i>	130
4.2.4	<i>Desenvolvimento de hardware e programa (versão final)</i>	131
4.2.5	<i>Considerações sobre os módulos eletrônicos utilizados</i>	133
4.2.6	<i>Umidade da cama: montagem de dispositivo e programação</i>	135
4.2.7	<i>Localização dos testes finais</i>	136
4.2.8	<i>Orientação de manuseio do protótipo</i>	138
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	140
4.3.1	<i>Testes iniciais do protótipo em campo</i>	140
4.3.2	<i>Testes de bancada</i>	142
4.3.3	<i>Interface do usuário (UI)</i>	147
4.3.4	<i>Banco de dados coletado</i>	148
4.3.5	<i>Custos de fabricação do dispositivo</i>	150
4.4	CONCLUSÃO	151

	REFERÊNCIAS.....	152
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	154
	REFERÊNCIAS.....	155
	APÊNDICE A – FICHA APLICADA NAS ENTREVISTAS.....	174
	APÊNDICE B – ESQUEMÁTICO COMPLETO DO PROJETO DA PLACA PCB.....	177
	APÊNDICE C – FIRMWARE EXECUTADO NO DISPOSITIVO.....	178

1 INTRODUÇÃO

O avanço de ferramentas tecnológicas na Zootecnia de precisão tem impulsionado os estudos voltados ao monitoramento ambiental das instalações, especialmente diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas (PAPAKONSTANTINO *et al.*, 2024; THORNTON *et al.*, 2021).

A análise do ambiente térmico é essencial para maximizar o desempenho produtivo dos animais, auxiliando o manejo e o bem-estar dos rebanhos. No entanto, os métodos tradicionais de coleta de dados, dependentes de trabalho humano, enfrentam a necessidade de maior eficiência e qualificação. Nesse contexto, as ferramentas oferecidas na perspectiva do termo “*Smart Farming*” surgem como uma solução promissora, contribuindo para otimizar processos de coleta, armazenamento e manejo ambiental (AYAZ *et al.*, 2019).

Pesquisas recentes têm explorado o emprego de tecnologias disruptivas na ambiência de precisão. Dentre os avanços observados, destaca-se o uso de microcontroladores em instalações para bovinos, integrados a plataformas de gestão e relacionados à tomada de decisões nas fazendas, especialmente em atividades de monitoramento ambiental, comportamento e saúde dos animais (FERREIRA *et al.*, 2024; OLIVEIRA *et al.*, 2023; SILVA *et al.*, 2023). Nesse sentido, essas tecnologias desempenham um papel importante na otimização da produção animal, contribuindo diretamente para o fortalecimento da segurança alimentar global (FAO, 2024).

Apesar da relevância do tema, a adoção de tecnologias na pecuária enfrenta obstáculos como a diversidade dos cenários agrícolas, a escassez de mão de obra qualificada, limitações na conectividade rural e o desconhecimento ou falta de acesso a equipamentos tecnológicos (MILANEZ *et al.*, 2020; RIZAN *et al.*, 2024). O presente estudo discute de que forma a crescente adoção de instalações *compost barn* em diversas regiões do mundo está associada ao maior interesse dos bovinocultores por inovações tecnológicas, e como os produtores brasileiros, sobretudo os produtores do estado do Ceará, estão inseridos nesse processo.

Com base no referencial teórico, o alojamento de vacas leiteiras em *compost barn* é analisado a partir de pesquisas sobre monitoramento ambiental, manejo da cama e conforto dos animais, considerando as variações construtivas e desafios regionais. Também são apresentados dados sobre tecnologias disruptivas, como microcontroladores, aplicadas ao monitoramento nas instalações *compost barn*.

O presente estudo está estruturado da seguinte forma: a Revisão de Literatura analisa o estado da arte; o Capítulo 1 descreve um estudo de campo conduzido em fazendas leiteiras que adotam o sistema *compost barn* no Nordeste brasileiro; e o Capítulo 2 apresenta testes de validação de um dispositivo eletrônico projetado para operar no manejo da cama dos animais. Por fim, a seção Apêndice foi incluída, contendo esquemas de design de *hardware* e códigos de programação, para expandir a compreensão deste trabalho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Sistema compost barn: Um novo cenário na bovinocultura leiteira no semiárido brasileiro

Instalação para gado leiteiro relativamente recente em todo o mundo, o *compost bedded pack barn* (CBP), ou simplesmente *compost barn*, surgiu como uma alternativa aos sistemas de confinamento convencionais para bovinos. Registros datados de 2001 sugerem que a sua implantação surgiu nos EUA, mais precisamente nos estados da Virginia (JANNI *et al.*, 2007) e de Minnesota (BARBERG; ENDRES; JANNI, 2007).

O sistema *compost barn* compreende o alojamento livre de bovinos em uma grande área de cama coletiva, a qual é separada de um corredor de alimentação geralmente por muretas de concreto, onde o estrume é incorporado na cama, em um processo de compostagem parcial (BEWLEY *et al.*, 2012; BLACK *et al.*, 2013; JANNI *et al.* 2007). Em suma, uma parte fundamental desse sistema é que o diferencia das instalações do tipo *free-stall* é a compostagem que ocorre na área de cama, ao longo do tempo (ECKELKAMP *et al.*, 2016a). A área de cama é um espaço destinado para descanso e livre circulação animal, permitindo que os excrementos sejam ali depositados, e que, assim, concentre nesse local o nitrogênio oriundo da urina e fezes dos animais combinado a própria matéria-prima da cama (fonte de carbono), essencial para o processo de compostagem (BEWLEY *et al.*, 2012; LESO *et al.*, 2020). A estabilização da decomposição da matéria orgânica resulta em um produto, o húmus, comumente utilizado para fins agrícolas na forma de fertilizantes (DAMASCENO *et al.*, 2022; LLONCH *et al.*, 2021).

Particularmente, sistema *compost barn* demanda um grande volume de material de cama, devido ao dinamismo que ocorre entre o adensamento animal e a necessidade de absorção da umidade do estrume (BEWLEY; ROBERTSON; ECKELKAMP, 2017), associado ao processo de rebaixamento da cama, ocasionado pela circulação constante de tratores e pelo pisoteio animal com o passar do tempo (DAMASCENO, 2020).

Escolher o material de cama adequado é crucial para o sucesso do sistema, pois os parâmetros químicos, físicos e térmicos da matéria-prima escolhida estarão diretamente relacionados a questões de sanidade do úbere (ECKELKAMP *et al.*, 2016a), de estresse térmico (PEIXOTO *et al.*, 2019), de conforto (LI *et al.*, 2021), de manejo de revolvimento (MOTA *et al.*, 2017), e consequentemente de produtividade. Além disso, a escolha do material de cama deve ser alinhada a características econômicas, no que se refere a custo e disponibilidade. A adição oportuna de cama é inerente ao manejo e está relacionada a diversas outras variáveis.

Com isso, o material de cama deve estar prontamente disponível e acessível para a fazenda durante todo o ano (FERRAZ *et al.*, 2020a).

Em comparação aos demais tipos de instalação, o arranjo construtivo encontrado neste tipo de sistema ficou conhecido por proporcionar melhores condições de conforto animal, dada a possibilidade das vacas se deitarem em qualquer posição e circularem livremente por toda área de cama, favorecendo melhorias em bem-estar e produtividade. Além disso, estudos abordam contribuições importantes em termos de sustentabilidade ambiental.

Investigações científicas anteriores recomendam que o material de cama seja revolvido ao menos duas vezes ao dia por meio de implementos acoplados a trator, com o objetivo de favorecer a secagem da cama e incorporar os excrementos nas camadas mais profundas, permitindo assim, a aeração necessária para o processo de compostagem. Esse manejo de revolvimento da cama promove a evaporação da água, a incorporação de oxigênio, e mantém a higiene e sanidade do úbere das vacas (BARBERG; ENDRES; JANNI, 2007; BARBERG *et al.*, 2007; BLACK *et al.*, 2013; KUIPERS *et al.*, 2022; LESO *et al.*, 2013).

Algumas recomendações gerais sobre o dimensionamento de galpões já foram descritas. No entanto, são relatadas ressalvas quanto ao projeto de construção, uma vez o seu planejamento deve ser orientado em função das condições climáticas locais (LESO *et al.*, 2020). A exemplo disso, para as condições climáticas brasileiras, a escolha por projetar instalações com orientação Leste-Oeste se torna mais assertiva, ao se considerar particularmente a orientação de ventos predominantes e a incidência de radiação solar (DAMASCENO; BRANDÃO, 2020). Recomenda-se que, para galpões com aberturas laterais, o pé-direito possua altura mínima suficiente para otimizar a circulação natural do ar externo para o interior da instalação (OLIVEIRA *et al.*, 2019). Enquanto para projetos de *compost barn* fechado, incluindo sistemas de controle climático, esse tipo de recomendação implica em alterações construtivas mais específicas (ANDRADE *et al.*, 2022). Os primeiros estudos publicados sobre dimensionamento de galpões recomendaram alturas de pé-direito lateral de 4,9 m (JANNI *et al.*, 2007). Bewley *et al.* (2012) advertem que a altura mínima de pé-direito deve ser de 3,60 m, contada acima da mureta lateral da instalação.

O telhado deve oferecer uma área de cobertura capaz de fornecer sombra constante aos animais, além de impedir a entrada de água da chuva para dentro da instalação, principalmente na área de cama. A altura da cumeeira deve ser planejada com o objetivo de garantir uma boa qualidade de circulação de ar (LESO *et al.*, 2020). Autores mencionam que a presença de estruturas de lanternim contribui para a maximização da dissipação de gases e calor gerado no interior da instalação, quando combinados a um sistema de ventilação adequado.

Nesse sentido, destaca-se também que ajustes na inclinação do telhado irão implicar diretamente na taxa de ventilação no interior da instalação, devendo ser considerados. Quanto a largura do beiral, os parâmetros a serem considerados são a altura de pé-direito e muretas da instalação, a dinâmica de ventilação local e o ângulo de incidência das chuvas (BEWLEY *et al.*, 2012; DAMASCENO, 2020).

O corredor de alimentação pode ser construído em uma das laterais da instalação, ou disposto no centro, para galpões com corredor central, sendo sugerida a orientação conforme o comprimento do cocho. Além de otimizar o espaço, essa orientação é capaz de melhor garantir a ingestão de alimento do rebanho com base na distância mínima por animal preconizada (BEWLEY *et al.*, 2012). Em condições de clima quente, ventiladores e sistemas de resfriamento podem ser distribuídos ao longo da linha de cocho a fim de melhorar o conforto térmico dos animais e aumentar o consumo de ração (CALDATO *et al.*, 2020).

Para evitar problemas com o acúmulo de umidade na área de cama, sobretudo nas passagens de acesso (*cross over*), recomenda-se que os bebedouros sejam direcionados no sentido oposto, para que os animais não tenham acesso diretamente pela cama, onde essas estruturas podem ser dispostas tanto no corredor de alimentação, como no corredor de serviço (JANNI *et al.*, 2007). O espaço mínimo de bebedouros depende do tamanho do animal e da quantidade de animais que serão alojados. De acordo com Bewley *et al.* (2012), os bebedouros devem ser facilmente acessíveis para as vacas, sendo recomendado o espaço de 0,60 a 1,0 m linear para cada grupo de 15 vacas.

A densidade de alojamento animal em *compost barn* foi amplamente discutida em pesquisas científicas. Conforme Leso *et al.* (2020), a área mínima de cama por animal deverá ser planejada considerando fatores como, o tamanho do rebanho, o padrão da raça e as condições climáticas locais. Janni *et al.* (2007), consideram a área de cama de 7,4 m² /animal ideal para vacas pesando 540 kg. Considerações sobre a raça a ser trabalhada foram descritas por Endres (2009), que sugere área mínima de 7,4 m² para a raça Holandesa e 6,1 m² para a raça Jersey. Bewley *et al.* (2012) sugerem a área mínima de cama de 7,9 m² para raças pequenas e de 9,3 m², para raças maiores.

A profundidade da cama em sistemas *compost barn* é recomendada em função de diversos aspectos de manejo. No Brasil, são relatadas variações de profundidade inicial de 20 a 40 cm (DAMASCENO; FERRAZ, 2020). Conforme Galama *et al.* (2014), produtores holandeses sugeriram o manejo de cama a uma profundidade mínima de 50 cm, essencial para a fase termofílica do processo de compostagem, enquanto Janni *et al.* (2007) abordaram valores variando de 30 a 50 cm. Radavelli *et al.* (2020a), em levantamento realizado em trinta

propriedades leiteiras no Sul do Brasil, identificou que 50% dos sistemas avaliados possuíam a profundidade média da cama maior que 40 cm, enquanto 30% eram formadas por cama entre 20 e 30 cm, e 20% entre 30 e 40 cm.

2.1.1 Manejo da cama e processo de compostagem

O sucesso do sistema *compost barn* depende principalmente de fatores como o monitoramento das propriedades térmicas, químicas e físicas da cama, a escolha da matéria-prima, o manejo de revolvimento e o adensamento animal (DAMASCENO *et al.*, 2022; FERRAZ *et al.*, 2020a; JANNI *et al.*, 2007), além disso, devem ser observadas as variáveis ambientais que envolvem a ventilação, a temperatura e a umidade relativa do ar no microclima da instalação (SHANE, ENDRES, JANNI, 2010).

O manejo tem como ponto de partida o revolvimento das camadas da cama, com o uso de implementos agrícolas apropriados (MOTA; ANDRADE; LEITE, 2019). Essa prática, geralmente realizada durante o momento em que as vacas estão na ordenha, promove a liberação de gases gerados pela fermentação dos resíduos e a incorporação de oxigênio, reduzindo a umidade e favorecendo a decomposição ideal para o a compostagem nesse sistema (SHANE, ENDRES, JANNI, 2010).

Em camas de *compost barn*, o calor é gerado como resultado da atividade microbiana, em um processo dinâmico de decomposição aeróbica que ocorre com o incremento das fezes e da urina dos animais (JANNI *et al.*, 2007). Assim, o processo de compostagem é favorecido quando há um equilíbrio entre proporções de carbono, nitrogênio e outros nutrientes, que são essenciais para o crescimento microbiano benéfico (DE BOER; WIERSMA, 2021; LESO *et al.*, 2020). Enquanto isso, a incorporação de oxigênio na cama contribui diretamente no processo de decomposição aeróbica e na manutenção da temperatura da cama em níveis adequados (BLACK *et al.*, 2013; COTTA *et al.*, 2015).

O monitoramento dos parâmetros térmicos da cama permite o controle e o bom manejo em sistemas *compost barn*. Em condições inadequadas com baixas temperaturas da cama, por exemplo, a inibição de agentes patogênicos é reduzida e a proliferação de microrganismos termofílicos é suprimida (BLACK *et al.*, 2013), enquanto para condições de umidade excessiva, surgem riscos como a compactação da cama (DAMASCENO, 2020) e o comprometimento da higiene do úbere dos animais (ALBINO *et al.*, 2017).

A utilização de ventiladores é fundamental, tanto para a secagem da cama, incorporação de oxigênio e dissipação do calor interno do galpão quanto para o conforto térmico dos animais (VIEIRA *et al.*, 2021). Nas situações de aumento de umidade, torna-se necessário o ajuste da ventilação associado ao revolvimento adicional de material de cama (DAMASCENO, 2020). Assim, são recomendados os escarificadores para alcance das camadas mais profundas de cama, assim como a enxada rotativa para a quebra de torrões, a fim de auxiliar o processo de evaporação e secagem (MOTA; ANDRADE; LEITE, 2019).

O material de cama precisa ter boa capacidade de retenção de água, boa relação C:N, estrutura que minimize os riscos de compactação, além de ser acessível e ter custo atrativo, sendo os tipos mais utilizados para esse sistema a serragem e a raspa de madeira, devido ao seu bom desempenho para a compostagem (DAMASCENO; FERRAZ, 2020). Alguns materiais de cama apresentam melhor desempenho ao favorecer a absorção de umidade e a manutenção da higiene do úbere, o que contribui para a prevenção de problemas sanitários. Somado a isso, a contaminação microbiológica na cama varia com o tipo de material (FERRAZ *et al.*, 2020a).

No Brasil, a serragem seca, como subproduto de serrarias, tem sido tradicionalmente utilizada como substrato para camas em *compost barn*. A prevalência de uso da serragem foi observada em 52,9% das propriedades leiteiras avaliadas por Radavelli *et al.* (2020), em levantamento realizado no estado de Santa Catarina, Brasil. Um estudo posterior, realizado por Oliveira *et al.* (2019), em Minas Gerais, mostrou que a utilização de serragem predominou em 52,9% das fazendas avaliadas. No entanto, com o aumento dos custos e a escassez desses materiais, várias alternativas vêm sendo exploradas como potenciais substitutos, tanto no Brasil quanto em outras partes do mundo (EBERLE *et al.*, 2024; FERRAZ *et al.*, 2020a).

Por fim, o gerenciamento correto do manejo da cama favorece a obtenção de um ambiente confortável e saudável aos animais, permitindo que as vacas caminhem em uma superfície macia. Além disso, o monitoramento da temperatura superficial da cama é um aspecto fundamental, pois, em instalações *compost barn*, essa medida é indispensável para avaliar a qualidade e a eficiência do processo de compostagem (BARBERG *et al.*, 2007; LESO *et al.*, 2013; MOTA *et al.*, 2017; PILATTI *et al.*, 2019).

Estudos de Black *et al.* (2014) apontaram que a temperatura ambiente era a única variável associada à concentração de agente causadores de mastite ambiental, em modelos multivariáveis avaliados. As bactérias termofílicas são oriundas de muitas fontes, incluindo área de cama, solo e fezes de animais, podendo sobreviver a temperaturas superiores a 55 °C. Caso essas bactérias não possam ser controladas no interior da instalação, as perdas financeiras para

os produtores tornam-se substanciais, diante dos parâmetros de qualidade do leite exigidos (DRIEHUIS; LUCAS-VAN DEN BOS; WELLS-BENNIK, 2014).

2.1.2 Conforto de vacas leiteiras em sistema *compost barn*

Os ajustes posturais em vacas leiteiras consistem em um parâmetro importante para avaliar conforto e bem-estar, e alterações no comportamento de deitar podem ser indicadores e preditores de problemas como lesões cutâneas, claudicação e sanidade do úbere (SADIQ *et al.* 2017). Para além da duração total do comportamento de deitar-se, outros fatores relacionados a esse padrão são afetados pelo manejo e por aspectos construtivos da instalação. A análise dessas respostas pode elucidar os fatores que levam às alterações comportamentais observadas (LEDGERWOOD; WINCKLER; TUCKER, 2010). Assim, o ambiente de alojamento, especialmente o local de descanso dos animais, desempenha um papel crucial.

Nesse sentido, o confinamento de vacas leiteiras em *compost barn* tem sido amplamente adotado para promover melhorias nos indicadores de conforto e saúde (BARBERG *et al.*, 2007), por permitir que o rebanho circule livremente pela instalação e expresse padrões naturais de comportamento (FERNANDEZ *et al.*, 2020). Nesse sistema, condições favoráveis de temperatura de superfície da cama também podem aumentar a disposição das vacas para se deitar (ECKELKAMP *et al.*, 2016b). Vacas que passam mais tempo deitadas, sobretudo em condições de conforto térmico, tendem a apresentar um melhor desempenho produtivo (COOPER; ARNEY; PHILLIPS, 2007; PEIXOTO *et al.*, 2019).

Por outro lado, o tipo de material utilizado como cama nos sistemas de confinamento intensivos influencia significativamente o conforto das vacas, desempenhando um papel importante no bem-estar (FERRAZ *et al.*, 2020b; SALFER; SIEWERT; ENDRES, 2018). As vacas passam mais tempo deitadas quando são fornecidas camas macias (ENDRES, 2009), profundas (WOLFE *et al.*, 2018) e secas (SCHÜTZ *et al.*, 2019).

Dimov *et al.* (2017) investigaram a relação entre diferentes tipos de cama (como areia, palha, piso de borracha, entre outros) e a temperatura da cama, avaliando indicadores de conforto, incluindo a postura das vacas e a quantidade de tempo gasta deitada. E como resultado, os autores concluíram que a menor variação nas temperaturas mínimas e máximas foi observada em instalações com cama de composto e palha, sugerindo que essa combinação pode fornecer um ambiente mais confortável para as vacas em comparação com tapetes de borracha, por exemplo. O estudo também revelou que as vacas demonstravam preferência por superfícies

mais frias, capazes de facilitar a transferência de calor por condução, contribuindo para a redução da temperatura corporal. Li *et al.* (2021) desenvolveram testes de preferência utilizando câmeras de monitoramento em vídeo, avaliando diferentes materiais de cama, como casca de arroz, casca de amendoim e uma mistura de ambos. O estudo combinou a análise da preferência das vacas com a avaliação do escore de sujidade, e os resultados indicaram que a cama composta por casca de amendoim, bem como a mistura de casca de amendoim e arroz, oferece condições favoráveis à manutenção da saúde e do conforto de vacas leiteiras.

Estudos que avaliam diferentes sistemas de alojamento sob a perspectiva do escore de sujidade e da saúde do úbere sugerem que vacas mantidas em galpões com amplas áreas de cama, como o *compost barn*, apresentam maior grau de sujidade. Essa condição pode ser atribuída ao maior tempo que os animais passam deitados, o que os expõe a maiores desafios sanitários. Esses resultados sugerem a necessidade de mais investigações sobre o impacto dos diferentes sistemas de confinamento intensivo no conforto e bem-estar animal (BOUFFARD *et al.*, 2017; EMANUELSON *et al.*, 2022; FERNÁNDEZ *et al.*, 2020; DE ANDRADE KOGIMA *et al.*, 2022; LOBECK *et al.*, 2011).

Em um estudo conduzido por Costa *et al.* (2018) no estado do Paraná, Brasil, foram avaliadas 50 fazendas leiteiras, classificadas em três sistemas de confinamento distintos: *compost barn* (CB), free-stall (FS) e um modelo misto CB + FS. Os resultados indicaram que a prevalência de claudicação e lesões no jarrete foi menor nos rebanhos confinados em fazendas que utilizavam apenas o *compost barn*, em comparação com os demais sistemas. Além disso, o estudo não encontrou diferenças significativas no tipo de cama entre os grupos experimentais que pudessem estabelecer uma relação direta com essas manifestações clínicas. Estudos semelhantes relatam que, embora a claudicação em vacas leiteiras tenha causas multifatoriais, há associações importantes entre o escore de sujidade dos animais, o ambiente de alojamento e a ocorrência de claudicação.

Para um sistema *compost barn*, compreender as condições meteorológicas e climáticas locais é fundamental, sobretudo, estabelecer índices de conforto a partir do monitoramento das variáveis ambientais no interior da instalação (SILVA *et al.*, 2020). Nesse sentido, diversos pesquisadores têm destacado o monitoramento conjunto de variáveis fisiológicas e ambientais, para a discussão de índices de conforto térmico para bovinos confinados, incluindo galpões *compost barn* (ANDRADE *et al.*, 2022; PEIXOTO *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2020).

O índice de estresse térmico mais amplamente utilizado é o Índice de Temperatura e Umidade (ITU), proposto por Thom (1959). Embora originalmente desenvolvido para avaliar

o conforto térmico humano, o ITU foi posteriormente adaptado e diferentes equações foram derivadas da formulação original, para avaliar o estresse térmico em bovinos. Essas variações decorrem, principalmente, da forma como consideram o efeito da umidade no ambiente. Bohmanova, Misztal e Cole (2007) analisaram diferentes equações de ITU para vacas leiteiras e concluíram que determinados índices são mais adequados para aplicação em climas úmidos. Em contrapartida, em regiões onde a umidade não compromete significativamente a dissipação de calor por evaporação, índices que priorizam a temperatura do ar são mais apropriados. Os autores destacam que o índice proposto pelo NRC (1971) apresenta um limiar mais elevado para estresse térmico em condições de clima semiárido.

Berman *et al.* (2016) reforçam essa perspectiva ao argumentar que, em condições de baixa umidade, não há diferenças significativas entre os índices de estresse térmico atualmente utilizados e aqueles baseados exclusivamente no calor sensível. Isso sugere que, embora determinados índices sejam projetados para ambientes com maior umidade, suas vantagens podem ser limitadas em climas semiáridos ou com baixa umidade relativa do ar.

Outra forma de compreender o estresse térmico em instalações zootécnicas, utilizando índices de conforto térmico, é através da mensuração da entalpia específica (h) (BARBOSA FILHO *et al.*, 2006). Esse método se baseia nas propriedades termodinâmicas do ar predominantes no local, fisicamente expressas pela quantidade total de energia em uma unidade de massa de ar seco (kJ/kg de ar seco) (ALBRIGHT, 1990; BRITTO, 2010).

A entalpia específica do ar é recomendada como um indicador na avaliação das condições de alojamento de animais porque, diferentemente de outros índices, este se fundamenta em propriedades termodinâmicas do ar e não em regressões lineares (DE CASTRO JÚNIOR; SILVA, 2020). É importante ressaltar que muitos índices conhecidos no campo da ambiência animal, apesar de amplamente divulgados, se baseiam em regressões lineares, obtidas em experimentos com particularidades de país e raça, o que requer atenção em seu uso (SARNIGHAUSEN, 2019).

Com base nisso, Rodrigues *et al.* (2011) propuseram uma equação direta para o cálculo da entalpia específica no microclima das instalações pecuárias, reformulando a equação original de Albright (1990). Os autores refutaram que equações anteriores não consideravam o fato que as variáveis psicrométricas variam de acordo com a pressão atmosférica local. Além disso, concluíram que é mais simples calcular a entalpia usando a temperatura de bulbo seco e a umidade relativa do ar, em vez da razão de mistura, conforme proposto por Albright (1990).

Índices como ITU e entalpia, portanto, combinam os efeitos da temperatura e da umidade do ar, variáveis que podem ser facilmente monitoradas em instalações *compost barn*.

O monitoramento pode ser realizado por meio de termo-higrômetros portáteis (OLIVEIRA *et al.*, 2016), bem como por outros tipos de dispositivos eletrônicos, sejam comerciais (DIAS BATISTA *et al.*, 2021) ou de fabricação própria (SILVA *et al.*, 2023), equipados com módulos *dataloggers* para registro e armazenamento de dados.

No contexto da zootecnia de precisão, Laurindo *et al.* (2022) exploraram o uso da inteligência artificial para automatizar a análise do comportamento de vacas leiteiras alojadas em uma instalação *compost barn*, abrangendo as quatro estações do ano, no estado de Minas Geria, Brasil. Um sistema computacional baseado em IA foi desenvolvido para identificar e quantificar o comportamento dos animais, distinguindo especificamente entre os momentos em que estavam deitados ou em pé, e, comparar com os resultados de ITU. Além de simplificar o processo de análise, a tecnologia se mostrou eficaz para monitorar a interação das vacas com o ambiente, evidenciando o papel promissor das tecnologias mais recentes para o setor agropecuário.

Contudo, diante de controvérsias substanciais sobre a confiabilidade no uso do ITU (WANG *et al.*, 2018), os especialistas na área comumente buscam compreender o conforto térmico animal com base na zona de termoneutralidade (SHEPHARD; MALONEY, 2023). Nãas (1989) menciona que a faixa de temperatura considerada ideal para garantir o conforto de vacas em lactação varia entre 4°C e 24°C. Müller (1982) considera temperaturas de -5°C a 21°C como limite para a produção de vacas Holandesas, enquanto raças de menor porte, como Jersey e Pardo-suíça, possuem um limite um pouco mais elevado, atingindo 24°C. Huber (1990) acrescenta que, para vacas da raça Holandesa, o limite máximo de temperatura tolerado é de 26°C, considerando-se também uma umidade relativa do ar ideal entre 65% e 70%. Acima desses valores, os animais entram em estado de estresse térmico por calor. Baêta e Souza (2010) indicam que a temperatura efetiva crítica superior para bovinos adultos de raças europeias é de 27°C, enquanto para raças zebuínas esse limite pode chegar a 35°C.

Silva (2000) destaca que, embora a temperatura do ar seja frequentemente considerada o principal fator climático, seus efeitos sobre os animais estão diretamente relacionados à umidade atmosférica, especialmente para aqueles que dependem da evaporação para regular a temperatura corporal. Em ambientes muito quentes, tanto o excesso quanto a escassez de umidade podem comprometer a termorregulação.

O impacto do estresse térmico por calor em vacas leiteiras inclui, inicialmente, a redução do consumo de alimentos, o aumento na ingestão de água e a elevação da frequência respiratória, além de ajustes posturais (PEREIRA, 2005). Esses sinais são mais evidentes quando as vacas são expostas a temperaturas elevadas, em um ambiente razoavelmente úmido.

No entanto, conforme a temperatura ambiente permanece alta e a umidade aumenta, as vacas passam a exibir sinais mais significativos de estresse, com respiração ofegante, boca aberta e língua para fora, além de uma queda acentuada na produção de leite (HABEEB *et al.*, 2023). Nessas condições, a evaporação pela pele e pelo trato respiratório é inibida, prejudicando os mecanismos naturais de dissipação de calor (WEST, 2003).

Por outro lado, a baixa UR pode trazer uma série de desafios para a criação de vacas leiteiras. Um dos principais problemas está relacionado à desidratação, já que ambientes com UR abaixo do ideal aumentam a taxa de evaporação corporal, comprometendo o equilíbrio hídrico dos animais (SILVA, 2000). Além disso, ambientes secos com UR abaixo de 50%, podem causar irritação nas vias respiratórias, tornando as vacas mais suscetíveis a infecções e doenças respiratórias, impactando diretamente sua saúde e produtividade (MALÁ; NOVÁK, 2021).

2.1.3 Pesquisas científicas desenvolvidas no Brasil

A publicação de estudos de Damasceno (2012) referente a sua tese de doutorado intitulada *Compost Bedded Pack Barns system and computational simulation of airflow through naturally ventilated reduced model*, e desenvolvida nos EUA, pode ser considerada pioneira no âmbito da produção científica do Brasil. De forma cronológica, pesquisas apontam que projetos com instalações do tipo *compost barn* só começaram a ser empregados no país por volta de 2012 (BRITO, 2016). Desde então, esse sistema passou a ser cada vez mais utilizado pelos produtores, de forma que atualmente, as instalações encontram-se difundidas em diversos estados brasileiros, a citar os estados de São Paulo (FÁVERO *et al.*, 2015), Minas Gerais (OLIVEIRA *et al.*, 2016), Santa Catarina (DALCHIAVON *et al.*, 2017), Rio Grande do Sul (BREITENBACH, 2018), Paraná (PILATTI, 2019), Ceará (PEIXOTO *et al.*, 2019), Pernambuco (SILVA *et al.*, 2020), e Sergipe (SIQUEIRA *et al.*, 2022).

Nesse sentido, alguns estudos foram realizados em instalações *compost barn* a fim de investigar variações arquitetônicas (SILVA *et al.*, 2021; VALENTE *et al.*, 2020), distribuição espacial de diversas variáveis de interesse (DAMASCENO *et al.*, 2019), comportamento e bem-estar animal (PILATTI; VIEIRA, 2017; VIEIRA *et al.*, 2021), modelos computacionais (OBANDO VEGA *et al.*, 2022) parâmetros de conforto térmico (GUESINE; SILVEIRA; SILVA, 2023), sanidade do úbere (FONSECA, *et al.*, 2023), escores de locomoção e lesões de casco (COSTA *et al.*, 2018), composição do leite (NOGARA *et al.*, 2021), materiais de cama

alternativos (LLONCH *et al.*, 2020; SAMPAIO *et al.*, 2021), sistemas de ventilação (ANDRADE *et al.*, 2020), manejo de revolvimento da cama e desempenho de implementos agrícolas (MOTA; ANDRADE; LEITE, 2019), aproveitamento do composto para fins agrícolas (DAMASCENO *et al.* 2020), e rentabilidade econômica (SILVA *et al.*, 2019).

Oliveira *et al.* (2019) buscaram compreender a real dinâmica da adoção de sistemas *compost barn* no estado de Minas Gerais. Para isso, os pesquisadores aplicaram um questionário em 16 instalações, distribuídas em quatorze municípios, a fim de avaliar como foram conduzidos os projetos de implantação dos galpões e as suas características de dimensionamento. Além disso, foram coletados dados sobre a produção, o manejo da cama e o grau de satisfação dos produtores. O estudo revelou que cerca de 75% das instalações não foram planejadas a partir de adaptações a estruturas antigas, assim, a escolha por galpões novos foi predominante entre os produtores. No entanto, apenas 29,5% das instalações foram construídas na orientação Leste-Oeste, considerada mais adequada para as condições locais, sendo a maioria (52,9%) disposta na direção Noroeste-Sudeste. Quanto aos demais aspectos construtivos, o estudo encontrou variações significativas entre os projetos e inferiu que até o momento da publicação, não foi observado um padrão de construção definido para a região. Por fim, apesar dos desafios encontrados, os produtores alegaram estar satisfeitos com o sistema, em virtude dos bons resultados alcançados, em termos de aumento na produção de leite e melhorias nas condições de conforto e sanidade do rebanho.

Um amplo estudo conduzido por Radavelli *et al.* (2020a) identificou fatores ambientais e de manejo que interferem no bem-estar dos rebanhos confinados em sistema *compost barn*. Os pesquisadores avaliaram 30 fazendas leiteiras, localizadas em oito municípios do estado de Santa Catarina, a fim de reunir informações sobre o manejo empregado em condições de clima subtropical. Para os parâmetros de termorregulação, o estudo recomendou atenção quanto ao conforto térmico dos rebanhos para essa região, onde 53,3% das 1.020 vacas em lactação avaliadas apresentaram frequência respiratória acima de 60 mov./min. Quanto aos parâmetros de sanidade, em geral, as propriedades apresentaram índices satisfatórios, sobretudo, no que se refere aos escore de locomoção e de sujidade do úbere. Além disso, fatores estruturais foram considerados. Observou-se que apenas 13,3% dos galpões foram construídos como adaptação a estruturas convencionais, enquanto 86,7% correspondiam aos galpões novos e construídos especificamente para essa finalidade. Porém, os pesquisadores observaram que muitos projetos não contemplaram recomendações construtivas importantes, tais como a abertura de cumeeira, disposição de pilares fora da área de cama, disposição de comedouros,

dentre outros. Já a orientação do telhado no sentido Leste-Oeste foi verificada em 50% das instalações.

A partir do estudo anterior, Radavelli *et al.* (2020b) abordaram resultados adicionais, e com ênfase na caracterização das instalações *compost barn* por meio de análise multivariada. Os pesquisadores buscaram investigar a existência de heterogeneidade no dimensionamento dos galpões e/ou nas características de manejo, que fosse significativamente relevante para a gestão das fazendas. Como resultado, o estudo agrupou 12 variáveis e classificou as propriedades em três grupos, conforme os fatores de tamanho e período de ocupação da instalação, assim como nível de intensificação do manejo de cama. Assim, os três grupos foram classificados como: galpão convencional e adaptado, galpão grande convencional e galpão de uso parcial. Um ponto de destaque foi dado para esse último grupo, no qual os produtores relataram confinar parcialmente os animais, em função das variações climáticas, considerando os horários mais quentes do dia e os períodos de maior concentração de chuvas.

Bran *et al.* (2019) realizaram um levantamento em 50 propriedades leiteiras, as quais alojavam os animais em sistemas *free-stall* e/ou *compost barn*, no estado do Paraná, e identificaram que para baias de *free-stall* cobertas por colchões e cama formada por serragem, houve uma maior prevalência de claudicação quando comparada às camas de *compost barn*. Segundo os autores, ao compararem o alojamento em *free-stall* com cama de areia e galpões *compost barn*, não foram encontradas diferenças significativas na claudicação, conferindo condições de conforto mais favoráveis para os animais, em relação às condições de camas formadas por serragem em sistemas *free-stall*. Os resultados deste estudo também indicaram que 15 propriedades que utilizavam *free-stall*, possuíam galpões *compost barn* para o alojamento de determinados lotes, como de animais em tratamento de mastite ou de baixa produção.

Diversos estudos utilizaram a geoestatística para verificar a variabilidade espacial do ambiente térmico em instalações *compost barn*, tanto para condições de ventilação natural (OLIVEIRA *et al.*, 2016), e mecânica (OLIVEIRA *et al.*, 2022), como para sistemas de climatização (DAMASCENO *et al.*, 2019). Pesquisas envolvendo análises geoestatísticas também foram abordadas a fim de discutir a influência dos índices de conforto térmico para animais confinados nesse sistema (MOTA *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2020).

Oliveira *et al.* (2019) estudaram a distribuição espacial do Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e do nível de ruídos, com o uso da técnica de geoestatística, no estado de Minas Gerais. A variabilidade dos parâmetros de interesse foi abordada considerando-se três sistemas de ventilação: natural, mecânica (sistema de baixo volume e alta rotação – LVHS) e mecânica

(sistema de alto volume e baixa rotação – HVLS). Os autores observaram valores mais elevados de ITU nas condições de ventilação do tipo HVLS, enquanto para a variabilidade de ruído, os pontos mais críticos foram observados com a ventilação do tipo LVHS. No geral, a partir dos resultados de ITU, o estudo sugeriu que a ventilação natural não deve ser utilizada como único recurso de dissipação de calor de bovinos confinados em sistema *compost barn*, contudo, os aspectos construtivos das instalações avaliadas foram pouco aprofundados.

Um estudo com abordagem metodológica semelhante foi desenvolvido posteriormente por ANDRADE *et al.* (2020), contudo, os pesquisadores investigaram possíveis diferenças nos níveis de iluminação e ruído entre o *compost barn* fechado (controle climático) e o galpão aberto (ventilação natural). Conforme os autores, o design construtivo do galpão fechado, que depende exclusivamente de iluminação artificial, mostrou limitações na oferta de luz adequada. Essa insuficiência foi atribuída à redução da eficiência luminosa das lâmpadas ao longo do tempo e ao acúmulo de poeira nas superfícies. O estudo também destacou que apesar de os níveis de ruído se mostrarem mais elevados nos galpões climatizados, as pressões sonoras registradas em ambos os tipos de estruturas permaneceram dentro das faixas recomendadas, não excedendo os limites considerados desconfortáveis para o bem-estar dos animais.

Analisando mapas de krigagem, Vieira *et al.* (2021) observaram que a heterogeneidade da ventilação no interior da instalação relacionou-se fortemente com a variabilidade da temperatura da cama, com implicações importantes no comportamento de dominância entre os animais. Esses resultados foram obtidos em condições de clima subtropical, onde foram considerados parâmetros ambientais, por meio do monitoramento mínimo. O estudo revelou que as vacas multíparas exerceram dominância diante de vacas primíparas, posicionando-se nas áreas de cama com maior ventilação, principalmente nos horários mais quentes do dia. Essa análise corroborou com resultados indicados pelos mapas, os quais mostraram que as áreas de cama com melhores condições de temperatura do ar e velocidade dos ventos, foram as mesmas em que os animais buscaram aglomerar-se. Assim, a referida concentração de vacas dominantes justificou a tendência de altas temperaturas da cama nesse local. Além disso, os pesquisadores identificaram que as vacas dominantes priorizaram o consumo de alimento nos horários de maior conforto térmico.

Resultados comportamentais semelhantes foram encontrados por Peixoto *et al.* (2019), no entanto, a variabilidade da temperatura da cama foi investigada para condições de clima semiárido, no país. Para ambos os estudos, o sistema de ventilação foi controlado manualmente, e as vacas priorizaram o descanso nas porções de cama com maior ventilação,

conforme o acionamento dos ventiladores nos períodos mais críticos, implicando em variações importantes na discussão da distribuição espacial dos atributos térmicos da cama.

Andrade *et al.* (2022) utilizaram métodos geoestatísticos por meio de dados coletados em uma instalação *compost barn* climatizada no formato túnel de vento, equipada com resfriamento evaporativo, no estado de Minas Gerais, com a finalidade de investigar a termorregulação das vacas nas estações de verão e inverno, nesse modelo. O estudo abordou que apesar de as respostas produtivas não terem apresentado alterações significativas, a tipologia da instalação e o sistema de ventilação não foram eficientes na redução da temperatura do ar, em função do microclima esperado. Os pesquisadores também mencionaram resultados inadequados quanto aos valores de pH, teor de umidade e temperatura da cama, e que provavelmente ocorreram devido à alta densidade de alojamento.

Estudos adicionais abordaram a utilização de métodos de análise geoestatística em galpões com sistema de túnel de vento, no Brasil (DAMASCENO *et al.*, 2019; OLIVEIRA *et al.*, 2021). De outra maneira, estudos utilizando CFD (*Computational Fluid Dynamics*) buscaram explicar o fluxo de ar em galpões *compost barn*, comparando diferentes sistemas de ventilação (FAGUNDES *et al.*, 2020), bem como testes de calibração de anemômetros, em condições distintas de estudo, dentre estas, uma simulação comparativa em túnel de vento e em situação de campo (VEGA *et al.*, 2020).

Um modelo CFD para análises em sistema *compost barn* também foi validado por Zanetoni *et al.* (2023). Os autores compararam dados de velocidade do ar em duas alturas (0 e 1,5 m da superfície da cama), simulados para prever a dinâmica da ventilação no interior do galpão e avaliar as condições de conforto das vacas. Como resultado, observaram valores médios de velocidade do ar inferiores aos padrões recomendados pela literatura, com destaque para a formação de zonas mortas de ventilação identificadas pela malha de medição do modelo, indicando a necessidade de adequações.

Considerando que muitos estudos foram desenvolvidos nos estados do Sul e Sudeste, alguns pesquisadores buscaram compreender a dinâmica da utilização de sistemas *compost barn* no Nordeste brasileiro. Em um estudo de Sampaio *et al.* (2021), a utilização de bagana de carnaúba como material de cama alternativo é relatada. Segundo os autores, apesar da boa aceitação dos animais, o material apresentou rápida degradação, conferindo valores de relação C:N inadequados, durante todo o período experimental. Além disso, os gestores da fazenda optaram por retirar a cama totalmente do galpão, com menos de 200 dias de uso, como medida de prevenção contra pontuações altas de sujeira das vacas.

Estudos anteriores investigaram a termorregulação de vacas leiteiras confinadas em clima semiárido, durante os períodos seco e chuvoso. Peixoto *et al.* (2019), avaliando dados fisiológicos e ambientais, observaram valores críticos de frequência respiratória, acima de 80 mov./min., conferindo estresse térmico severo aos animais. Os pesquisadores também utilizaram a análise geoestatística para explicar a distribuição espacial da temperatura superficial da cama, e como resultado, verificaram que o período seco apresentou condições mais desfavoráveis, em comparação ao período chuvoso. Siqueira *et al.* (2022), encontraram condições deletérias de estresse térmico, para ambos os períodos, a partir de observações de índices de conforto térmico, ITU e ITGU.

Silva *et al.* (2020) reuniram um conjunto de metodologias a fim de explorar o ambiente térmico de galpões *compost barn* no semiárido. Para isso, os pesquisadores utilizaram técnicas de termografia de infravermelho, assim como análises geoestatística e multivariada. Os dados resultaram em forte relação entre a temperatura do ar e a temperatura da cama, e um índice de conforto térmico por meio de modelo de regressão linear ($R^2 = 0,996$; $p < 0,0001$) foi sugerido.

2.2 Zootecnia de Precisão na pecuária leiteira

Diversas ferramentas tecnológicas de interesse científico estão presentes na Zootecnia de Precisão, das quais, conferem possibilidades que incluem o uso de tecnologias da informação, microeletrônica, técnicas de modelagem computacional, monitoramento por imagens, sensores e atuadores, com o objetivo de reduzir perdas e aumentar o controle acerca do sistema produtivo (PANDORFI; ALMEIDA; GUISELINI, 2012).

Na bovinocultura de leite, estudos baseados em visão computacional, robótica, tecnologia IoT e *Big Data* estão sendo realizados com a proposta de otimizar o manejo e o tratamento de gestão de dados nas fazendas. Pesquisas nesse sentido são impulsionadas pelos avanços positivos alcançados por pesquisadores no mundo todo, a partir de estudos relacionados a Zootecnia de Precisão (ANDRIAMANDROSO *et al.*, 2017; ARCIDIACONO *et al.*, 2021; BERCKMANS, 2014; SCHILLINGS; BENNETT; ROSE, 2021).

Em bovinos, os padrões comportamentais podem ser avaliados com base em visão computacional, o que inclui alerta de claudicação precoce, detecção de estro e previsão de parto (BORCHERS *et al.*, 2017; WARNER *et al.*, 2020). Isso se torna possível com o uso de microssistemas eletrônicos (*Micro Electro Mechanical System – MEMS*) equipados nos

animais, como é o caso de acelerômetros, os quais são utilizados como ferramenta de rastreamento e de medição de níveis de atividades, e que ao combinar-se com sistemas de visão computacional e localização em tempo real (*Real-Time Location System* – RTLS) permitem a obtenção de dados comportamentais de forma abrangente, objetiva e menos invasiva (MELZER; FORIS; LANGBEIN, 2021).

Nos últimos anos, esses sistemas têm sido úteis em estudos da bovinocultura de precisão, que envolvem testes de preferências de vacas leiteiras relacionados ao comportamento de descanso (SALAU; KRIETER, 2020).

Vacas leiteiras expressam melhor desempenho quando se encontram em uma rotina diária de manejo e de eventos repetidos, o que contribui para os estudos de análise de padrão comportamental e aprendizado profundo de máquinas (*deep learning*) (MEUNIER *et al.*, 2018; PORTO *et al.*, 2013). Esses animais também precisam deitar cerca de 12 a 14 horas por dia para descansar (GREENOUGH, 2007), dormir, aliviar o peso direcionado aos seus cascos e prover de ruminação adequada (BORCHERS *et al.*, 2017; WILSON *et al.*, 2022). A redução nesse tempo de descanso pode resultar em mudanças fisiológicas associadas ao estresse, afetando a saúde e a produção, isso porque o aumento no tempo gasto em pé coloca as vacas em risco de desenvolver lesões de casco (ECKELKAMP *et al.*, 2014). Associado a isso, o tempo de descanso influencia a otimização da circulação do sangue no úbere, essencial para uma boa produção de leite (RAO *et al.*, 2014).

Um dos métodos mais conhecidos é o uso de acelerômetros para medição de atividades de locomoção e índices de atividade, a fim de determinar estados reprodutivos e indicadores de saúde (SCHWEINZER *et al.*, 2019). No estudo de Benaissa *et al.* (2019), acelerômetros 3D montados na perna e no pescoço de vacas leiteiras previram o comportamento de deitar-se com alta precisão (98%). Schmeling *et al.* (2021) realizaram testes com acelerômetros para classificar automaticamente o comportamento de descanso de vacas leiteiras, combinados a um modelo de aprendizado de máquina, alojadas tanto no pasto quanto no celeiro.

A partir de outra abordagem, Liseune *et al.*, (2021), testaram algoritmos sequenciais de aprendizado profundo para a previsão de parto de 2363 vacas confinadas em *free-stall*, utilizando dados de sensores vestíveis. Sensores acoplados ao pescoço e perna dos animais mensuravam a cada minuto comportamentos como comer, ruminar, andar, deitar-se e permanecer em ócio. Como resultado, os pesquisadores conseguiram identificar 65% dos partos em 24 h e 57% dos partos que ocorreram dentro de 3h, com precisão de 77% e 49%, respectivamente.

De outra maneira, alterações comportamentais dos bovinos ao caminhar podem ser identificadas por meio de algoritmos direcionados para o monitoramento individual, possibilitando a detecção precoce de claudicação. Tais observações são possíveis, pois as vacas comumente reduzem a velocidade ao transitar no ambiente, mudam o ritmo das passadas, arqueiam as costas e abaixam a cabeça, como resposta compensatória a estímulos de dor (DYER *et al.*, 2007; VIAZZI *et al.*, 2013; ZILLNER *et al.*, 2018). Assim, métodos de detecção precoce de claudicação foram propostos para vacas leiteiras com base em algoritmos de aprendizado de máquina comparando a curvatura do dorso dos animais ao caminhar (JIANG *et al.*, 2022). Diante disso, o método convencional de detecção e classificação de claudicação em bovinos tem sido apontado como subjetivo por consistir em uma pontuação estabelecida por observações humanas, sendo influenciada por experiência e percepções do avaliador (RENN; ONYANGO; MCCORMICK, 2014).

Combinado às técnicas de aprendizado de máquina, Wang *et al.* (2022) desenvolveram estudos com vacas leiteiras a fim de propor práticas de monitoramento animal menos invasivas, e que garantissem, portanto, melhores condições de bem-estar animal. Com isso, os pesquisadores utilizaram uma plataforma automática, para a detecção de mastite por tecnologia de *deep learning*, a partir da mensuração da temperatura corporal por termografia de infravermelho, e como resultado, a acurácia do método foi de 85,71%. Métodos utilizando modelos de aprendizado de máquina também foram testados em bovinos, e relacionados a outras práticas zootécnicas importantes, como a identificação animal, o escore de condição corporal e a estimativa de peso (QIAO *et al.*, 2021; SHI *et al.*, 2023).

O método tradicional para mensuração da frequência respiratória em vacas leiteiras baseia-se na contagem manual por meio da visualização dos movimentos tóracoabdominais dos animais (PINTO *et al.*, 2019). No entanto, avanços tecnológicos recentes têm impulsionado a adoção de abordagens mais sofisticadas, integrando sensores eletrônicos e algoritmos de aprendizado de máquina. Essas inovações permitem um monitoramento mais preciso, automatizado e contínuo, reduzindo a subjetividade da avaliação e possibilitando a detecção precoce de alterações fisiológicas indicativas de estresse térmico ou condições adversas (JORQUERA-CHAVEZ *et al.*, 2019).

Uma dessas técnicas é a utilização de sensores de pressão diferencial, que medem as flutuações de pressão no nariz dos bovinos, permitindo a detecção precisa da frequência respiratória (STRUTZKE *et al.*, 2019). Técnicas de termografia infravermelha também têm sido empregadas para identificar variações de temperatura no fluxo de ar inspirado e expirado pelas narinas, oferecendo uma alternativa não invasiva para monitorar a frequência respiratória

(LOWE *et al.*, 2019). Outra metodologia inovadora é a bioacústica, que envolve a fixação de gravadores digitais nos cabrestos dos animais para captar os sons respiratórios. Esses áudios são posteriormente analisados com softwares especializados, permitindo a mensuração contínua da FR sem a necessidade de observação direta (VEIT *et al.*, 2018).

Em termos gerais, o crescimento no uso de tecnologias baseadas em microcontroladores e dispositivos eletrônicos tem se destacado no âmbito de pesquisas acadêmicas, especialmente em projetos de desenvolvimento de protótipos de baixo custo (KERA, 2017), bem como em pesquisas utilizando hardware de código aberto (PEARCE, 2012). Em uma ampla possibilidade de utilização, a configuração desses módulos pode ser realizada pelo software IDE de programação Arduino utilizando a linguagem C ou C++ (ABBA *et al.*, 2019), bem como por outras linguagens didaticamente usuais, como Python (FISHER; FLETCHER; ANAPALLI, 2021) e JavaScript (TSAKIRIDIS *et al.*, 2020).

Conforme Fisher e Gould (2012), os avanços em microcontroladores programáveis têm facilitado o desenvolvimento de dispositivos de monitoramento mais acessíveis e de fácil uso. Os autores destacam que essa evolução tecnológica viabilizou a criação de sistemas automatizados e econômicos para sensoriamento e registro de dados, amplamente aplicados em pesquisas voltadas à agricultura, por exemplo.

A crescente disponibilidade de sensores (KNIGHT, 2020), comunicação de dados sem fio – wireless (OJHA; MISRA; RAGHUWANSHI, 2015), bem como tecnologias de Internet das Coisas – IoT (ANDREW; MALEKIAN; BOGATINOSKA, 2018), têm possibilitado a medição e o monitoramento de uma ampla variedade de parâmetros ambientais no âmbito da zootecnia de precisão, destacando o potencial dos microcontroladores como uma solução eficiente e de baixo custo para projetos científicos. Além disso, destaca-se o fato que a IoT oferece amplas possibilidades de aplicação na agropecuária de precisão, impulsionadas, sobretudo, pelo desenvolvimento de dispositivos com direitos de propriedade intelectual independentes (OLIVEIRA *et al.*, 2020). Tais possibilidades são beneficiadas pelos protocolos abertos e/ou regulamentados que dispensam custos com direitos autorais (FISHER; FLETCHER; ANAPALLI, 2021).

2.2.1 *Aplicações de tecnologias IoT na bovinocultura*

A Internet das Coisas (IoT) refere-se a uma rede de dispositivos interconectados que utilizam a internet para transmitir e receber dados. Sua definição também abrange qualquer

objeto capaz de se conectar à rede para captar, armazenar e compartilhar informações. A arquitetura da IoT é composta por múltiplas camadas integradas com sensores, incluindo a camada de rede, responsável pela coleta e controle dos dados, e a camada de plataforma, encarregada do processamento e armazenamento permanente dessas informações (GZAR; MAHMOOD; AL-ADILEE, 2022; LEE; LEE, 2015; SYMEONAKI; ARVANITIS; PIROMALIS, 2020).

Conforme Oliveira *et al.* (2024), a maioria dos aplicativos de IoT opera com base em uma arquitetura de três camadas. A primeira camada consiste em sistemas embarcados projetados para monitoramento ambiental, caracterizados por dispositivos de baixo consumo, alta confiabilidade e operação em tempo real. A segunda camada, dedicada à comunicação, facilita a troca de informações entre dispositivos e com a terceira camada, o aplicativo, geralmente por meio de conexões sem fio. Por fim, a terceira camada é responsável por oferecer os serviços diretamente aos usuários ou sistemas solicitantes.

Javaid *et al.* (2022) destacam que os sensores desempenham um papel central na coleta de grandes volumes de dados em aplicações IoT. Esses dados, incompatíveis com o gerenciamento por bancos de dados tradicionais, são processados em sistemas agrícolas inteligentes que dependem de plataformas IoT e armazenamento em nuvem para transformá-los em informações relevantes.

De acordo com Bao e Xie (2022), tecnologias IoT podem ser aplicadas na pecuária como um recurso capaz de automatizar a gestão de dados por meio da comunicação entre sensores e dispositivos implantados nas fazendas, a partir do uso de plataformas *mobile* facilmente empregadas em aparelhos do tipo *smartphone*, conferindo a possibilidade de monitorar o ambiente em tempo real.

A utilização de sistemas embarcados para projetos envolvendo IoT é explorada em diversos estudos agropecuários, sobretudo, relacionados a comunicação Zigbee (PARK; HA, 2015), LoRa (PAGANO *et al.*, 2023) e outras tecnologias sem fio, incluindo Wi-Fi (SADOWSKI; SPACHOS, 2020). De outro modo, com a chegada do 5G, diversas inovações tecnológicas têm sido aplicadas ao setor agropecuário, incluindo veículos aéreos não tripulados (UAVs), monitoramento em tempo real, suporte técnico remoto e tecnologias emergentes, como realidade aumentada, robôs dotados de inteligência artificial e soluções baseadas em análise de dados e armazenamento em nuvem (MORRONE *et al.*, 2022).

Embora promissora, a implementação do 5G no universo da IoT ainda avança lentamente, permitindo que outras tecnologias se destaquem. Com o lançamento de novas placas de extensão, o LoRa vem se consolidando como uma solução capaz de oferecer maior

aplicabilidade (COSTA; DURAN-FAUNDEZ, 2018). Paralelamente, padrões de comunicação via Wi-Fi e Bluetooth continuam evoluindo em projetos agropecuários, principalmente com o crescente uso de microcontroladores da família ESP8266 (ZANETONI *et al.*, 2023).

Como abordado anteriormente, os rápidos avanços em tecnologias eletrônicas, bem como a ampla adoção de sensores e comunicações de rede sem fio, criaram uma série de oportunidades para atender às necessidades de pesquisadores no campo da agricultura e pecuária de precisão (AHMED; DE; HUSSAIN, 2018; MISHRA; SHARMA, 2023). Várias dessas tecnologias usam IoT como ferramenta para atender a inúmeras aplicações no contexto das fazendas inteligentes (AYAZ *et al.*, 2019). Como exemplo de aplicações inovadoras na bovinocultura, tem-se o uso de sensores sem fio, visão computacional e dispositivos habilitados para IoT, que permitem aos produtores monitorarem, em tempo real, aspectos como a saúde, o comportamento e as condições ambientais do alojamento dos animais (CAJA; CASTRO-COSTA; KNIGHT, 2016; MELZER; FORIS; LANGBEIN, 2021; SAAR *et al.*, 2022).

De maneira geral, as pesquisas relacionadas a aplicações de tecnologias IoT na bovinocultura concentram-se predominantemente no uso de sensores acelerômetros vestíveis (ANDRIAMANDROSO *et al.*, 2017; PRATAMA *et al.*, 2019; SHI *et al.*, 2023), embora também sejam relatados sensores ambientais (BOVO *et al.*, 2020), dispositivos intravaginais (REN *et al.*, 2023), etiquetas RFID (CHUNG *et al.*, 2020) e câmeras de monitoramento para análise por visão computacional (BEZEN; EDAN; HALACHMI, 2020).

Em estudos com bovinos, Germani *et al.* (2019), utilizaram tecnologias IoT a fim de realizar testes de monitoramento contínuo. Para isso, os pesquisadores reuniram em um hardware um conjunto de sensores vestíveis, baseados em Arduino Mega 2560 e Raspberry Pi, e conseguiram conduzir um projeto promissor, propondo uma rede de sensores de pequena escala para o manejo de bovinos utilizando tecnologia LoRa LPWAN.

Suresh e Sarath (2019) propuseram um sistema de monitoramento contínuo e em tempo real dos parâmetros de saúde em bovinos baseado em IoT, compreendendo uma rede de sensores sem fio (WSN) integrados a um microcontrolador. Tais sensores foram empregados para medir parâmetros críticos, como temperatura, umidade, frequência cardíaca e frequência de queda dos animais, este último por meio de acelerômetros. Os dados de um nó de coleta móvel foram carregados para uma plataforma em nuvem onde puderam ser analisados. Dispositivos IoT implantados em WSNs foram utilizados com objetivos semelhantes em um estudo com bovinos desenvolvido por Navarro *et al.* (2024), no entanto, o sistema de análise comportamental proposto foi realizado com base na arquitetura Edge Computing, permitindo uma verificação de dados mais rápida e abrangente.

Outro sistema inteligente de monitoramento contínuo de atividade baseado em IoT foi desenvolvido por Dutta *et al.* (2022). Os autores propuseram um dispositivo capaz de reunir um sensor de temperatura corporal, um acelerômetro de 3 eixos e um módulo GPS, este último direcionado para a análise da velocidade de caminhada dos bovinos. Os dados foram coletados por um microcontrolador integrado e transmitidos para um servidor remoto utilizando um módulo GSM baseado em SIM. Posteriormente, esses dados foram processados para extração de características e analisados por algoritmos inteligentes. Como resultado, verificou-se benefícios relevantes quanto a detecção precoce de atividades comportamentais de interesse para o manejo de bovinos, com base nas condições experimentais.

Apesar dos benefícios já atribuídos à IoT na Zootecnia de precisão, ainda há desafios significativos que precisam ser superados. Entre os principais obstáculos estão o gerenciamento de dados, a necessidade de garantir sua viabilidade econômica e a adoção dessas tecnologias por parte dos produtores (KARUNATHILAKE *et al.*, 2023; MISHRA; SHARMA, 2023). Segundo Biondi *et al.* (2022) as aplicações inteligentes também enfrentam desafios complexos relacionados à necessidade de gerenciar grandes volumes de dados com alta variabilidade em arquiteturas distribuídas, muitas vezes exigindo respostas em tempo real. Com isso, as aplicações IOT tornam-se particularmente vulneráveis a falhas, podendo ocasionar perdas substanciais de dados causadas por limitações de hardware, software, comunicação ou fornecimento de energia.

Ainda que a crescente acessibilidade a dispositivos eletrônicos tenha impulsionado o avanço das tecnologias IoT no setor agropecuário, promovendo mudanças importantes nos processos produtivos e nas decisões tomadas nas fazendas (AYAZ *et al.*, 2019), desafios como a diversidade de perfis agrícolas, a falta de mão de obra qualificada, a ineficiência na conectividade rural e a incerteza de disponibilidade de equipamentos eletrônicos no mercado dificultam a adesão a essas tecnologias (MILANEZ *et al.*, 2020; RIZAN *et al.*, 2024; TZOUNIS *et al.*, 2017). Além disso, soluções agrícolas baseadas em IoT devem ser projetadas com custos reduzidos para garantir sua acessibilidade aos usuários finais (RAY, 2017).

Conforme a conectividade rural se expande, a possibilidade de implementar sistemas de obtenção de dados em nuvem torna-se viável, permitindo o acesso por diversos dispositivos móveis. Esse avanço cria oportunidades relevantes para a integração de fluxos de dados provenientes de sensores, promovendo uma visão mais abrangente sobre o bem-estar animal e o desempenho produtivo (KNIGHT, 2020; MICHIE *et al.*, 2020).

2.2.2 Microeletrônica aplicada ao monitoramento em instalações compost barn

Conforme descrito por Polat (2020), os microcontroladores são considerados microcomputadores compactos, compostos por circuitos integrados projetados para executar tarefas específicas de monitoramento e controle. Esses dispositivos reúnem, em um único chip, a integração entre componentes necessários para operar de forma independente, caracterizando-se pelo baixo consumo de energia e pelo custo acessível. Dentre esses componentes, destacam-se os sensores e os atuadores. Thomazini e Albuquerque (2011, p. 17) definem sensores como um “termo empregado para designar dispositivos sensíveis a alguma forma de energia do ambiente que pode ser luminosa, térmica, cinética, relacionando informações sobre uma grandeza que precisa ser medida, como: temperatura, pressão, velocidade, corrente, aceleração, posição, etc.”. Ainda segundo Thomazini e Albuquerque (2011, p. 15), atuadores “são dispositivos que modificam uma variável controlada. Recebem um sinal proveniente do controlador e agem sobre o sistema controlado. Geralmente trabalham com potência elevada”.

Um microcontrolador pode integrar um ou mais CPUs (Unidade Central de Processamento) juntamente com memória e periféricos de entrada e saída programáveis, como memórias, barramentos, timers, portas de comunicação, conversores de sinal analógico em digital, permitindo que o usuário personalize um programa para operar diferentes módulos dentro de um circuito (IDRIS; IRDAYANTI; RAMLEE, 2024; OLIVEIRA; ANDRADE, 2010). Além disso, o usuário pode modificar o programa continuamente e alterar a funcionalidade do circuito sem a necessidade de realizar mudanças físicas no hardware (CODELUPPI *et al.*, 2020; POLAT, 2020).

Enquanto isso, há uma variedade considerável de linguagens de programação disponíveis, permitindo que programadores utilizem recursos avançados sem a necessidade de dominar a linguagem de montagem específica de cada microcontrolador. Somado a isso, os componentes são considerados acessíveis, com baixo custo e se são ofertados por diversos fornecedores ao redor do mundo (FISHER; KEBEDE, 2010).

Dentre as opções mais conhecidas por usuários em geral, os microcontroladores ESP8266 e ESP32 são usados por apresentarem baixo consumo e baixo custo combinadas a integração com a plataforma Arduino®, principalmente por possuir recursos de comunicação Wi-Fi (LÓPEZ; LAMO, 2023; ZANETONI *et al.*, 2023). Enquanto isso, estudos que utilizam placas Arduino são majoritariamente difundidos, sobretudo, em projetos de prototipagem acadêmica e profissional (KHALIFEH *et al.*, 2022; OLIVEIRA *et al.*, 2024; SILVA *et al.* 2023).

De acordo com Costa *et al.* (2018), a escolha do Arduino como plataforma base deve-se à sua popularidade, baixo custo, arquitetura de sistema aberto e ampla comunidade de entusiastas que oferece suporte online, difundido em uma série de fóruns virtuais. Contudo, o Arduino apresenta limitações para algumas aplicações de IoT, como por exemplo, a necessidade de integração com outros módulos de comunicação com a internet. Apesar dessas restrições, a disponibilidade de placas de extensão (shields) permite ampliar suas funcionalidades, conferindo maior flexibilidade e recursos adicionais.

O uso de microcontroladores em instalações de *compost barn* foi explorado por Silva *et al.* (2023), que apresentaram um protótipo portátil equipado com uma placa Arduino para medições de dados ambientais. O programa, desenvolvido em linguagem C++, permite executar comandos relacionados ao ITU e monitorar temperatura e umidade do ambiente por meio de um sensor DHT22. Para a comunicação dos dados em tempo real, os pesquisadores desenvolveram uma plataforma IoT com o uso de rede Wi-Fi. Dessa forma, o estudo mostrou que o uso de dispositivos eletrônicos se torna importante não apenas para monitorar o microclima em ambientes de confinamento em *compost barn*, mas também para fornecer dados de forma automática e em tempo real, disponíveis em nuvem.

Em diversos estudos sobre o monitoramento ambiental em sistemas agropecuários, os módulos sensores DHT11 e DHT22 são frequentemente mencionados. Esses sensores, amplamente utilizados para medir temperatura e umidade, destacam-se por sua ampla disponibilidade e baixo custo. Apesar de econômicos, oferecem precisão e alcance de medição considerados relativamente satisfatórios (AHMAD *et al.*, 2021; KAPLYA; KAPLYA; SILAEV, 2020; MISHRA *et al.*, 2019).

Oliveira *et al.* (2024) conduziram um estudo de monitoramento ambiental em sistemas *compost barn*, utilizando uma rede de sensores composta por módulos DHT22 integrados ao Arduino Uno R3. O monitoramento foi realizado durante o verão e o inverno, no estado de Minas Gerais, Brasil. Os pesquisadores exploraram os dados obtidos por meio de geostatística e destacaram tanto vantagens quanto limitações sobre o DHT22. Apesar de ser acessível e econômico, o sensor apresentou limitações relacionadas à precisão e ao alcance em comparação com os equipamentos comerciais testados. Os autores identificaram um bom potencial para a aplicação desses sensores no monitoramento ambiental, mas enfatizaram a necessidade de ajustes, especialmente no desenvolvimento de curvas de calibração para a variável umidade relativa do ar.

Oliveira *et al.* (2023) realizaram um estudo para avaliar o monitoramento de variáveis ambientais e a concentração de amônia em uma instalação de *compost barn* durante

o inverno no Brasil. Os autores testaram o desempenho de três módulos sensores eletroquímicos de amônia (MQ137, FECS44-100 e MIX2801), em comparação com uma unidade de monitoramento portátil padrão (iPMU). O estudo identificou diferenças significativas entre os registros dos sensores de amônia e do iPMU e destacou que as diferentes condições de temperatura e umidade relativa do ar impactou consideravelmente o desempenho dos módulos testados. Contudo, o sensor MQ137 foi considerado a opção mais adequada para as condições do estudo, pois apresentou resultados mais próximos aos registrados pelo iPMU e mostrou-se significativamente mais econômico.

Do mesmo modo, em um estudo envolvendo o monitoramento ambiental em uma instalação *compost barn*, Ferreira *et al.* (2024) utilizaram uma plataforma com múltiplos sensores, projetada para medir concentrações de gás, especificamente metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂). Os autores buscaram reunir uma unidade de processamento, um microcontrolador ATM2560 para processamento e transmissão de dados, bem como um módulo Raspberry Pi, em um dispositivo em formato de miniestação meteorológica e equipado com *dataloggers* e um anemômetro comercial. O estudo considerou a plataforma testada adequada para análise na variabilidade espacial de atributos ambientais em instalações *compost barn*.

Plataformas de microcontroladores, como o Arduino, oferecem uma solução acessível e fácil de aprender, permitindo que especialistas e fazendeiros criem seus próprios dispositivos. Embora menos precisos que os equipamentos laboratoriais, esses dispositivos destacam-se pelo custo-benefício, especialmente em países em desenvolvimento, com perdas financeiras mínimas em caso de danos (POLAT, 2020). Além disso, estudos indicam que sistemas de sensores podem beneficiar toda a cadeia de alimentos lácteos, destacando-se como uma ferramenta essencial para a segurança alimentar global (DŽERMEIKAITĖ; BAČĖNINAITĖ; ANTANAITIS, 2023; KNIGHT, 2020).

Com base na presente revisão, apesar de tais vantagens, a implantação de sistemas embarcados em estudos na pecuária ainda foi pouco explorada no Brasil. De fato, um obstáculo para a aplicação de técnicas da Zootecnia de Precisão, especialmente relacionadas a tecnologias IoT, consiste na falta ou limitações de conectividade com a internet no campo (MILANEZ *et al.*, 2020). Além disso, investir na formação de equipes multidisciplinares, que envolvam profissionais da engenharia elétrica, ciência da computação, e outros campos, juntamente com profissionais da área agrária, é fundamental (MORRONE *et al.*, 2022).

REFERÊNCIAS

- ABBA, S. *et al.* Design and Performance Evaluation of a Low-Cost Autonomous Sensor Interface for a Smart IoT-Based Irrigation Monitoring and Control System. **Sensors**, Basel, v. 19, n. 17, p. 3643, 2019.
- AHMAD, Y. A. *et al.* On the Evaluation of DHT22 Temperature Sensor for IoT Application. *In: 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AND COMMUNICATION ENGINEERING (ICCCE)*, 2021, Jeju Island. **Anais [...]**. Jeju Island: IEEE, 2021. p. 131-134.
- AHMED, N.; DE, D.; HUSSAIN, I. Internet of Things (IoT) for Smart Precision Agriculture and Farming in Rural Areas. **IEEE Internet of Things Journal**, Piscataway, v. 5, n. 6, p. 4890–4899, 2018.
- ALBINO, R. L. *et al.* Comparison of bacterial populations in bedding material, on teat ends, and in milk of cows housed in compost bedded pack barns. **Animal Production Science**, Melbourne, v. 58, n. 9, p. 1686–1691, 2017.
- ALBRIGHT, L. D. **Environment control for animals and plants**. St Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1990. 453 p.
- ANDRADE, R. R. *et al.* Lighting and noise levels in compost dairy barns with natural and forced ventilation. **Agronomy Research**, Tartu, v. 18, p. 689–698, 2020.
- ANDRADE, R. R. *et al.* Spatial analysis of microclimatic variables in compost-bedded pack barn with evaporative tunnel cooling. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 94, n. 3, p. e20210226, 2022.
- ANDREW, R. C.; MALEKIAN, R.; BOGATINOSKA, D. C. IoT solutions for precision agriculture. *In: 41ST INTERNATIONAL CONVENTION ON INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGY, ELECTRONICS AND MICROELECTRONICS (MIPRO)*, 2018, Opatija. **Anais [...]**. Opatija: IEEE, 2018. p. 0345-0349.
- ANDRIAMANDROSO, A. L. H. *et al.* Development of an open-source algorithm based on inertial measurement units (IMU) of a smartphone to detect cattle grass intake and ruminating behaviors. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 139, p. 126–137, 2017.
- ARCIDIACONO, C. *et al.* IoT device-based data acquisition system with on-board computation of variables for cow behaviour recognition. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 191, p. 106500, 2021.
- AYAZ, M. *et al.* Internet-of-Things (IoT)-Based Smart Agriculture: Toward Making Fields Talk. **IEEE Access**, Piscataway, v. 7, p. 129551–129583, 2019.
- BAO, J.; XIE, Q. Artificial intelligence in animal farming: A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 331, p. 129956, 2022.
- BARBERG, A. E.; ENDRES, M. I.; JANNI, K. A. Compost Dairy Barns in Minnesota: a

descriptive study. **Applied Engineering In Agriculture**, St. Joseph, v. 23, n. 2, p. 231-238, 2007.

BARBERG, A. E. *et al.* Performance and Welfare of Dairy Cows in an Alternative Housing System in Minnesota. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 90, n. 3, p. 1575–1583, 2007.

BARBOSA FILHO, J. A. D. *et al.* Avaliação Direta e Prática – Caracterização do ambiente interno de galpões de criação de frangos de corte utilizando tabelas práticas de entalpia. **Avicultura industrial**, Itu, v. 97, n. 4, p. 54-57, 2006.

BENAISSA, S. *et al.* On the use of on-cow accelerometers for the classification of behaviours in dairy barns. **Research in Veterinary Science**, Londres, v. 125, p. 425–433, 2019.

BERCKMANS, D. Precision livestock farming technologies for welfare management in intensive livestock systems. **Revue scientifique et technique**, Paris, v. 33, n. 1, p. 189–196, 2014.

BERMAN, A. *et al.* A comparison of THI indices leads to a sensible heat-based heat stress index for shaded cattle that aligns temperature and humidity stress. **International Journal of Biometeorology**, Berlim, v. 60, n. 10, p. 1453–1462, 2016.

BEWLEY, J. M.; ROBERTSON, L. M.; ECKELKAMP, E. A. A 100-Year Review: Lactating dairy cattle housing management. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 100, n. 12, p. 10418–10431, 2017.

BEWLEY, J. *et al.* **Compost Bedded Pack Barn Design – Features and Management Considerations**. Lexington, 2012. Disponível em: <https://publications.ca.uky.edu/sites/publications.ca.uky.edu/files/ID206.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2022.

BEZEN, R.; EDAN, Y.; HALACHMI, I. Computer vision system for measuring individual cow feed intake using RGB-D camera and deep learning algorithms. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 172, p. 105345, 2020.

BIONDI, G. *et al.* IoTracker: A probabilistic event tracking approach for data-intensive IoT Smart Applications. **Internet of Things**, Amsterdam, v. 19, p. 100556, 2022.

BLACK, R. A. *et al.* Compost bedded pack dairy barn management, performance, and producer satisfaction. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 96, n. 12, p. 8060–8074, 2013.

BLACK, R. A. *et al.* The relationship between compost bedded pack performance, management, and bacterial counts. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 97, n. 5, p. 2669–2679, 2014.

BOHMANOVA, J.; MISZTAL, I.; COLE, J. B. Temperature-Humidity Indices as Indicators of Milk Production Losses due to Heat Stress. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 90, n. 4, p. 1947–1956, 2007.

BORCHERS, M. R. *et al.* Machine-learning-based calving prediction from activity, lying, and ruminating behaviors in dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 100, n. 7, p. 5664–

5674, 2017.

BOUFFARD, V. *et al.* Effect of following recommendations for tiestall configuration on neck and leg lesions, lameness, cleanliness, and lying time in dairy cows. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 100, n. 4, p. 2935–2943, 2017.

BOVO, M. *et al.* A Smart Monitoring System for a Future Smarter Dairy Farming. *In: IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON METROLOGY FOR AGRICULTURE AND FORESTRY (METROAGRIFOR)*, 2020, [s.l.]. **Anais [...]**. [s.l.]: IEEE, 2020. p. 165-169.

BRAN, J. A. *et al.* Factors associated with lameness prevalence in lactating cows housed in freestall and compost-bedded pack dairy farms in southern Brazil. **Preventive Veterinary Medicine**, Amsterdam, v. 172, p. 104773, 2019.

BREITENBACH, R. Economic Viability of Semi-Confined and Confined Milk Production Systems in Free-Stall and Compost Barn. **Food and Nutrition Sciences**, Irvine, v. 9, n. 5, p. 609–618, 2018.

BRITO, Eduardo Corrêa. **Produção intensiva de leite em compost barn: uma avaliação técnica e econômica sobre sua viabilidade**. 2016. 57f. Dissertação (Mestrado profissional) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

BRITTO, J. F. B. Considerações sobre psicometria. **Revista SBCCv**, São Paulo, v. 45, p. 35-41, 2010.

CAJA, G.; CASTRO-COSTA, A.; KNIGHT, C. H. Engineering to support wellbeing of dairy animals. **Journal of Dairy Research**, Cambridge, v. 83, n. 2, p. 136–147, 2016.

CALDATO, E. M. R.; CALDATO, A.; MARCONDES, M. I.; ROTTA, P. P. **Manual técnico de construção e manejo de Compost Barn para vacas leiteiras**. 1.ed. Viçosa: Editora UFV, 2020. 35 p.

CHUNG, H. *et al.* Using implantable biosensors and wearable scanners to monitor dairy cattle's core body temperature in real-time. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 174, p. 105453, 2020.

CODELUPPI, G. *et al.* LoRaFarM: A LoRaWAN-Based Smart Farming Modular IoT Architecture. **Sensors**, Basel, v. 20, n. 7, p. 2028, 2020.

COOPER, M. D.; ARNEY, D. R.; PHILLIPS, C. J. C. Two- or Four-Hour Lying Deprivation on the Behavior of Lactating Dairy Cows. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 90, n. 3, p. 1149–1158, 2007.

COSTA, D. G.; DURAN-FAUNDEZ, C. Open-Source Electronics Platforms as Enabling Technologies for Smart Cities: Recent Developments and Perspectives. **Electronics**, Basel, v. 7, n. 12, p. 404, 2018.

COSTA, J. H. C. *et al.* Prevalence of lameness and leg lesions of lactating dairy cows housed in southern Brazil: Effects of housing systems. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 101, n. 3, p. 2395–2405, 2018.

COTTA, J. A. DE O. *et al.* Compostagem versus vermicompostagem: comparação das técnicas utilizando resíduos vegetais, esterco bovino e serragem. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 20, p. 65–78, 2015.

DALCHIAVON, A. *et al.* Análise comparativa de custos e produtividade de leite em diferentes sistemas de produção. *In*: XXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE CUSTOS (ABC), 2017, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: ABC, 2017. p. 1-16.

DAMASCENO, F. A. **Compost barn**: como alternativa para a pecuária leiteira. Divinópolis: Adelante, 2020. 396 p.

DAMASCENO, F. A. **Compost bedded pack barns system and computational simulation of airflow through naturally ventilated reduced model**. 2012. 391f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

DAMASCENO, F. A.; BRANDÃO, L. F. Projeto de instalações compost barn. *In*: DAMASCENO, F. A. **Compost barn**: como alternativa para a pecuária leiteira. Divinópolis: Adelante, 2020. p. 53-92.

DAMASCENO, F. A. *et al.* Determination of Thermal, Chemical and Physical Properties of Bedding Materials for Compost Dairy Barns. **Animals**, Basel, v. 12, n. 18, p. 2450, 2022.

DAMASCENO, F. A.; FERRAZ, G. A. S. Materiais e manejo da cama. *In*: DAMASCENO, F. A. **Compost barn**: como alternativa para a pecuária leiteira. Divinópolis: Adelante, 2020. p. 93-123.

DAMASCENO, F. A. *et al.* Estimate of manure present in compost dairy barn systems for sizing of manure storage. **Agronomy research**, Tartu, v. 18, p. 1213-1219, 2020.

DAMASCENO, F. A. *et al.* Spatial distribution of thermal variables, acoustics and lighting in compost dairy barn with climate control system. **Agronomy Research**, Tartu, v. 17, n. 2, p. 385-395, 2019.

DE ANDRADE KOGIMA, P. *et al.* The Welfare of Dairy Cows in Pasture, Free Stall, and Compost Barn Management Systems in a Brazilian Subtropical Region. **Animals**, Basel, v. 12, n. 17, p. 2215, 2022.

DE BOER, H. C.; WIERSMA, M. Thermophilic composting of the pack can reduce nitrogen loss from compost-bedded dairy barns. **Biosystems Engineering**, Londres, v. 210, p. 20–32, 2021.

DE CASTRO JÚNIOR, S. L.; SILVA, I. J. O. The specific enthalpy of air as an indicator of heat stress in livestock animals. **International Journal of Biometeorology**, Berlim, v. 65, n. 2, p. 149–161, 2021.

DIAS BATISTA, P. H. *et al.* Thermal images to predict the thermal comfort index for Girolando heifers in the Brazilian semiarid region. **Livestock Science**, Amsterdam, v. 251, p. 104667, 2021.

DIMOV, D. *et al.* Effect of stall surface temperature and bedding type on comfort indices in dairy cows. **Sylwan**, Varsóvia, v. 161, n. 8, p. 2-16, 2017.

DRIEHUIS, F.; LUCAS-VAN DEN BOS, E.; WELLS-BENNIK, M. H. J (org.). **Sporen van thermofiele aërobe sporenvormers in compost en andere beddingmaterialen bij melkveebedrijven met een vrijloop- of ligenboxenstal**. Kernhemseweg: NIZO-Rapport E, 2014.

DUTTA, D. *et al.* MOOnitor: An IoT based multi-sensory intelligent device for cattle activity monitoring. **Sensors and Actuators A: Physical**, Amsterdam, v. 333, p. 113271, 2022.

DYER, R. M. *et al.* Objective Determination of Claw Pain and Its Relationship to Limb Locomotion Score in Dairy Cattle. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 90, n. 10, p. 4592–4602, 2007.

DŽERMEIKAITĖ, K.; BAČĖNINAITĖ, D.; ANTANAITIS, R. Innovations in Cattle Farming: Application of Innovative Technologies and Sensors in the Diagnosis of Diseases. **Animals**, Basel, v. 13, n. 5, p. 780, 2023.

EBERL, D. T. *et al.* Innovative bedding materials for compost bedded pack barns: enhancing dairy cow welfare and sustainable dairy farming. **Environment, Development and Sustainability**, Dordrecht, p. 1-25, 2024.

ECKELKAMP, E. A. *et al.* CASE STUDY: Characterization of lying behavior in dairy cows transitioning from a freestall barn with pasture access to a compost bedded pack barn without pasture access. **The Professional Animal Scientist**, Savoy, v. 30, n. 1, p. 109–113, 2014.

ECKELKAMP, E. A. *et al.* Sand bedded freestall and compost bedded pack effects on cow hygiene, locomotion, and mastitis indicators. **Livestock Science**, Amsterdam, v. 190, p. 48–57, 2016a.

ECKELKAMP, E. A. *et al.* Understanding compost bedded pack barns: Interactions among environmental factors, bedding characteristics, and udder health. **Livestock Science**, Amsterdam, v. 190, p. 35–42, 2016b.

EMANUELSON, U. *et al.* Animal Health in Compost-Bedded Pack and Cubicle Dairy Barns in Six European Countries. **Animals**, Basel, v. 12, n. 3, p. 396, 2022.

ENDRES, M. I. Compost Bedded Pack Barns – Can They Work For You? **WCDS Advances in Dairy Technology**, Edmonton, v. 21, p. 271-279, 2009.

FAGUNDES, B. *et al.* Comparison of airflow homogeneity in Compost Dairy Barns with different ventilation systems using the CFD model. **Agronomy Research**, Tartu, v. 18, p. 788-796, 2020.

FAO; IFAD; UNICEF; WFP; WHO (org.). **The State of Food Security and Nutrition in the World 2024 – Financing to end hunger, food insecurity and malnutrition in all its forms**. Rome, 2024. Disponível em: <https://www.fao.org/publications/fao-flagship-publications/the-state-of-food-security-and-nutrition-in-the-world/en>. Acesso em: 14 jan. 2025.

FÁVERO, S. **Fatores associados à qualidade do leite, higiene animal e concentração bacteriana na cama de vacas leiteiras confinadas no sistema de compostagem.** 2015. 117f. Dissertação (Mestrado em Medicina Veterinária) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2015.

FERNÁNDEZ, A. *et al.* Impacts of Compost Bedded Pack Barns on the Welfare and Comfort of Dairy Cows. **Animals**, Basel, v. 10, n. 3, p. 431, 2020.

FERRAZ, P. F. P. *et al.* Properties of conventional and alternative bedding materials for dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 103, n. 9, p. 8661–8674, 2020a.

FERRAZ, P. F. P. *et al.* Evaluation of the Physical Properties of Bedding Materials for Dairy Cattle Using Fuzzy Clustering Analysis. **Animals**, Basel, v. 10, n. 2, p. 351, 2020b.

FERREIRA, J. C. *et al.* Spatial variability of methane and carbon dioxide gases in a Compost-Bedded Pack Barn system. **Agronomy Research**, Tartu, v. 22, p. 110-126, 2024.

FERRAZ, P. F. P. *et al.* Evaluation of the Physical Properties of Bedding Materials for Dairy Cattle Using Fuzzy Clustering Analysis. **Animals**, Basel, v. 10, n. 2, p. 351, 2020.

FISHER, D. K.; FLETCHER, R. S.; ANAPALLI, S. S. Python Software Integrates with Microcontrollers and Electronic Hardware to Ease Development for Open-Source Research and Scientific Applications. **Advances in Internet of Things**, Irvine, v. 11, n. 1, p. 42–58, 2021.

FISHER, D. K.; GOULD, P. J. Open-Source Hardware Is a Low-Cost Alternative for Scientific Instrumentation and Research. **Modern Instrumentation**, Irvine, v. 1, n. 2, p. 8–20, 2012.

FISHER, D. K.; KEBEDE, H. A low-cost microcontroller-based system to monitor crop temperature and water status. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 74, n. 1, p. 168–173, 2010.

FONSECA, M. *et al.* Epidemiology of mastitis and interactions of environmental factors on udder health in the compost barn system. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 75, p. 14–26, 2023.

GALAMA, P. J. *et al.* (org.). **Sustainability aspects of ten bedded pack dairy barns in The Netherlands.** Wageningen: Wageningen UR Livestock Research, 2015.

GERMANI, L. *et al.* An IoT Architecture for Continuous Livestock Monitoring Using LoRa LPWAN. **Electronics**, Basel, v. 8, n. 12, p. 1435, 2019.

GREENOUGH, P. R. **E-Book - Bovine Laminitis and Lameness: A Hands On Approach.** Filadélfia: Elsevier Health Sciences, 2007.

GUESINE, G. D.; SILVEIRA, R. M. F.; DA SILVA, I. J. O. Thermoregulatory, behavioral, and productive responses and physical integrity of primiparous and multiparous cows on compost barn in Brazilian tropical conditions. **International Journal of Biometeorology**, Berlin, v. 67, n. 6, p. 1003–1015, 2023.

GZAR, D. A.; MAHMOOD, A. M.; AL-ADILEE, M. K. A. Recent trends of smart agricultural systems based on Internet of Things technology: A survey. **Computers and Electrical Engineering**, Oxford, v. 104, p. 108453, 2022.

IDRIS, M. R.; IRDAYANTI, M. N.; RAMLEE, M. A review of microcontroller design in future industrial revolution. **AIP Conference Proceedings**, Nova Iorque, v. 2750, n. 1, p. 050031, 2023.

JANNI, K. A. *et al.* Compost dairy barn layout and management recommendations. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 23, n. 1, p. 97-102, 2007.

JAVAID, M. *et al.* Enhancing smart farming through the applications of Agriculture 4.0 technologies. **International Journal of Intelligent Networks**, Beijing, v. 3, p. 150–164, 2022.

JIANG, B. *et al.* Dairy cow lameness detection using a back curvature feature. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 194, p. 106729, 2022.

JORQUERA-CHAVEZ, M. *et al.* Modelling and validation of computer vision techniques to assess heart rate, eye temperature, ear-base temperature and respiration rate in cattle. **Animals**, Basel, v. 9, n. 12, p. 1089, 2019.

KAPLYA, V. I.; KAPLYA, E. V.; SILAEV, A. A. Identification of the Transient Response of a Capacitive Relative Humidity Sensor. **Measurement Techniques**, Nova Iorque, v. 62, n. 12, p. 1099–1105, 2020.

KARUNATHILAKE, E. M. B. M. *et al.* The Path to Smart Farming: Innovations and Opportunities in Precision Agriculture. **Agriculture**, Basel, v. 13, n. 8, p. 1593, 2023.

KERA, D. Science Artisans and Open Science Hardware. **Bulletin of Science, Technology & Society**, Thousand Oaks, v. 37, n. 2, p. 97–111, 2017.

KHALIFEH, A. *et al.* Microcontroller Unit-Based Wireless Sensor Network Nodes: A Review. **Sensors**, Basel, v. 22, n. 22, p. 8937, 2022.

KNIGHT, C. H. Review: Sensor techniques in ruminants: more than fitness trackers. **Animal**, Cambridge, v. 14, p. 187–195, 2020.

KUIPERS, A. *et al.* A Composting Bedding System for Animals as a Contribution to the Circular Economy. **Processes**, Basel, v. 10, n. 3, p. 518, 2022.

LAURINDO, G. M. *et al.* Thermal Environment and Behavior Analysis of Confined Cows in a Compost Barn. **Animals**, Basel, v. 12, n. 17, p. 2214, 2022.

LEDGERWOOD, D. N.; WINCKLER, C.; TUCKER, C. B. Evaluation of data loggers, sampling intervals, and editing techniques for measuring the lying behavior of dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 93, n. 11, p. 5129–5139, 2010.

LEE, I.; LEE, K. The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for

enterprises. **Business Horizons**, Bloomington, v. 58, n. 4, p. 431–440, 2015.

LESO, L. *et al.* A survey on Italian compost dairy barns. **Journal of Agricultural Engineering**, Pavia, p. 203-207, 2013.

LESO, L. *et al.* Invited review: Compost-bedded pack barns for dairy cows. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 103, n. 2, p. 1072–1099, 2020.

LI, P. *et al.* A Comparison of Rice Husks and Peanut Shells as Bedding Materials on Dairy Cows' Preferences, Behaviour, and Health. **Animals**, Basel, v. 11, n. 7, p. 1887, 2021.

LISEUNE, A. *et al.* Leveraging sequential information from multivariate behavioral sensor data to predict the moment of calving in dairy cattle using deep learning. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 191, p. 106566, 2021.

LLONCH, L. *et al.* Agronomic Characteristics of the Compost-Bedded Pack Made with Forest Biomass or Sawdust. **Processes**, Basel, v. 9, n. 3, p. 546, 2021.

LOBECK, K. M. *et al.* Animal welfare in cross-ventilated, compost-bedded pack, and naturally ventilated dairy barns in the upper Midwest. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 94, n. 11, p. 5469–5479, 2011.

LÓPEZ, J. J.; LAMO, P. Rapid IoT Prototyping: A Visual Programming Tool and Hardware Solutions for LoRa-Based Devices. **Sensors**, Basel, v. 23, n. 17, p. 7511, 2023.

LOWE, G. *et al.* Infrared thermography—A non-invasive method of measuring respiration rate in calves. **Animals**, Basel, v. 9, n. 8, p. 535, 2019.

MADER, T. L.; DAVIS, M. S.; BROWN-BRANDL, T. Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 84, n. 3, p. 712–719, 2006.

MELZER, N.; FORIS, B.; LANGBEIN, J. Validation of a real-time location system for zone assignment and neighbor detection in dairy cow groups. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 187, p. 106280, 2021.

MEUNIER, B. *et al.* Image analysis to refine measurements of dairy cow behaviour from a real-time location system. **Biosystems Engineering**, Londres, v. 173, p. 32–44, 2018.

MICHIE, C. *et al.* The Internet of Things enhancing animal welfare and farm operational efficiency. **Journal of Dairy Research**, Cambridge, v. 87, n. S1, p. 20–27, 2020.

MILANEZ, A. Y. *et al.* **Conectividade rural**: situação atual e alternativas para superação da principal barreira à agricultura 4.0 no Brasil. 2020. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/20180>. Acesso em: 28 nov 2022.

MISHRA, D. *et al.* Smart agriculture system using IoT. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED INFORMATICS FOR COMPUTING RESEARCH, 2019, Shimla. **Anais [...]**. New York: Association for Computing Machinery, 2019. p. 1-7.

MISHRA, S.; SHARMA, S. K. Advanced contribution of IoT in agricultural production for the development of smart livestock environments. **Internet of Things**, Amsterdam, v. 22, p. 100724, 2023.

MORRONE, S. *et al.* Industry 4.0 and Precision Livestock Farming (PLF): An up to Date Overview across Animal Productions. **Sensors**, Basel, v. 22, n. 12, p. 4319, 2022.

MOTA, V. *et al.* Feedlot for dairy cattle: history and characteristics. **PUBVET**, Maringá, v. 11, p. 433, 2017.

MOTA, V. C.; ANDRADE, E. T. DE; LEITE, D. F. Bed temperature in compost barns turned with rotary hoe and offset disc harrow. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 39, p. 280–287, 2019.

NAVARRO, J. *et al.* Real-time classification of cattle behavior using Wireless Sensor Networks. **Internet of Things**, Amsterdam, v. 25, p. 101008, 2024.

NOGARA, K. *et al.* Characterization and relationship between bulk tank milk composition and compostbedded variables from dairy barns in Rio Grande do Sul state, Brazil. **Turkish Journal of Veterinary & Animal Sciences**, Ankara, v. 45, n. 5, p. 890–900, 2021.

OBANDO VEGA, F.A. *et al.* Airflow profile study of a compost dairy barn using a low-cost 3D-printed anemometer network. **Agronomy Research**, Tartu, v. 18, p. 931–944, 2020.

OBANDO VEGA, F. A. *et al.* CFD Study of a Tunnel-Ventilated Compost-Bedded Pack Barn Integrating an Evaporative Pad Cooling System. **Animals**, Basel, v. 12, n. 14, p. 1776, 2022.

OJHA, T.; MISRA, S.; RAGHUWANSHI, N. S. Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 118, p. 66–84, 2015.

OLIVEIRA, A. S.; ANDRADE, F. S. **Sistemas embarcados: hardware e o firmware na prática**. São Paulo: Érica, 2010.

OLIVEIRA, C. E. A. *et al.* Assessment of spatial variability of bedding variables in compost bedded pack barns with climate control system. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 93, p. e20200384, 2021.

OLIVEIRA, C. E. A. *et al.* Geoestatística aplicada a distribuição espacial das condições térmicas e ruído em instalações Compost Barn com diferentes sistemas de ventilação. **Ciência et Praxis**, Passos, v. 9, n. 18, p. 41-48, 2016.

OLIVEIRA, C. E. A. *et al.* Geostatistics applied to evaluation of thermal conditions and noise in compost dairy barns with different ventilation systems. **Agronomy Research**, Tartu, v. 17, n. 3, p. 783–796, 2019.

OLIVEIRA, C. E. A. *et al.* Mapping of air temperature and relative humidity in Compost-Bedded Pack Barn systems using a network of easily obtainable recording sensors. *In*: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION LIVESTOCK FARMING, 2024, Bologna. **Anais [...]**. Bologna: Labanti E Nanni Industrie Grafiche, 2024a. p. 1681-1688.

- OLIVEIRA, C. E. A. *et al.* Mapping of the Thermal Microenvironment for Dairy Cows in an Open Compost-Bedded Pack Barn System with Positive-Pressure Ventilation. **Animals**, Basel, v. 12, n. 16, p. 2055, 2022.
- OLIVEIRA, F. *et al.* Internet of Intelligent Things: A convergence of embedded systems, edge computing and machine learning. **Internet of Things**, Amsterdam, v. 26, p. 101153, 2024b.
- OLIVEIRA, S. S. *et al.* Intellectual property and the Internet of Things: a bibliometric search. **International Business Management**, Dubai, v. 14, n. 4, p. 145-156, 2020
- OLIVEIRA, V. C. *et al.* Compost-bedded pack barns in the state of Minas Gerais: architectural and technological characterization. **Agronomy Research**, Tartu, v. 17, n. 5, p. 2016-2028, 2019b.
- OLIVEIRA, V. C. DE *et al.* Evaluation of ammonia sensor modules in a compost barn system during winter in Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 43, p. e20230062, 2023.
- PAGANO, A. *et al.* A Survey on LoRa for Smart Agriculture: Current Trends and Future Perspectives. **IEEE Internet of Things Journal**, Piscataway, v. 10, n. 4, p. 3664–3679, 2023.
- PANDORFI, H.; ALMEIDA, G. L. P.; GUISELINI, C. Zootecnia de precisão: princípios básicos e atualidades na suinocultura. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, Salvador, v. 13, p. 558–568, 2012.
- PAPAKONSTANTINO, G. I. *et al.* Precision Livestock Farming Technology: Applications and Challenges of Animal Welfare and Climate Change. **Agriculture**, Basel, v. 14, n. 4, p. 620, 2024.
- PARK, M. C.; HA, O. K. Development of effective cattle health monitoring system based on biosensors. **Advanced Science and Technology Letters**, Jeju, v. 117, p. 180-185, 2015.
- PEARCE, J. M. Building Research Equipment with Free, Open-Source Hardware. **Science**, Washington, v. 337, n. 6100, p. 1303–1304, 2012.
- PEIXOTO, M. S. M. *et al.* Thermoregulatory behavior of dairy cows submitted to bedding temperature variations in Compost barn systems. **Biological Rhythm Research**, Abingdon, v. 52, n. 7, p. 1120–1129, 2019.
- PILATTI, J. A. *et al.* Diurnal behaviors and herd characteristics of dairy cows housed in a compost-bedded pack barn system under hot and humid conditions. **Animal**, Cambridge, v. 13, n. 2, p. 399–406, 2019.
- PILATTI, J. A.; VIEIRA, F. M. C. Environment, behavior and welfare aspects of dairy cows reared in compost bedded pack barns system. **Journal of Animal Behaviour and Biometeorology**, Mossoró, v. 5, n. 3, p. 97-105, 2017.
- POLAT, M. Y. A Low-Cost Microcontroller Based Air Temperature, Humidity and Pressure Datalogger System Design for Agriculture. **Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences**, Van, v. 30, n. 1, p. 211–219, 2020.

PORTO, S. M. C. *et al.* A computer vision-based system for the automatic detection of lying behaviour of dairy cows in free-stall barns. **Biosystems Engineering**, Londres, v. 115, n. 2, p. 184–194, 2013.

PRATAMA, Y. P. *et al.* Designing of a smart collar for dairy cow behavior monitoring with application monitoring in microservices and internet of things-based systems. *In*: INTERNATIONAL ELECTRONICS SYMPOSIUM, 2019, Surabaya. **Anais [...]**. Surabaya: IEEE, 2019. p. 527-533.

QIAO, Y. *et al.* Intelligent perception for cattle monitoring: A review for cattle identification, body condition score evaluation, and weight estimation. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 185, p. 106143, 2021.

RADAVELLI, W. M. *et al.* Compost barns in Brazilian Subtropical region (Part 1): facility, barn management and herd characteristics. **Research, Society and Development**, Vargem Grande do Sul, v. 9, n. 8, p. e445985198–e445985198, 2020a.

RADAVELLI, W. M. *et al.* Compost barns in Brazilian Subtropical region (Part 2): classification through multivariate analysis. **Research, Society and Development**, Vargem Grande do Sul, v. 9, n. 8, p. e480985229–e480985229, 2020b.

RAO, T. K. S. *et al.* Improving comfort and welfare to mitigate stress in dairy animals-a review. **Wayamba Journal of Animal Science**, Lunuwila, v. 6, p. 1070-1084, 2014.

RAY, P. P. Internet of things for smart agriculture: Technologies, practices and future direction. **Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments**, Amsterdam, v. 9, n. 4, p. 395–420, 2017.

REN, Y. *et al.* An automated system for cattle reproductive management under the IoT framework. Part I: the e-Synch system and cow responses. **Frontiers in Animal Science**, Lausanne, v. 4, 2023.

RENN, N.; ONYANGO, J.; MCCORMICK, W. Digital Infrared Thermal Imaging and manual lameness scoring as a means for lameness detection in cattle. **Veterinary clinical Science**, Los Baños, v. 2, n. 2, 2014.

RIZAN, N. *et al.* Internet-of-Things for Smart Agriculture: Current Applications, Future Perspectives, and Limitations. **Agricultural Sciences**, Irvine, v. 15, n. 12, p. 1446–1475, 2024.

RODRIGUES, V. C. *et al.* A correct enthalpy relationship as thermal comfort index for livestock. **International Journal of Biometeorology**, Berlim, v. 55, n. 3, p. 455–459, 2011.

SAAR, M. *et al.* A machine vision system to predict individual cow feed intake of different feeds in a cowshed. **Animal**, Cambridge, v. 16, n. 1, p. 100432, 2022.

SADIQ, M. B. *et al.* Association between Lameness and Indicators of Dairy Cow Welfare Based on Locomotion Scoring, Body and Hock Condition, Leg Hygiene and Lying Behavior. **Animals**, Basel, v. 7, n. 11, p. 79, 2017.

SADOWSKI, S.; SPACHOS, P. Wireless technologies for smart agricultural monitoring using internet of things devices with energy harvesting capabilities. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 172, p. 105338, 2020.

SALAU, J.; KRIETER, J. Analysing the space-usage-pattern of a cow herd using video surveillance and automated motion detection. **Biosystems Engineering**, Londres, v. 197, p. 122–134, 2020.

SALFER, J. A.; SIEWERT, J. M.; ENDRES, M. I. Housing, management characteristics, and factors associated with lameness, hock lesion, and hygiene of lactating dairy cattle on Upper Midwest United States dairy farms using automatic milking systems. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 101, n. 9, p. 8586–8594, 2018.

SAMPAIO, L. C. *et al.* Carnauba (copernicia prunifera) straw as an alternative bedding material for dairy cows housed in a Compost barn system. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 73, p. 1361–1370, 2021.

SARNIGHAUSEN, V. C. R. Estimation of thermal comfort indexes for production animals using multiple linear regression models. **Journal of Animal Behaviour and Biometeorology**, Mossoró, v. 7, n. 2, p. 73-77, 2019.

SCHILLINGS, J.; BENNETT, R.; ROSE, D. C. Exploring the Potential of Precision Livestock Farming Technologies to Help Address Farm Animal Welfare. **Frontiers in Animal Science**, Lausanne, v. 2, 2021.

SCHMELING, L. *et al.* Training and Validating a Machine Learning Model for the Sensor-Based Monitoring of Lying Behavior in Dairy Cows on Pasture and in the Barn. **Animals**, Basel, v. 11, n. 9, p. 2660, 2021.

SCHÜTZ, K. E. *et al.* Effects of 3 surfaces types on dairy cattle behavior, preference, and hygiene. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 102, n. 2, p. 1530–1541, 2019.

SCHWEINZER, V. *et al.* Evaluation of an ear-attached accelerometer for detecting estrus events in indoor housed dairy cows. **Theriogenology**, Nova Iorque, v. 130, p. 19–25, 2019.

SHANE, E. M.; ENDRES, M. I.; JANNI, K. A. Alternative bedding materials for compost bedded pack barns in Minnesota: a descriptive study. **Applied engineering in agriculture**, St. Joseph, v. 26, n. 3, p. 465-473, 2010.

SHEPHARD, R. W; MALONEY, S. K. A review of thermal stress in cattle. **Australian Veterinary Journal**, Richmond, v. 101, n. 11, p. 417–429, 2023.

SHI, Z. *et al.* Internet-of- Things Behavior Monitoring System Based on Wearable Inertial Sensors for Classifying Dairy Cattle Health Using Machine Learning. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN ENGINEERING AND TECHNOLOGY*, 2023, Kota Kinabalu. **Anais [...]**. Kota Kinabalu: IEEE, 2023. p. 277-282.

SILVA, G.R.O. *et al.* Profitability analysis of compost barn and free stall milk-production systems: a comparison *Análise de rentabilidade de sistemas de produção de leite em compost*

barn e free stall: um comparativo. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 40, n. 3, p. 1165-1184, 2019.

SILVA, M. V. DA *et al.* Spatial variability and exploratory inference of abiotic factors in barn compost confinement for cattle in the semiarid. **Journal of Thermal Biology**, Amsterdam, v. 94, p. 102782, 2020.

SILVA, M. V. DA *et al.* Spatial modeling via geostatistics and infrared thermography of the skin temperature of dairy cows in a compost barn system in the Brazilian semiarid region. **Smart Agricultural Technology**, Amsterdam, v. 3, p. 100078, 2023.

SILVA, K. H. E *et al.* Classification of compost barns system of milk producers from cooperatives in the mission region. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 7, n. 4, p. 36263–36282, 2021.

SIQUEIRA, I. *et al.* Characterization of the spatial variability of thermal comfort indices for dairy cows breeding in compost barn. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 8, p. 38001–38014, 2022.

STRUTZKE, S. *et al.* Technical note: Development of a noninvasive respiration rate sensor for cattle. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 102, p.690–695, 2019.

SURESH, A.; SARATH, T. V. An IoT Solution for Cattle Health Monitoring. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, Bristol, v. 561, n. 1, p. 012106, 2019.

SYMEONAKI, E.; ARVANITIS, K.; PIROMALIS, D. A Context-Aware Middleware Cloud Approach for Integrating Precision Farming Facilities into the IoT toward Agriculture 4.0. **Applied Sciences**, Basel, v. 10, n. 3, p. 813, 2020.

THOM, E. C. The Discomfort Index. **Weatherwise**, Philadelphia, v. 12, p. 57-61, 1959.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. **Sensores industriais: fundamentos e aplicações**. São Paulo: Érica, 2011.

THORNTON, P. *et al.* Increases in extreme heat stress in domesticated livestock species during the twenty-first century. **Global Change Biology**, Oxford, v. 27, n. 22, p. 5762–5772, 2021.

TSAKIRIDIS, N. L. *et al.* Versatile Internet of Things for Agriculture: An eXplainable AI Approach. In: MAGLOGIANNIS, I. (ed.). **Artificial intelligence applications and innovations**. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 180-191.

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

VALENTE, D. A. *et al.* Comparative analysis of performance by cows confined in different typologies of compost barns. **Agronomy Research**, Tartu, v. 18, p. 1547-1555, 2020.

VEIT, H. M. *et al.* Bioacústica como método de avaliação do comportamento em pastejo de novilhas Girolando. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 70, n. 03, p. 873-880, 2018.

VIAZZI, S. *et al.* Analysis of individual classification of lameness using automatic measurement of back posture in dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 96, n. 1, p. 257–266, 2013.

VIEIRA, F. M. C. *et al.* Spatio-Thermal Variability and Behaviour as Bio-Thermal Indicators of Heat Stress in Dairy Cows in a Compost Barn: A Case Study. **Animals**, Basel, v. 11, n. 5, p. 1197, 2021.

WANG, Y. *et al.* Accurate detection of dairy cow mastitis with deep learning technology: a new and comprehensive detection method based on infrared thermal images. **Animal**, Cambridge, v. 16, n. 10, p. 100646, 2022.

WARNER, D. *et al.* A machine learning based decision aid for lameness in dairy herds using farm-based records. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 169, p. 105193, 2020.

WILSON, A. M. *et al.* Development of a novel stall design for dairy cattle: Part II. The effect of minimal stall partitioning on lying behavior, rumination, stall cleanliness, and preference. **Animal**, Cambridge, v. 16, n. 1, p. 100428, 2022.

WOLFE, T. *et al.* Effects of alternative deep bedding options on dairy cow preference, lying behavior, cleanliness, and teat end contamination. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 101, n. 1, p. 530–536, 2018.

ZANETONI, H. H. R. *et al.* Esp8266 module use in animal production: a review. **Revista Engenharia na Agricultura - REVENG**, Viçosa, v. 31, n. Contínua, p. 120–126, 2023.

ZILLNER, J. C. *et al.* Using walking speed for lameness detection in lactating dairy cows. **Livestock Science**, Amsterdam, v. 218, p. 119–123, 2018.

**3 CAPÍTULO I: TIPOLOGIA DE INSTALAÇÕES COMPOST BARN E
VARIABILIDADE ESPACIAL DO AMBIENTE TÉRMICO NO NORDESTE
BRASILEIRO**

RESUMO

Objetivou-se investigar a dinâmica ambiental do alojamento de vacas leiteiras em propriedades do estado do Ceará, Brasil, que utilizam o sistema compost barn. Foram observados e aferidos aspectos como a tipologia construtiva, as condições microclimáticas, o manejo da cama e os parâmetros fisiológicos dos animais. Além disso, avaliou-se o grau de satisfação dos produtores em relação à adoção do sistema. As avaliações foram conduzidas em seis instalações durante o período seco. Foram registradas variáveis ambientais no microclima dos galpões, nos turnos da manhã e da tarde. A cama foi avaliada quanto à temperatura interna e superficial, umidade, relação C/N e pH. Os dados de temperatura da cama e velocidade do ar foram coletados em malha regular no interior dos galpões. A variabilidade espacial dessas variáveis foi analisada por meio de geoestatística, relacionando-a às características construtivas e de manejo. A frequência respiratória (FR) e a temperatura superficial da pelagem (TS) foram utilizadas como indicadores fisiológicos, enquanto o Índice de Temperatura e Umidade (ITU) foi adotado como parâmetro ambiental. Os dados mostraram variações significativas entre as fazendas, impactando tanto a resposta fisiológica dos animais quanto o manejo da cama. Em todas as propriedades, as vacas permaneceram sob estresse térmico severo, conforme indicado pelo ITU, especialmente no período da tarde, quando se observou aumento expressivo da FR. A TS foi mantida em níveis aceitáveis, provavelmente em função da elevação da FR. Fazendas com menor densidade de alojamento apresentaram melhores condições de cama e maior conforto animal. A análise geoestatística revelou ausência de uniformidade na temperatura superficial da cama, indicando desafios relacionados à tipologia das instalações. Todos os proprietários relataram satisfação com o sistema. Apesar das limitações impostas pelo clima semiárido, os resultados evidenciam o potencial do sistema compost barn para a produção leiteira no estado do Ceará.

Palavras-chave: geoestatística; semiárido; sistema de confinamento; vacas leiteiras.

ABSTRACT

The objective of this study was to investigate the environmental dynamics of dairy cow housing on farms in the state of Ceará, Brazil, that use the compost barn system. Aspects such as barn typology, microclimatic conditions, bedding management, and the animals' physiological parameters were observed and measured. In addition, the level of farmers' satisfaction regarding the adoption of the system was evaluated. Assessments were carried out in six facilities during the dry season. Environmental variables in the barn microclimate were recorded during both morning and afternoon periods. The bedding was evaluated in terms of internal and surface temperature, moisture, carbon-to-nitrogen ratio (C/N), and pH. Bedding temperature and air velocity data were collected on a regular grid within the barns. The spatial variability of these variables was analyzed using geostatistics, relating them to structural and management characteristics. Respiratory rate (RR) and coat surface temperature (ST) were used as physiological indicators, while the Temperature-Humidity Index (THI) was adopted as the environmental parameter. The data showed significant variation among the farms, affecting both the physiological responses of the animals and bedding management. In all properties, cows remained under severe heat stress, as indicated by the THI, especially in the afternoon, when a marked increase in RR was observed. ST remained at acceptable levels, likely due to the increase in RR. Farms with lower stocking density showed better bedding conditions and greater animal comfort. Geostatistical analysis revealed a lack of uniformity in the surface temperature of the bedding, indicating challenges related to facility typology. All farm owners reported satisfaction with the system. Despite the limitations imposed by the semi-arid climate, the results highlight the potential of the compost barn system for dairy production in the state of Ceará.

Keywords: geostatistics; semi-arid; confinement system; dairy cows.

3.1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a produção leiteira no Nordeste apresentou um crescimento significativo, impulsionada pela adoção de práticas agropecuárias inovadoras, avanços em melhoramento genético, profissionalização da gestão e a presença de um mercado consumidor consolidado. Esse desenvolvimento tem se refletido na distribuição da atividade produtiva em diferentes estados da região, com destaque para o leste do Ceará, Pernambuco, Alagoas e Sergipe (EMBRAPA, 2023). Em 2023, o Ceará registrou uma produção de aproximadamente 1,14 bilhão de litros de leite, representando 3,21% da produção nacional. Esse volume posicionou o estado como o terceiro maior produtor da região Nordeste e o nono no ranking nacional (IBGE, 2023).

A decisão dos bovinocultores leiteiros quanto ao tipo de instalação adotado, está relacionada a uma série de fatores, incluindo as condições edafoclimáticas, os custos dos insumos disponíveis localmente e a viabilidade econômica da região (DAMASCENO, 2020b). Além disso, aspectos pessoais, como a confiança no sistema e a preferência por um tipo específico de instalação, também são relevantes. Não raramente, os produtores visitam propriedades vizinhas para avaliar os sistemas adotados e utilizá-los como modelo.

O sistema de confinamento de bovinos em *compost barn* possibilita melhorias na produtividade e no bem-estar animal, sendo cada vez mais adotado pelos produtores brasileiros (RADAVELLI *et al.*, 2020). Entretanto, há uma escassez de pesquisas voltadas para os aspectos construtivos dos galpões e o monitoramento ambiental nessas instalações, especialmente na região Nordeste do Brasil. Enquanto a maior parte dos estudos científicos concentra-se em instalações projetadas para as regiões Sul e Sudeste, particularmente no estado de Minas Gerais (DAMASCENO; OLIVEIRA, 2019), os desafios específicos enfrentados pelos produtores nordestinos permanecem pouco explorados.

No caso dos produtores que optam pelo *compost barn*, as principais preocupações envolvem a disponibilidade e o custo dos materiais de cama, uma vez que a reposição desse insumo é uma prática recorrente nesse sistema. Outro fator a ser considerado são as práticas de monitoramento da cama, como a mensuração de parâmetros (temperatura, umidade, entre outros), que exigem atenção e podem vir a ser negligenciadas devido às limitações de coleta (PEIXOTO, BARBOSA FILHO, DAMASCENO, 2022).

O presente estudo analisa o impacto do microclima em instalações *compost barn* sobre o conforto térmico de vacas leiteiras, com base em um levantamento realizado no estado do Ceará, Brasil. A pesquisa adotou uma abordagem mista, combinando dados quantitativos

relacionados aos parâmetros ambientais e fisiológicos, com uma análise qualitativa que considera os aspectos construtivos das instalações, além dos relatos dos produtores sobre suas experiências e grau de satisfação com o sistema.

3.1.1 Objetivo geral

Objetivou-se investigar a dinâmica do alojamento de vacas leiteiras em propriedades que utilizam o sistema *compost barn* sob condições de clima semiárido, considerando diferentes tipologias construtivas, microclima, manejo da cama e parâmetros fisiológicos dos animais.

3.1.2 Objetivos específicos

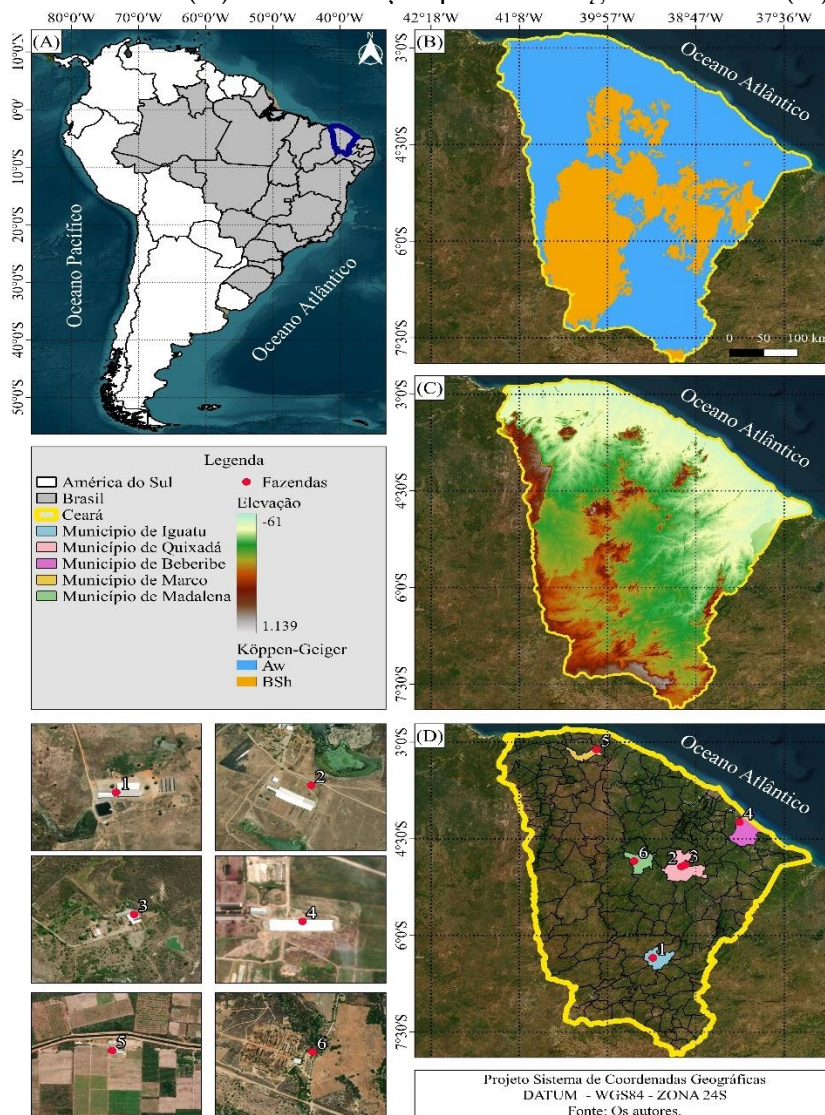
- Analisar os aspectos construtivos das instalações;
- Analisar parâmetros de qualidade da cama;
- Analisar a variabilidade espacial de variáveis de interesse por meio de geoestatística;
- Monitorar e caracterizar o ambiente térmico;
- Caracterizar as respostas fisiológicas dos animais;
- Caracterizar outros aspectos de manejo em geral;
- Realizar levantamento de dados por meio de entrevista direcionada aos gestores de cada propriedade avaliada.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Caracterização da área experimental

Este estudo foi conduzido em seis fazendas comerciais, que atuam na produção de leite bovino, situadas no estado do Ceará, Brasil (Figura 1).

Figura 1- Localização geográfica das fazendas (A), expressa no mapa conforme a classificação de Köppen (B), a elevação ao nível do mar (C) e a distribuição por mesorregião do estado (D)



Fonte: elaborada pelo autor.

A etapa de coleta de campo foi realizada por meio de visita técnica, em cada propriedade, durante o período de setembro a dezembro de 2021 (período seco), e seguindo todas as recomendações do Comitê de Ética sobre o Uso de Animais (CEUA/UFC), sob número

de protocolo 2206202101. As visitas ocorreram nas seguintes datas: Fazenda A – 14/09/2021, Fazenda B – 25/09/2021, Fazenda C – 26/09/2021, Fazenda D – 16/10/2021, Fazenda E – 23/11/2021, Fazenda F – 22/12/2021

A fazenda (A) estava localizada no município de Iguatu, situada na região Centro-Sul do estado, na latitude 6°20'51''S e longitude 39°20'56''W. O clima da região é considerado tropical quente semiárido “As”, segundo a classificação climática de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013). De acordo com as normais climatológicas disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, a temperatura média anual do município é de 28 °C e precipitações médias anuais irregulares (INMET, 2023). A propriedade atua no confinamento de bovinos leiteiros da raça Girolando (50% de 1/2 Holandês, 40% de 3/4 Holandês e 10% de 7/8 Holandês), com produção média diária de 25 litros/vaca. O rebanho totalizava 564 bovinos, sendo 173 destes confinados em galpão *compost barn*.

A fazenda (B) estava localizada no município de Quixadá, Sertão Central do estado, na latitude 4°55'55''S e longitude 38°58'04''W. Segundo a classificação de Köppen, o clima é do tipo “As”, com padrão de precipitação anual de 156 mm (ALVARES *et al.*, 2013), e uma temperatura média do ar de 28,4 °C (INMET, 2023). A particularidade desta fazenda está no confinamento de vacas leiteiras em sistema de ventilação negativa, do tipo túnel de vento, inaugurado no ano de 2017. A produção média diária no período do estudo era de 22 litros/vaca, com 344 vacas mestiças (maioria dos animais 7/8 Holandês) confinadas no galpão, sendo 232 vacas em fase de produção. O manejo de ordenha era realizado duas vezes ao dia, com início das atividades às 05h30 e 14h00. Nesse momento, era feito o trabalho de revolvimento da cama, onde os operadores remanejavam os lotes por meio das cercas elétricas móveis a fim de liberar a área de cama e a pista de alimentação para a passagem do trator. Além disso, era realizado um revolvimento adicional entre as ordenhas.

A fazenda (C) estava localizada no município de Quixadá, na latitude 4°54'22''S e longitude 38°55'10''W. Segundo a classificação de Köppen, o clima é do tipo “As”, com padrão de precipitação anual de 156 mm (ALVARES *et al.*, 2013), e uma temperatura média do ar de 28,4 °C (INMET, 2023). A propriedade atua no confinamento de vacas leiteiras (7/8 e 15/16 Holandês), distribuídas em lotes alojados em distintas instalações, sendo estas do tipo *Free-stall* e *compost barn*, com produção média diária de 30 e 20 litros/vaca, respectivamente. Os gestores da fazenda optaram por confinar o lote de maior produção na instalação *Free-stall*, pelo fato de já estarem acostumados com o sistema. Enquanto a área destinada ao sistema *compost barn* fazia parte de uma ampla estrutura, que no passado era utilizada em modelo de *Free-stall*, portanto, o galpão da fazenda C consistia em uma instalação adaptada. Para a

realização do monitoramento ambiental foi escolhida apenas uma das áreas de confinamento do amplo galpão CB em questão.

A fazenda (D) estava localizada no município de Beberibe, na latitude 4°14'43"S e longitude 38°11'46"W. O clima da região é considerado tropical quente semiárido brando "As", segundo a classificação climática de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013), com temperatura média variando de 27 a 28 °C e padrão de precipitação com os maiores valores (média de 200 mm) observados na quadra chuvosa, que se estende entre os meses de fevereiro e maio (INMET, 2023). A propriedade atua no confinamento de vacas mestiças com maior grau de sangue Gir e produção média diária de 31 litros/vaca. O rebanho total contava com 1.300 animais, dos quais, 480 eram vacas em lactação. Segundo os administradores da empresa, o projeto inicial buscou contemplar o alojamento de 180 vacas para cada um dos três galpões *compost barn* da propriedade, os quais foram construídos com dimensões iguais, e adotando a densidade de alojamento de 10,0 m² animal⁻¹. O galpão foi inaugurado em julho de 2018. No período da visita, o galpão avaliado alojava cerca de 57 vacas em lactação (média de 16 litros/vaca/dia) e 90 novilhas, sendo 43 destas inseridas na categoria de novilhas inseminadas/aptas para inseminação.

A fazenda (E) estava localizada no município de Marco, na latitude 3°06'53"S e longitude 40°05'54"W. O clima da região é considerado tropical quente semiárido com estação seca de inverno "As", segundo a classificação climática de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013), com precipitações médias anuais irregulares e temperatura média anual variando de 26 a 28 °C (INMET, 2023). O galpão avaliado foi inaugurado no ano de 2019. Os animais alojados são em sua maioria vacas mestiças 3/4 Holandês, com produção média diária de 35 litros. O rebanho total da fazenda reúne 140 animais. Os lotes de vacas em produção são distribuídos em dois galpões *compos barn*, os quais possuem 65 e 38 animais alojados. A fazenda não possuía vacas em lactação fora do sistema descrito e eram ordenhadas três vezes ao dia, nos horários de 04h00, 12h00 e 20h00.

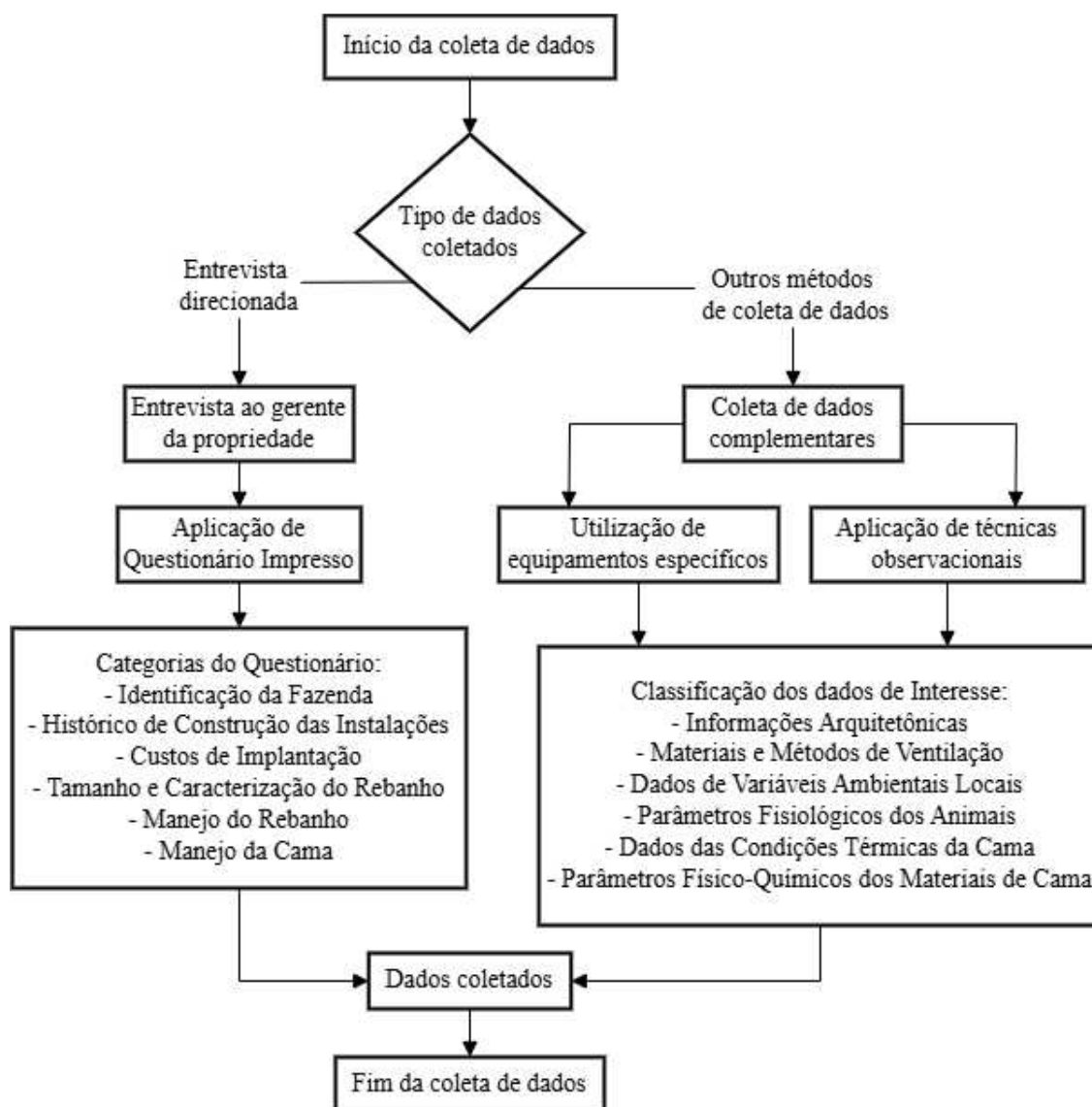
A fazenda (F) estava localizada no município de Madalena, na latitude 4°50'44"S e longitude 39°35'55"W, mesorregião do sertão cearense, e possui características de clima semiárido "BSh", compreendendo características de pertencer a um dos locais mais secos do Brasil, segundo a classificação climática de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013). O clima do município se caracteriza por apresentar temperaturas médias anuais de 25 °C, com estimativas de chuvas quase nulas (INMET, 2023). A propriedade atua no confinamento de vacas com a genética Guzolando. O rebanho avaliado era predominantemente 1/5 Guzolando, com produção média de 22 litros/vaca/dia, distribuída em duas ordenhas diárias, nos horários de 03h00 e

14h00. O rebanho total contava com 510 animais, dos quais, 63 estavam confinados como categoria de lotes em lactação no galpão *compost barn* avaliado, o qual foi construído no ano de 2019.

3.2.2 Entrevista aos produtores

O levantamento de dados foi conduzido por meio de entrevista com o gerente de cada propriedade, complementado pela coleta de parâmetros específicos, conforme demonstrado na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma representativo da coleta de dados nas fazendas selecionadas



Fonte: elaborada pelo autor.

As fazendas foram selecionadas a partir de levantamento realizado junto a profissionais da área na bovinocultura da região. As propriedades mencionadas como atuantes no confinamento de vacas leiteiras em instalação *compost barn* eram elegíveis para a pesquisa. Um total de doze produtores de leite foram inicialmente contatados por telefone, onde aqueles que demonstraram interesse em participar tiveram visitas agendadas para a coleta de dados. Entre os produtores abordados, um recusou a participação. Além disso, um foi excluído do estudo por utilizar o sistema *compost barn* exclusivamente para o alojamento de bezerros, enquanto outros quatro foram desconsiderados devido ao fato de seus galpões estarem em fase de construção.

3.2.3 Parâmetros ambientais

Para mensurar os dados ambientais no interior de cada instalação, foram utilizados *data loggers* (Onset®, modelo U23-001 HOBO® Pro v2, Cape Cod, Massachusetts, USA), equipados com sensores de leitura contínua para medição de temperatura e umidade relativa do ar. Os dispositivos foram previamente calibrados com base nos dados da estação meteorológica da UFC e programados para registrar medições em intervalos de 10 minutos, utilizando o software HOBOWare. Os sensores possuem faixa de operação de temperatura do ar (T_a , °C) entre -40 e 100 °C, com precisão de $\pm 0,2$ °C na faixa de 0 a 70 °C. Para a umidade relativa do ar (UR, %), a faixa de operação é de 0 a 100%, com precisão de $\pm 2,5\%$ entre 10% e 90%.

Ao todo, foram distribuídos três *data loggers* por visita, sendo dois instalados no interior da instalação, a uma altura de 2,0 m em relação à cama, para evitar o acesso dos animais; e um colocado externamente ao galpão (para análise complementar). Os dispositivos foram instalados no dia anterior às coletas, na tentativa de garantir a obtenção segura dos dados desde as primeiras horas do dia, sendo retirados apenas ao término das medições. Com os dados de T_a e UR, foi calculado o Índice de Temperatura e Umidade (ITU), conforme a equação 1, desenvolvida por Berman *et al.* (2016), bem como a entalpia específica (h , kJ/kg de ar seco) segundo Rodrigues *et al.* (2011), conforme a equação 2.

$$ITU = [3.43 + (1.058 \cdot T_a) - (0.293 \cdot UR) + (0.0164 \cdot T_a \cdot UR) + 35.7] \quad (1)$$

$$h = 1,006 \cdot T_a + \frac{UR}{p_B} \cdot 10^{\left(\frac{7,5 \cdot T_a}{237,3 + T_a}\right)} \cdot (71,28 + 0,052 \cdot T_a) \quad (2)$$

Em que:

Ta é a temperatura do ar, em °C;

UR é a umidade relativa do ar, em %;

p_B é a pressão barométrica local em mmHg.

As mensurações da velocidade do ar (Var , $m\ s^{-1}$) foram realizadas na altura dos animais, durante os turnos da manhã e tarde, por meio de um anemômetro digital do tipo hélice com *Datalogger* e interface USB Minipa MDA-20 (Figura 3).

Figura 3 - Mensuração da variável velocidade do ar em galpões *compost barn*



Fonte: elaborada pelo autor.

Os dados referentes a Var foram aferidos em uma malha regular e uniforme entre pontos, no interior de cada instalação, com o intuito de investigar a relação entre a variabilidade espacial encontrada e os aspectos tipológico, como orientação do galpão, dimensionamento de pé direito e beiral, aberturas laterais, dentre outros, bem como as respectivas características de manejo de cada local.

3.2.4 Parâmetros de avaliação da cama

A área de cama foi dividida em nove seções equidistantes com o uso de trena, as quais foram previamente delimitadas no galpão para a realização das coletas de dados (BLACK *et al.*, 2013; ECKELKAMP *et al.*, 2016a; ALBINO *et al.*, 2017; DAMASCENO *et al.*, 2022). No centro de cada seção, foi introduzido um termômetro digital do tipo espeto (Pyromed®

TP101, com faixa de medição de -50 a 300 °C e $\pm 0,1$ °C de precisão) a fim de mensurar a temperatura interna da cama (TIC), onde a haste do termômetro permaneceu na cama com o período de 1 minuto (ANDRADE *et al.*, 2021).

A temperatura superficial da cama (TSC) foi mensurada adotando-se o método de coleta por malha de diversos pontos equidistantes, para todos os galpões avaliados. A mesma grade amostral foi utilizada para a avaliação da distribuição espacial da Var. Para a avaliação da TSC foi utilizada uma câmera termográfica de infravermelho com resolução de 4800 pixels (modelo FLIR E4 MSX® *with MSX® Enhancement*, com faixa de medição de -20 °C a +250 °C). Os registros foram realizados a uma distância focal de 1,0 m e emissividade (ϵ) ajustada para 0.90 (PEIXOTO *et al.*, 2019; SILVA *et al.*, 2020). Os termogramas foram analisados no *software* FLIR Thermal Studio Starter (FLIR Systems, EUA). Os pontos de coleta, previamente ordenados em seções, foram manualmente delimitados no programa, com o uso da ferramenta *Add measurement*, seguida da seleção da opção *rectangle*.

Amostras de cama foram coletadas em cada seção, na profundidade de 20 cm, em todas as fazendas, após a mensuração dos valores de TIC e TSC. A Figura 4 ilustra as metodologias utilizadas para a coleta de dados na área de cama.

Figura 4 - Coleta de dados para avaliação da qualidade da cama em *compost barn*



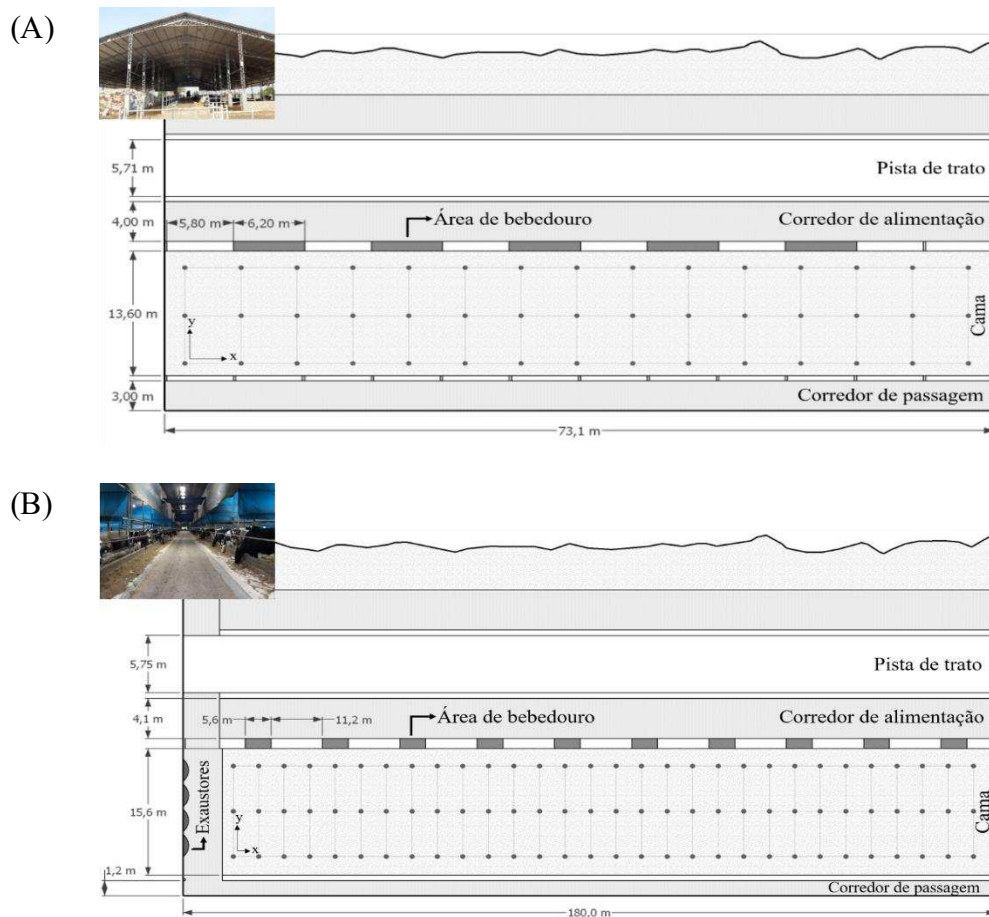
Fonte: elaborada pelo autor.

As porções de material de cama foram homogeneizadas em balde plástico para a formação de uma amostra composta (500 g), e em seguida identificados e acondicionados em

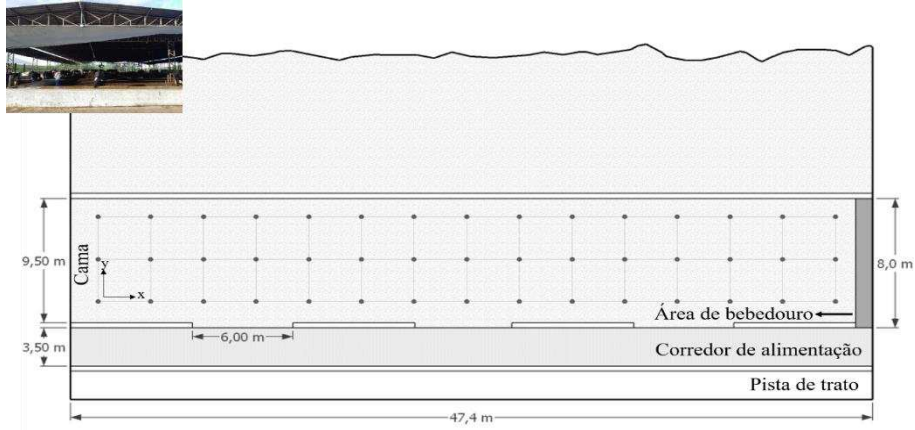
recipientes plásticos fechados. No dia seguinte de cada visita, a amostra era enviada ao Laboratório de Análise de Solos da Universidade Federal do Viçosa – Minas Gerais. Análises químicas foram realizadas nas amostras em estufa à 75 °C, em que além do teor de umidade (%), foram determinados os valores de pH e relação C:N. Essa análise foi planejada com o objetivo de confrontar os dados das amostras da cama com o resultado de temperatura ambiente e de temperatura da cama.

A coleta de dados para análise dos parâmetros TSC e Var foi realizada utilizando as seguintes malhas de pontos: Fazenda A – 5 x 5 m, Fazenda B – 5 x 5 m, Fazenda C – 2,5 x 2,5 m, Fazenda D – 5 x 5 m, Fazenda E – 3 x 3 m, Fazenda F – 2,5 x 2,5. A malha de pontos e o esquema dos galpões avaliados estão ilustrados na Figura 5.

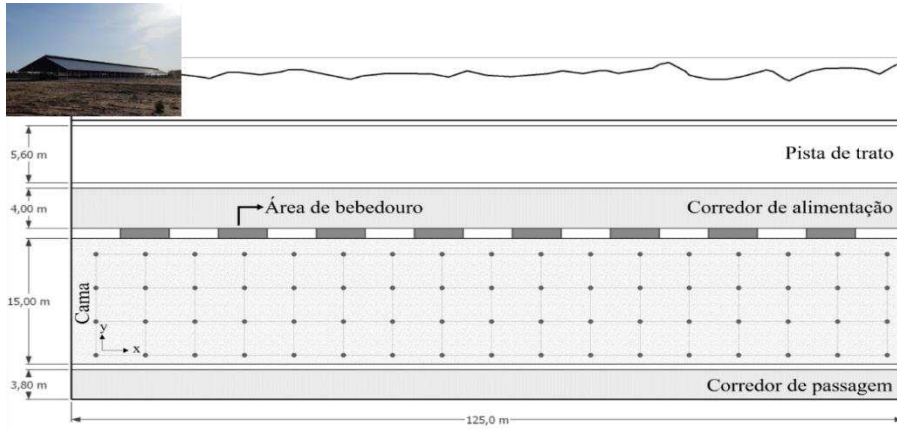
Figura 5- Esquema da área construtiva dos galpões referentes às fazendas (A a F), e respectivas áreas designadas como grade amostral para análise geoestatística da TSC (°C) e da Vv (m s⁻¹)



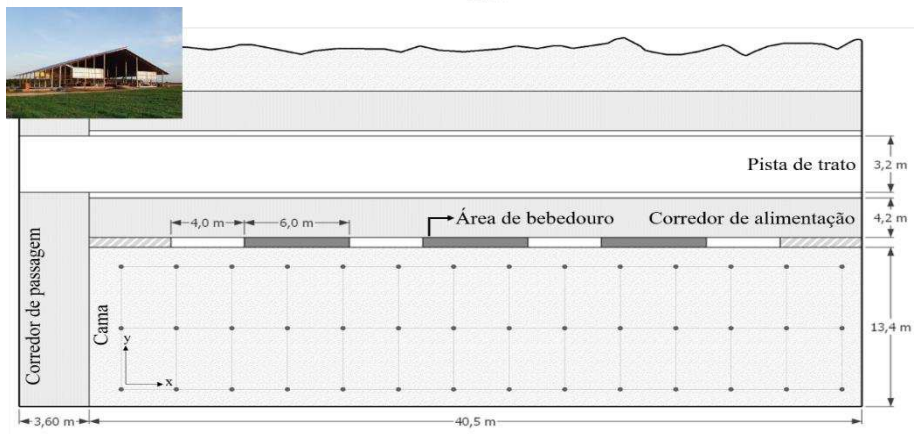
(C)



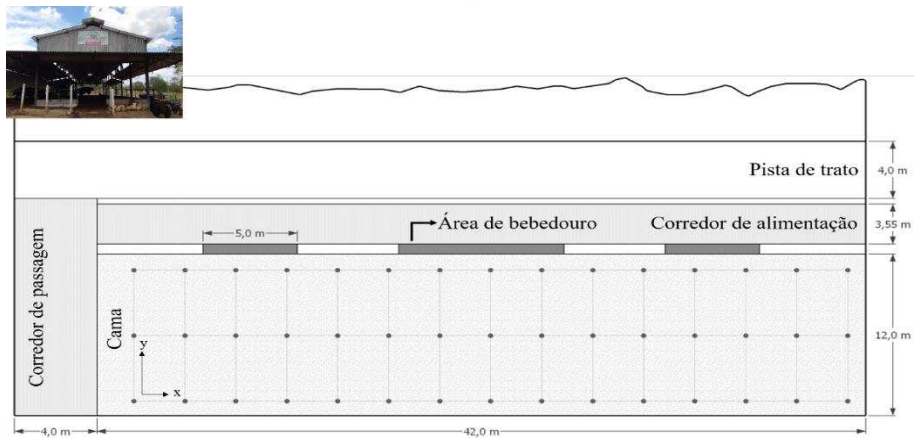
(D)



(E)



(F)



Fonte: elaborada pelo autor.

3.2.5 Parâmetros fisiológicos e conforto térmico de vacas leiteiras

A caracterização das respostas fisiológicas dos animais foi realizada com 5 animais por fazenda. Foram coletados dados referentes a temperatura superficial da pelagem (TS, °C) e frequência respiratória (FR, mov/min). A TS foi registrada por meio de uma câmera termográfica (a mesma utilizada para a mensuração da TSC). Os registros foram realizados a uma distância focal de 2,0 m e a emissividade foi ajustada para 0,98, conforme descrito por Diniz *et al.* (2020). O tratamento das imagens térmicas foi realizado por meio do programa FLIR QuickReport®.

Os dados fisiológicos foram coletados pelo mesmo avaliador durante todas as visitas, além disso, certificou-se que tais métodos não configurariam práticas invasivas aos animais, ou mesmo que comprometessem o manejo rotineiro das fazendas (Figura 6).

Figura 6 - Mensuração de variáveis fisiológicas em vacas leiteiras confinadas em sistema *compost barn*



Fonte: elaborada pelo autor.

Os registros das imagens termográficas foram realizados nos turnos manhã e tarde, em todas as fazendas. Foram obtidos os valores médios da temperatura da cabeça ($T_{\text{cabeça}}$), temperatura do dorso (T_{dorso}), temperatura da canela (T_{canela}). A partir da $T_{\text{cabeça}}$, T_{dorso} e T_{canela} foi determinado a temperatura da pele dos animais (T_{pele}) através da equação 3 de Dias Batista *et al.* (2021):

$$T_{\text{pele}} = 0,425 + (0,105 \times T_{\text{cabeça}}) + (0,019 \times T_{\text{canela}}) + (0,695 \times T_{\text{dorso}}) \quad (3)$$

A determinação da FR, foi realizada a partir da contagem do número de movimentos da região tóraco-abdominal direita do animal (decúbito esternal), em um intervalo de 1 minuto, mensurada a uma distância superior a 15 metros entre o avaliador e o animal. Para isso, considerou-se o período de contagem dos movimentos por 30 segundos, sendo esse valor posteriormente multiplicado por 2, para obtenção da frequência de movimentos por minuto (PINTO *et al.*, 2019). Foram considerados os parâmetros de Silanikove (2000), o qual caracterizou a gravidade do estresse térmico com base na FR, classificando como baixo estresse valores entre 40 e 60 mov.min⁻¹, estresse moderado entre 60 e 80 mov.min⁻¹, e estresse alto entre 80 e 120 mov.min⁻¹. Para animais sob estresse térmico severo, são registrados valores acima de 150 mov.min⁻¹.

3.2.6 Modelagem Geoestatística

O método de interpolação por krigagem foi utilizado para analisar a variabilidade espacial da TSC e da Var, por meio da semivariância $\gamma(h)$ com base no estimador de Matheron (1962) (Equação 4), durante os turnos manhã e tarde.

$$\gamma(h) = \left(\frac{1}{2N(h)} \right) \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (4)$$

Em que:

$\gamma(h)$ é a semivariância experimental obtida através dos resultados alcançados;

h é a distância de separação entre as medidas;

$N(h)$ é o número de pares experimentais de dados medidos de $Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$;

$Z(x_i)$ é o valor da variável para posição x_i não estimado (verdadeiro) considerada como uma variável aleatória, função da posição da amostragem x ;

$Z(x_i+h)$ é o valor da mesma variável na posição x_i+h em qualquer direção.

Os semivariogramas experimentais foram ajustados com base nos modelos geoestatísticos esférico, exponencial e gaussiano, respectivamente representados pelas equações 5, 6 e 7, sendo posteriormente validados pela técnica de Jack-Knifing, a qual preconiza que a média dos erros deve ser próxima a zero e o desvio-padrão próximo a 1 (VAUCLIN *et al.*, 1983). Os modelos de semivariogramas foram testados, conforme descrito por Vieira *et al.* (2010).

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right) \text{ para } h \leq a,$$

$$\text{ou } \gamma(h) = C_0 + C_1 \text{ para } h > a; \quad (5)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - e^{\left(-3\frac{h}{a}\right)} \right) \quad (6)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left(1 - e^{\left(-3\left(\frac{h}{a}\right)^2\right)} \right) \quad (7)$$

Em que:

C_0 é o efeito pepita;

C_1 representa a variância estrutural;

a representa o alcance.

Na análise geoestatística de um fenômeno, os parâmetros do semivariograma são considerados em conjunto. Conforme Camargo (1998) o alcance (a) representa a distância máxima em que as amostras ainda exibem correlação espacial, enquanto o patamar (C) indica o valor do semivariograma nesse limite, refletindo a ausência de dependência espacial a partir desse ponto, já que a variância das diferenças entre pares de amostras se estabiliza. Por sua vez, o efeito pepita (C_0) exibe uma interrupção na continuidade do semivariograma para distâncias inferiores à menor distância entre as amostras. Contudo, é impossível quantificar a contribuição isolada do efeito pepita em uma análise. A partir disso, alguns índices foram propostos por alguns autores. Dentre eles, Cambardella *et al.* (1994) propuseram uma classificação baseada na porcentagem da variância do efeito pepita, com o objetivo de mensurar o grau de dependência espacial (GDE).

Para analisar o grau de dependência espacial (GDE) foi utilizado a classificação de Cambardella *et al.* (1994), em que a relação entre a porcentagem do efeito pepita (C_0) e o patamar (C_0+C_1) de um semivariograma classifica-se da seguinte forma: dependência forte ($GDE \leq 25\%$), dependência moderada (GDE entre 25 e 75%) e dependência fraca ($GDE \geq 75\%$). As análises geoestatísticas foram realizadas utilizando o software GS+ versão 10 – Gamma Design Software, 2013. A partir dos dados interpolados pelo método de krigagem, foram gerados mapas em duas dimensões (2D), a partir do software Surfer® versão 22 (Golden Software, Inc.).

Utilizando o software MINITAB®, foi realizada a estatística descritiva básica para as variáveis ambientais, obtendo-se medidas como média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação, assimetria e curtose.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Tipologia descritiva da construção das instalações

O levantamento por meio do questionário revelou particularidades construtivas em cada fazenda, contribuindo para a análise desenvolvida neste estudo. O galpão avaliado na Fazenda A foi inaugurado em abril de 2021. A construção seguiu a orientação Leste-Oeste, com dimensões totais de 73,10 m de comprimento, 51,10 m de largura, corredor central e telhado em duas águas (Figura 7).

Figura 7- Instalação *compost barn* da fazenda A, situada no município de Iguatu, Ceará, Brasil



Fonte: elaborada pelo autor.

O pé direito possuía altura de 4,0 m e prolongamento de beiral de 2,10 m. A pista de trato com dimensão de 411,10 m² continha dois cochos de alvenaria e piso de cerâmica de 72 m de comprimento. Para cada lado do galpão, uma mureta de concreto de 0,2 m de altura separava o corredor de alimentação (292,4 m²) e a área de cama (979,2 m², com densidade de alojamento de 8,2 m² animal⁻¹). Nesta seção foram distribuídos cinco bebedouros em inox do tipo calha. O corredor de passagem das vacas para a ordenha estava disposto nas laterais do galpão e possuía 2,20 m de largura. A cama da instalação (A) era constituída de 100% de maravalha (resíduos de serragem da madeira), com aproximadamente 0,40 m de profundidade, sendo revolvida duas vezes ao dia, imediatamente após os animais serem conduzidos a ordenha.

A primeira ordenha tinha início às 05:00 h e a segunda às 14:00 h. Além disso, as vacas passavam novamente pela sala de espera, no intervalo das 9:30 às 10:00h, para um banho de aspersão extra.

A instalação da Fazenda (B) possuía 180,0 m de comprimento com orientação Noroeste-Sudeste, 80,0 m de largura, 4,10 m de altura de pé direito, 0,90 m de largura de beiral, 6,0 m de altura de cumeeira, e mureta lateral medindo 3,75 m de altura, esta última preenchida por cortinas de vedação. Um corredor central de 5,75 m de largura separava duas áreas de descanso e seus respectivos corredores de alimentação (Figura 8).

Figura 8 - Instalação *compost barn* da fazenda B, situada no município de Quixadá, Ceará, Brasil



Fonte: elaborada pelo autor.

A área de cama de 2.687 m² de cada lado do galpão, foi projetada para alojar cerca de 200 vacas (densidade de alojamento de 13,4 m² animal⁻¹). Conforme o gerente, a cama foi trocada em novembro de 2020. Os animais foram distribuídos em quatro/cinco lotes, conforme critérios de produção de leite e de categoria de criação, sendo separados por cerca elétrica móvel. O corredor de alimentação medindo 168,50 × 4,10 m contava com uma área de 0,84 m linear de cocho/animal e 0,18 m linear de bebedouro/animal (20 bebedouros).

Para cada extremidade lateral do galpão existia um corredor de passagem para a ordenha, medindo 2,30 m de largura. No período do estudo, considerando ambos os lados do galpão, estavam abrigadas 195 e 149 vacas, o que incluía lotes de maior, média e baixa produção, lotes de pré-parto, novilhas, vacas em tratamento e animais de descarte.

Na Fazenda (C) as dimensões da estrutura avaliada eram de 47,4 m × 16,8 m, contendo altura de pé direito de 5,0 m, com prolongamento de beiral de 3,5 m, na orientação

Nordeste-Sudoeste (Figura 9).

Figura 9 - Instalação *compost barn* da fazenda C, situada no município de Quixadá, Ceará, Brasil



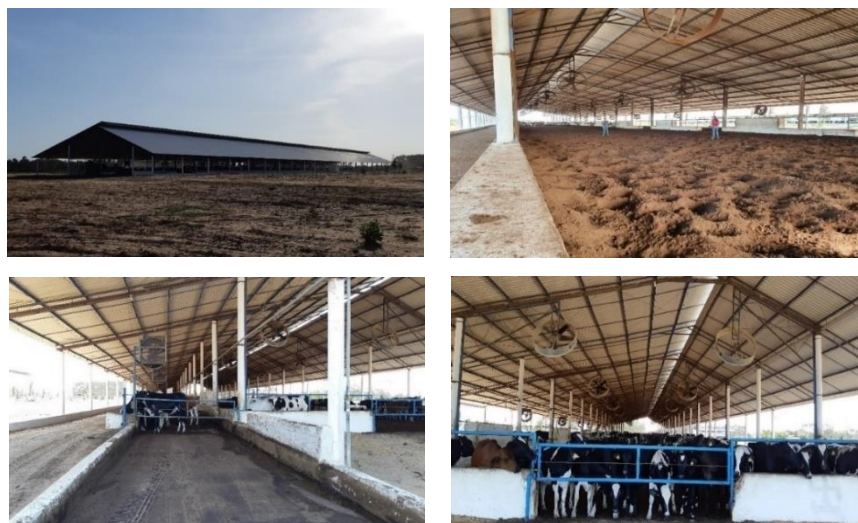
Fonte: elaborada pelo autor.

O telhado não possuía lanternim, mas por se tratar de uma adaptação construtiva havia uma pequena abertura no telhado (formado por telhas galvanizadas), de forma que em certos horários se observava um feixe de luz incidindo sobre a cama. Muretas de alvenaria medindo 0,6 m de altura separavam a área de cama ($43,6 \text{ m} \times 9,5 \text{ m}$) do corredor de alimentação ($47,0 \text{ m} \times 3,5 \text{ m}$), as quais possuíam três áreas de passagem dos animais medindo 6,0 m de largura cada.

As vacas tinham acesso a um único bebedouro retangular de alvenaria de 8,0 m de comprimento. No período do estudo, quarenta e duas vacas estavam confinadas nessa área do galpão, com densidade de alojamento na cama de $9,8 \text{ m}^2 \text{ animal}^{-1}$. Conforme informado pelo gerente da propriedade, a cama não era revolvida há cerca de 1 ano. Dois ventiladores com distância de 15 m entre si (modelo Ziehl-Abegg FE2owlet-ECblue FN 125, diâmetro de 1,5 m, fluxo de ar de $54.000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, 640 RPM), centralizados a uma altura de 3,10 m, permaneceram com funcionamento contínuo, exceto nos períodos em que as vacas estiveram na sala de ordenha.

A instalação avaliada na Fazenda (D) possuía 125,0 m de comprimento, 30,0 m de largura e estruturas de pé direito nas laterais medindo 4,8 m de altura, com telhado em duas águas, corredor lateral de alimentação medindo 4,0 m de largura, 8 bebedouros de alvenaria e orientação Leste-Oeste (Figura 10).

Figura 10 - Instalação *compost barn* da fazenda D, situada no município de Beberibe, Ceará, Brasil

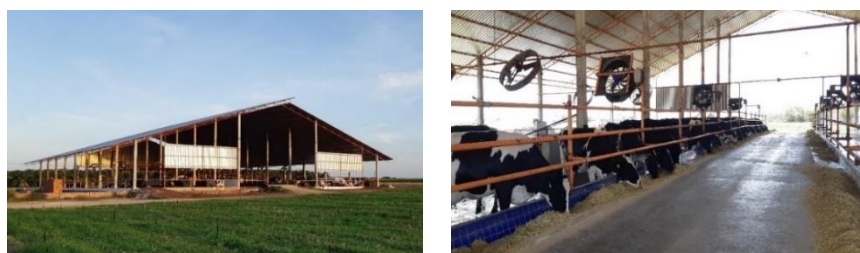


Fonte: elaborada pelo autor.

O projeto de construção também incluiu um corredor de serviço em uma das laterais do galpão, medindo 3,8 m de largura, enquanto na outra lateral, foi construída uma pista de trato coberta, medindo 5,6 metros de largura. A área de cama de 1.736 m² era composta por aparas de madeira (resíduos de serragem), com aproximadamente 0,40 m de profundidade, a qual era revolvida 3 vezes ao dia, logo após a saída dos animais para a sala de ordenha, nos horários de 05h00, 12h00 e 17h00. O lote de vacas em lactação recebia resfriamento no corredor de alimentação. Além disso, a área de cama contava com duas linhas de 9 ventiladores, totalizando 18 unidades, equidistantes entre si a cada 14 metros no comprimento do galpão.

A instalação avaliada na Fazenda (E) possuía dimensões totais de 44,1 m de comprimento, 43,0 m de largura, bem como alturas de 6,0 e 18,0 m para as estruturas de pé direito e cumeeira, respectivamente (Figura 11).

Figura 11 - Instalação *compost barn* da fazenda E, situada no município de Marco, Ceará, Brasil





Fonte: elaborada pelo autor.

A construção seguiu a orientação Leste-Oeste, com a pista de trato disposta no centro do galpão medindo 3,20 m de largura e o telhado de duas águas formado por telhas metálicas. Considerando ambos os lados do galpão avaliado, a área de cama possuía 1.085 m², a qual era revolvida duas vezes ao dia, nos horários de 4h00 e 12h00.

No período do estudo, a fazenda contava com a densidade de 18,7 m² animal⁻¹, no referido galpão avaliado. Havia um corredor de alimentação de 40,5 × 4,20 m, com três bebedouros de alvenaria medindo 2,0 × 0,40 × 0,80 m. As passagens de acesso mediam 4,0 m.

O galpão também possuía seis ventiladores dispostos na área de cama e cinco distribuídos no corredor de alimentação, além disso, as vacas recebiam resfriamento na linha de cocho por meio de um sistema automático de aspersão, o qual funcionava por sensores de aproximação.

A instalação *compost barn* avaliada na Fazenda (F) foi construída na orientação Noroeste-Sudoeste e possuía dimensões totais de 47,0 × 22,0 m e altura de pé direito de 5,0 metros (Figura 12).

Figura 12 - Instalação *compost barn* da fazenda F, situada no município de Madalena, Ceará, Brasil



Fonte: elaborada pelo autor.

O galpão possuía as laterais abertas, bem como estruturas de oitões, dispostas nas porções nascente e poente. Todas as extremidades do telhado possuíam estruturas com prolongamento de beiral, que mediam em média 4,0 m de largura. Uma das laterais do galpão possuía ainda uma tela de sombreamento, em toda sua extensão, com o objetivo de bloquear a incidência de raios solares no interior da instalação.

O galpão possuía área de cama de 504 m² com pó de serragem, corredor lateral de alimentação de 3,55 m de largura, cocho de alvenaria com 0,66 m²/animal e telhado em duas águas com oitões e lanternim. A densidade de alojamento era de 8 m²/animal. Na pista de alimentação, havia quatro bebedouros de alvenaria (1,90 × 0,52 × 0,90 m). A cama era revolvida três vezes ao dia, com oito ventiladores instalados a 2,8 m de altura e espaçados a cada 10 m.

3.3.2 Análise das condições ambientais das instalações

As condições microclimáticas das seis fazendas avaliadas e os atributos da cama estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores médios das variáveis ambientais e dados para avaliação da cama

Variáveis	Turnos	Fazendas					
		A	B	C	D	E	F
Tar (°C)	Manhã	32,9	30,4	30,8	31,2	28,6	31,7
	Tarde	38,8	34,6	35,6	32,1	33	35
	Média	35,9	32,5	33,2	31,7	30,8	33,4
UR (%)	Manhã	50	54	52	56	67	58
	Tarde	29	40	34	56	50	40
	Média	40	47	43	56	58	49

Tar: temperatura do ar; UR: umidade relativa do ar.

Fonte: elaborada pelo autor.

A Fazenda A registrou a maior média de temperatura do ar e, simultaneamente, a menor média de umidade relativa entre todas as propriedades, evidenciando desafios específicos para a produção de leite em sistema *compost barn*, especialmente quando comparada às demais fazendas avaliadas.

A literatura apresenta uma considerável variação quanto às temperaturas que definem a faixa de termoneutralidade dos animais, uma vez que o conforto térmico é influenciado não apenas pela temperatura, mas também pela umidade relativa do ar, além de fatores que envolvem mecanismos adaptativos, fisiológicos e produtivos (AZEVEDO; ALVES, 2009; SILVA *et al.*, 2020). Essa variação é condizente com as respostas adaptativas observadas

nas vacas mestiças avaliadas no presente estudo, em que a Tar permaneceu elevada em todos os galpões, ultrapassando os valores preconizados na literatura. Os resultados sobre a adaptação de vacas mestiças em *compost barn* se mostram interessantes, pois, mesmo sob condições climáticas extremas e poucos recursos de climatização, a produção média diária superou 22,0 L no semiárido.

Com exceção da Fazenda F, que confinava vacas Guzolando, as demais adotavam a raça Girolando, amplamente reconhecida pelo seu alto desempenho adaptativo às condições tropicais brasileiras e consolidada, ao longo das últimas décadas, pelo setor da genética bovina nacional (EMBRAPA, 2024). Nesse sentido, a Embrapa Gado de Leite, em parceria com a Associação Brasileira dos Criadores de Girolando, incorporou recentemente a PTA para tolerância ao estresse térmico no Sumário de Touros do Programa de Melhoramento Genético do Girolando (PMGG). Essa inclusão ocorreu após um amplo estudo sobre a adaptação da raça às condições do clima tropical (EMBRAPA, 2023).

No presente estudo, o cenário comumente observado foi de baixa UR associada a elevadas Tar, no interior dos galpões. A Fazenda A registrou UR de 40%, a mais baixa observada. As Fazendas B, C e F também apresentaram valores baixos de UR, com médias de 47%, 43% e 49%, respectivamente. Apenas as Fazendas D e E apresentaram valores acima de 50%. Conforme apontado por Malá e Novák (2021), níveis de umidade relativa do ar abaixo de 50% podem provocar o ressecamento das vias respiratórias em vacas leiteiras, favorecendo o surgimento de infecções e doenças respiratórias. Esses efeitos impactam negativamente tanto a saúde dos animais quanto sua produtividade, sendo, portanto, um fator crítico em sistemas de produção localizados em regiões de clima seco.

Em estudo realizado nos períodos seco e chuvoso, em instalações *compost barn* localizadas no município de Quixadá, Ceará, Peixoto *et al.* (2019) relataram resultados semelhantes, com valores de umidade relativa do ar de 33% e 44%, respectivamente. Por sua vez, a proximidade de municípios cearenses com o litoral torna as condições semiáridas amenas em comparação com regiões distantes do oceano atlântico (MONTEIRO, 2016). Esse efeito pode ser observado nas Fazendas D e E, onde foram registrados valores mais baixos de temperatura e níveis de umidade mais elevados, aproximando-se das condições consideradas adequadas para a produção. Segundo Baêta e Sousa (2010), a UR ideal situa-se entre 50% e 70%. No entanto, embora a proximidade com o litoral atenuar algumas características do clima semiárido nas fazendas situadas em Beberibe (Fazenda D) e Marco (Fazenda E), esses locais ainda apresentam as particularidades do tipo climático “As” (ALVARES *et al.*, 2013), como temperaturas elevadas e precipitações irregulares ao longo do ano.

Enquanto isso, a instalação fechada da Fazenda B, situada no sertão e equipada com ventilação negativa em modo túnel, apresentou médias de temperatura e umidade relativa do ar semelhantes às observadas na Fazenda C, localizada no mesmo município e a apenas 6 km de distância. A Fazenda C, possui laterais abertas, uma estrutura menos complexa e ventilação artificial incipiente. As visitas a ambas as fazendas foram realizadas em dias consecutivos, sem a ocorrência de adversidades climáticas, como precipitações, durante o período de coleta. Esses resultados indicam que os benefícios esperados com o investimento no galpão fechado da Fazenda B foram comprometidos pela ineficiência do sistema de climatização.

Durante o período de coleta, as placas evaporativas do galpão da Fazenda B estavam inoperantes e, no lugar delas, foi deixada uma abertura que permitia a livre circulação da ventilação natural, assim, o galpão operava com uma das extremidades sem estruturas de fechamento, o que impactou ainda mais a regulação do microclima. O gestor da fazenda informou que houve um problema de corrosão das placas evaporativas devido a falhas envolvendo o reservatório de fornecimento de água, comprometendo o funcionamento adequado do sistema. Em decorrência desse efeito, a ventilação em túnel não possibilitou controlar as condições internas do ambiente, especialmente diante das altas temperaturas, características da região do Sertão central.

A Fazenda B foi a única propriedade identificada no Ceará que adotava a ventilação negativa em modo túnel para galpões *compost barn*. No Brasil, as abordagens científicas sobre o assunto ainda são limitadas, com poucos estudos disponíveis para embasar a eficácia do sistema em diferentes condições climáticas e produtivas. Entretanto, pesquisas desenvolvidas em Minas Gerais oferecem algumas referências para avaliar a aplicabilidade dessa tipologia construtiva.

Valente *et al.* (2020) compararam o desempenho produtivo de vacas leiteiras em dois galpões *compost barn* distintos, um com ventilação natural em galpão aberto e outro com ventilação de pressão negativa associada a painéis de resfriamento. Embora alguns fatores climáticos tenham sido monitorados, os autores constataram que temperatura e umidade relativa do ar não foram os principais determinantes da produtividade. Além disso, durante o inverno, o galpão fechado apresentou desempenho inferior ao aberto, tornando sua adoção questionável diante dos altos custos de construção e manutenção.

Em outro estudo, Andrade *et al.* (2022a) investigaram a eficiência da ventilação negativa em modo túnel quanto à distribuição espacial do fluxo de ar dentro do galpão, nas estações de verão e inverno. Os autores identificaram que, mesmo com os exaustores em pleno funcionamento, a ventilação não foi uniforme ao longo da instalação, tanto na altura dos animais

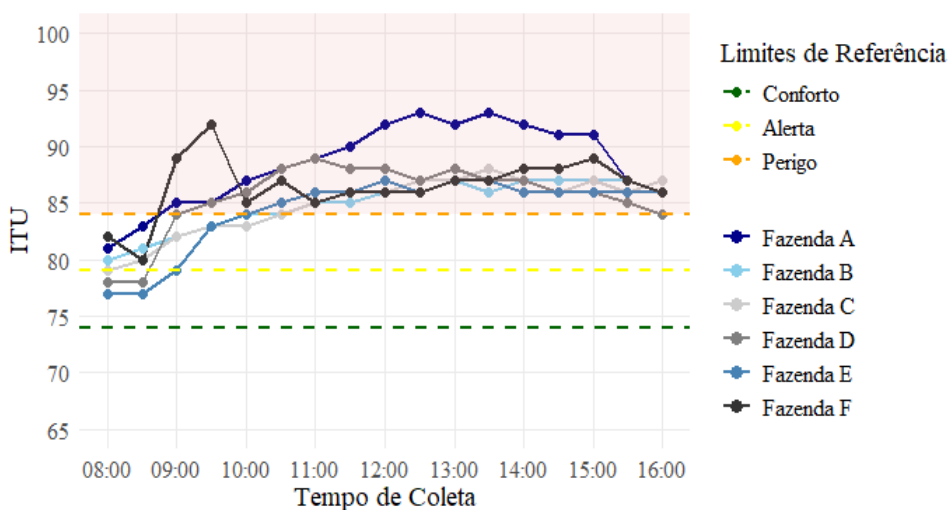
quanto próximo à cama, comprometendo a eficiência do sistema.

A análise conjunta desses estudos sugere que a tipologia de galpões com ventilação negativa em modo túnel, em determinadas regiões do país, pode apresentar desafios operacionais significativos e poucas garantias de melhorias na produtividade. Além disso, a escassez de pesquisas sobre esse modelo de climatização em regiões de clima semiárido ressalta a necessidade de novas investigações em diferentes contextos produtivos para avaliar sua eficácia.

De maneira geral, os dados ambientais registrados divergiram dos valores encontrados em estudos realizados em outros estados do Nordeste. Em um galpão *compost barn* no Agreste sergipano, Siqueira *et al.* (2022) registraram temperaturas médias de 28,1 °C no turno da manhã e 28,9 °C no turno da tarde. No entanto, a região possui um clima tropical de savana (As), e o estudo foi conduzido na transição entre o período seco e o chuvoso, quando as temperaturas tendem a ser mais amenas. Já Silva *et al.* (2023) observaram temperaturas variando de 23,5 a 27,0 °C e umidade relativa do ar entre 63% e 89% em um estudo no Sertão pernambucano. Esses resultados ressaltam a importância de ampliar as investigações sobre a termorregulação de vacas leiteiras confinadas em *compost barn* no semiárido brasileiro, a fim de gerar dados mais robustos sobre o assunto.

Com base na avaliação do Índice de Temperatura e Umidade (ITU), o ambiente de confinamento não ofereceu conforto aos animais, considerando todas as fazendas avaliadas, com valores de ITU nas categorias de alerta, perigo e emergência durante quase todo o período de coleta (Figura 13).

Figura 13 - Variação do Índice de temperatura e umidade (ITU) ao longo do dia, em galpões *compost barn*, durante o período seco no estado do Ceará



Fonte: elaborada pelo autor.

Mader, Davis e Brown-Brandl (2006) classificam valores abaixo de 74 como ideais para o conforto térmico, enquanto intervalos entre 74 e 79 indicam alerta, 79 e 84 representam perigo, e valores superiores a 84 configuram estado de emergência para bovinos.

As condições térmicas do ambiente se tornaram progressivamente mais desafiadoras ao longo do dia, atingindo índices mais elevados (ITU acima de 84) no período da tarde em todas as fazendas. No entanto, o gráfico indica que, na Fazenda F, os valores mais críticos ocorreram pela manhã. Esse fato pode estar relacionado a períodos específicos em que a temperatura no interior do galpão superou 37,0 °C, enquanto a umidade relativa do ar permaneceu acima de 60,0%. Já as fazendas D e E, localizadas na região mais próxima ao litoral, apresentaram ITU dentro da faixa de conforto no início da manhã.

Machado *et al.* (2021), trabalharam em uma instalação *compost barn* na mesorregião do Jaguaribe, Ceará, e destacaram que o ITU variou entre 75 e 80 ao longo do dia dentro do galpão, caracterizando um estado de estresse térmico crítico para vacas leiteiras. Pesquisas conduzidas em outras regiões do país indicaram condições de ITU moderado, com valores dentro da faixa de conforto e alerta, variando entre 72 e 78 (FERREIRA *et al.*, 2024), 70 e 76 (LAURINDO *et al.*, 2022), 71 e 74 (NEPOMUCENO *et al.*, 2023) e 74 e 77 (OLIVEIRA *et al.*, 2019).

Considerando as contribuições de Rodrigues *et al.* (2011), que identificam a entalpia específica como um indicador robusto de estresse térmico, este estudo buscou uma abordagem complementar para caracterizar o ambiente térmico das fazendas avaliadas, conduzindo análises em paralelo às discussões sobre o ITU. Adotou-se como faixa de conforto térmico valores de temperatura do ar entre 5 e 31 °C, combinados a UR entre 60 e 70% (PEREIRA, 2005). A classificação da entalpia foi realizada considerando a pressão barométrica local de cada município, utilizando como referência a tabela prática desenvolvida por Alves (2014). Nesse estudo, a autora determinou 77,0 kJ/kg de ar seco como o limiar de conforto para vacas mestiças em lactação na região litorânea do Ceará, enquanto valores acima de 84,6 kJ/kg de ar seco indicam condições críticas aos animais.

Em clima subtropical úmido, Garcia (2017) identificou um limiar mais baixo, de 64,7 kJ/kg de ar seco, para vacas da raça Holandesa, evidenciando que diferenças raciais e regionais influenciam a interpretação desse indicador. Peixoto (2017), considerando como referência a zona de termoneutralidade estabelecida para raças Holandesas, em um estudo conduzido em galpão *compost barn* em região do Sertão Central cearense conferiu condições de conforto a faixa de entalpia entre 12,3 e 61,0 kJ/kg de ar seco. No referido estudo, observou-

se que a intensidade da entalpia ocorreu substancialmente na quadra chuvosa (69,0 e 72,0 kJ/kg de ar seco), em comparação ao período seco no estado.

Com base nos limites de entalpia, verificou-se que, em média ao longo do dia, as vacas mestiças avaliadas no presente estudo permaneceram em condições de conforto térmico em todas as fazendas analisadas ($h < 77,0$ kJ/kg de ar seco). Esse resultado contrasta com a avaliação pelo ITU, que indicou estresse térmico acentuado em todas as coletas.

Ao considerar a média por turno, observou-se que a amplitude dos valores de ITU e de entalpia foi menor nas fazendas B e C, sugerindo maior estabilidade térmica nesses locais. Além disso, apesar de a entalpia média indicar conforto, a análise dos valores mínimo e máximo revelou que, em determinados horários, os índices alcançaram a faixa de alerta ($77,3 < h < 84,5$ kJ/kg de ar seco) e, em alguns casos, atingiram valores críticos ($h > 84,6$ kJ/kg de ar seco) para vacas mestiças, conforme apresentado na Tabela 2.

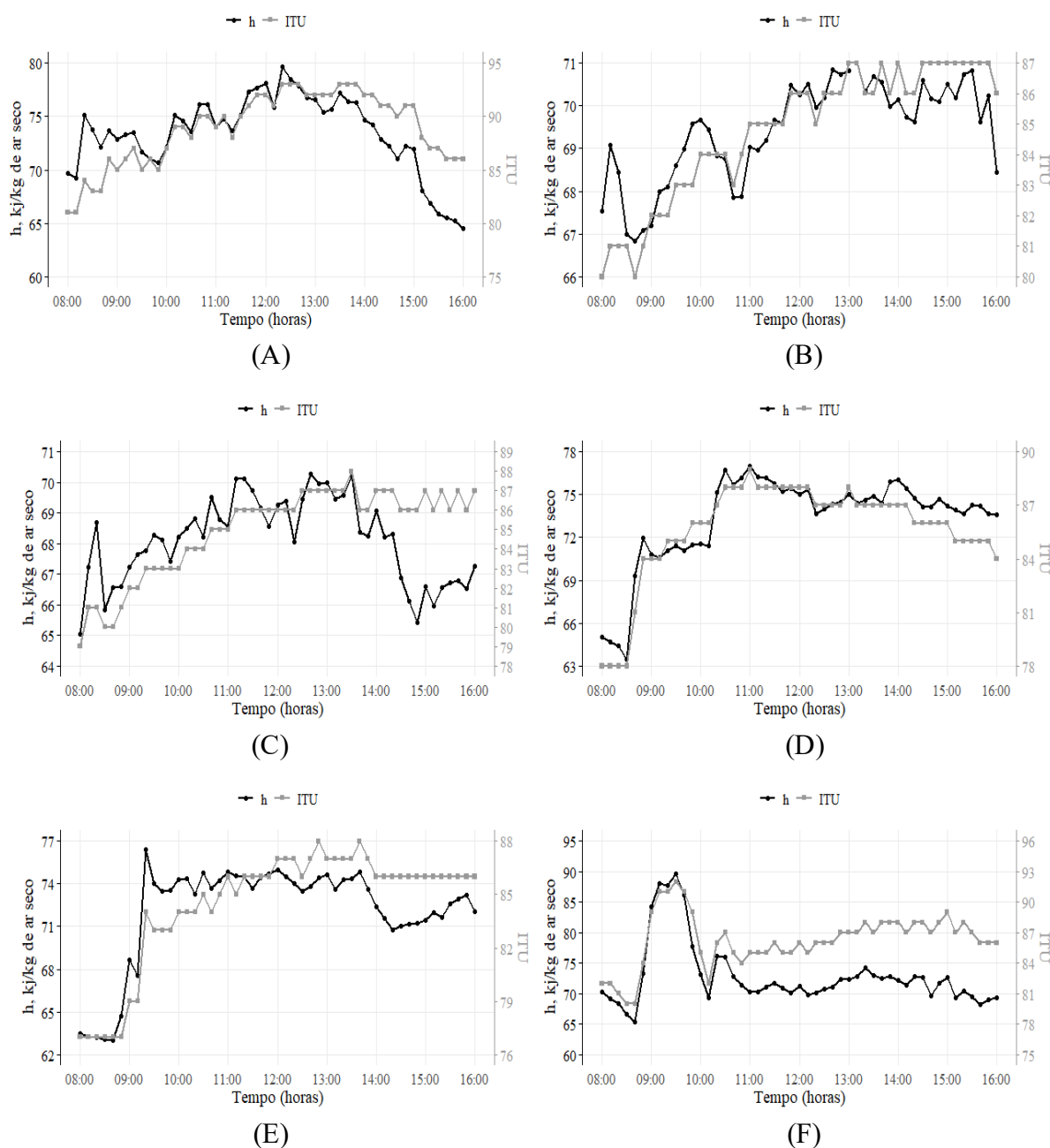
Tabela 2 - Registros do Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e da entalpia específica (h, kJ/kg de ar seco), em galpões *compost barn* (A a F) durante o período seco, no estado do Ceará

Índices	Valores médios registrados por turno		Valores registrados ao longo do dia		Valores médios registrados	Faixa de amplitude ao final do dia
	Manhã	Tarde	Mínimo	Máximo		
ITU						
A	88	90	81,2	93,4	89	12,3
B	84	87	79,9	87,4	85	7,5
C	84	87	78,7	87,5	85	8,9
D	85	86	77,9	88,7	86	10,8
E	83	86	76,6	87,6	84	11,0
F	86	86	79,8	91,9	86	12,1
h						
A	74,46	71,73	64,49	79,68	73,40	15,2
B	68,94	70,23	66,85	71,12	69,44	4,3
C	68,37	67,70	65,06	70,28	68,11	5,2
D	72,50	74,51	63,48	77,00	73,28	13,5
E	71,69	72,60	62,99	76,38	72,04	13,4
F	73,85	72,91	65,39	89,61	72,91	24,2

Fonte: elaborada pelo autor.

A Figura 14 apresenta, de forma ilustrativa, a variação dos valores de ITU e de entalpia específica ao longo do dia, em cada microclima das instalações avaliadas. Essa representação gráfica possibilita uma visualização comparativa mais clara das flutuações térmicas diárias, evidenciando momentos críticos e variações entre os índices.

Figura 14 - Variação da entalpia específica (h , kJ/kg de ar seco) e do Índice de Temperatura e Umidade (ITU), em galpões *compost barn* (A a F), durante o período seco no estado do Ceará



Fonte: elaborada pelo autor.

De outra maneira, a avaliação das variáveis ambientais norteia práticas de manejo importantes para a eficiência da compostagem no interior da instalação. Nesse sentido, a temperatura e a umidade relativa do ar influenciam diretamente o teor de umidade da cama em sistemas *compost barn* (BLACK *et al.*, 2013; ECKELKAMP *et al.*, 2014; LESO *et al.*, 2020). A Tabela 3 apresenta, portanto, os dados coletados para a avaliação da cama.

Tabela 3 - Dados para avaliação da cama obtidos em galpões compost barn em região semiárida

Fazenda	pH	Umidade da cama (%)	TIC (°C)	C/N
A	7,83	23,7	43,2	13,14
B	8,18	31,5	37,3	7,83
C	8,64	40,2	31,4	7,91
D	8,67	30,3	41,6	13,11
E	8,6	23,4	44,2	19,35
F	9,05	31,6	45,8	10,94

pH: potencial hidrogeniônico; TIC: temperatura interna da cama; C/N: relação carbono/nitrogênio.

Fonte: elaborada pelo autor.

Todos os galpões avaliados apresentaram baixos níveis de umidade na cama, com exceção do galpão da Fazenda C. A umidade da cama, influenciada pela deposição diária de fezes e urina, é um fator determinante para a atividade microbiana e a eficiência do processo de compostagem (JANNI *et al.*, 2007). Para um manejo adequado, recomenda-se que o teor de umidade se mantenha entre 45% e 55%, embora uma faixa operacional entre 40% e 60% ainda permita uma atividade microbiana significativa (BEWLEY *et al.*, 2012). Quando os níveis de umidade caem abaixo de 40%, há uma redução na atividade microbiana, levando ao resfriamento da cama e à diminuição da taxa de compostagem. Por outro lado, valores superiores a 55%–60% criam condições anaeróbicas que comprometem a decomposição, retardando esse processo (BEWLEY; ROBERTSON; ECKELKAMP, 2017).

Na Fazenda C, o teor de umidade da cama foi de 40,2%, o mais elevado entre as fazendas avaliadas. Esse valor esteve associado à menor temperatura interna da cama em comparação às demais fazendas. Embora a literatura indique uma faixa de umidade considerada adequada para a compostagem, outros fatores, como a ventilação ineficiente, podem ter influenciado esse resultado. Isso porque a instalação possuía apenas dois ventiladores para promover a circulação do ar e, conseqüentemente, a secagem da cama. Aspectos como aeração inadequada, maior densidade de alojamento e ventilação ineficiente influenciam o teor de umidade na cama (BLACK *et al.*, 2014; JANNI *et al.*, 2007). Em contrapartida, a cama quando úmida pode favorecer sua compactação, que por sua vez, consiste em um problema frequentemente associado à entrada diária de maquinário no galpão para o revolvimento do material (DAMASCENO, 2020a).

No entanto, o fator maquinário pode ser descartado, uma vez que a Fazenda C não adotava esse procedimento como parte de seu protocolo de manejo. De acordo com o gestor da fazenda, a cama não era revolvida há dois anos, período no qual sua compactação tornou-se

visivelmente evidente. Janni *et al.* (2007) destacam que não havendo a oxigenação, por meio do manejo de revolvimento, aumenta-se a possibilidade de a cama ficar compactada. Além disso, os resultados da análise da cama indicaram que a umidade presente não era elevada o suficiente para justificar riscos significativos de compactação, reforçando que outros fatores podem estar envolvidos nesse processo. Entre esses fatores, destaca-se o pisoteio frequente dos animais, ao longo do tempo, que exerce pressão contínua sobre a cama e pode contribuir diretamente para sua compactação (LESO *et al.*, 2013).

Radavelli *et al.* (2020) destacam que as condições climáticas de cada região podem impactar diretamente diversos parâmetros em sistemas *compost barn*, incluindo a temperatura da cama. De modo geral, à medida que a temperatura do ar se eleva, ocorre um aumento proporcional na temperatura da cama, favorecendo a evaporação da umidade e contribuindo para seu processo de secagem.

No presente estudo, as fazendas B e C, situadas em regiões com condições climáticas semelhantes, registraram as menores temperaturas internas da cama, com valores de 37,3 °C e 31,4 °C, respectivamente, sobretudo consideradas inadequadas para o processo de compostagem (JANNI *et al.*, 2007; BEWLEY *et al.*, 2012). Esse resultado sugere que há uma forte influência do ambiente sobre essa variável. Por outro lado, todas as demais fazendas apresentaram temperaturas internas da cama entre 41,6 °C e 45,8 °C, o que sugere uma maior atividade microbiana (SHANE; ENDRES; JANNI, 2010).

As médias de temperatura interna da cama obtidas nas fazendas A, D, E e F são consideradas satisfatórias quando comparadas a estudos conduzidos em outras regiões do Brasil (KAPPES *et al.*, 2020; NEPOMUCENO *et al.*, 2023; NOGARA *et al.*, 2021; OLIVEIRA *et al.*, 2019b; PIOVESAN; OLIVEIRA, 2019; YAMEOGO *et al.*, 2021). Enquanto outros autores mencionaram resultados mais próximos do ideal para o manejo da cama em *compost barn*, registrando valores que ultrapassam 40 °C (MOTA; ANDRADE; LEITE, 2019), mas ainda fora dos limites recomendados. Outras metodologias baseadas em análises de variabilidade espacial indicam elevadas amplitudes térmicas, com temperaturas internas da cama variando de 20,7 a 49,8 °C (VIEIRA *et al.*, 2021) e de 30,0 a 55,0 °C (OLIVEIRA *et al.*, 2021). Em um estudo que comparou diferentes estações climáticas, Andrade *et al.* (2022b) observaram temperaturas entre 30,0 e 47,0 °C no verão e entre 23,0 e 44,0 °C no inverno.

A Tabela 4 reúne dados comparativos entre estudos desenvolvidos no Nordeste brasileiro e demais regiões do país.

Tabela 4 - Informações geográficas, produtivas e de manejo de galpões *compost barn* no Brasil utilizados no alojamento de vacas em lactação

Autores	Localização	Produção média de leite (L/dia)	Material de cama	Raça	Área de cama (m²/vaca)
Nordeste brasileiro					
Peixoto <i>et al.</i> (2019)	Quixadá/CE	-	Serragem	Holandesa	27,0
Silva <i>et al.</i> (2020)	Lajedo/PE	-	Serragem	Holandesa	12,5
Sampaio <i>et al.</i> (2021)	Russas/CE	20,0	Bagana de carnaúba	Holandês/Gir*	6,6/ 9,5
Siqueira <i>et al.</i> (2022)	Carira/SE	-	-	-	10,0
Silva <i>et al.</i> (2023)	Quixadá/CE	20,5/ 19,3	Serragem	Holandesa	10,4
Presente estudo ^a	Iguatu/CE	25,0	Serragem	Holandês/Gir*	8,2
Presente estudo ^b	Quixadá/CE	22,0	Serragem	Holandês/Gir*	13,4
Presente estudo ^c	Quixadá/CE	20,0	Serragem	Holandês/Gir*	9,8
Presente estudo ^d	Beberibe/CE	16,0	Serragem	Holandês/Gir*	11,8
Presente estudo ^e	Marco/CE	35,0	Serragem	Holandês/Gir*	18,7
Presente estudo ^f	Madalena/CE	22,0	Serragem	Holandês/Guzerá*	8,0
Demais regiões					
Fávero <i>et al.</i> (2015)	Botucatu/SP	-	Casca de amendoim/serragem/maravalha	Holandesa/Simental*	11,0/ 19,0/ 12,0
Damasceno <i>et al.</i> (2019)	Oeste/MG**	28,0	Serragem	Holandesa	10,5
Valente <i>et al.</i> (2020)	Cajuri/MG	24,6/ 30,3	Serragem/casca de café	Holandesa	10,0/ 13,6
Kappes <i>et al.</i> (2020)	Bom Retiro/SC	45,0/ 33,0/ 22,0	Serragem	Holandês/Simental*	10,5
Vieira <i>et al.</i> (2021)	Sudoeste/PR**	25,0/ 32,0	Maravalha	Holandês/Jersey*	12,3/ 17,0
Laurindo <i>et al.</i> (2022)	Itaguara/MG	18,4	Maravalha	Holandês/Gir*	16,6
Guesine, Silveira e Silva (2023)	Monte Alegre/MG	27,0/ 33,0	Palha de arroz	Holandês/Gir*	8,7
Oliveira <i>et al.</i> (2023)	Sudeste/MG**	-	Maravalha/serragem	Holandesa	11,5/ 9,9

As letras sobrescritas em "Presente estudo" (a, b, c, d, e, f) correspondem às diferentes fazendas avaliadas. O traço (-) indica que o dado não foi informado pelos autores.

*Mestiça proveniente do cruzamento das raças mencionadas. **Os autores não especificaram o município de realização do estudo, mencionando apenas a região geográfica.

Fonte: elaborada pelo autor.

As Fazendas A e F apresentaram temperaturas do ar mais elevadas, associadas a um maior adensamento animal, 8,2 e 8,0 m²/vaca, respectivamente, conforme a tabela anterior. Essa condição pode ser crítica, uma vez que Damasceno e Ferraz (2020) recomendam área mínima de 10 m²/animal, para alojamento em *compost barn* no Brasil. Essa recomendação visa garantir que as vacas possam deitar-se, levantar e se movimentar livremente, proporcionando maior conforto. Essa estratégia tem sido adotada a fim de evitar superlotação e compactação da cama, considerando a diversidade climática e os diferentes materiais utilizados como cama no país. De modo semelhante, Galama *et al.* (2014), ao analisarem dez fazendas na Holanda, observaram que densidades de alojamento inferiores a 10 ou 12 m² por vaca são inadequadas, pois dificultam a manutenção da camada superficial da cama seca e limpa.

No Brasil, diferentes valores de densidade de alojamento têm sido relatados, geralmente superiores a 10,0 m²/animal. Em um estudo pioneiro no estado de São Paulo, Fávero *et al.* (2015) identificaram três fazendas com densidades de 11,0, 19,0 e 12,0 m²/animal. Já Radavelli *et al.* (2020) analisaram trinta galpões *compost barn* no Oeste catarinense e observaram uma média de $14,6 \pm 4,1$ m² por animal.

Estudos clássicos indicam que a área de cama disponibilizada aos animais varia conforme a raça. Endres (2009) sugere 7,4 m² para a raça Holandesa e 6,1 m² para a Jersey. Enquanto Bewley *et al.* (2012) apontam a necessidade de 7,9 m² para vacas de menor porte e 9,3 m² para as de maior porte. Nesse contexto, a Fazenda F adotou uma densidade de alojamento de 8 m² para vacas da raça Guzolando. Esse resultado ressalta a necessidade de estudos adicionais sobre a adaptabilidade dessa raça ao confinamento em instalações *compost barn* no semiárido. A raça Guzolando, resultante do cruzamento entre o gado Holandês e o Guzerá, apresenta animais de médio a grande porte, com dupla aptidão, temperamento ativo, porém dócil, e pelagem predominantemente escura (AGROLINK, 2010; CLEMENTE; RAGAZZI, 2024).

Os resultados indicam que a combinação de elevada temperatura do ar e baixa umidade relativa, observada na maioria das fazendas, contribuiu consideravelmente para os baixos níveis de umidade da cama registrados neste estudo. No entanto, o galpão da Fazenda E apresentou UR moderada (58%) e registrou o menor teor de umidade da cama (23,4%). Esse resultado pode ser atribuído ao menor adensamento adotado na propriedade, que disponibilizou a maior área de cama por animal (18,7 m² por animal), e, portanto, menor incorporação de fezes e urina na cama, em comparação às demais fazendas.

Por outro lado, a umidade da cama na Fazenda A apresentou um valor extremamente baixo (23,7%), mesmo sob uma alta densidade de alojamento animal (8,2 m² por

animal). Esse resultado sugere uma forte influência das condições ambientais no interior do galpão, que registrou temperaturas médias elevadas (acima de 35°C) e baixa umidade relativa do ar (40%).

Esse cenário representa um desafio tanto para a termorregulação dos animais, agravada pela alta taxa de lotação, quanto para o processo de compostagem da cama. Além disso, é importante ressaltar que condições extremas de baixa umidade da cama pode intensificar a suspensão de partículas de poeira no ambiente, aumentando os riscos de problemas respiratórios para as vacas. Esse efeito é potencializado pela já reduzida umidade relativa do ar, que pode contribuir para a irritação das vias respiratórias dos animais.

A necessidade de ampliar a área da cama cresce à medida que aumenta o número de vacas alojadas e, conseqüentemente, a produção de dejetos, garantindo a eficiência da atividade microbiana e a secagem da superfície (JANNI *et al.*, 2007; LESO *et al.*, 2020). Esse manejo torna-se essencial em vacas de alta produção, cuja maior ingestão de alimento e água resulta em um volume elevado de urina e fezes, exigindo estratégias eficazes para controlar a umidade da cama (DAMASCENO; FERRAZ, 2020). Nesse contexto, o manejo de adensamento promovido pela Fazenda E, a qual apresentou a maior média de produção de leite (35,0 L/dia), também foi a que ofereceu maior área de cama para as vacas (18,7 m² por animal).

Além da temperatura e umidade, o processo de compostagem é influenciado por diversos fatores, incluindo oxigênio e aeração, porosidade, granulometria, relação carbono-nitrogênio (C:N), pH, e tempo de decomposição. Essas variáveis não apenas afetam a eficiência da compostagem, mas também influenciam a dinâmica microbiológica da cama (DAMASCENO, 2020a; LLONCH *et al.*, 2020). Em sistemas *compost barn*, embora seja desafiador realizar medições práticas, as variáveis relação C:N e pH são bons indicativos para o manejo da cama (BEWLEY; TARABA, 2009).

Neste estudo, as análises de pH da cama revelaram valores acima da faixa recomendada em todas as fazendas, variando de 8,2 a 9,0. Esses resultados sugerem que para alguns casos, a cama poderia já estar em seu estágio final de decomposição, corroborando com estudos de Radavelli *et al.* (2020). A única exceção foi a Fazenda A, onde o pH registrado foi 7,8, devido ao pouco tempo de uso da área de cama pelos animais.

Para uma compostagem eficiente, o pH ideal deve situar-se entre 6,5 e 8,0. Embora a compostagem ainda ocorra em níveis de pH entre 5,5 e 9,0, sua eficiência tende a ser menor em valores extremos, sendo mais favorável em condições próximas à neutralidade (NRAES-54, 1992). Essa observação é reforçada por Changirath, Halbach e Dorff (2011), que apontam que os microrganismos presentes na cama apresentam melhor desempenho em condições neutras a

levemente ácidas, com pH entre 5,5 e 7,0. Já Rodrigues *et al.* (2006) consideram que a maioria das enzimas presentes nos microrganismos se encontram ativas na faixa de pH de 5,5 a 8,5, o que é importante para o crescimento microbiano. De forma geral, os autores supracitados concordam que valores fora dos limites mencionados podem comprometer tanto organismos benéficos quanto patógenos presentes na cama.

Quando o pH está baixo, o meio pode tornar-se excessivamente ácido, prejudicando a atividade microbiana e comprometendo o processo de compostagem. Por outro lado, valores mais elevados de pH podem intensificar a volatilização de amônia, afetando a qualidade do ambiente e, conseqüentemente, o bem-estar dos animais, além de impactar as condições de trabalho na instalação (DAMASCENO, 2020b).

Estudos indicaram pH médio superior a 8,0 nas amostras de cama presentes em galpões *compost barn* no Brasil. Na região Sudeste, Andrade *et al.* (2022b) identificaram que os valores de pH superavam 8,0, atingindo níveis alcalinos elevados durante o verão, com registros superiores a 10. Resultados semelhantes são apontados por Oliveira *et al.* (2019b), onde registraram amostras com valores de pH entre 8,0 e 9,5. Já na região Sul, Piovesan e Oliveira (2019) observaram pH acima de 10 e relataram uma associação negativa entre os níveis de pH da cama e a presença excessiva de patógenos.

Quanto a relação C:N obtida nas coletas da cama, os valores mantiveram-se fora da faixa recomendada para a compostagem ideal, em todas as fazendas avaliadas (Tabela 2). Uma relação C/N equilibrada assegura a disponibilidade adequada de nutrientes para a atividade microbiana. Enquanto o carbono é utilizado como fonte de energia, o nitrogênio é fundamental para a reprodução dos microrganismos (DAMASCENO, 2020b).

A proporção C/N ideal para compostagem deve estar entre 25/1 e 30/1. Valores superiores a 30/1 podem reduzir a taxa de decomposição devido à limitação de nitrogênio para a atividade microbiana. Já proporções inferiores a 25/1 favorecem a volatilização de amônia, resultando em odores indesejáveis e perdas de nitrogênio (NRAES-54, 1992).

Com exceção da Fazenda E, a medição da temperatura da cama e a coleta de amostras não eram realizadas de maneira frequente nas propriedades avaliadas. Além disso, os procedimentos adotados não seguiam um protocolo padronizado, o que compromete a confiabilidade dos dados obtidos e dificulta a implementação orientada de práticas de manejo da cama. Isso explicaria a baixa relação C/N encontrada nas fazendas avaliadas. Com exceção da Fazenda E, que apresentou valores mais próximos do ideal, os gestores informaram que a reposição da cama era feita de forma empírica, sem planejamento estruturado ou critérios técnicos bem definidos.

Manhã	Esférico	3,000	53,09	18,5	0,974	5,65	forte	0,013	0,913
Tarde	Gaussiano	2,620	9,327	9,4	0,893	28,09	moderado	-0,01	1,100
Velocidade dos ventos									
Manhã	Exponencial	0,420	0,99	30,2	0,902	42,42	moderado	0,013	1,678
Tarde	Esférico	0,175	0,610	17,5	0,840	28,69	moderado	0,004	3,087

Fazenda D		Temperatura superficial da cama							
Manhã	Gaussiano	1,790	5,59	86,0	0,792	32,02	moderado	-0,007	0,990
Tarde	Gaussiano	0,541	2,301	31,6	0,987	23,51	forte	-0,001	1,149
Velocidade dos ventos									
Manhã	Exponencial	0,258	1,018	15,6	0,73	25,34	moderado	-0,029	1,39
Tarde	Exponencial	0,616	1,351	31,4	0,658	45,60	moderado	-0,023	1,212

Fazenda E		Temperatura superficial da cama							
Manhã	Gaussiano	0,725	3,46	37,6	0,924	20,95	forte	0,013	1,129
Tarde	Gaussiano	3,900	48,8	26,9	0,951	7,99	forte	0,046	1,251
Velocidade dos ventos									
Manhã	Exponencial	0,222	0,921	23,0	0,919	24,10	forte	0,001	0,908
Tarde	Gaussiano	0,730	2,651	44,4	0,983	27,54	moderado	-0,011	0,994

Fazenda F		Temperatura superficial da cama							
Manhã	Gaussiano	0,396	2,658	27,7	0,987	14,90	forte	0,021	0,995
Tarde	Gaussiano	0,580	7,169	26,4	0,981	8,09	forte	-0,003	0,852
Velocidade dos ventos									
Manhã	Gaussiano	0,379	2,686	53,4	0,947	14,11	forte	0,010	0,923
Tarde	Esférico	0,086	0,1986	17,3	0,932	43,45	moderado	-0,010	1,063

Co: efeito pepita; Co + C: patamar; a: alcance (m); R^2 : coeficiente de determinação; Co/(Co+C): razão do efeito pepita com o patamar (multiplicado por 100); GDE: grau de dependência espacial (%); DP: desvio padrão.
Fonte: elaborada pelo autor.

Todas as áreas de cama avaliadas apresentaram variabilidade espacial para TSC, com semivariogramas ajustados pelo modelo gaussiano em todas as fazendas e em ambos os turnos. No entanto, houve exceções: na Fazenda C, no turno da manhã, o modelo melhor representado foi o esférico, enquanto na Fazenda B, no turno da tarde, o modelo mais adequado foi o exponencial.

A variabilidade espacial também foi observada para Vv. No turno da manhã, o modelo gaussiano foi o mais adequado para as fazendas B, C, D e E, enquanto para as fazendas A e F, os melhores ajustes foram pelos modelos esférico e gaussiano, respectivamente. No turno da tarde, observou-se que o modelo exponencial foi o mais adequado para as fazendas A e D, o modelo gaussiano para as fazendas B e E, e o modelo esférico para as fazendas C e F.

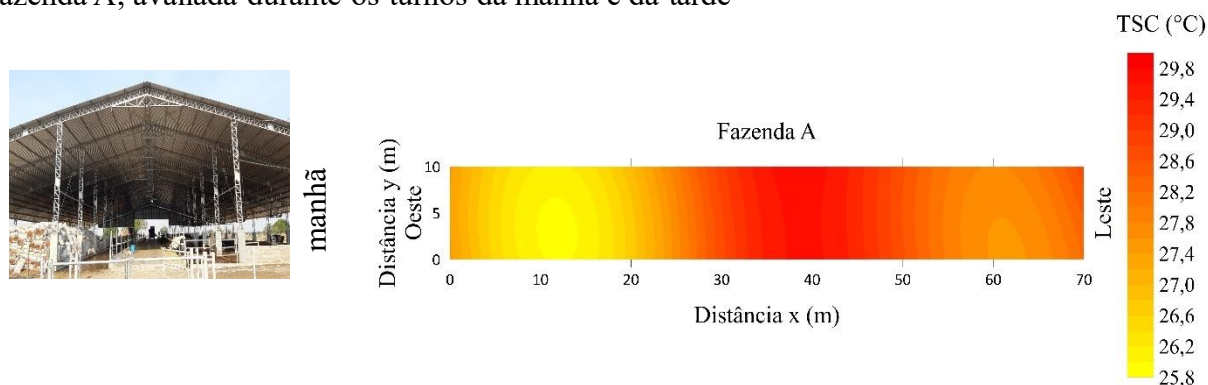
Com base no método de "Jack-knifing", verificou-se que os ajustes obtidos, para todas as fazendas avaliadas, foram validados adequadamente, uma vez que a média se manteve próxima a zero, bem como o desvio padrão próximo a 1 (VAUCLIN *et al.*, 1983). A validação dos modelos de semivariograma, incluindo a aplicação do método Jack-knifing, demonstrou a consistência e a confiabilidade dos ajustes realizados. Os resultados apresentados na Tabela 3 indicam que os modelos estão adequadamente validados, o que confere robustez à krigagem realizada.

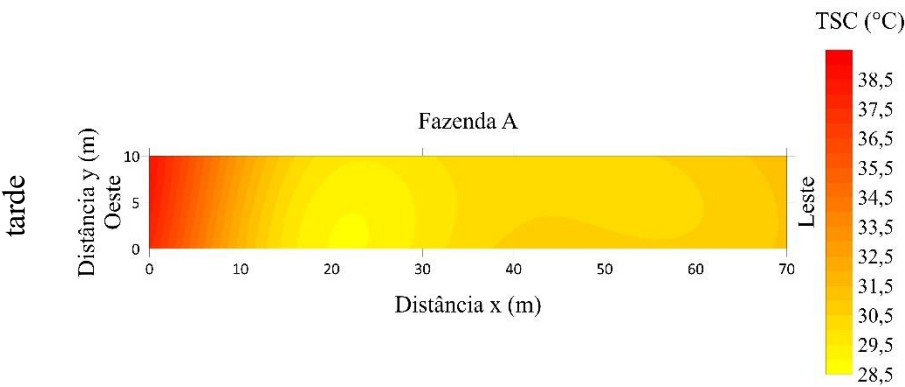
Conforme os intervalos estabelecidos por Cambardella *et al.* (1994), o GDE foi classificado como forte para a TSC ($\leq 25\%$) durante o turno da manhã em todas as fazendas avaliadas, exceto para a Fazenda D, que apresentou GDE moderado (32,02%). Esse resultado indica que a menor participação do efeito pepita na variabilidade dos dados reflete uma maior continuidade espacial entre os pontos avaliados. Vieira (2000), destaca que quanto menor o efeito pepita em relação ao patamar, maior a continuidade espacial da variável analisada, menor a incerteza da estimativa e maior a confiabilidade da interpolação por meio de krigagem.

Por fim, foram gerados mapas de distribuição espacial para representar visualmente a variação dos parâmetros TSC e Vv nas áreas de cama avaliadas. Inicialmente, buscou-se compreender o efeito da temperatura no interior do galpão, associado a particularidades construtivas sob a TSC.

A partir da análise descritiva, a TSC na Fazenda A, variou de 24,9 °C a 31,6 °C, no turno da manhã e de 28,3 °C a 42,4 °C no turno da tarde, que combinada a análise dos mapas gerados evidencia-se que o manejo da fazenda não garantiu a homogeneidade da temperatura da cama, sobretudo, apresentando acentuada amplitude térmica, especialmente no turno da tarde (Figura 15). Essa tendência foi observada em todas as fazendas avaliadas, com exceção da Fazenda D.

Figura 15 - Distribuição espacial da temperatura da superfície da cama (TSC, °C) no galpão da Fazenda A, avaliada durante os turnos da manhã e da tarde

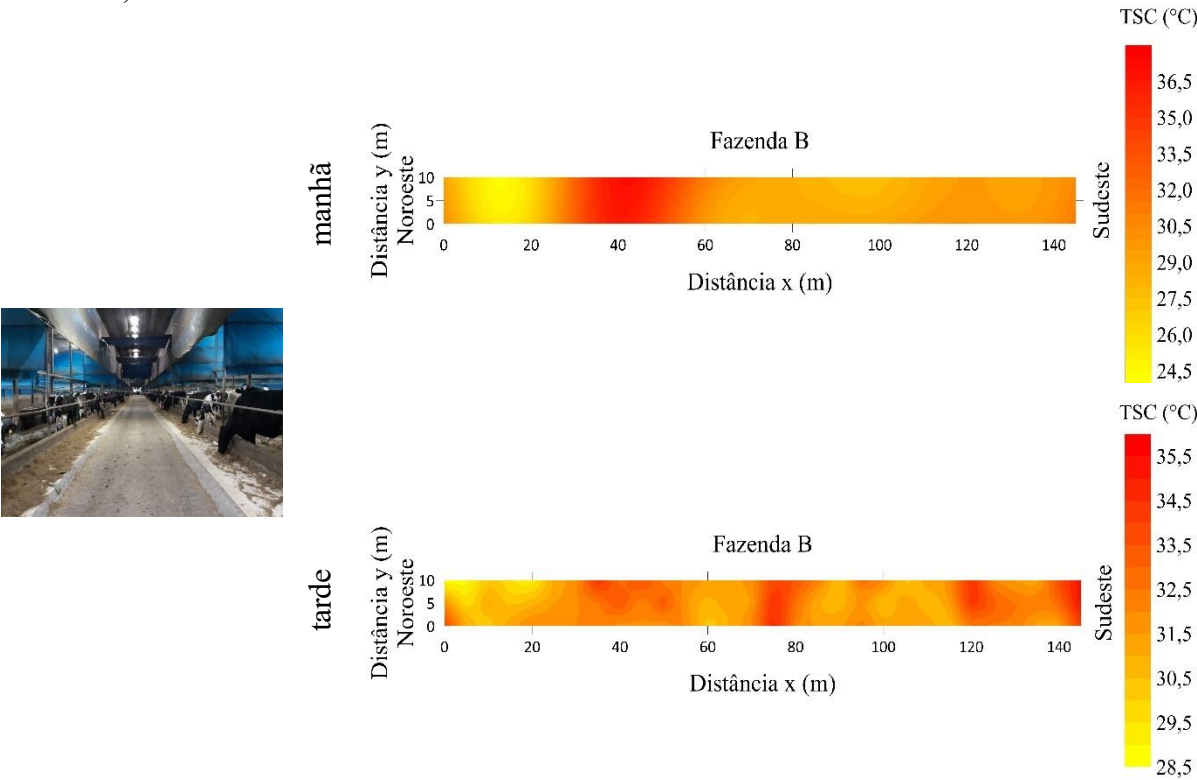




Fonte: elaborada pelo autor.

Os mapas gerados para a Fazenda B indicam que o galpão fechado não foi eficaz em promover a homogeneidade da distribuição espacial da TSC (Figura 16). No entanto, permanece a discussão sobre o quanto a ausência da placa evaporativa comprometeu a funcionalidade esperada para esse tipo de instalação. Ainda assim, considerando as condições climáticas adversas da região, os valores de TSC poderiam ser ainda mais elevados, o que não ocorreu, especialmente quando comparados à alta temperatura do ar registrada no interior do galpão.

Figura 16 - Distribuição espacial da temperatura da superfície da cama (TSC, °C) no galpão da Fazenda B, avaliada durante os turnos da manhã e da tarde

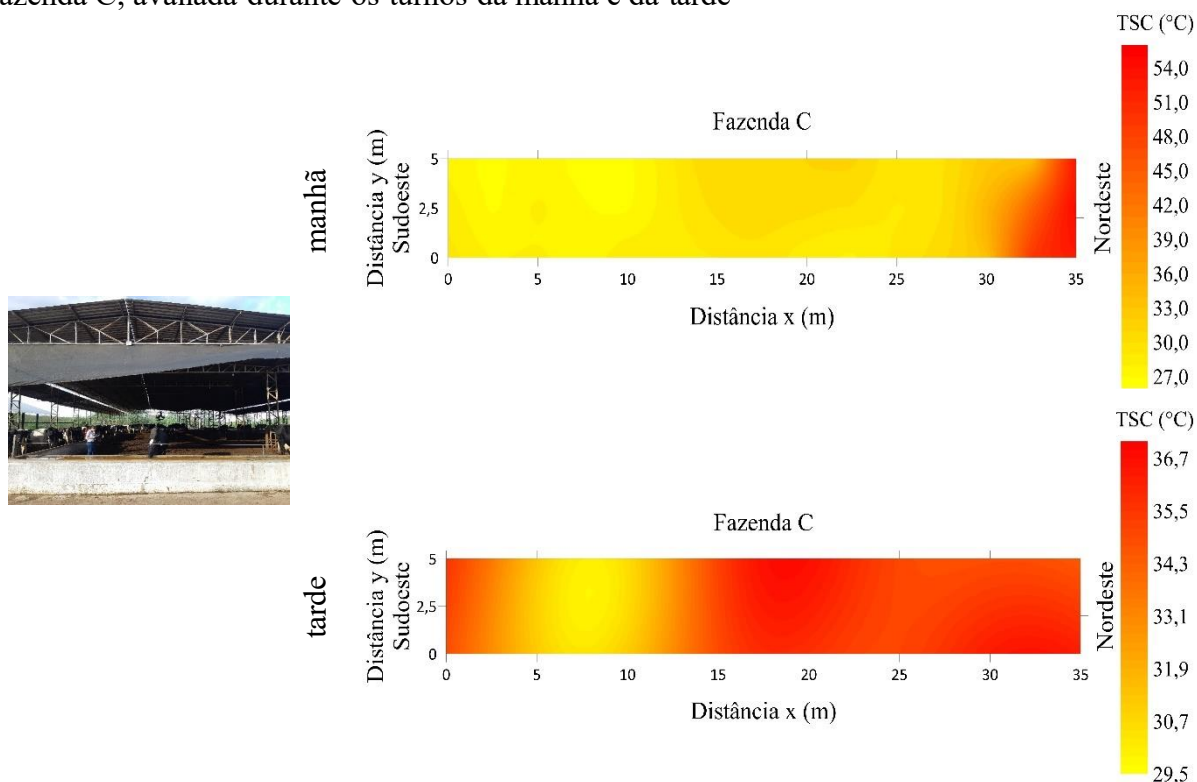


Fonte: elaborada pelo autor.

Em ambos os turnos, os mapas evidenciaram uma marcante heterogeneidade térmica na área analisada. Além disso, a considerável amplitude térmica observada, associada às variações de coloração conforme o gradiente de temperatura, sugere a formação de microclimas distintos, possivelmente influenciados por fatores relacionados ao manejo da cama. Para garantir a padronização das medições, todas as análises foram realizadas antes do revolvimento da cama, em cada fazenda. No entanto, como a Fazenda B realizava três revolvimentos diários, a intensa agitação da cama pode ter favorecido a transferência de calor das camadas internas para a superfície, contribuindo para as variações de temperatura observadas. Além disso, a eficácia desse manejo depende não apenas da frequência do revolvimento, mas também da escolha do implemento adequado e da técnica aplicada pelo operador, fatores que podem ter influenciado a variação térmica observada, especialmente no turno da tarde.

Na Fazenda C, a temperatura mínima da cama no turno da manhã foi de 26,2 °C, enquanto a máxima atingiu 55,7 °C (Figura 17).

Figura 17 - Distribuição espacial da temperatura da superfície da cama (TSC, °C) no galpão da Fazenda C, avaliada durante os turnos da manhã e da tarde



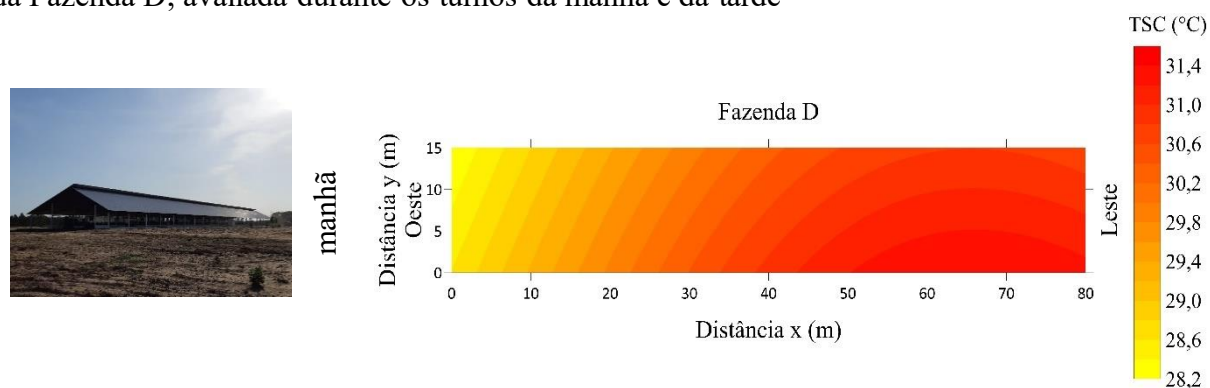
Fonte: elaborada pelo autor.

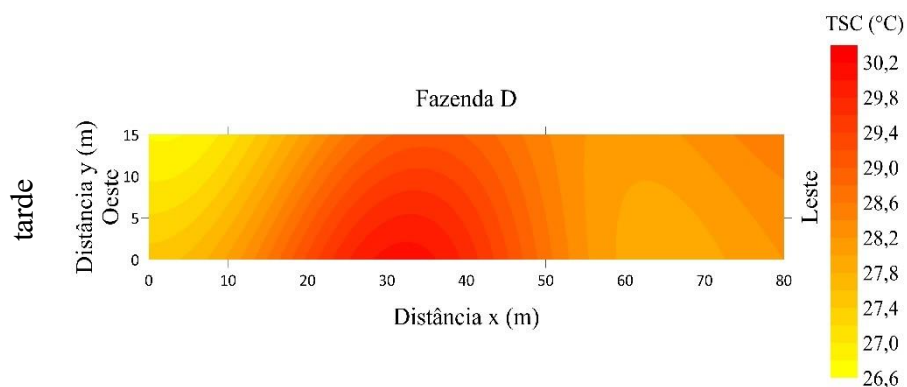
Apesar da elevada amplitude térmica, os valores mais altos da TSC concentraram-se na extremidade do galpão voltada para o sentido Nordeste. Esse resultado sugere que a tela de sombreamento instalada no fechamento frontal da instalação, conhecido como oitão, não proporcionou uma barreira eficiente contra a radiação solar direta incidente no interior do galpão. Contudo, conforme os mapas de Krigagem, no turno da manhã, os valores de TSC permaneceram, em grande parte da área de cama, próximos à temperatura do ar.

No período da tarde, observou-se uma considerável variabilidade térmica, com manutenção de elevada amplitude. Contudo, a porção da cama voltada para o Sudoeste apresentou as menores temperaturas registradas. Essa área corresponde à região mais próxima do único bebedouro do galpão, o qual não possui muretas de separação entre o piso ao seu redor e a cama. Essa característica estrutural favorece o molhamento da cama, o que pode ter contribuído para a redução da temperatura nessa região.

Na Fazenda D, o mapa correspondente ao turno da manhã apresenta um gradiente de temperatura mais homogêneo, caracterizado por uma transição suave de temperaturas mais baixas para mais altas no sentido Oeste-leste, sem grandes variações dentro do gradiente, sugerindo uma dispersão térmica mais uniforme, em comparação ao mapa do turno da tarde. A menor amplitude térmica também foi observada na Fazenda D em relação às demais, tanto entre os pontos amostrados dentro de cada turno quanto na comparação entre os turnos. Esse comportamento reforça a maior uniformidade espacial da variável TSC ao longo da área de cama, indicando uma distribuição térmica mais estável nesta fazenda (Figura 18).

Figura 18 - Distribuição espacial da temperatura da superfície da cama (TSC, °C) no galpão da Fazenda D, avaliada durante os turnos da manhã e da tarde





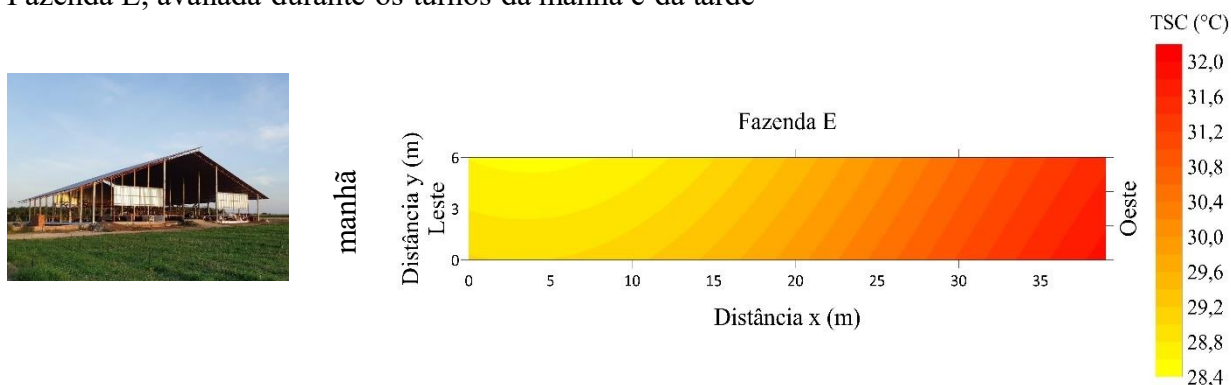
Fonte: elaborada pelo autor.

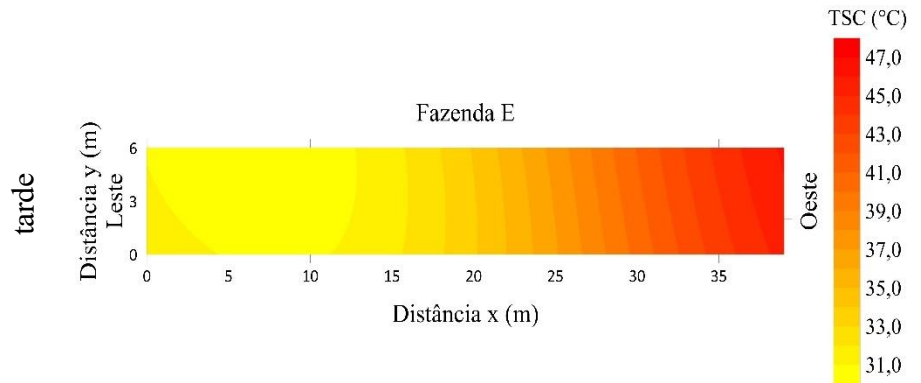
Esses resultados estão alinhados com a compreensão de que a uniformidade espacial contribui para a redução de problemas relacionados à hierarquia social dos lotes, uma vez que a disputa por áreas de cama mais confortáveis tende a ser menos frequente. Essa condição favorece melhorias tanto na produtividade quanto no bem-estar animal.

Na Fazenda E o comportamento espacial foi semelhante entre os turnos, mas a tarde a temperatura foi elevada. Os registros obtidos mostram que a TSC apresentou amplitude de 31,0 °C a 47,0 °C para o turno da tarde, o que reforça a necessidade de planos de manejo para os horários considerados mais críticos para o conforto térmico dos animais.

A distribuição expressa pelos mapas indica que a temperatura da cama tende a aumentar progressivamente na direção Oeste do galpão, independentemente do turno, sem grandes variações dentro do gradiente, sugerindo uma dispersão térmica mais uniforme, semelhante à Fazenda D. Contudo, os mapas sugerem que adaptações estruturais podem ser analisadas para implementação no galpão a fim de minimizar a incidência da radiação solar direta no interior do galpão, uma vez que o pé direito é consideravelmente alto, combinado a inclinação acentuada do telhado na altura da cumeeira (Figura 19).

Figura 19 - Distribuição espacial da temperatura da superfície da cama (TSC, °C) no galpão da Fazenda E, avaliada durante os turnos da manhã e da tarde

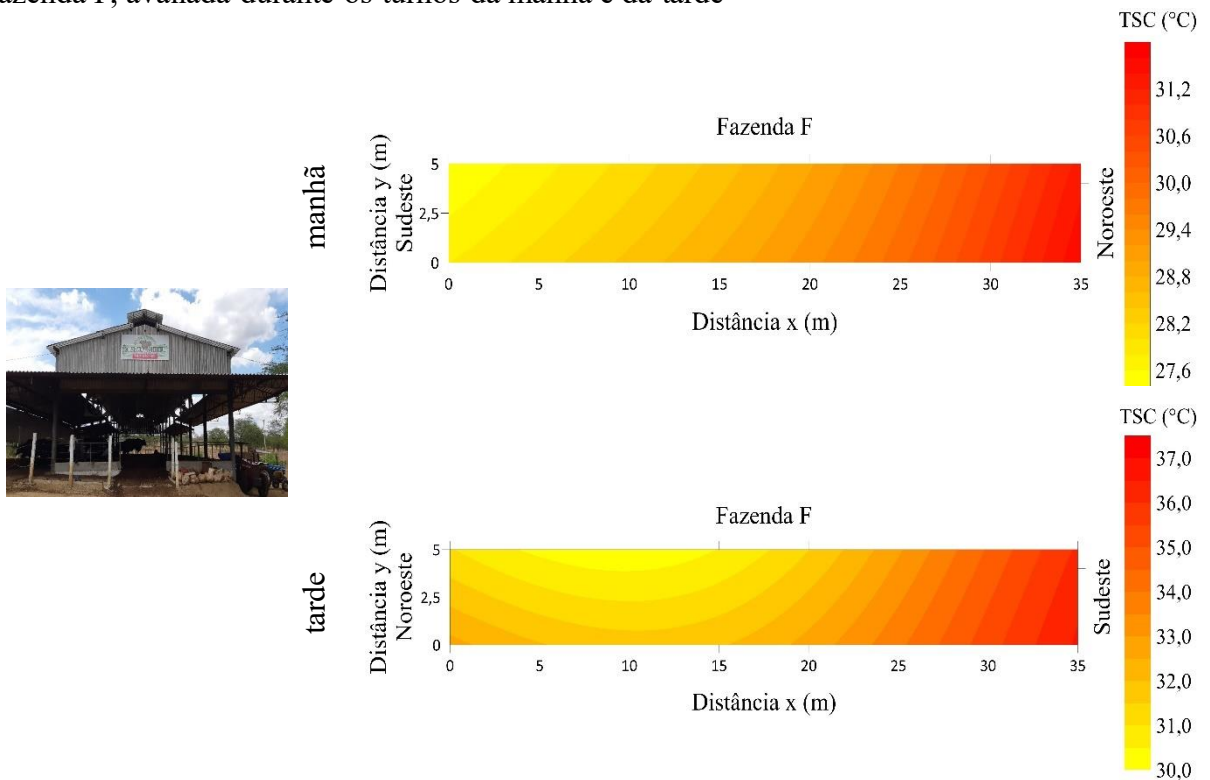




Fonte: elaborada pelo autor.

Os mapas de distribuição espacial da Fazenda F indicam que os valores altos de TSC se concentraram em uma das extremidades do galpão (porção Noroeste), e de forma semelhante ao que ocorreu com a Fazenda E. No entanto, as médias de temperatura foram mais amenas, em ambos os turnos (Figura 20).

Figura 20 - Distribuição espacial da temperatura da superfície da cama (TSC, °C) no galpão da Fazenda F, avaliada durante os turnos da manhã e da tarde



Fonte: elaborada pelo autor.

Os resultados obtidos na Fazenda F foram semelhantes aos descritos por Oliveira *et al.* (2022), em um estudo conduzido em um galpão *compost barn* no estado de Minas Gerais.

Segundo os autores, a incidência de radiação solar direta no interior da instalação esteve associada à sua orientação sudeste-noroeste e à ausência de fechamento na parte superior da face noroeste, estrutura comumente denominada oitão, o que resultou na elevação dos valores médios de temperatura do ar, especialmente no período da tarde, durante o inverno.

Black *et al.* (2013), apontam que a temperatura superficial da cama tende a ter valores mais próximos da temperatura do ar. Essa tendência foi verificada no presente estudo. Os mapas de Krigagem revelaram que, independentemente do fluxo de ar, da quantidade de revolvimento da cama e da densidade de alojamento, há uma tendência de os valores de TSC serem maiores em pontos específicos, como as extremidades e o centro do galpão.

A escassez de informações sobre a caracterização do ambiente térmico em galpões *compost barn*, por meio de geoestatística, no Nordeste brasileiro, ainda persiste até o presente momento desta publicação. Silva *et al.* (2020), ao investigarem a variabilidade espacial de diferentes parâmetros ambientais em condições de confinamento em *compost barn* no semiárido pernambucano, observaram que os modelos gaussiano e esférico apresentaram o melhor ajuste.

Considerando que a velocidade do vento é uma variável de interesse tanto para o conforto térmico dos animais quanto para a secagem da cama, propõe-se discutir fatores estruturais e de manejo que se relacionam com os resultados de variabilidade espacial obtidos em cada fazenda visitada no âmbito deste estudo.

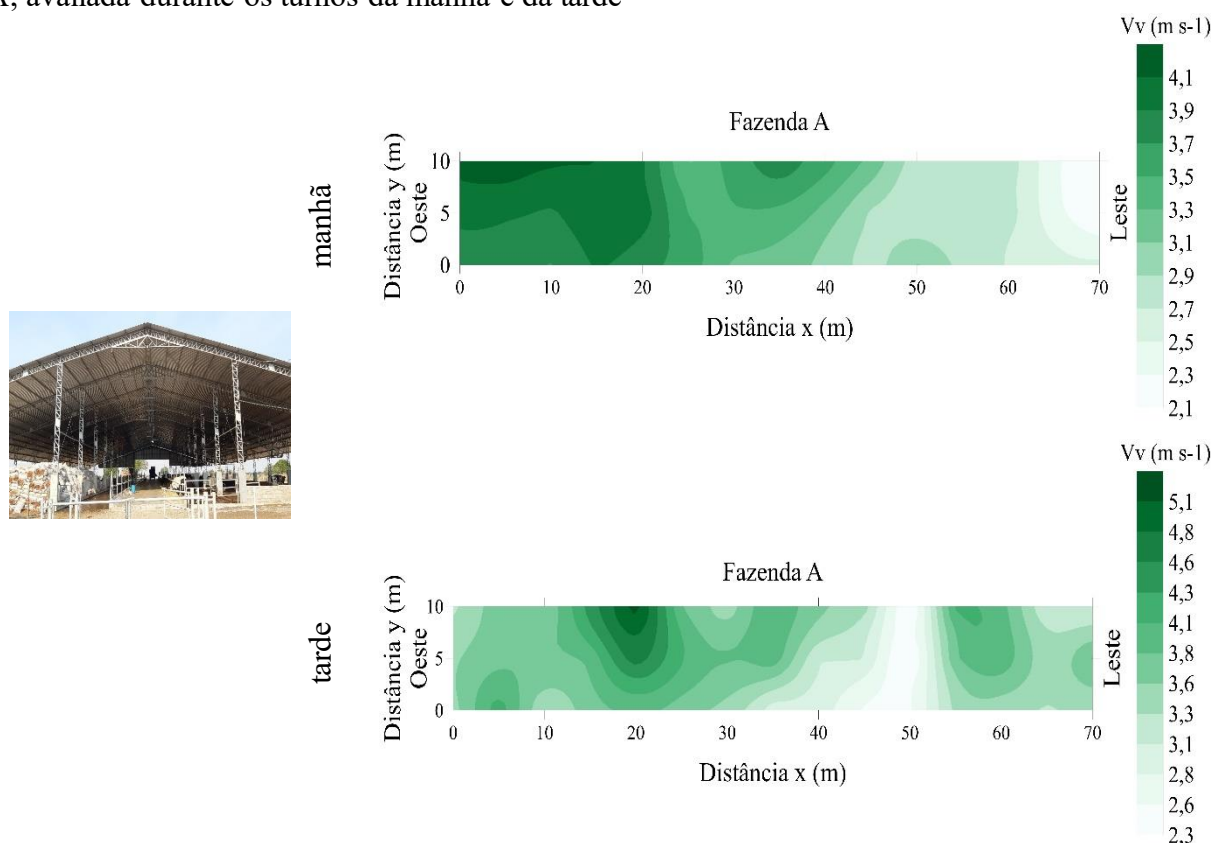
Quanto ao uso de ventiladores, todos os galpões avaliados apresentavam ventilação mecânica, com exceção do galpão da Fazenda B. A disposição dos ventiladores com o fluxo de ar no sentido Leste–Oeste foi observada nas Fazendas A, D e E, enquanto o galpão da Fazenda C estava equipado com ventiladores direcionados para o sentido Sudoeste–Nordeste, e o da Fazenda F, para o sentido Sudeste–Noroeste.

Conforme os intervalos propostos por Cambardella *et al.* (1994), o GDE foi classificado como moderado para a velocidade do vento (entre 25% e 75%) em ambos os turnos nas fazendas B, C e D, diferentemente do estudo desenvolvido por Silva *et al.* (2020), que identificou GDE forte para todas as variáveis analisadas.

Os mapas gerados para a Fazenda A indicaram que, apesar da presença de doze ventiladores, não foi possível alcançar a homogeneidade desejada na distribuição da velocidade do vento, evidenciando um padrão espacial marcadamente heterogêneo. Tal resultado torna-se particularmente preocupante ao considerar que este microclima apresentou as condições climáticas mais desafiadoras entre as propriedades avaliadas, caracterizadas por temperaturas do ar elevadas e baixos valores UR, especialmente no turno da tarde, situação reconhecida como

crítica para o conforto térmico de bovinos leiteiros. Além disso, a análise espacial revelou que, concomitantemente a este cenário de estresse térmico potencial, a ventilação média no interior do galpão manteve-se em níveis reduzidos, o que pode ter comprometido a eficácia da dissipação de calor e, consequentemente, impactado negativamente a termorregulação dos animais (Figura 21).

Figura 21 - Distribuição espacial da velocidade dos ventos (V_v , m s⁻¹) no galpão da Fazenda A, avaliada durante os turnos da manhã e da tarde



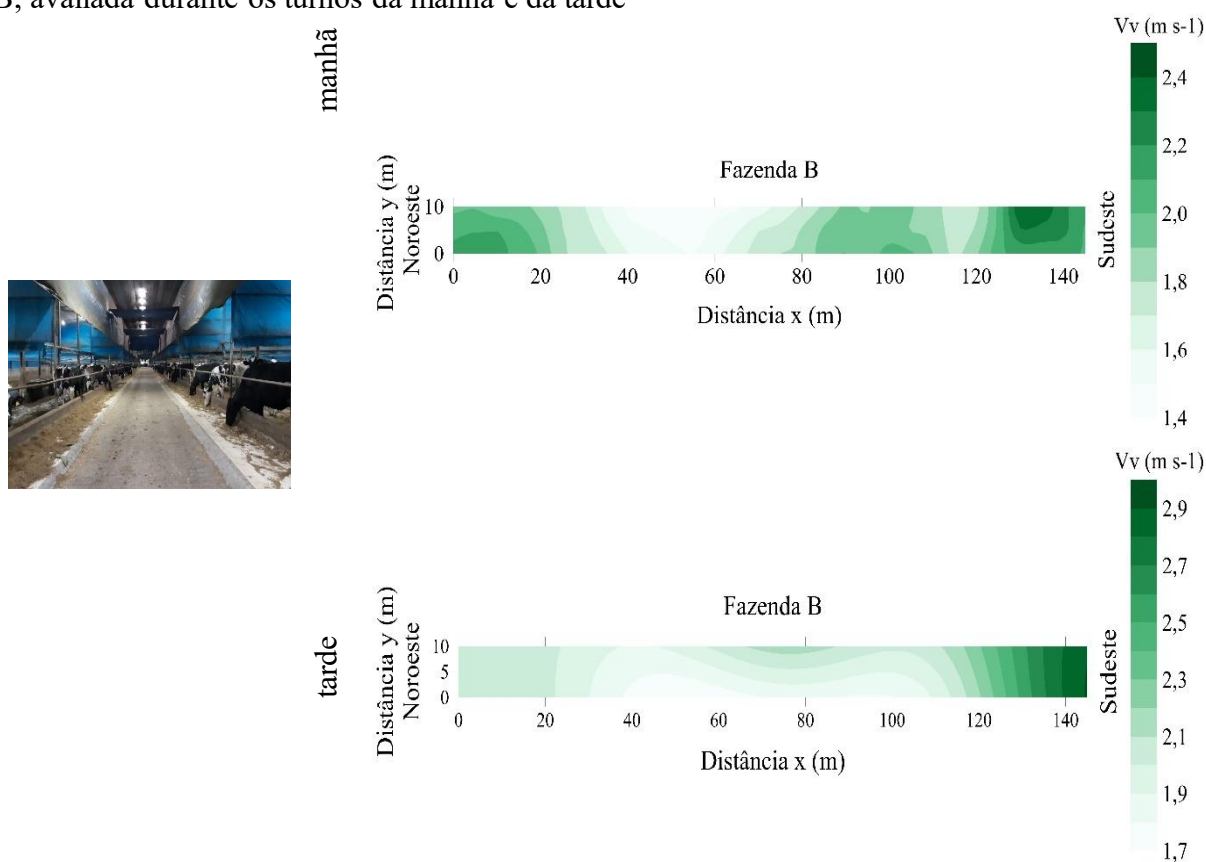
Fonte: elaborada pelo autor.

Contudo, por se tratar de instalações com amplas aberturas com interferência da ventilação natural, análises mais precisas exigem cautela. Conforme destacado por Damasceno, Fagundes e Melo (2020), o fluxo de ar em galpões com ventilação natural apresenta comportamento irregular e multidirecional, além de, em algumas situações, ocorrer com baixa intensidade, o que dificulta sua mensuração com precisão. Ressalta-se ainda que esse tipo de ventilação é predominantemente influenciado pelas diferenças de temperatura entre o ambiente interno e o externo da instalação.

O galpão da Fazenda B apresentou a condição mais crítica entre os avaliados, considerando que, além de se tratar de uma estrutura fechada e com problemas funcionais, os

valores de V_{ar} foram substancialmente baixos em ambos os turnos, agravando-se diante das condições extremas de temperatura do ar características da região. A ausência de placas evaporativas e a vedação inadequada do galpão foram identificadas como fatores centrais para o comprometimento do funcionamento do sistema de ventilação em modo túnel. Além disso, a atuação dos exaustores posicionados no sentido Noroeste demonstrou-se incipiente no processo de sucção do ar percorrido no galpão (Figura 22).

Figura 22 - Distribuição espacial da velocidade dos ventos (V_v , $m\ s^{-1}$) no galpão da Fazenda B, avaliada durante os turnos da manhã e da tarde

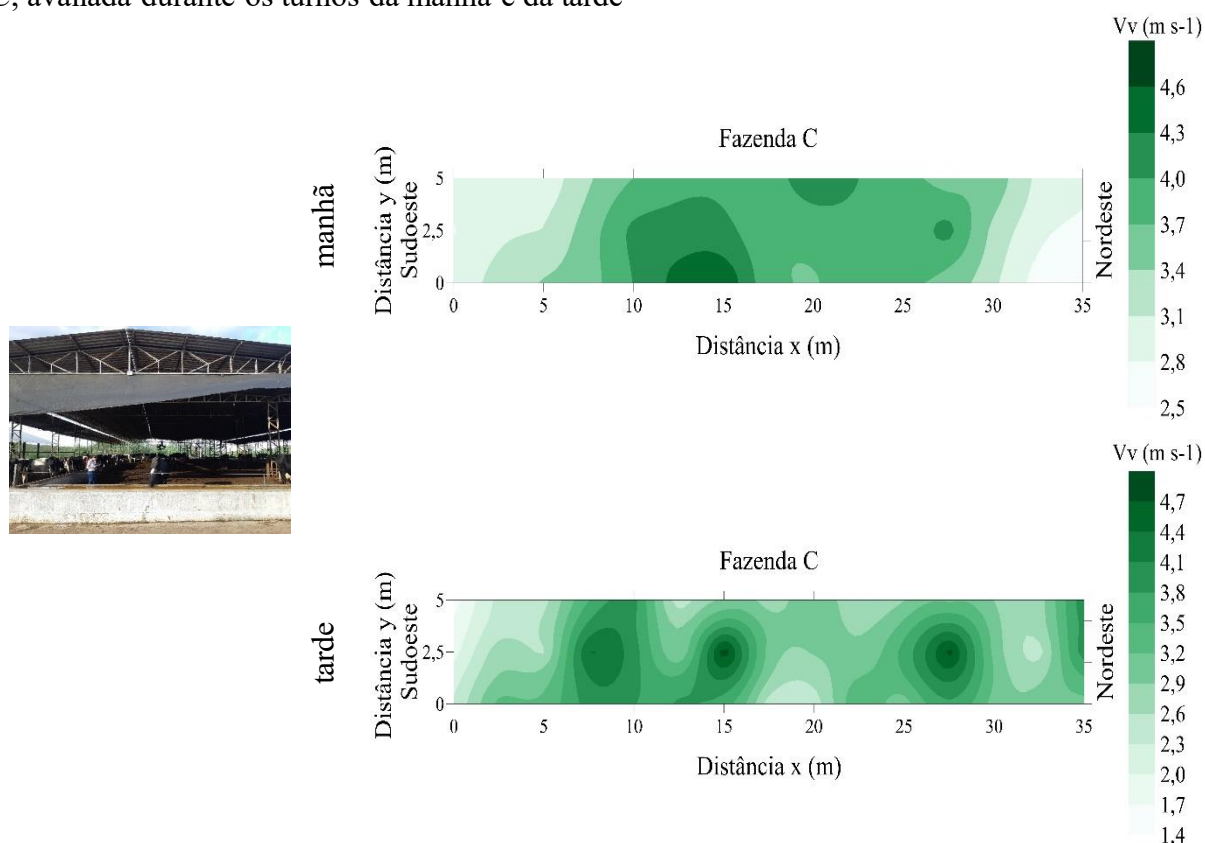


Fonte: elaborada pelo autor.

É possível que o projeto não tenha considerado a limitação imposta pela ventilação natural fraca e pouco eficiente da região. Além disso, o pé-direito pode ter sido dimensionado de forma inadequada, dificultando o fluxo de ar uniforme sobre a área de cama, indicando, sobretudo, que características estruturais não garantiram o aproveitamento dos ventos predominantes. Observa-se ainda que a amplitude dos valores de V_{ar} foi mínima, com variação em torno de $1\ m\ s^{-1}$ na malha amostral representada pelos mapas.

Na Fazenda C, os funcionários eram orientados a acionar os ventiladores apenas no turno da tarde, com a justificativa de que esse seria o período mais quente do dia e de que o galpão já apresentava boa ventilação natural. A economia de energia também foi citada como motivação para essa escolha de manejo. Essa decisão refletiu nos resultados observados no mapa do período da tarde, o qual indicou maior fluxo de ar na região central do galpão. Essa área foi diretamente beneficiada pela atuação dos dois únicos ventiladores instalados especificamente para promover o resfriamento nesse setor (Figura 23). Ainda assim, apesar da quantidade reduzida de ventiladores, observou-se que, em ambos os turnos, os ventos circularam pelo galpão com velocidade razoável, principalmente no turno da manhã, com valores mínimos próximos a $2,5 \text{ m s}^{-1}$.

Figura 23 - Distribuição espacial da velocidade dos ventos (V_v , m s^{-1}) no galpão da Fazenda C, avaliada durante os turnos da manhã e da tarde

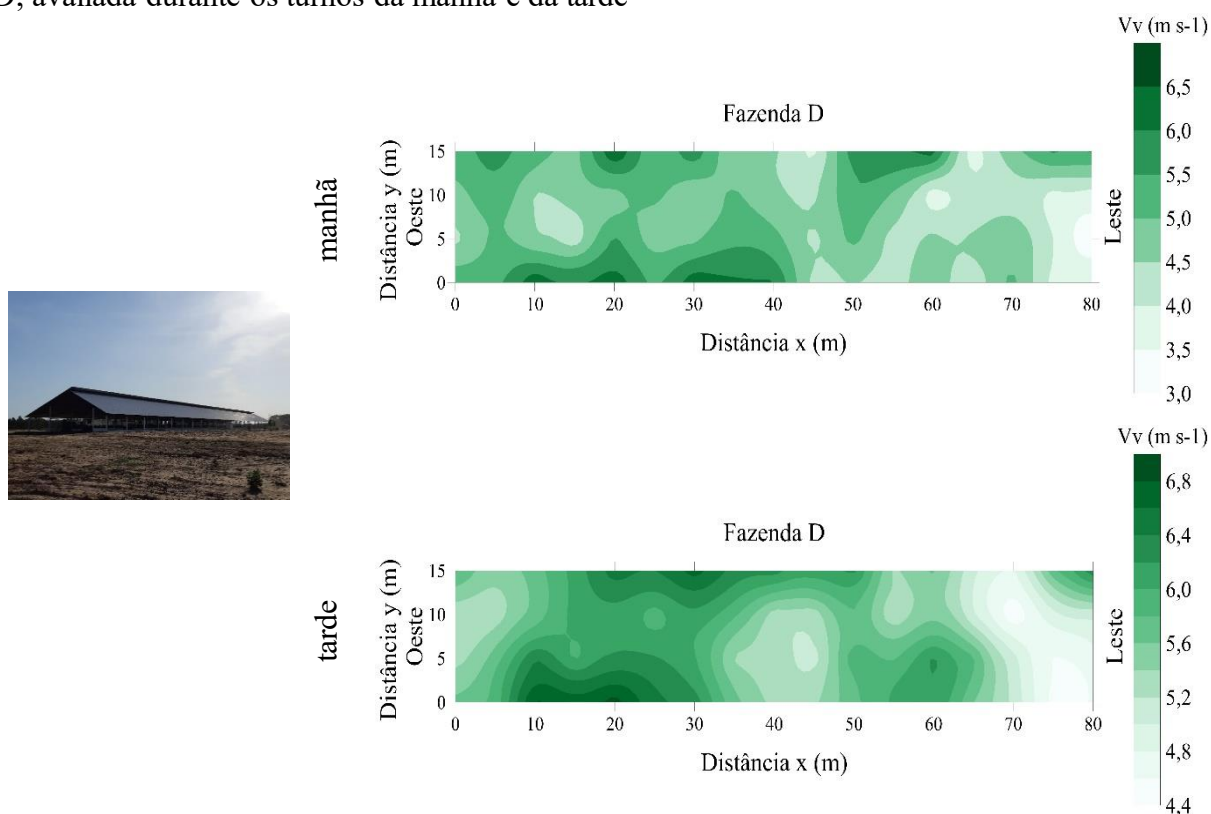


Fonte: elaborada pelo autor.

A área de cama da Fazenda D estava equipada com duas linhas de ventiladores, totalizando 18 unidades, dispostas a cada 14 metros ao longo do comprimento do galpão. Embora os ventiladores estivessem espaçados em uma malha devidamente regular, a disposição em duas linhas pode não ter sido suficiente considerando a ampla largura da área de cama. Essa

configuração pode ter influenciado diretamente o padrão heterogêneo da distribuição espacial da velocidade dos ventos observado no interior da instalação, onde foi registrada ventilação elevada, com média de 5 m s^{-1} . Observou-se que essa intensidade de ventilação não se manteve uniforme em toda a área de cama, apresentando zonas com menor movimentação de ar, o que pode comprometer a eficiência da dissipação de calor pelos animais. Essa heterogeneidade sugere que a inclusão de um corredor adicional de ventiladores poderia favorecer a cobertura total da área e reduzir os gradientes de velocidade do vento, contribuindo para um microclima mais equilibrado. Além disso, o reposicionamento ou ajuste do ângulo de inclinação dos ventiladores existentes poderia complementar essa melhoria, otimizando a circulação do ar (Figura 24).

Figura 24 - Distribuição espacial da velocidade dos ventos (V_v , m s^{-1}) no galpão da Fazenda D, avaliada durante os turnos da manhã e da tarde

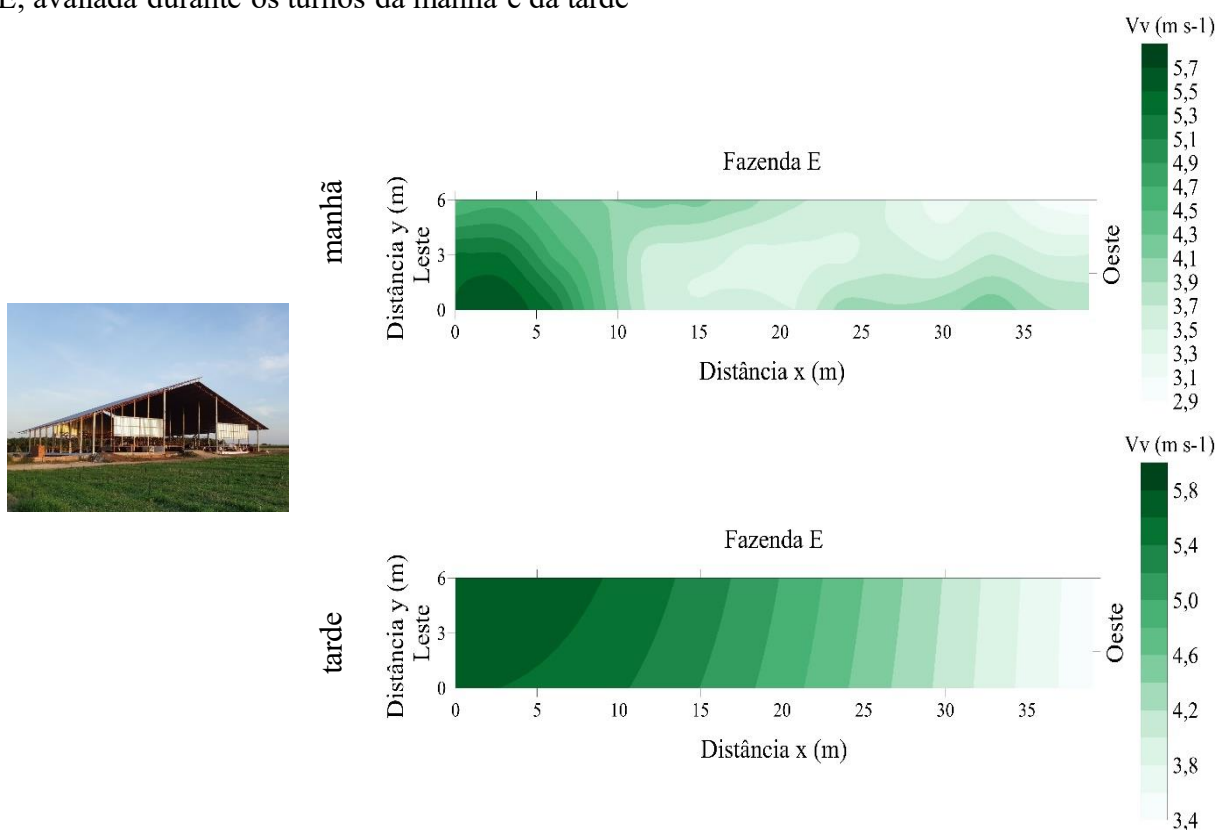


Fonte: elaborada pelo autor.

Os mapas da Fazenda E demonstram que os seis ventiladores instalados na área de cama não foram suficientes para garantir a homogeneidade da velocidade dos ventos. A análise dos dados indica que tanto a quantidade quanto a disposição desses equipamentos podem ter sido inadequadas frente ao projeto da instalação. Observou-se que a ventilação foi ineficiente em manter a uniformidade da velocidade do ar, especialmente durante o turno da tarde. No

entanto, como a densidade de alojamento ($18,7 \text{ m}^2$ por animal) possibilitava uma maior área livre de circulação animal, é razoável discutir que a heterogeneidade da distribuição espacial observada não implicou em problemas de comportamento social significativos. Além disso, registrou-se ventilação elevada, com média de 4 m s^{-1} (Figura 25), valor que, embora positivo para a dissipação de calor, não garantiu sua distribuição uniforme. Essa condição reforça a necessidade de avaliar ajustes na disposição dos ventiladores para otimizar o microclima interno da instalação.

Figura 25 - Distribuição espacial da velocidade dos ventos (Var, m s^{-1}) no galpão da Fazenda E, avaliada durante os turnos da manhã e da tarde



Fonte: elaborada pelo autor.

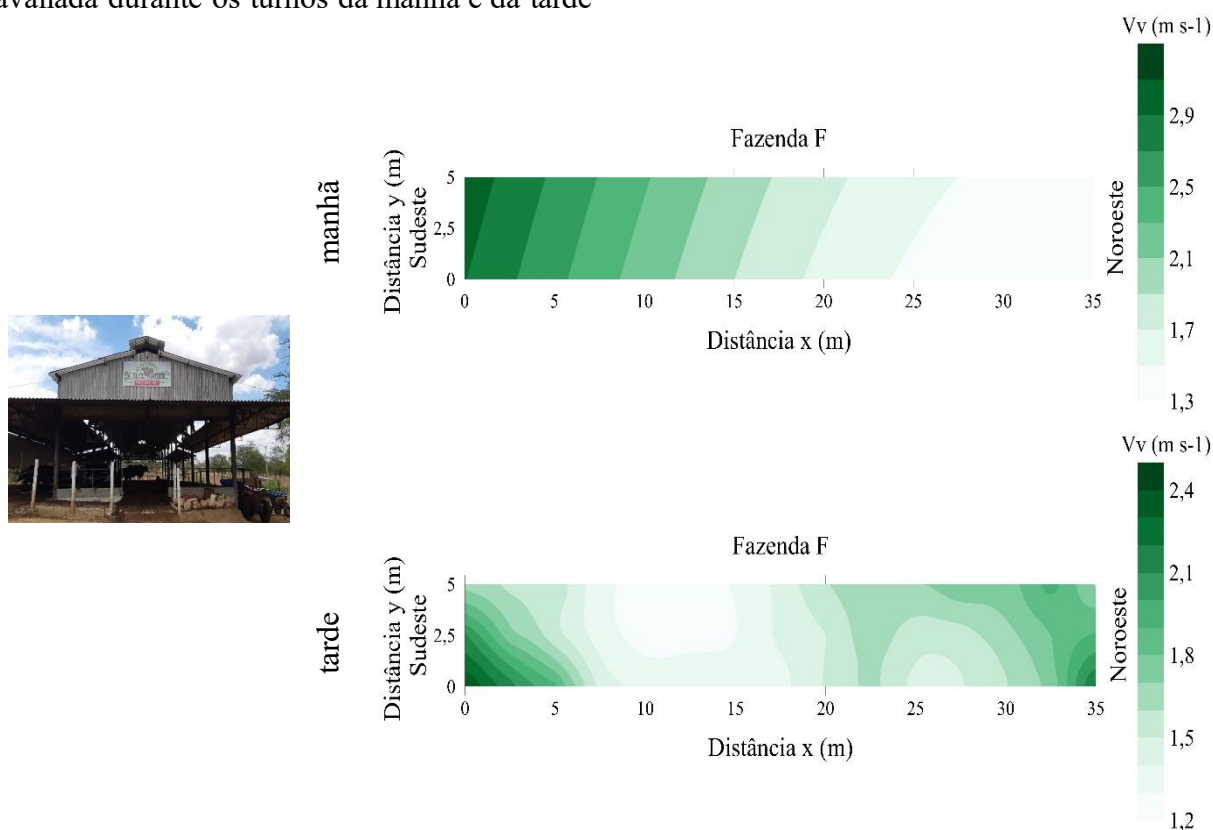
Considerando que o maior adensamento animal na Fazenda F ($8,0 \text{ m}^2$ por animal) exigiria uma ventilação mais eficiente, os mapas revelaram que essa expectativa não se concretizou. A média da velocidade dos ventos no galpão foi baixa, e as vacas permaneceram expostas a temperaturas elevadas, o que pode ter contribuído para o surgimento de comportamentos competitivos, com possíveis impactos negativos no bem-estar animal.

Além disso, é discutível quanto a quantidade de oito ventiladores foi adequada para a ventilação local, e o quanto a orientação da instalação influencia os resultados obtidos. Nessa fazenda, os ventiladores foram direcionados no sentido Sudeste-Noroeste (Figura 26), o que

pode não ter favorecido a distribuição uniforme do fluxo de ar em toda a área de cama. Pilatti et al. (2019) relatam que as vacas tendem a se aglomerar em áreas onde há maior fluxo de ar por ventiladores, quando submetidas a estresse térmico.

Esse comportamento pode levar a disputas por recursos como ventilação, água e espaço, além de favorecer a ocorrência de outros problemas relacionados a comportamentos agonísticos, reforçando a importância de um planejamento criterioso no posicionamento dos equipamentos de climatização.

Figura 26 - Distribuição espacial da velocidade dos ventos (V_v , m s⁻¹) no galpão da Fazenda F, avaliada durante os turnos da manhã e da tarde



Fonte: elaborada pelo autor.

De modo geral, verificou-se que, em todas as instalações avaliadas, a velocidade do vento superou os valores recomendados na literatura (BLACK *et al.*, 2013; JANNI *et al.*, 2007). Diante disso, torna-se necessário conduzir estudos adicionais para identificar quais parâmetros de Var são mais adequados às condições de confinamento sob temperaturas elevadas, especialmente no contexto semiárido.

3.3.4 Condições fisiológicas dos animais

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos para as variáveis fisiológicas.

Tabela 6 - Valores médios das variáveis fisiológicas de vacas leiteiras confinadas em *compost barn* no nordeste brasileiro

Fazenda	Variáveis fisiológicas			
	Frequência respiratória (FR, mov/min)		Temperatura superficial da pelagem (TS, °C)	
	Manhã	Tarde	Manhã	Tarde
A	47	61	29,5	30,4
B	43	60	27,0	30,6
C	39	67	27,4	30,4
D	40	66	27,9	29,1
E	42	67	26,4	30,6
F	52	58	27,2	29,8

Fonte: elaborada pelo autor.

A média das variáveis fisiológicas frequência respiratória (FR) e temperatura superficial da pelagem (TS) foi maior no turno da tarde em todas as fazendas, acompanhando o aumento da temperatura do ar nesse período. Esses resultados corroboram estudos prévios conduzidos em galpões *compost barn* no Brasil, que também observaram um aumento da FR e da TS em resposta a condições ambientais mais adversas, indicando que o ambiente mais quente nesse período impactou negativamente o conforto térmico dos animais (ANDRADE *et al.*, 2022; MOTA; ANDRADE, LEITE, 2020; OLIVEIRA *et al.*, 2022).

Os valores médios elevados de FR no turno da tarde foram observados nas fazendas C, D e E, acarretando maior estresse térmico nesses locais, onde diferentes combinações de Tar, UR e ITU podem ser analisadas para caracterização dos ambientes. Na Fazenda C, as condições ambientais foram $35,6 \pm 0,33^{\circ}\text{C}$ (Tar), $34 \pm 2,1\%$ (UR) e $87 \pm 0,46$ (ITU), enquanto na Fazenda D apresentaram $32,1 \pm 0,98^{\circ}\text{C}$ (Tar), $56 \pm 3,9\%$ (UR) e $86 \pm 1,06$ (ITU) e, na Fazenda E, $33,0 \pm 0,35^{\circ}\text{C}$ (Tar), $50 \pm 2,0\%$ (UR) e $86 \pm 0,55$ (ITU).

Observa-se que as condições mais próximas de valores extremos de umidade relativa do ar, seja em patamares mais baixos (34% na Fazenda C) ou mais elevados (56% na Fazenda D), aparentemente contribuíram para os maiores valores de FR registrados neste estudo. Embora se esperasse que a Fazenda A apresentasse os maiores valores de FR, devido à maior média de Tar ($38,8^{\circ}\text{C}$) e à menor UR (29%), os resultados encontrados nas fazendas C, D e E indicam que a referida variável é influenciada por múltiplos fatores.

A FR é o primeiro sinal fisiológico visível de estresse térmico em bovinos e um importante indicador do estado de saúde (MCDOWELL, 1972). No entanto, sua interpretação deve considerar variáveis adicionais, pois a FR pode ser influenciada por fatores como tamanho corporal, idade, exercício, excitação, temperatura ambiente, prenhez e grau de enchimento do trato digestivo (REECE, 2006).

A análise das respostas termorregulatórias das vacas da raça Guzolando (Fazenda F) apresentou a maior média de FR no turno da manhã, entretanto, esse valor permaneceu dentro de uma faixa fisiológica aceitável, com média abaixo de 60 mov.min⁻¹ (HAHN; PARKHURST; GAUGHAN, 1997; SILANIKOVE, 2000). Além disso, a fazenda apresentou a menor variação de FR entre os turnos em comparação às demais, registrando também o menor valor de FR no período da tarde. Esse padrão sugere uma maior eficiência termorreguladora da raça Guzolando sob as condições ambientais observadas.

No turno da manhã, a FR manteve-se dentro da faixa indicativa de baixo nível de estresse térmico em todas as fazendas avaliadas (entre 40 e 60 mov.min⁻¹), e no turno da tarde, as médias indicaram que as vacas estavam submetidas a condições moderadas de estresse (60 e 80 mov.min⁻¹), exceto para a Fazenda F, conforme a classificação proposta por Silanikove (2000). No entanto, a classificação foi estabelecida para animais mantidos em sistemas a pasto, o que sugere a necessidade de discussões adicionais sobre o impacto do confinamento nas variações de FR observadas neste e em outros estudos.

De todo modo, ao considerarmos que os animais avaliados neste estudo eram mantidos em condições mais controladas e favorecidas, do ponto de vista do confinamento, os resultados da variável FR foi interessante ao indicar boas respostas termorreguladoras diante das diferentes tipologias construtivas em ambiente semiárido.

Por outro lado, as vacas da raça Guzolando na Fazenda F estavam expostas a valores elevados de ITU, especialmente no turno da manhã, mas apresentaram menor FR em comparação às demais fazendas. Os resultados indicam que índices como o ITU podem não refletir completamente as variações na geração interna de calor dos animais (WANG *et al.*, 2018), entretanto, pesquisas prévias apontam uma forte correlação entre o ITU e respostas fisiológicas, como a FR ($R^2 = 0,8852$, $P < 0,05$) e a TS ($R^2 = 0,9678$, $P < 0,05$), além de uma correlação negativa com parâmetros produtivos em vacas leiteiras (AMAMOU *et al.*, 2019; JI *et al.*, 2020).

Nepomuceno *et al.* (2023) avaliaram a frequência respiratória de vacas mestiças (Holandês x Jersey) em diferentes lotes de produção, nos turnos da manhã e da tarde, em um galpão *compost barn* localizado em Minas Gerais, Brasil. Os autores identificaram diferenças

significativas entre os grupos (alta, média e baixa produção) e observaram um aumento da FR no período da tarde. Pela manhã, a FR foi de aproximadamente 60 movimentos por minuto, subindo para 65, 64 e 62 mov.min⁻¹ nas vacas de alta, média e baixa produção, respectivamente. O Índice de Temperatura e Umidade (ITU) registrado foi de 71 pela manhã e 73 à tarde. Os resultados desse estudo contrastam com os do presente trabalho, especialmente no turno da manhã. Mesmo sob condições de clima semiárido e ITU acima de 81 em todas as fazendas avaliadas, as médias de FR ainda foram inferiores, variando entre 39 e 52 mov.min⁻¹.

No presente estudo, os maiores valores de FR observados em vacas da raça Girolando não foram necessariamente registrados em ambientes com maior ITU. Considerando que a maioria das equações de ITU para animais de produção foi desenvolvida com base no conforto térmico de vacas da raça Holandesa, os resultados deste estudo reforçam a necessidade de ajustes ou da formulação de índices mais específicos para raças adaptadas a regiões tropicais, especialmente em condições semiáridas.

Alguns sinais de estresse térmico em vacas lactantes são facilmente perceptíveis, tanto em comportamentos quanto em respostas fisiológicas. Do ponto de vista comportamental, as vacas podem se mostrar mais prostradas ou letárgicas, reduzir a ingestão de alimentos e aumentar a ingestão de água (O'BRIEN *et al.*, 2010; TEMPLE *et al.*, 2015). Fisiologicamente, observam-se alterações como aumento da frequência respiratória e sudorese intensa (ROBERTSHAW, 2006). Em vacas de alta produção leiteira, esses mecanismos são ainda mais acentuados, pois o metabolismo intensificado para suprir a demanda energética da lactação gera calor endógeno adicional, tornando esses animais mais vulneráveis ao impacto das altas temperaturas, e atingindo um estado crítico de estresse térmico em limiares ambientais mais baixos quando comparados a vacas de menor produção (KADZERE *et al.*, 2002); BERNABUCCI *et al.*, 2014).

Neste estudo, a Fazenda E registrou média de FR de 67 mov.min⁻¹ no turno da tarde, um valor elevado e preocupante, especialmente porque as vacas dessa propriedade apresentavam alta produção leiteira (35 L/dia). Pinto *et al.* (2019) demonstraram que, para cada quilograma adicional de leite produzido diariamente, há um aumento médio de $0,23 \pm 0,19$ mov.min⁻¹ na frequência respiratória. Assim, estratégias de mitigação do estresse térmico, como resfriamento evaporativo, ventilação adequada e ajustes na nutrição, são essenciais para vacas de alta produção, uma vez que esses animais apresentam maior risco de redução no desempenho produtivo e reprodutivo em condições ambientais adversas (PEREIRA, 2005).

Embora a Fazenda E tenha adotado um sistema de resfriamento automático, por meio de sensores de aproximação em toda a linha de cocho, o conforto térmico dos animais não

foi garantido conforme os resultados da FR observados.

Estudos conduzidos em outras regiões do país relataram valores de FR no turno da tarde distintos dos observados neste estudo, além de terem sido obtidos em condições de ITU diferentes. Vacas leiteiras alojadas em *compost barn* na região Sul de Minas Gerais, situado em um clima subtropical úmido com inverno seco e verão quente, apresentaram FR no verão variando de 45,6 a 49,5 mov.min⁻¹, de manhã e tarde, respectivamente, e no inverno 41,5 a 45,07 mov.min⁻¹, de manhã e tarde, respectivamente (MOTA; ANDRADE; LEITE, 2020). Em outro estudo, Radavelli *et al.* (2020), avaliando 1.020 vacas leiteiras alojadas em galpões *compost barn* em Santa Catarina, verificaram médias de FR entre 40 e 80 mov.min⁻¹ sob condições de ITU de $76,5 \pm 3,0$.

Peixoto *et al.* (2019) relataram valores mais elevados de FR e TS em um estudo realizado em galpão *compost barn* no Ceará, durante o período seco do ano. Apesar das semelhanças nas variáveis ambientais observadas no turno da tarde, com temperatura média do ar de 35,0 °C e umidade relativa de 33%, os autores registraram médias de FR de 81 mov.min⁻¹ e TS de 37,1 °C. Contudo, diferentemente do presente estudo, os autores utilizaram uma equação baseada em registros de termogramas do úbere para calcular a TS, o que pode influenciar os valores observados. Assim, as diferenças encontradas entre os estudos podem estar associadas à metodologia empregada.

Em estudos primários envolvendo a termorregulação de aves e mamíferos, pesquisadores passaram a adotar o termo “janela térmica”, a qual se refere a áreas do corpo responsáveis pela troca de calor, de forma que os animais podem alterar a perda de calor canalizando e controlando o fluxo sanguíneo (via vasoconstrição e vasodilatação) em áreas específicas do corpo (ŠUMBERA *et al.*, 2007).

Yang *et al.* (2018) observaram que a temperatura da superfície do úbere após a ordenha é significativamente influenciada pela produção de leite, indicando que a captura de termogramas antes da ordenha pode reduzir erros na análise térmica. Dessa forma, o presente estudo analisou termogramas de áreas específicas da superfície corporal das vacas, excluindo o úbere, pois a variação na produção de leite entre fazendas, aliada aos diferentes horários de ordenha, tornaria inviável a padronização dessa medição e poderia comprometer a precisão dos resultados.

A Fazenda A, que apresentou a menor umidade relativa do ar, teve um aumento de apenas 0,9°C na TS entre os turnos, apesar da temperatura do ar extremamente alta. Isso sugere que a baixa umidade favoreceu a dissipação de calor por evaporação, evitando um acúmulo maior de calor na superfície da pelagem. Além disso, a ventilação artificial adotada pode ter

favorecido o fluxo de ar dentro do galpão, auxiliando na dissipação de calor e contribuindo, possivelmente, para os menores valores de FR observados.

As vacas confinadas nas Fazendas B e C apresentaram médias de TS muito próximas nos dois turnos, apesar de estarem confinadas em instalações com tipologias construtivas distintas, sendo a primeira em galpão fechado e a segunda em galpão aberto. A proximidade geográfica entre ambas as fazendas possivelmente contribuiu para a similaridade nas condições ambientais, o que pode ter influenciado de maneira semelhante os mecanismos fisiológicos de dissipação de calor dos animais. No entanto, embora essa hipótese seja plausível com base nas variáveis ambientais, é importante destacar a necessidade de análises mais detalhadas a partir da ficha zootécnica dos rebanhos avaliados.

A Fazenda D apresentou uma relação equilibrada entre temperatura e umidade relativa do ar, com menor amplitude térmica comparada às outras fazendas, especialmente no turno da tarde, na qual registrou a menor média de TS (29,1 °C) e aumento de apenas 1,2 °C na TS, indicando que as condições ambientais eram menos desafiadoras. No entanto, os animais apresentaram FR elevada (66 mov.min⁻¹), sugerindo um quadro de estresse térmico moderado.

Na Fazenda E, apesar das temperaturas do ar mais amenas, a umidade relativa elevada (67%), especialmente no turno da manhã, pode ter dificultado a dissipação de calor dos animais ao longo do dia. Embora essa fazenda tenha registrado, em relação às demais, alguns dos menores valores médios das variáveis fisiológicas no turno da manhã, foi a que apresentou a maior variação na TS, com um aumento de 4,2 °C. Consequentemente, no turno da tarde, a Fazenda E figurou entre as propriedades com os maiores valores de FR (67 mov.min⁻¹) e TS (30,6 °C). Esses resultados corroboram a literatura ao indicar que animais mantidos em ambientes com altas temperaturas e umidade relativa do ar, especialmente quando submetidos a uma considerável amplitude térmica ao longo do dia, tendem a utilizar os recursos de perdas de calor por mecanismos evaporativos (PEREIRA, 2005).

Quanto a Fazenda F, assim como nas demais fazendas, os animais mantiveram a temperatura superficial da pelagem em escalas aceitáveis às custas de altas taxas de frequência respiratória. Contudo, o rebanho Guzolando apresentou a menor amplitude para FR (6 mov.min⁻¹), sugerindo que essa raça possui mecanismos adaptativos favoráveis a climas quentes, devido à herança zebuína do Guzerá (CLEMENTE; RAGAZZI, 2024). A Figura 27 ilustra os termogramas obtidos, destacando, como exemplo, a temperatura superficial da pelagem em vacas das raças Girolando e Guzolando.

Figura 27 - Termogramas obtidos em vacas leiteiras das raças Girolando (1) e Guzolando (2), confinadas em galpões *compost barn* no estado do Ceará, Brasil



Fonte: elaborada pelo autor.

3.3.5 Considerações sobre as entrevistas

Conforme relatado pelos gerentes durante as entrevistas, a adoção do sistema *compost barn* nas propriedades analisadas foi impulsionada com objetivo de promover maior conforto animal, resultando em melhorias nos índices reprodutivos e na produção de leite. Embora, todos os entrevistados tenham relatado que os custos de implantação saíram acima do valor esperado, atribuídos às oscilações de preços da construção civil, todos os produtores demonstraram satisfação com o sistema, destacando suas vantagens e apontando desafios específicos.

Na fazenda A, a escolha pelo *compost barn* teve como principal objetivo potencializar a genética do rebanho. No entanto, por se tratar de um projeto recente, o produtor avaliou que os resultados ainda são preliminares, sendo necessário mais tempo para obter conclusões precisas. Já na fazenda B, os gestores relataram problemas com a qualidade e a disponibilidade de água para as placas evaporativas do galpão fechado, considerando ainda possíveis adaptações estruturais, como a transição para um sistema *free-stall*. Na fazenda C, o produtor, embora satisfeito, manteve as vacas de maior produção no sistema *free-stall* e apontou o alto custo do revolvimento da cama como uma preocupação.

Na fazenda D, a decisão de adotar o *compost barn* foi embasada em visitas a diversas propriedades, principalmente em Minas Gerais, cujos resultados promissores motivaram a implementação do sistema. Da mesma forma, o proprietário da fazenda E realizou visitas a fazendas no Ceará, utilizando sua experiência em automação e eletrônica para desenvolver uma instalação inovadora para a região. Nessa fazenda, o produtor elaborou um sistema de reconhecimento das vacas na linha de cocho, por meio de sensores de aproximação, e com isso, programou a comunicação dos sensores com um sistema de arrefecimento no dorso das vacas. Por fim, o gestor da fazenda F destacou o interesse em avaliar o desempenho genético das vacas Gurolando no sistema, reforçando o trabalho da empresa voltado à genética.

Embora cada propriedade tenha enfrentado desafios específicos, os relatos indicam que o sistema *compost barn* contribuiu para a melhoria do conforto animal e, consequentemente, dos resultados produtivos.

A satisfação dos produtores com as instalações *compost barn* já foi destacada na literatura científica. Oliveira *et al.* (2019b), em um estudo envolvendo 20 galpões em 14 municípios de Minas Gerais, Brasil, todos os entrevistados relataram melhorias na saúde do rebanho, maior conforto, melhor higiene e um aumento significativo na produção de leite. De modo semelhante, estudos pioneiros também destacaram a satisfação dos produtores e o bom desempenho dos rebanhos nesse sistema (BARBERG *et al.*, 2007; BLACK *et al.*, 2013; LESO *et al.*, 2013).

3.4 CONCLUSÃO

O presente estudo indicou que as regiões cearenses exploradas apresentam potencial para a produção de leite em sistema *compost barn*, diante da diversidade de modelos estruturais dos galpões observados e da variação no tamanho dos rebanhos. Observou-se tanto fazendas com rebanhos de tamanho médio reduzido, com cerca de 63 animais alojados, quanto galpões maiores, que acomodavam aproximadamente 500 animais, evidenciando a adaptabilidade do sistema a diferentes escalas de produção.

O uso da geoestatística na análise da distribuição espacial de variáveis de interesse no galpão se mostrou como uma ferramenta útil na caracterização do ambiente térmico dos animais, facilitando a compreensão dos resultados obtidos.

Na caracterização microclimática, a maioria das fazendas apresentou baixos níveis de umidade relativa do ar, o que pode comprometer a saúde dos animais, causando irritações cutâneas e respiratórias, agravadas pelas altas temperaturas registradas. Recomenda-se a investigação desses fatores também no período chuvoso, visto que este estudo analisou apenas o período seco.

De forma inédita, este estudo relata o uso de galpão *compost barn* fechado em uma região semiárida do Brasil. Do mesmo modo, são mencionados grupos genéticos distintos dos padrões comumente adotados por produtores brasileiros que utilizam o sistema *compost barn*, como vacas Guzolando e Girolando. Reforça-se ainda a necessidade de estudos sobre o estresse térmico desses animais confinados em *compost barn*, em diferentes períodos climáticos no semiárido brasileiro.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estado do Ceará está passando por uma transformação significativa no confinamento de bovinos leiteiros. Os produtores têm buscado cada vez mais assistência técnica na construção das instalações, como evidenciado neste estudo, em que todos os galpões foram construídos com suporte profissional. No entanto, os produtores relataram a necessidade de contratar assistência técnica de fora do estado, sobretudo de Minas Gerais, devido à escassez de especialistas locais. Além disso, após o período experimental, novos galpões foram construídos no estado, reforçando o crescente interesse dos produtores cearenses no confinamento em *compost barn*.

Dentre os desafios críticos apontados pelos produtores, destaca-se a dificuldade de acesso a informações adequadas às condições edafoclimáticas locais para o planejamento e construção de galpões. Este estudo indica que, no Ceará, a escassez de propriedades vizinhas como referência leva muitos produtores a não seguir um padrão construtivo. Assim, as decisões de construção costumam se basear em visitas a outras propriedades fora do estado, e, quando buscam assistência técnica, recorrem, em sua maioria, a empresas privadas.

Quanto à caracterização das fazendas avaliadas, embora as coletas tenham sido realizadas, preferencialmente, em galpões com vacas de menor produção, os dados obtidos são valiosos diante da escassez de informações sobre o uso de *compost barn* no Nordeste. Na Fazenda D, por exemplo, apesar da média diária de produção ser 31,0 litros, apenas o galpão com vacas de menor produção (16,0 litros) foi avaliado. Essa limitação é comum em pesquisas de campo, já que a decisão sobre as áreas avaliadas depende dos produtores, os quais costumam alegar que a presença dos pesquisadores pode interferir na rotina do lote.

Por fim, a seleção inicial das fazendas revelou outros usos do *compost barn* no estado, não abordados neste estudo por focar em vacas em lactação. Observou-se, por exemplo, a construção de galpões para novilhas e vacas em pré-parto, além da adaptação do sistema para o alojamento de bezerros, especialmente na região de Tabuleiro do Norte.

REFERÊNCIAS

- AGROLINK. **Guzolando reúne vantagens das raças Guzerá e Holandesa**. Fortaleza, 2010. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/noticias/guzolando-reune-vantagens-das-racas-guzera-e-holandesa_119569.html. Acesso em: 4 nov. 2023.
- ALBINO, R. L. *et al.* Comparison of bacterial populations in bedding material, on teat ends, and in milk of cows housed in compost bedded pack barns. **Animal Production Science**, Melbourne, v. 58, n. 9, p. 1686–1691, 2017.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ALVES, M. A. **Respostas termorreguladoras e ambiente térmico de bovinos leiteiros em regiões de clima tropical**. 2014. 77f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.
- AMAMOU, H. *et al.* Thermotolerance indicators related to production and physiological responses to heat stress of holstein cows. **Journal of thermal biology**, Amsterdam, v. 82, p. 90-98, 2019.
- ANDRADE, R. R. **Ambiência e bem-estar animal na produção intensiva de leite em sistemas Compost Barn fechados para a tipologia construtiva e clima do Brasil**. 2021. 158f. Tese (Doutorado em Engenharia agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021.
- ANDRADE, R. R. *et al.* Spatial analysis of microclimatic variables in compost-bedded pack barn with evaporative tunnel cooling. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 94, n. 3, p. e20210226, 2022a.
- ANDRADE, R. R. *et al.* Spatial distribution of bed variables, animal welfare indicators, and milk production in a closed compost-bedded pack barn with a negative tunnel ventilation system. **Journal of Thermal Biology**, Amsterdam, v. 105, p. 103111, 2022b.
- AZEVEDO, D. M. M. R.; ALVES, A. A. **Bioclimatologia aplicada à produção de bovinos leiteiros nos trópicos**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2009. 83 p.
- BAÊTA, F. C.; SOUZA, C. F. **Ambiência em edificações rurais: conforto animal**. Viçosa: UFV, 2010. 269 p.
- BARBERG, A. E. *et al.* Performance and Welfare of Dairy Cows in an Alternative Housing System in Minnesota. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 90, n. 3, p. 1575–1583, 2007.
- BERMAN, A. *et al.* A comparison of THI indices leads to a sensible heat-based heat stress index for shaded cattle that aligns temperature and humidity stress. **International Journal of Biometeorology**, Berlim, v. 60, n. 10, p. 1453–1462, 2016.
- BERNABUCCI, U. *et al.* The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 97, n. 1, p. 471–486, 2014.

BEWLEY, J. M.; ROBERTSON, L. M.; ECKELKAMP, E. A. A 100-Year Review: Lactating dairy cattle housing management. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 100, n. 12, p. 10418–10431, 2017.

BEWLEY, J.; TARABA, J. **Understanding Bedding materials for Compost Bedded Pack Barn**. Lexington, 2009. Disponível em: https://static1.squarespace.com/static/5a313bdc8c56a875ad7a89be/t/5a5e451671c10b3c9174ba0f/1516127510389/understanding_bedding_materials_for_compost_bedded_pack_barns.pdf. Acesso em: 13 jan. 2022

BEWLEY, J. *et al.* **Compost Bedded Pack Barn Design: Features and Management Considerations**. Lexington, 2012. Disponível em: <https://publications.ca.uky.edu/sites/publications.ca.uky.edu/files/ID206.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2022.

BLACK, R. A. *et al.* Compost bedded pack dairy barn management, performance, and producer satisfaction. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 96, n. 12, p. 8060–8074, 2013.

BLACK, R. A. *et al.* The relationship between compost bedded pack performance, management, and bacterial counts. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 97, n. 5, p. 2669–2679, 2014.

CAMARGO, E. C. G. Geoestatística: fundamentos e aplicações. *In*: CAMARA, G.; MEDEIROS, J. S. **Geoprocessamento em projetos ambientais**. São José Dos Campos: Inpe, 1998. p. 5-36.

CAMBARDELLA, C.A. *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1501–1511, 1994.

CHANGIRATH, S.; HALBACH, T. R.; DORFF, R. **Media and media mix evaluation for dairy barn compost bedding systems**. St. Paul, 2011. Disponível em: https://auri.org/wp-content/uploads/2011/08/Compost_Bedding_Report.pdf. Acesso em: 13 jan. 2022.

CLEMENTE, N. L. S.; RAGAZZI, F. G. Efeitos do estresse térmico na proporção sexual da cria de gado leiteiro da raça Guzolando criado na região Noroeste Fluminense. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, São José dos Pinhais, v. 7, n. 1, p. 612–620, 2024.

DAMASCENO, F. A. Processo de compostagem. *In*: DAMASCENO, F. A. **Compost barn: como alternativa para a pecuária leiteira**. Divinópolis: Adelante, 2020a. p. 125-147.

DAMASCENO, F. A. Sistemas de confinamento para bovinos leiteiros. *In*: DAMASCENO, F. A. **Compost barn: como alternativa para a pecuária leiteira**. Divinópolis: Adelante, 2020b. p. 19-31.

DAMASCENO, F. A.; OLIVEIRA, V. C. Instalações de Compost Barn no estado de Minas Gerais. **Balde Branco**, São Paulo, p. 56 - 61, 2019.

DAMASCENO, F. A. *et al.* Determination of Thermal, Chemical and Physical Properties of Bedding Materials for Compost Dairy Barns. **Animals**, Basel, v. 12, n. 18, p. 2450, 2022.

DIAS BATISTA, P. H. *et al.* Thermal images to predict the thermal comfort index for Girolando heifers in the Brazilian semiarid region. **Livestock Science**, Amsterdam, v. 251, p. 104667, 2021.

ECKELKAMP, E. A. *et al.* Sand bedded freestall and compost bedded pack effects on cow hygiene, locomotion, and mastitis indicators. **Livestock Science**, Amsterdam, v. 190, p. 48–57, 2016a.

EMBRAPA. **ANUÁRIO Leite 2023**: leite baixo carbono. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2023. 118 p.

EMBRAPA. **ANUÁRIO Leite 2024**: avaliação genética multirracial. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2024. 137 p.

FÁVERO, S. *et al.* Factors associated with mastitis epidemiologic indexes, animal hygiene, and bulk milk bacterial concentrations in dairy herds housed on compost bedding. **Livestock Science**, Amsterdam, v. 181, p. 220–230, 2015.

GALAMA, P. J. **On farm development of bedded pack dairy barns in the Netherlands**. Report 707. Lelystad: Wageningen UR Livestock Research, 2014. 22 p.

GALAMA, P. J. *et al.* 2014. **Vrijloopstallen voor melkvee in de praktijk**. Lelystad: Wageningen UR Livestock Research, 2014. 85 p.

GARCIA, P. R. **Galpão freestall com sistema de resfriamento evaporativo e ventilação cruzada: desempenho térmico, zootécnico e o nível de bem-estar animal**. 2017. 149f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo/ Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2017.

HABEEB, A. A. *et al.* The detrimental impact of high environmental temperature on physiological response, growth, milk production, and reproductive efficiency of ruminants. **Tropical Animal Health and Production**, Dordrecht, v. 55, n. 6, p. 388, 2023.

HAHN, G. L.; PARKHURST, A. M.; GAUGHAN, J. B. Cattle respiration rate as a function of ambient temperature. **ASAE Paper NMC97**, St. Joseph, v. 121, 1997.

HARRIS-BRIDGE, G. *et al.* The use of infrared thermography for detecting digital dermatitis in dairy cattle: What is the best measure of temperature and foot location to use? **The Veterinary Journal**, Londres, v. 237, p. 26–33, 2018.

HUBER, J. T. Alimentação de vacas de alta produção sob condições de estresse térmico. *In*: **Bovinocultura leiteira**. Piracicaba: FEALQ, 1990. p. 33-48.

INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais climatológicas do Brasil**. Brasília, 2022. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em: 22 jan. 2023.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa da**

Pecuária Municipal: produção da pecuária municipal 2022. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ppm/quadros/brasil/2023>. Acesso em: 07 nov. 2024.

JANNI, K. A. *et al.* Compost dairy barn layout and management recommendations. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 23, n. 1, p. 97-102, 2007.

Jl, B. *et al.* Modelling of heat stress in a robotic dairy farm. Part 1: Thermal comfort indices as the indicators of production loss. **Biosystems Engineering**, Londres, v. 199, p. 27-42, 2020.

KADZERE, C. T. *et al.* Heat stress in lactating dairy cows: a review. **Livestock Production Science**, Amsterdam, v. 77, n. 1, p. 59–91, 2002.

KAPPES, R. *et al.* Cow's functional traits and physiological status and their relation with milk yield and milk quality in a compost bedded pack barn system. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 49, p. e20190213, 2020.

LESO, L. *et al.* A survey on Italian compost dairy barns. **Journal of Agricultural Engineering**, Pavia, p. 203-207, 2013.

LESO, L. *et al.* Invited review: Compost-bedded pack barns for dairy cows. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 103, n. 2, p. 1072–1099, 2020.

LLONCH, L. *et al.* Effect of forest biomass as bedding material on compost-bedded pack performance, microbial content, and behavior of nonlactating dairy cows. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 103, n. 11, p. 10676–10688, 2020.

MALÁ, G.; NOVÁK, P. 2021: Housing for unweaned dairy calves. *In*: SZENCI, O.; MEE, J. F.; BLEUL, U.; TAVERNE, M. A. M. **Bovine Prenatal, Perinatal and Neonatal Medicine**. Budapest: Hungarian Association for Buiatrics, 2021, p. 309-341.

MATHERON, G. **Treaty of applied geostatistics**. Paris: Editions Technip, 1962. 333 p.

MCDOWELL, R. E. **Improvement of livestock production in warm climates**. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1972. 711 p.

MOTA, V. C.; ANDRADE, E. T. DE; LEITE, D. F. Bed temperature in compost barns turned with rotary hoe and offset disc harrow. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 39, p. 280–287, 2019.

MÜLLER, P. B. **Bioclimatologia aplicada aos animais domésticos**. 2. ed. Porto Alegre: Sulina, 1982. 158 p.

NÃÄS, I. A. **Princípios de conforto térmico na produção animal**. São Paulo: Ícone, 1989. 183 p.

NOGARA, K. *et al.* Characterization and relationship between bulk tank milk composition and compostbedded variables from dairy barns in Rio Grande do Sul state, Brazil. **Turkish Journal of Veterinary & Animal Sciences**, Ankara, v. 45, n. 5, p. 890–900, 2021.

NORTHEAST REGIONAL AGRICULTURAL ENGINEERING SERVICE. **On-Farm Composting Handbook**. Ithaca: Waste Management Publications, 1992. (NRAES-54).

O'BRIEN, M. D. *et al.* Metabolic adaptations to heat stress in growing cattle. **Domestic Animal Endocrinology**, Nova Iorque, v. 38, n. 2, p. 86–94, 2010.

OLIVEIRA, C. E. A. *et al.* Assessment of spatial variability of bedding variables in compost bedded pack barns with climate control system. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 93, p. e20200384, 2021.

OLIVEIRA, C. E. A. *et al.* Geostatistics applied to evaluation of thermal conditions and noise in compost dairy barns with different ventilation systems. **Agronomy Research**, Tartu, v. 17, n. 3, p. 783-796, 2019a.

OLIVEIRA, V. C. *et al.* Compost-bedded pack barns in the state of Minas Gerais: architectural and technological characterization. **Agronomy Research**, Tartu, v. 17, n. 5, p. 2016-2028, 2019b.

PEREIRA, J. C. C. **Fundamentos de bioclimatologia aplicados à produção animal**. Belo Horizonte: FEPMVZ, 2005. 195 p.

PEIXOTO, M. S. M. **Termorregulação de bovinos leiteiros confinados em instalação compost barn em Região Semiárida**. 2017. 78f. Dissertação (Mestrado em Engenharia agrícola) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

PEIXOTO, M. S. M. *et al.* Thermoregulatory behavior of dairy cows submitted to bedding temperature variations in Compost barn systems. **Biological Rhythm Research**, Abingdon, v. 52, n. 7, p. 1120–1129, 2019.

PEIXOTO, M. S. M.; BARBOSA FILHO, J. A. D.; DAMASCENO, F. A. **Desenvolvimento de sensor de baixo custo para monitorar cama em compost barn**. Piracicaba, 2022. Disponível em: <https://www.milkpoint.com.br/artigos/producao-de-leite/sensores-para-uso-em-cama-de-compost-barn-sao-foco-de-pesquisa-230573/>. Acesso em: 4 nov. 2023.

PILATTI, J. A. *et al.* Diurnal behaviors and herd characteristics of dairy cows housed in a compost-bedded pack barn system under hot and humid conditions. **Animal**, Cambridge, v. 13, n. 2, p. 399–406, 2019.

PINTO, S. *et al.* Influence of Barn Climate, Body Postures and Milk Yield on the Respiration Rate of Dairy Cows. **Annals of Animal Science**, Kraków, v. 19, n. 2, p. 469–481, 2019.

PIOVESAN, S. M.; OLIVEIRA, D. dos S. de. Fatores que influenciam a sanidade e conforto térmico de bovinos em sistemas compost barn. **Vivências**, Erechim, v. 16, n. 30, p. 247–258, 2019.

RADAVELLI, W. M. *et al.* Compost barns in Brazilian Subtropical region (Part 2): classification through multivariate analysis. **Research, Society and Development**, Vargem Grande do Sul, v. 9, n. 8, p. e480985229–e480985229, 2020b.

ROBERTSHAW, D. Regulação da temperatura e o ambiente térmico. *In*: REECE, W. O.

(Ed.). **Dukes, fisiologia dos animais domésticos**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2006. p. 897-908.

RODRIGUES, M. S. *et al.* Compostagem: reciclagem de resíduos sólidos orgânicos. *In*: SPADOTTO, C. A; RIBEIRO, W. **Gestão de Resíduos na agricultura e agroindústria**. FEPAF. Botucatu, 2006. p. 63-94.

RODRIGUES, V. C. *et al.* A correct enthalpy relationship as thermal comfort index for livestock. **International Journal of Biometeorology**, Berlim, v. 55, n. 3, p. 455–459, 2011.

SHANE, E. M.; ENDRES, M. I.; JANNI, K. A. Alternative bedding materials for compost bedded pack barns in Minnesota: a descriptive study. **Applied engineering in agriculture**, St. Joseph, v. 26, n. 3, p. 465-473, 2010.

SILANIKOVE, N. Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants. **Livestock Production Science**, Amsterdam, v. 67, n. 1, p. 1–18, 2000.

SILVA, R. G. **Introdução à bioclimatologia animal**. São Paulo: Nobel, 2000. 286 p.

SILVA, M. V. DA *et al.* Spatial variability and exploratory inference of abiotic factors in barn compost confinement for cattle in the semiarid. **Journal of Thermal Biology**, Amsterdam, v. 94, p. 102782, 2020.

SIQUEIRA, I. *et al.* Characterization of the spatial variability of thermal comfort indices for dairy cows breeding in compost barn. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 8, p. 38001–38014, 2022.

TEMPLE, D. *et al.* **Heat stress and efficiency in dairy milk production: A practical approach**. The farm animal welfare fact sheet. Barcelona, 2015. Disponível em: <https://awecadvisors.org/wp-content/uploads/2023/08/fs12-en.pdf> Acesso em: 16 nov. 2024.

VALENTE, D. A. *et al.* Comparative analysis of performance by cows confined in different typologies of compost barns. **Agronomy Research**, Tartu, v. 18, p. 1547–1555, 2020.

VAUCLIN, M. *et al.* The Use of Cokriging with Limited Field Soil Observations 1. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, n. 2, p. 175-184, 1983.

VIEIRA, S. R. *et al.* Detrending non stationary data for geostatistical applications. **Bragantia**, Campinas, v. 69, p. 01–08, 2010.

VIEIRA, S. R.; CARVALHO, J. R. P. D.; GONZÁLEZ, A. P. Jack knifing for semivariogram validation. **Bragantia**, Campinas, v. 69, p. 97-105, 2010.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. *In*: NOVAIS, R. F. *et al.* (Eds). **Tópicos em Ciência do Solo**, 1. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p. 1–53, 2000.

WANG, X. *et al.* A review and quantitative assessment of cattle-related thermal indices. **Journal of Thermal Biology**, Amsterdam, v. 77, p. 24–37, 2018.

WEST, J. W. Effects of Heat-Stress on Production in Dairy Cattle. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 86, n. 6, p. 2131–2144, 2003.

YANG, C. *et al.* Udder skin surface temperature variation pre- and post- milking in dairy cows as determined by infrared thermography. **Journal of Dairy Research**, Cambridge, v. 85, n. 2, p. 201–203, 2018.

ZANETONI, H. H. R. *et al.* Caracterização da cama utilizada em sistemas Compost Barn: Characterization of the beds used in compost Barn Systems. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, São José dos Pinhais, v. 5, n. 4, p. 4014–4018, 2022.

4 CAPÍTULO II: DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO ELETRÔNICO PARA USO EM CAMAS DE INSTALAÇÕES COMPOST BARN

RESUMO

Investigações científicas têm sido amplamente conduzidas sobre os parâmetros construtivos e zootécnicos em instalações *compost barn*, especialmente no que se refere ao bem-estar dos bovinos e ao manejo da cama. No entanto, ainda há escassez de pesquisas sobre o uso de tecnologias baseadas em Internet das Coisas (IoT) para o monitoramento térmico da cama. Diante disso, objetivou-se desenvolver um dispositivo portátil baseado em IoT para mensuração de atributos térmicos da cama em sistemas *compost barn*. Inicialmente, foram realizados testes em seis fazendas comerciais no estado do Ceará, Brasil, seguidos de experimentos em laboratório. Após sucessivos testes de prototipagem, foi concluída a fabricação do dispositivo, que recebeu um programa compilado especificamente para sua operação. O modelo final consistiu em uma placa de circuito impresso (PCB) integrada a um microcontrolador ESP32, sensores ambientais e módulo de armazenamento de dados, sendo programado com software de código aberto e com envio automático de dados via internet para um servidor gratuito na nuvem. Os testes preliminares revelaram que a maioria dos dados obtidos diferiu estatisticamente ($p < 0,05$) dos métodos convencionais. O desempenho eletrônico durante os testes finais foi satisfatório para as variáveis de temperatura e umidade relativa do ar, e temperatura da cama, com exceção da umidade da cama, devido a falhas de comunicação entre a sonda e a placa. O sensor DHT22 apresentou bom desempenho na mensuração das variáveis ambientais. O sistema de armazenamento local permitiu o funcionamento mesmo na ausência de conexão com a internet. Conclui-se que o dispositivo apresenta potencial para o monitoramento térmico da cama em instalações *compost barn*.

Palavras-chave: bovinos leiteiros; microcontroladores; sensores; zootecnia de precisão.

ABSTRACT

Scientific investigations have been extensively conducted on the construction and zootechnical parameters of compost barn facilities, especially regarding cattle welfare and bedding management. However, research on the application of Internet of Things (IoT)-based technologies for thermal monitoring of the bedding remains limited. This study aimed to develop a portable IoT-based device for measuring thermal attributes of bedding in compost barn systems. Preliminary tests were carried out on six commercial farms in the state of Ceará, Brazil, followed by laboratory experiments. After successive prototyping tests, the final device was completed and programmed with a custom-compiled application. The final model consisted of a printed circuit board (PCB) integrated with an ESP32 microcontroller, environmental sensors, and a data storage module, programmed using open-source software and capable of automatically transmitting data via the internet to a free cloud-based server. Preliminary tests showed that most of the data obtained differed statistically ($p < 0.05$) from conventional methods. During final testing, the electronic performance was satisfactory for the variables of air temperature, relative humidity, and bedding temperature, except for bedding moisture, due to communication failures between the probe and the PCB. The DHT22 sensor demonstrated good performance in measuring environmental variables. The local storage system enabled proper functioning even in the absence of an internet connection. It is concluded that the device shows potential for thermal monitoring of bedding in compost barn facilities.

Keywords: dairy cows; microcontrollers; sensors; precision livestock farming.

4.1 INTRODUÇÃO

Recentemente, os métodos de coleta de dados nas fazendas têm se modificado com o uso de ferramentas da era digital, com o crescente uso da internet por parte dos produtores (AYAZ *et al.*, 2019). Uma consequência direta dessas transformações é a ideia de que os produtores estão se tornando cada vez mais dependentes de tecnologias digitais (PEIXOTO; HERNÁNDEZ; SARAZ, 2024). No entanto, apesar do Brasil acompanhar essa tendência, a questão da conectividade no campo ainda é vista como um desafio a ser enfrentado.

Diante desse cenário, os bovinocultores podem encontrar algumas aplicações de dispositivos portáteis e de conexão sem fio, para uso na gestão de dados (ANDRIAMANDROSO *et al.*, 2017). Embora essas tecnologias ofereçam vantagens significativas para o manejo das fazendas, estudos são necessários quanto ao custo de implantação. No Brasil, as pesquisas sobre o desenvolvimento de novos métodos de aquisição de dados via IoT para uso em fazendas, são escassas, e em especial, para sistema *compost barn* (RÖSLER, 2021; SILVA *et al.*, 2023).

Em sistemas do tipo *compost barn* para a produção de leite, a temperatura e a umidade da cama são parâmetros considerados cruciais no manejo (BLACK *et al.*, 2013; JANNI *et al.*, 2007). Compreender a dinâmica térmica da área de descanso dos bovinos torna-se fundamental, pois a ineficiência do monitoramento dessas variáveis pode associar-se a problemas de sanidade do úbere, assim como demais desafios de manejo, que incluem, compactação da cama, compostagem inadequada, redução no adensamento animal, dentre outros (DAMASCENO, 2020; LESO *et al.*, 2013). Contudo, existem poucas informações sobre a eficiência das técnicas de mensuração térmica da cama, adotadas pelos produtores que utilizam esse sistema no Brasil.

Com o presente estudo, parte-se da hipótese de que há uma lacuna no conhecimento científico sobre a mensuração dos atributos térmicos da cama em sistemas *compost barn*, especialmente quanto à avaliação da eficiência dos métodos atualmente utilizados. Presume-se que os métodos convencionais empregados nessa prática não sejam plenamente eficazes, o que reforça a necessidade de desenvolvimento e validação de novas abordagens metodológicas.

Estudos anteriores relatam que o método convencional de registro de dados de temperatura é feito de forma manual, a partir de anotações em papel e sem qualquer facilidade de compartilhamento de dados para computadores (PEIXOTO, BARBOSA FILHO, DAMASCENO, 2022). Já a avaliação do teor de umidade da cama é feita por um método empírico, onde o responsável por esse monitoramento utiliza apenas a sua percepção tátil para

verificar se o material se encontra demasiadamente molhado ou não, o que permite apontar que a referida técnica está sujeita a subjetividade humana (DAMASCENO; FERRAZ, 2020).

O dispositivo e o método desenvolvidos neste estudo, propõem a possibilidade de utilizar tecnologias da área IoT, para a mensuração prática de variáveis importantes ao manejo da cama em *compost barn*, as quais se relacionam também com aspectos de interesse para o conforto térmico dos animais. Para isso, objetivou-se desenvolver um protótipo de fácil manuseio, utilizando componentes eletrônicos acessíveis, e capaz de registrar dados de temperatura e umidade da cama, bem como dados ambientais. Os registros permanecerão armazenados em um banco de dados, o qual foi programado para a elaboração de relatórios a serem expressos na nuvem, com transmissão dos dados em tempo real.

O monitoramento do desempenho dos sensores, bem como do mecanismo de envio dos registros por via *wireless*, foi investigado simultaneamente, como meio de comparação ao método de coleta convencional. Assim, o desenvolvimento de projetos que contemplem a utilização de recursos IoT são importantes não apenas para o manejo em camas de *compost barn*, mas também para oferecer maiores possibilidades de gestão de dados de interesse para fazendas leiteiras.

4.1.1 *Objetivo geral*

Objetivou-se desenvolver e validar um sistema embarcado portátil, fundamentado em ferramentas da Zootecnia de Precisão, para o monitoramento ambiental em instalações *compost barn*.

4.1.2 *Objetivos específicos*

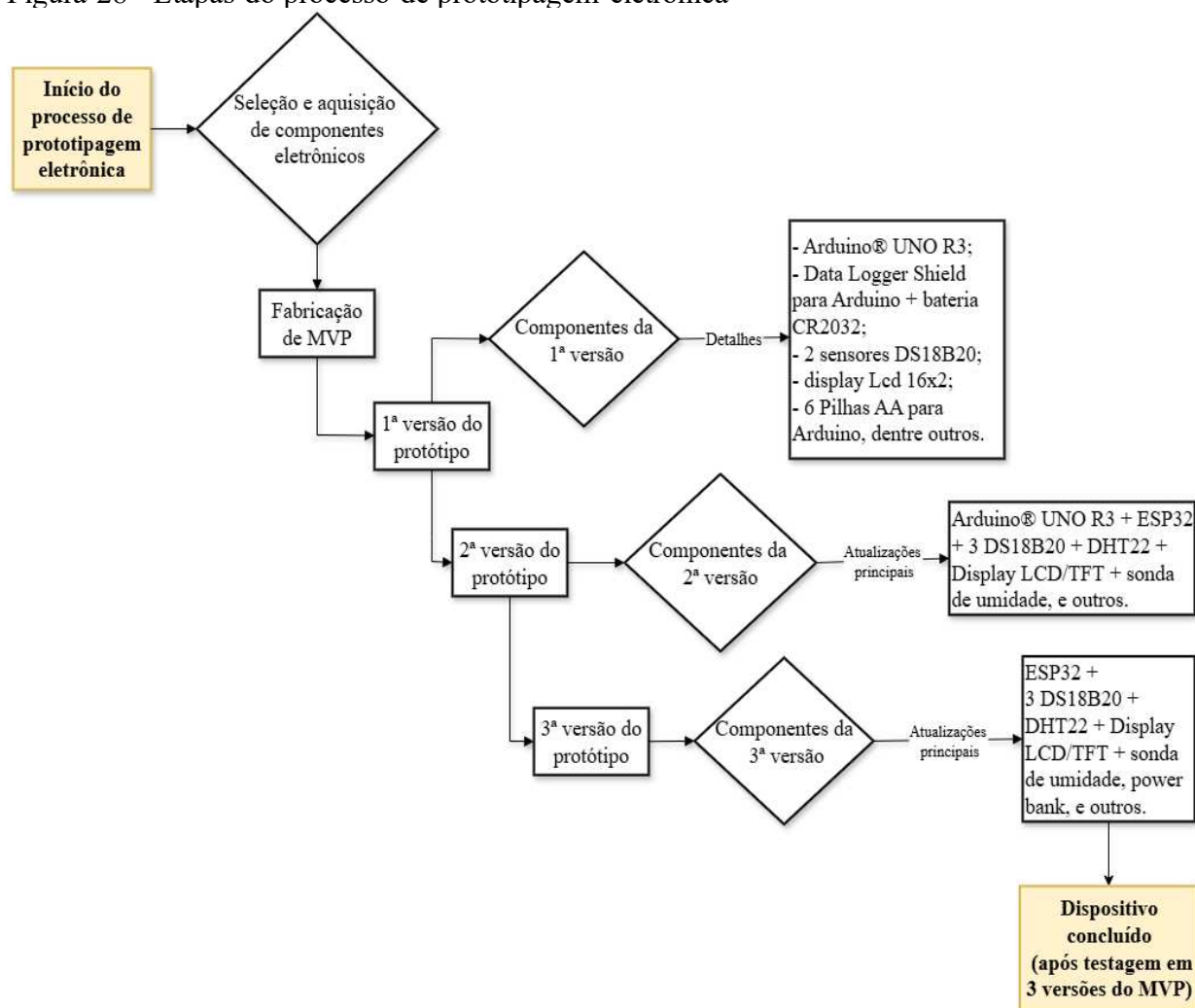
- Reunir componentes eletrônicos acessíveis e capazes de registrar dados de temperatura e umidade, utilizando métodos de prototipagem. Em seguida, coletar dados em instalações *compost barn* e transmiti-los em tempo real via IoT.
- Projetar um dispositivo capaz de sinalizar os produtores sobre quaisquer condições anormais, de fornecer dados históricos para análise e otimização do ambiente de alojamento, de ser de baixo custo, e de fácil manuseio, além de ser capaz de integrar-se com *softwares* gratuitos de gestão.
- Propor uma metodologia alternativa aos bovinocultores na prática em questão.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Planejamento do projeto

Este estudo propôs o desenvolvimento de um dispositivo equipado com sensores de temperatura e umidade, voltado à aplicação em camas de instalações do tipo *compost barn*. Testes de validação do equipamento foram realizados em seis fazendas leiteiras, após a conclusão das etapas iniciais de prototipagem necessárias para a obtenção de um Produto Mínimo Viável (MVP), conforme descrito por Lokhorst (2022). A Figura 28 ilustra as etapas principais que serão descritas na metodologia para a obtenção do dispositivo final.

Figura 28 - Etapas do processo de prototipagem eletrônica

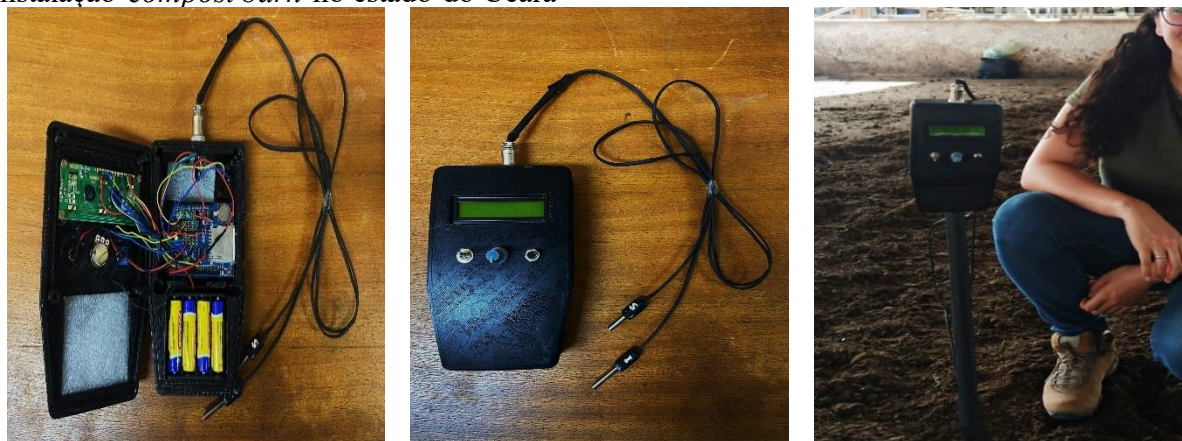


Fonte: elaborada pelo autor.

Para a fabricação da primeira versão do protótipo, foram acoplados os seguintes componentes em um microcontrolador Arduino® UNO R3: *Data Logger Shield* para Arduino + bateria CR2032, 3V; 2 sensores DS18B20 (faixa de medição -55 °C a +125 °C, ± 0.5 °C de precisão); cartão de memória micro SD com adaptador SD, 8GB; *display* Lcd 16x2/ backlight green; suporte 6 Pilhas AA para Arduino; chave Liga/Desliga tipo alavanca; Potenciômetro 100 k Ω + Knob para potenciômetro, *buzzer* e conector Mike duas vias. Em seguida, foram realizados os testes de execução do *firmware*, o qual foi elaborado especificamente para o presente estudo por meio de plataforma de desenvolvimento de *software* de código aberto (Ambiente de Desenvolvimento Integrado – IDE), disponível gratuitamente pela internet e usando a linguagem Arduino, a qual se baseia na linguagem C++.

No programa, dois sensores DS18B20 foram compilados a fim de estabelecer padrões de medição de interesse, sendo, a temperatura superficial da cama (TSC, 0 cm) e a temperatura interna da cama (TIC, 20 cm de profundidade). Por ter se tratado de testes iniciais, foram determinadas três possibilidades de obtenção dos registros de temperatura, com o objetivo de observar variações no tempo de estabilização dos sensores. Dessa forma, nas situações em que o operador quisesse manter os sensores inseridos na cama por 1 minuto, bastaria pressionar o botão uma única vez, que tão logo o *display* apresentaria a contagem regressiva do tempo, e ao alcançar o status de 0 segundos, um som emitido pelo *buzzer* sinalizaria o registro dos dados no SD card. O programa foi compilado seguindo essa mesma lógica para os demais tempos de 30 e 0 segundos, com base no acionamento duplo e triplo do botão, respectivamente (Figura 29).

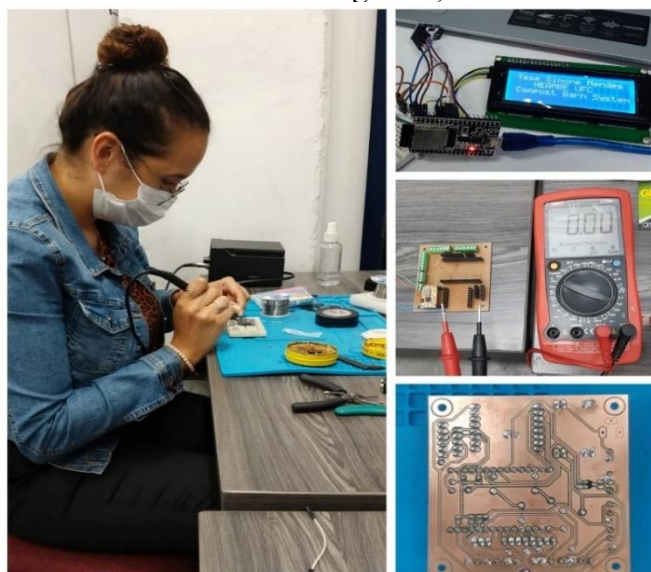
Figura 29 - Produto Mínimo Viável (MVP) utilizado em teste inicial (primeira versão) em instalação *compost barn* no estado do Ceará



Fonte: elaborada pelo autor.

Durante a execução do projeto, estabeleceu-se uma colaboração com a Universidad Nacional de Colombia que viabilizou um período de mobilidade acadêmica como pesquisador visitante. Durante essa estadia, foram realizados treinamentos voltados à aplicação da eletrônica na pecuária. A experiência proporcionou o surgimento de diversas propostas de aprimoramento do projeto, que, após o retorno ao Brasil, resultaram em melhorias significativas no protótipo (Figura 30).

Figura 30 - Prototipagem de dispositivo eletrônico na Facultad de Ciencias Agrarias, sede Medellín



Fonte: elaborada pelo autor.

A presente pesquisa foi conduzida com o objetivo de reivindicar o protótipo como patente de invenção junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI). Para essa finalidade, foram elaborados os seguintes documentos: relatório descritivo, reivindicações, resumo e desenho técnico. A fim de iniciar a pesquisa de anterioridade, adotaram-se os seguintes critérios de inclusão: publicações científicas, como patentes, artigos originais, teses e dissertações, relacionadas ao escopo da área agropecuária e com foco na aplicação de dispositivos eletrônicos, desde que publicadas até o momento da análise.

Os códigos adotados pela Classificação Internacional de Patentes e pela Classificação Cooperativa de Patentes (IPC e CPC, nas siglas em inglês, respectivamente), foram utilizados nas buscas por pesquisas de exato escopo da invenção, o que resultou predominantemente no código A01K29/00 (Outros aparelhos para pecuária) para fins de abordagem. Dessa forma, a reivindicação de registros da Patente de invenção foi submetida com o número de processo: BR 10 2023 027750 0. Todos os documentos anexados no processo

foram realizados com base em documento oficial disponibilizado pelo INPI, que corresponde as diretrizes de exame de pedidos de patente, presentes na Resolução Nº 124/2013.

4.2.2 *Localização dos testes iniciais*

Os primeiros testes com o protótipo (MVP) foram conduzidos em seis fazendas comerciais de produção de leite bovino, com instalações do tipo *compost barn* (identificadas de A a F), localizadas no estado do Ceará, Brasil, durante o período seco de 2021. O objetivo dessa etapa foi comparar os registros da Temperatura Superficial da Cama (TSC) e da Temperatura Interna da Cama (TIC), utilizando métodos convencionais de coleta e o método proposto neste estudo, por meio do protótipo desenvolvido, e com isso, verificar desempenho do sensor DS18B20 em campo a fim de identificar possíveis falhas de medição.

Para a TSC, as variáveis analisadas foram a temperatura superficial mensurada por termovisor (TST) e a temperatura superficial mensurada pelo protótipo (TSP). Já para a TIC, avaliaram-se a temperatura interna obtida por termômetro digital (TIT) e a mensurada pelo protótipo (TIP).

A área de cama foi dividida em nove seções, distribuídas em uma área previamente delimitada no galpão (BLACK *et al.*, 2013; ECKELKAMP *et al.*, 2016). No centro de cada seção, a TSC foi registrada com o uso de uma câmera termográfica de infravermelho com resolução de 4800 pixels (modelo Flir E4 MSX® com aprimoramento MSX®), posicionada a uma distância focal de 1,0 m e com emissividade ajustada para 0,90. As coletas ocorreram nos turnos da manhã e da tarde, seguindo metodologia descrita por Silva *et al.* (2020). Simultaneamente, o sensor DS18B20, acoplado ao protótipo, foi introduzido na cama para mensuração da TSP.

Para a medição da TIC, um termômetro digital tipo espeto (Pyromed® TP101, com faixa de medição de -50 a 300 °C e precisão de $\pm 0,1$ °C) foi inserido no centro de cada seção. A haste permaneceu na cama por 60 segundos para o registro da TIT. No mesmo ponto, o sensor DS18B20 foi inserido a 20 cm de profundidade para aferição da TIP.

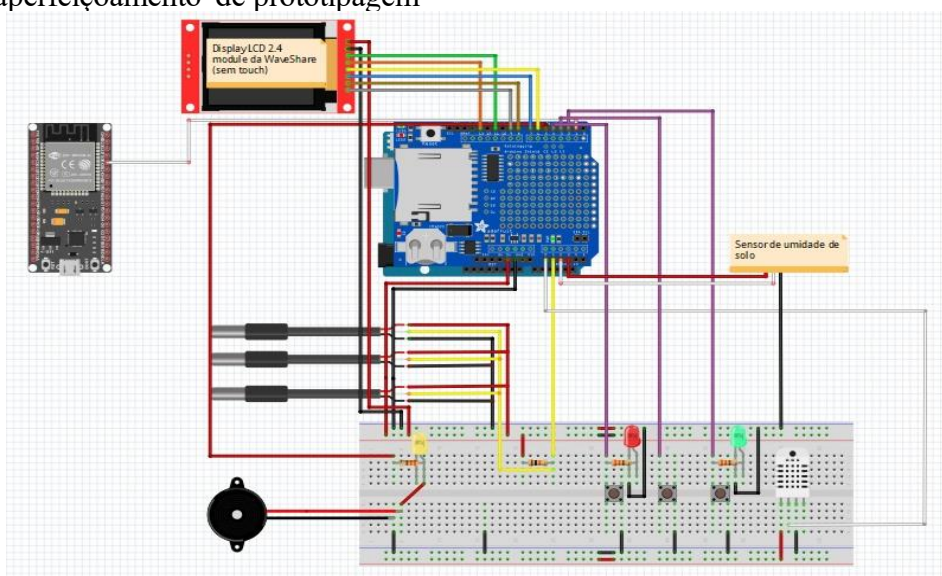
Para as análises estatísticas foi utilizado o *software* MINITAB®. Inicialmente, a estatística descritiva foi utilizada para análise das variáveis TSC e TIC, para ambos os métodos de coleta, sendo determinados valores de média, mediana, desvio padrão, variância, coeficiente de variação, máximo, mínimo, curtose e assimetria. Na sequência, as amostras foram submetidas ao teste de normalidade. Em seguida, verificou-se a variância entre os grupos testados. Assim, com base nos referidos pressupostos, as variáveis foram comparadas por meio

do teste t de Student, considerando a significância de 95%, como ferramenta estatística para a explicação dos resultados.

4.2.3 Descrição dos ajustes de hardware do dispositivo (MVP)

O esquema dos primeiros ajustes realizados no MPV (segunda versão) está expresso na Figura 31.

Figura 31- Esquema de *hardware* elaborado durante as etapas de aperfeiçoamento de prototipagem



Fonte: elaborada pelo autor.

A primeira alteração do protótipo reuniu o seguinte conjunto de componentes no *hardware*: microcontrolador (Arduino ® Uno) + Shield para Arduino com módulo de relógio em tempo real (RTC + cartão de memória *flash* removível – micro SD); módulo microcontrolador (ESP32); *display* 2,4" – TFT ILI9341; sensor de temperatura e umidade ambiente (DHT22); três sensores de temperatura (DS18B20); sonda de umidade; *buzzer*; três *push buttons* e 3 LEDs.

Após diversas etapas de montagem e programação, foram definidos os ajustes finais do protótipo. Com isso, um dispositivo portátil completo foi finalmente projetado (terceira versão do MVP), o qual teve como base a montagem dos componentes eletrônicos em *Printed Circuit Board* (PCB), em placa com dimensões de 100 × 74 mm e que integrava os componentes em um mesmo circuito elétrico.

No período de treinamento na Universidad Nacional de Colombia, uma placa de circuito impresso (caseira, em tecnologia CNC) chegou a ser elaborada, e com isso surgiu a proposta de reunir 4 sensores DS18B20, um sensor DHT11, e os demais componentes. No entanto, com o retorno ao Brasil algumas alterações de projeto fizeram com que fosse necessário produzir uma nova placa. Além disso, foram identificadas falhas constantes, e até mesmo sinais de inoperância na placa e no módulo RTC, durante os testes. Esses riscos chegaram a ser previstos, dada a fabricação desse tipo de circuito eletrônico estar sujeita a falhas manuais.

4.2.4 Desenvolvimento de hardware e programa (versão final)

Após a estadia de pesquisa na Colômbia, o desenvolvimento do protótipo foi retomado, contemplando desde as modificações sugeridas até a sua validação definitiva. Assim, o dispositivo final proposto foi composto por um conjunto de componentes eletrônicos conectados a uma placa de desenvolvimento e microcontrolador ESP32, os quais foram programados por plataforma de desenvolvimento de *software* de código aberto (IDE Arduino), a fim de reunir a comunicação de 3 sensores de temperatura e uma sonda eletrônica de umidade, em uma única base registradora.

A placa PCB foi projetada usando o KiCAD, um *software* de código aberto para o desenvolvimento de placas eletrônicas (EDA – *Electronic Design Automation*). Esse processo passou pelas seguintes etapas: elaboração do esquemático eletrônico, verificação dos componentes, elaboração do *layout*, geração do arquivo GERBER e listagem BOM (*Bill Of Materials*). Em seguida, o arquivo GERBER foi enviado para uma empresa prestadora de serviços de fabricação de placas PCB (Figura 32).

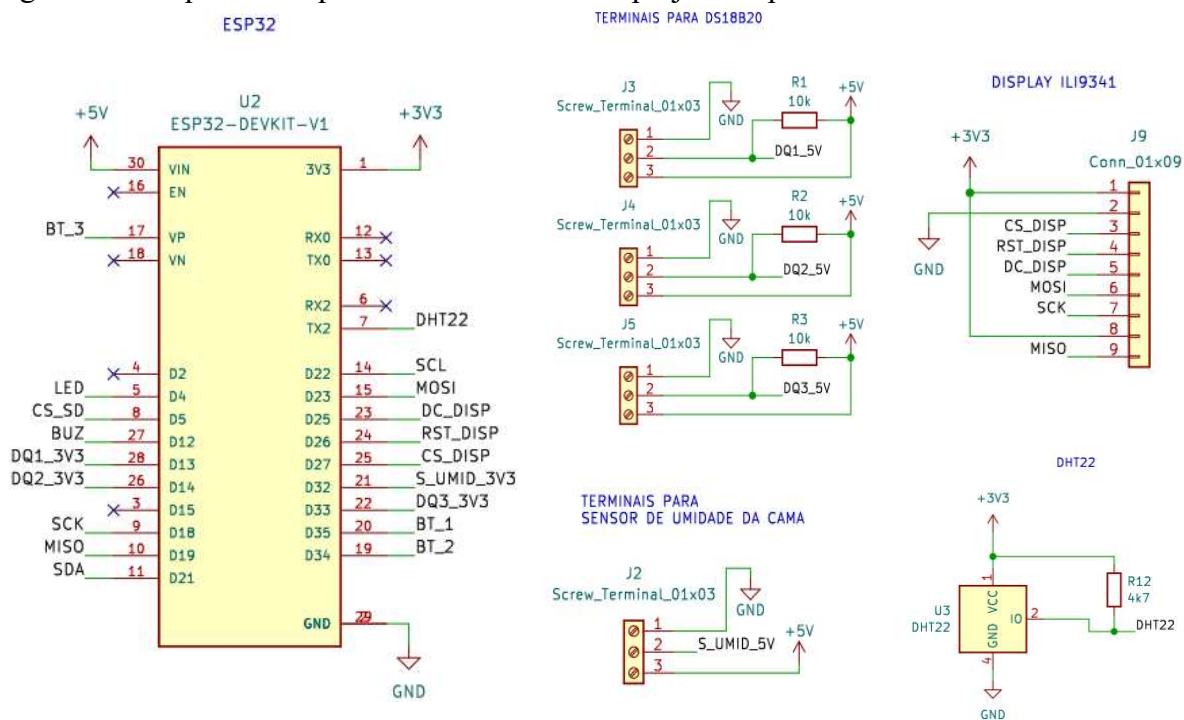
Figura 32 - Design 3D personalizado de PCB utilizada na versão atualizada do protótipo



Fonte: elaborada pelo autor.

O diagrama parcial do circuito está ilustrado na Figura 33, enquanto os detalhes do projeto esquemático completo estão disponíveis no Apêndice A.

Figura 33 - Esquemático parcial desenvolvido no projeto da placa eletrônica



Fonte: elaborada pelo autor.

É importante destacar que no KiCAD, foram incluídos somente componentes do tipo PTH (*Pin Through Hole*) e não SMD (*Surface Mounted Device*), devido a maior facilidade para soldagem manual, visto que a placa PCB elaborada compõe um projeto de protótipo. Se no futuro, surgir o interesse de criar uma placa para produção em escala, o projeto pode ser reajustado acrescentando um circuito de carga de bateria, realocando a disposição do ESP32, o SD card e o RTC direto na placa, sem os módulos e todos os componentes SMD.

Na placa PCB contendo o módulo ESP32 foram acoplados os seguintes componentes principais: relógio RTC (Real Time Clock RTC para *Raspberry Pi*) – para controle do tempo; *display* 2.4inch LCD (ILI9341 Controller, 240x320 Pixels) – para apresentação das medições dos dados ao operador; Mini SD card Arduino/Mini Leitor Micro SD Card – que permite a leitura e gravação dos dados no cartão SD; 3 sensores de temperatura (termômetro digital DS18B20) – para mensuração da temperatura da cama em três pontos; e sensor de temperatura ambiente (DHT22) – para mensuração da temperatura e umidade relativa do ar.

A placa possui uma entrada de conexão USB para alimentação em 5V, enquanto um *power bank* foi utilizado como fonte de alimentação do sistema. Todas as conexões com os

sensores (DHT22, DS18B20 e sonda de umidade) são feitas com bornes parafusáveis. O *display* não foi soldado na placa, e sim plugado.

4.2.5 Considerações sobre os módulos eletrônicos utilizados

A seguir, encontra-se apresentada uma breve descrição do microcontrolador utilizado, seguida da apresentação de todos os componentes eletrônicos utilizados para a versão final do dispositivo.

O microcontrolador ESP32 utilizado pode ser descrito como um módulo com conexão Wi-Fi/Bluetooth® integrada, que o torna facilmente escalável para uma ampla variedade de aplicações IoT. Possui tensão de operação de 3.3 volts, no entanto, contém um regulador de tensão que permite a operação em 5 volts, onde são recomendados cuidados específicos para a utilização desse recurso.

A placa de desenvolvimento integrada a PCB e utilizada no processo de prototipagem é baseada em um *System on Chip* (SoC) de 5,5 x 2,8 x 1,3 cm (dimensões incluindo os pinos), o qual integra o componente ESP32 descrito e possui 30 pinos de conexão. O módulo utilizado foi o ESP WROOM 32, o qual faz parte da placa de desenvolvimento ESP32_Demo Board_V2, desenvolvida pelo fabricante *Espressif Systems*. O ESP WROOM 32 é baseado em microprocessadores LX6 dual core Xtensa® de 32 bits de baixa potência, funcionando individualmente a uma velocidade de 240MHz, e contendo um chip de baixo consumo de energia. Além disso, possui GPIO com funções de PWM, I2C, SPI.

O termômetro digital DS18B20, utilizado para as medições da temperatura da cama, funciona por interface 1-Wire® (protocolo de barramento de um fio), o qual é equipado com um código serial exclusivo de 64 bits, de forma que a comunicação com o microprocessador requer apenas uma porta Pin. Conforme o fabricante (*Maxim Integrated*), esse recurso permite que apenas um microprocessador seja utilizado para controlar diversos módulos DS18B20, distribuídos na área experimental.

O sensor DS18B20 é à prova d'água e lê temperaturas de -55 °C a +125 °C, com precisão de $\pm 0,5$ °C entre -10 °C e 85 °C. Além disso, possui tensão de alimentação que varia de 3,0 a 5,5 volts. O comprimento do cabo mede 1 m e a ponta do sensor possui 6 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento. A escolha deste componente se deu pelo fato de essas características de dimensionamento se mostrarem adequadas para o projeto, uma vez que seria preciso mensurar a temperatura da cama em profundidade de até 40 cm.

O sensor DHT22 inclui um termistor do tipo NTC para a medição de temperatura do ar, permitindo medir temperaturas de -40 a $+80$ °C (precisão de $\pm 0,5$ °C), e um sensor capacitivo para a medição da umidade relativa do ar, capaz de mensurar valores de 0 a 100%. A faixa de precisão para a umidade é de ± 2 a 5%. As especificações descritas, conforme o *datasheet* do fabricante (*Aosong Electronics Co.,Ltd*), são: tensão de operação de 3,3 a 5,5 volts, possuindo quatro pinos de conexão e com sinal de transmissão podendo chegar até 20 metros, e taxa de amostragem não superior a 0,5 Hz, o que lhe confere leituras a cada 2 segundos. A pinagem consiste na seguinte denominação: 1. VCC – Alimentação; 2. DATA – Comunicação de dados; 3. NC – Sem conexão e 4. GND – Terra. O sensor DHT22 consiste em um pequeno componente com dimensionamento, 15,1 mm x 25 mm x 7,7 mm.

O módulo de exibição LCD de 2,4" – modelo *Waveshare*, com driver TFT ILI9341 embutido, suporta interface de comunicação via barramento SPI, e possui dimensões de 70,50 × 43,30 mm e resolução de 240 × 320 (cores RGB de 65K – efeito de exibição claro e colorido). Conforme o fabricante *Ilitek*, a tensão operacional é de 3,3 V/5 V. O painel do *display* permite que o operador do dispositivo testado visualize os dados de interesse para o manejo da cama, bem como informações de data e hora fornecidas pelo módulo RTC.

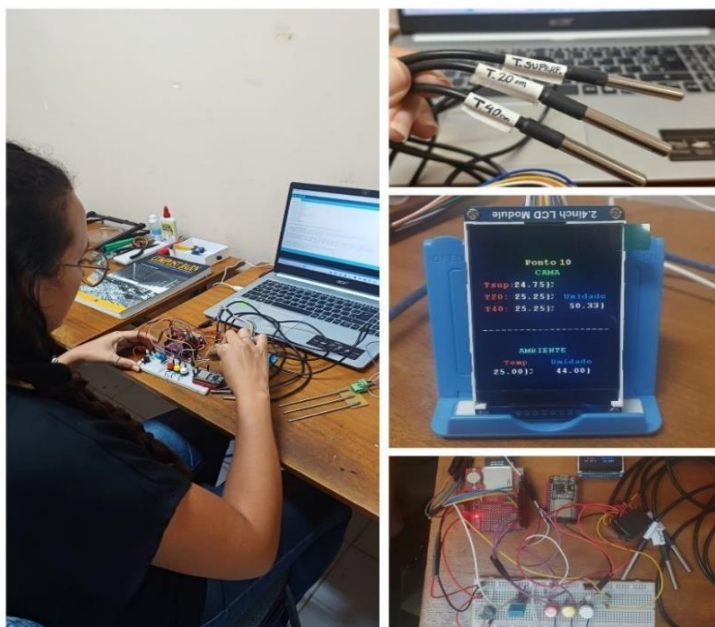
O projeto inicial com o MVP incluía a utilização de um Arduino Uno, porém, com a escolha em utilizar um *display* LCD gráfico foi necessário trocar de microcontrolador e optar por um ESP32, pois demoraria muitos segundos para atualizar a tela inteira. O Arduino Uno não é suficiente para conduzir um *display* com uma resolução tão alta, como é o caso do modelo TFT ILI9341. Como o módulo ESP32 usa níveis lógicos de 3,3 V, também não precisaríamos de resistores para acionar a tela, com isso, os testes de prototipagem na protoboard seriam otimizados.

O módulo RTC DS3231 para *Raspberry Pi* compreende um relógio de tempo real de alta precisão e fornece informações de horas, minutos e segundos, o qual opera no formato de 24 horas ou 12 horas com um indicador am/pm, além de contemplar funções de calendário. Conforme o fabricante *Maxim Integrated*, a data no final do mês é ajustada automaticamente conforme as variações de número de dias de cada mês, incluindo compensações para anos bissextos. O modelo utilizado no projeto apresenta baixo consumo de energia, interface serial I2C e dimensão reduzida (14x13x13 mm). A tensão de operação pode ser trabalhada na faixa de 2.3V-5.5V. Uma bateria embutida permite o aporte de energia interno, importante para situações de falhas no circuito.

Para esse projeto, a sugestão em armazenar os dados em um cartão SD se torna interessante ao imaginarmos que em caso de falhas de internet na plataforma, o processo de

aquisição de dados não seria prejudicado. Os testes do circuito eletrônico em protoboard podem ser vistos na Figura 34.

Figura 34 - Prototipagem de dispositivo eletrônico na Universidade Federal do Ceará, Brasil



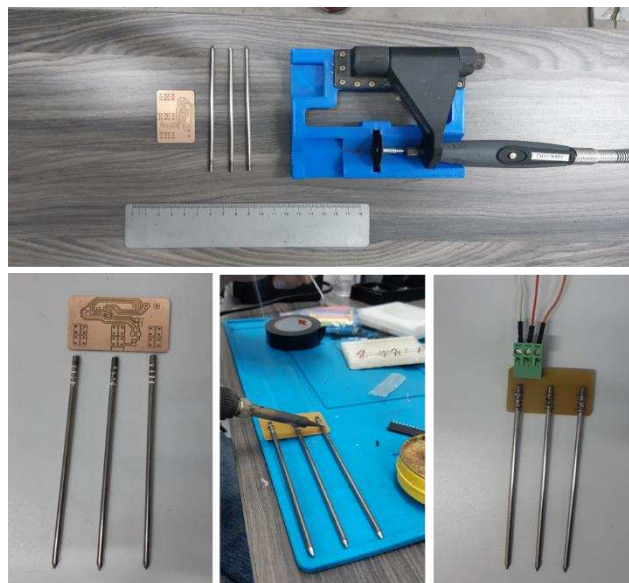
Fonte: elaborada pelo autor.

4.2.6 Umidade da cama: montagem de dispositivo e programação

O dispositivo proposto para a mensuração da umidade da cama tem como princípio de funcionamento a medição da frequência gerada com o uso de um circuito integrado (CI) 555, que integra uma sonda capacitiva compreendendo três eletrodos configurados para serem inseridos na cama e um código configurado para determinar o valor de capacitância do meio, e, em seguida o teor de umidade da cama. Buscou-se obter uma faixa de frequência satisfatória de modo que as propriedades elétricas do meio, colaborassem com a captação de variações, tanto no que se refere a constante dielétrica quanto na resistência elétrica das camadas de cama avaliadas.

O design da sonda de umidade inclui uma placa de circuito impresso de fenolite ($4,9 \times 2,8$ cm), três hastes metálicas (aço inoxidável medindo 12 cm soldadas à placa) e um espaço para o acoplamento de um conector borne de 3 vias (VCC/GND/sinal output), conforme ilustrado na Figura 35.

Figura 35 - Fabricação da sonda de umidade da cama



Fonte: elaborada pelo autor.

No teste de bancada, a sonda foi inserida na amostra de cama, enquanto os fios de saída do borne da placa de fenolite foram conectados em um borne da placa PCB, a qual reunia todos os outros componentes do dispositivo.

A sonda de umidade proposta precisa de 5V para a alimentação do sistema e o sinal enviado é do tipo digital, também em 5V. Dessa forma, a sonda envia um sinal em 5V, que é lida pelo microcontrolador ESP32, que por sua vez transmite os dados via comunicação serial. A frequência desse sinal é que determina o teor de umidade da porção de cama avaliada. Para isso, foi preciso utilizar um conversor de nível lógico capaz de operar a mudança de 5V para 3.3V, requerida para o funcionamento seguro do ESP32. A comunicação serial permite que a sonda seja conectada em dispositivos de coleta e armazenamento de dados ou em um computador. Sendo assim, a placa PCB que integra todos os componentes, possibilita a transmissão dos dados pois um conversor USB serial está incluso no projeto.

4.2.7 Localização dos testes finais

Os testes foram finalizados com base no registro dos dados do dispositivo a partir da simulação de um perfil de cama, durante cinco dias consecutivos. As análises foram conduzidas no Laboratório de Automação e Robótica Agropecuária (LAGRO – UFC), ocasião em que foram implementadas modificações significativas no *hardware* e *firmware*, anteriormente citadas, bem como no sistema de comunicação de dados.

A Figura 36 ilustra os materiais empregados nos testes de comunicação via Internet das Coisas (IoT).

Figura 36 - Materiais utilizados na simulação de um perfil de cama



Fonte: elaborada pelo autor.

Para simular um perfil de cama, foi utilizado um cilindro confeccionado em PVC com 100 mm de diâmetro, uma placa acrílica transparente, entre outros materiais auxiliares, como lixa de ferro, fita métrica, e cola instantânea à base de cianoacrilato (TEKBOND, Modelo 793) (A). A amostra de cama de gado foi utilizada para o preenchimento do cilindro, possibilitando a inserção dos sensores (B). Por fim, o cilindro foi identificado manualmente com base nas distâncias entre os sensores, distribuídos da seguinte forma: Tsup (temperatura superficial), T20 (temperatura a 20 cm de profundidade) e T40 (temperatura a 40 cm de profundidade) (C).

Para o monitoramento remoto e em tempo real dos dados coletados durante os testes de bancada, foi utilizada a plataforma web “ThingSpeak” (<http://thingspeak.com>), que permite o envio, armazenamento e visualização de informações provenientes de sensores. Essa ferramenta possibilita o acesso aos dados de qualquer local e a qualquer momento por meio de um navegador, facilitando a análise e o acompanhamento dos parâmetros monitorados. Além disso, o “ThingSpeak” oferece um ambiente gratuito para visualização e processamento de dados, sendo amplamente utilizado em aplicações de IoT. Essa etapa de testes foi realizada utilizando um notebook, para visualização dos dados no “ThingSpeak”, e um smartphone, para acompanhamento por meio do aplicativo gratuito “ThingView”.

A Figura 37 apresenta o esquema de utilização e funcionamento do dispositivo, em que sensores são introduzidos em cama de instalação *compost barn*, para mensuração das condições térmicas da cama, bem como as variáveis ambientais, sendo os dados transferidos

via conexão Wi-Fi para uma plataforma *back-end* na nuvem, que serve de suporte para a análise em tempo real.

Figura 37 - Esquema dos sensores instalados em cama de *compost barn* para medir condições térmicas e variáveis ambientais, com envio dos dados via Wi-Fi para plataforma em nuvem para análise em tempo real



Fonte: elaborada pelo autor.

4.2.8 Orientação de manuseio do protótipo

Conforme apresentado no documento de patente (BR 10 2023 027750 0), a mensuração dos parâmetros térmicos da cama se inicia com a etapa de introdução dos sensores no interior da cama por um operador (Interface Homem-Máquina – IHM), com o auxílio de uma haste de aço inoxidável, a qual terá 3 sensores de temperatura acoplados e dispostos em diferentes distâncias entre si (sensor de superfície – 0 cm e sensores de 20 cm e 40 cm de profundidade). Em seguida, o operador irá introduzir a sonda de umidade na mesma porção de cama em que a haste se encontra.

Ao penetrar a haste na cama, o operador irá acionar a chave de ligação “ON” do dispositivo, o qual contará com um suporte para *power bank*, uma vez que a proposta consiste no uso de um produto portátil, de forma que o sistema seja alimentado por uma bateria externa. Após a sinalização de funcionamento normal apresentada pelo *display*, o operador irá selecionar o ponto de coleta da cama ao pressionar os botões indicados como “+ (mais)” ou “- (menos)”, conforme a sua necessidade, sendo possível a seleção de pontos que variam de 1 a 99. Enquanto

isso, a malha de medição, geralmente definida em metros, será de livre escolha do operador da fazenda.

O registro pontual dos dados terá início a partir do acionamento do botão “ENTER”, pelo operador. Enquanto isso, o circuito elétrico estará preparado para comunicar-se com a Placa de Circuito Impresso (PCI ou PCB – *Printed Circuit Board*), a qual foi elaborada especificamente para este projeto de prototipagem. Projetos de fabricação de placas PCBs são produzidos por meio de *software* de design assistido por computador (CAD), que permite reunir todas as informações necessárias para a montagem dos componentes eletrônicos. Neste projeto, a placa PCI ou PCB irá comunicar os módulos ao microcontrolador ESP32, de forma que as informações de temperatura e umidade da cama, bem como da temperatura ambiente, serão apresentadas no *display*, quando o botão “ENTER” for acionado.

No momento do registro do ponto selecionado, os dados serão armazenados em cartão de memória flash removível – micro SD, os quais também estarão disponíveis para envio via conexão Wi-Fi. Um serviço de Plataforma web (na nuvem) instalado em computadores (de mesa ou notebooks) e/ou em *smartphone* receberá os dados, os quais serão armazenados para uso oportuno. O operador poderá obter, portanto, acesso a informações de temperatura e umidade da cama, bem como dados ambientais, de diversos pontos de coleta da cama de uma instalação *compost barn*, em tempo real. Além disso, os dados estarão apresentados em planilhas que especificarão a data e o horário da coleta, o que poderá facilitar o trabalho de gestão da fazenda.

Após a coleta dos dados, o operador deverá acionar o botão “OFF”. A decisão em desligar o dispositivo entre a coleta de um ponto e outro, ou somente após o registro de todos os pontos, será opcional para o operador. Na prática, as tecnologias no campo IoT, propostas no presente estudo, podem ser adotadas na obtenção e armazenamento de um grande volume de informações, e em tempo real, com o objetivo de otimizar o tratamento dos dados de forma computacional a fim de melhor direcionar as tomadas de decisões das fazendas.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Testes iniciais do protótipo em campo

A análise preliminar indicou que os testes com sensores DS18B20 foram satisfatórios para a mensuração da temperatura superficial da cama, não sendo observadas falhas eletrônicas nos sensores, tampouco registros anômalos. Contudo, os resultados evidenciaram a necessidade de estudos adicionais quanto à comparação entre os métodos de coleta utilizados. De acordo com a Tabela 6, apenas as fazendas E e F não apresentaram diferenças significativas entre os testes realizados pela metodologia convencional (TST) e aqueles obtidos por meio do protótipo (TSP).

Tabela 7 - Valores de temperatura superficial da cama (TSC, °C) mensurados por diferentes métodos de coleta, seguidos da média, desvio padrão e valor de significância estatística entre as amostras

Fazenda	Métodos	Pontos de coleta na cama										Média	DP	p-value
		1	2	3	4	5	6	7	8	9				
A	TST	30,9	28,4	29,4	28,9	29,8	30,5	30,6	30,9	31,2	30,1	0,99	0,000*	
	TSP	34,0	32,1	32,0	32,7	33,6	34,5	33,9	32,3	34,2	33,3	0,98		
B	TST	28,9	28,6	29,5	31,2	31,8	31,7	32,5	31,4	32,6	30,9	1,52	0,078	
	TSP	30,3	31,7	31,4	31,7	33,3	32,3	32,3	31,9	33,5	32,0	0,97		
C	TST	29,3	29,6	31,3	30,4	32,0	32,4	31,4	32,7	31,1	31,1	1,18	0,006*	
	TSP	28,8	29,1	30,9	29,9	29,7	28,9	29,3	30,5	29,9	29,7	0,72		
D	TST	29,9	29,2	30,4	32,6	29,2	29,0	27,8	28,7	28,4	29,5	1,40	0,044*	
	TSP	30,0	31,7	30,8	31,5	31,2	30,1	29,8	30,3	30,1	30,6	0,71		
E	TST	29,7	29,4	31,0	30,8	30,2	30,9	31,5	32,0	29,2	30,5	0,96	0,669	
	TSP	30,3	29,7	29,6	27,8	29,9	30,1	30,0	32,1	32,9	30,3	1,47		
F	TST	31,4	31,2	30,9	33,4	31,0	29,4	30,2	32,1	33,2	31,4	1,31	0,051	
	TSP	30,9	29,5	29,4	31,5	30,2	29,1	29,9	30,9	31,4	30,3	0,90		

TST: temperatura superficial mensurada por termovisor, em °C); TSP: temperatura superficial mensurada por protótipo, em °C); DP: desvio padrão; teste t ao nível de significância de 95% (p-value <0,05); *: indicativo de amostras que diferem entre si estatisticamente.

Fonte: elaborada pelo autor.

Para ambos os termômetros, os resultados mostraram que os gestores das fazendas B e C tiveram dificuldade de alcançar valores mínimos de temperatura interna da cama. Estudos anteriores, preconizaram a faixa de 45 a 65 °C como ideal, para uma compostagem eficaz (JANNI *et al.*, 2007; BEWLEY *et al.*, 2012). Considerando os registros a 0,15 m de profundidade, pelo método convencional, a média de TIC permaneceu abaixo da faixa recomendada para sistemas *compost barn*, porém com valores de desvio padrão dentro da faixa aceitável, conferindo temperatura média de $40,6 \pm 5,4$ °C. Particularmente, para os registros de TIT, as fazendas A, D e E apresentaram valores de 43,2 °C, 41,6 °C e 44,2 °C, respectivamente, considerados próximos das condições ideais. Por outro lado, observa-se que os registros de TIP diferiram ($p < 0,05$) da TIT (Tabela 7).

Tabela 8 - Valores de temperatura interna da cama (TIC, °C) mensurados por diferentes métodos de coleta, seguidos da média, desvio padrão e valor de significância estatística entre as amostras

Fazenda	Métodos	Pontos de coleta na cama										Média	DP	p-value
		1	2	3	4	5	6	7	8	9				
A	TIT	42,8	45,0	44,2	41,6	40,7	44,3	43,5	42,2	44,1	43,2	1,43	0,366	
	TIP	44,9	43,3	42,6	40,9	42,5	44,4	45,4	43,3	48,2	43,9	2,11		
B	TIT	35,9	38,1	37,2	37,8	36,4	39,1	36,4	37,0	38,2	37,3	1,04	0,001*	
	TIP	37,2	39,9	40,0	39,9	39,5	38,8	39,1	39,2	39,0	39,2	0,86		
C	TIT	28,9	29,1	32,4	32,2	31,5	33,6	32,1	31,7	30,9	31,4	1,54	0,000*	
	TIP	31,2	34,1	37,5	37,6	34,9	38,2	36,4	36,1	34,8	35,6	2,18		
D	TIT	41,9	39,2	40,8	40,0	44,1	44,7	39,9	40,4	43,4	41,6	2,02	0,000*	
	TIP	47,7	44,8	44,1	47,9	47,5	49,2	44,1	43,8	46,8	46,2	2,02		
E	TIT	41,2	40,7	40,3	44,6	44,9	47,3	43,6	46,5	49,1	44,2	3,09	0,005*	
	TIP	44,8	44,5	47,3	49,9	49,1	52,8	48,5	52,3	55,9	49,5	3,76		
F	TIT	44,4	44,1	46,3	44,4	46,1	43,9	48,2	47,3	47,4	45,8	1,63	0,000*	
	TIP	51,9	50,0	49,8	48,8	49,2	47,8	55,8	50,6	50,9	50,5	2,31		

TIT: temperatura interna mensurada por termômetro digital culinário, em °C; TIP: temperatura interna mensurada por protótipo, em °C; DP: desvio padrão; teste t ao nível de significância de 95% (p-value <0,05); *: indicativo de amostras que diferem entre si estatisticamente.

Fonte: elaborada pelo autor.

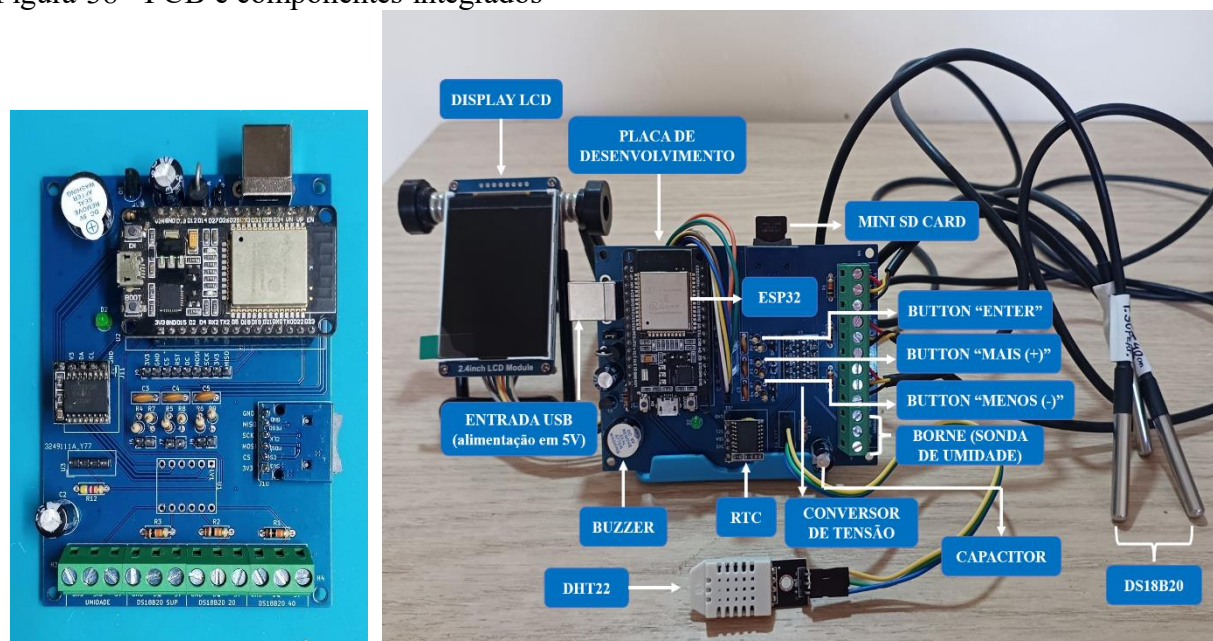
Considerando os testes com o protótipo, as fazendas B, C, D, E e F apresentaram média de temperatura maior, em comparação aos resultados encontrados pelo método

convencional, com 99% de confiabilidade. Isso pode ser explicado pelo fato de a TIT ter sido mensurada na profundidade de 15 cm, enquanto a TIP foi registrada com 20 cm de profundidade. Como as coletas foram feitas de forma simultânea, buscou-se manipular a cama o mínimo possível, de forma que, no mesmo instante que a haste do protótipo foi fincada na cama, o termômetro do tipo espeto foi inserido. Outra hipótese consiste no tempo de estabilização que pode variar para cada dispositivo. Para ambos os métodos, a TIC foi registrada após o período de 1 minuto (ANDRADE *et al.*, 2021). Apesar de o *firmware* elaborado para o MPV ter considerado três possibilidades de tempo de coleta, foi utilizada apenas o período de 60 segundos para comparação. O código poderia ter sido executado oferecendo mais recursos, porém, essa possibilidade só foi pensada após as visitas das fazendas A e B.

4.3.2 Testes de bancada

Com base nos ajustes iniciais que compreenderam desde os testes em *protoboard* até as análises de desempenhos dos sensores conectados ao protótipo em campo, o código foi finalmente reajustado, compilado na placa de desenvolvimento personalizada e a comunicação serial configurada (Apêndice B). A placa de desenvolvimento integrada aos componentes necessários para o funcionamento do dispositivo encontra-se ilustrada na Figura 38.

Figura 38 - PCB e componentes integrados

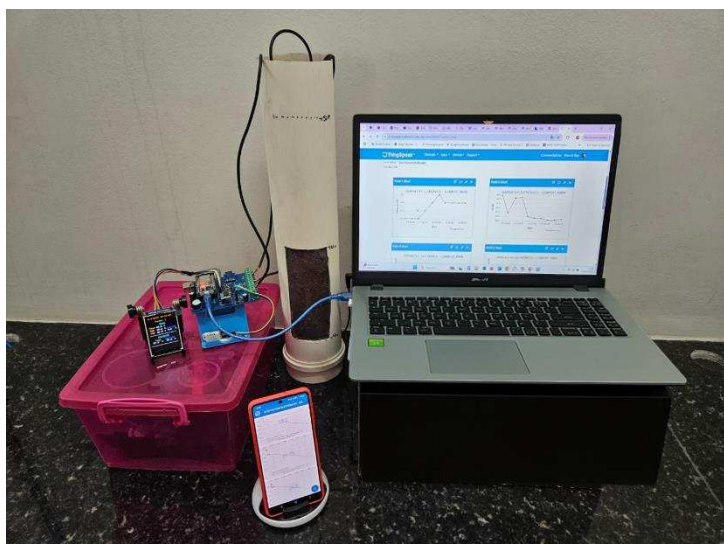


Fonte: elaborada pelo autor.

Os testes de transmissão de dados via Wi-Fi, realizados durante a simulação de registros de temperatura no perfil da cama, foram satisfatórios. As exceções ocorreram durante quedas de energia no laboratório e oscilações na rede de internet local, que resultaram na interrupção do envio de dados durante os períodos de inoperância da conexão. Tal situação já havia sido prevista e descrita no planejamento inicial do projeto, no qual se considerou que, em casos de falha na conexão, o código de programação deveria permitir a inserção manual de outra rede Wi-Fi disponível. Nas situações de queda de energia, as análises foram retomadas com o uso de um roteador celular.

A Figura 39 ilustra a comunicação dos dados via IoT, com os registros sendo armazenados e transmitidos em tempo real, permitindo a visualização dos dados tanto no display do dispositivo, como na plataforma “ThinkSpeak” no desktop e no celular.

Figura 39 - Teste de comunicação IoT em laboratório



Fonte: elaborada pelo autor.

Durante as etapas de teste de desempenho do sensor DS18B20, surgiu o questionamento sobre a razoabilidade de testá-lo em paralelo com outros sensores comumente disponíveis no mercado, tanto para projetos de prototipagem acadêmica quanto para aplicações em escala industrial. Com base no levantamento realizado, dois sensores foram considerados: o NTC 10K 3950, um dos termistores mais utilizados, amplamente empregado como sensor de temperatura tanto em prototipagem de equipamentos eletrônicos quanto em sistemas de automação industrial; e o NTC 10K Injetado TPE, um termistor encapsulado em elastômero termoplástico (TPE), esse encapsulamento confere ao sensor maior resistência a líquidos,

variações térmicas frequentes e proporciona uma camada extra de proteção.

Quando o sensor realiza a medição da temperatura, ele emite um sinal baseado na resistência do termistor NTC (sigla do inglês *Negative Temperature Coefficient*). No entanto, essa resistência não varia de forma linear em relação à temperatura, o que pode resultar em erros de medição que dependem da faixa de temperatura e do coeficiente beta do termistor (SARKAR; DEY; MUNSHI, 2013).

Para minimizar esses possíveis erros, é essencial que o microcontrolador utilizado no sistema faça a leitura do sinal emitido e, em seguida, realize a conversão para a temperatura real da variável observada. Essa conversão pode ser aprimorada por meio de cálculos de calibração ajustados ao ambiente específico de uso. No entanto, essa necessidade de calibração representa uma limitação que se buscou evitar no presente estudo, sendo um dos motivos para não optar por sensores que exigem calibração adicional, como os termistores NTC. Assim, a escolha pelo uso exclusivo do DS18B20 se mostrou a alternativa mais adequada para a aplicação no presente trabalho. As principais características dos sensores mencionados estão detalhadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Principais características para comparação entre sensores de temperatura

Característica	NTC 10K 3950	NTC 10K Injetado TPE	DS18B20
Tipo	Termistor NTC	Termistor NTC	Sensor digital (diodo de junção semicondutora)
Saída	Resistência variável	Resistência variável	Dados digitais
Precisão	Moderada* ¹	Moderada* ²	Alta ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$) ³
Proteção	Sem encapsulamento especial	Encapsulamento TPE	Encapsulado (aço inoxidável)
Instalação	Pode precisar de proteção extra	Mais resistente para ambientes adversos	Fácil integração com microcontroladores
Necessidade de conversão	Sim, precisa de um circuito externo	Sim, precisa de um circuito externo	Não, fornece temperatura diretamente
Comunicação	Nenhuma	Nenhuma	1-Wire
Faixa de temperatura	-40°C a 125°C**	-20°C a 100°C**	-55°C a 125°C

*Depende da curva de calibração – 1: $\pm 1\%$ na resistência a 25°C, conforme datasheet (SHENZHEN SHENGYUANXIN ELECTRONICS, 2023); 2: $\pm 0,5\%$ (-20°C a 50°C), conforme datasheet (LIOHM, 2025); 3: conforme datasheet (DALLAS, 2008); **Depende do modelo do fabricante.

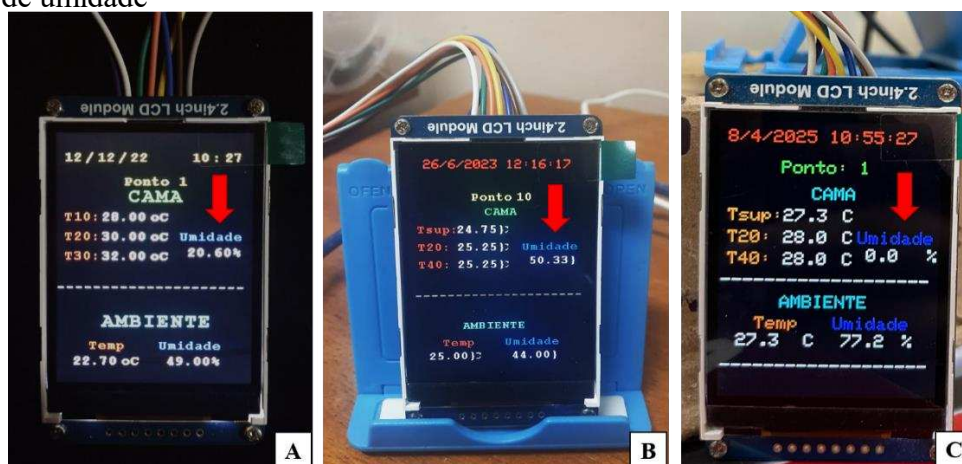
Fonte: elaborada pelo autor.

Embora existam modelos de sensores NTC encapsulados em aço inoxidável, que garantem maior proteção contra umidade e compatibilidade com diversos circuitos e microcontroladores, optou-se por realizar os testes de bancada exclusivamente com o sensor DS18B20. Essa escolha foi fundamentada em sua alta confiabilidade na mensuração dos dados (conforme especificado no datasheet), além do fato de que esse sensor tem sido amplamente utilizado em pesquisas científicas relacionadas a conceito “Smart farming” (CODELUPPI *et al.*, 2020; VEGA *et al.*, 2020; SIQUEIRA *et al.*, 2022). Outro fator determinante para essa decisão foi a facilidade de integração do DS18B20 com microcontroladores, tornando-o uma opção mais prática em comparação com os demais sensores analisados.

Contudo, a facilidade observada com o uso do sensor de temperatura não se repetiu com a sonda de umidade desenvolvida para o presente estudo. Desde os primeiros testes de bancada, realizados a partir das alterações iniciais do protótipo, os desafios para obter a captação dos dados foram constantes. A cada compilação do código no IDE, o display apresentava instabilidade na exibição dos valores. Em alguns testes, os espaços reservados para a indicação da umidade exibiam símbolos com indicativos de erro. Em determinados momentos, surgia essa instabilidade e, em outros, apareciam dados anômalos.

Apesar disso, o estudo foi conduzido normalmente e, após diversas tentativas de ajustes no código, a exibição correta dos dados tornou-se mais frequente. A Figura 40 apresenta datas distintas de execução do experimento em que o display exibiu valores considerados razoáveis de umidade da cama: 20,6% (A) e 50,33% (B). No entanto, após o ajuste final de todo o código de programação e a montagem do circuito na PCB, a sonda de umidade deixou de enviar os dados (C).

Figura 40 - Testes periódicos referentes a comunicação de dados da sonda de umidade



Fonte: elaborada pelo autor.

Uma das hipóteses para essa falha foi o intervalo de aproximadamente um ano em que o dispositivo permaneceu inoperante e, conseqüentemente, sem a realização de testes periódicos para assegurar seu pleno funcionamento. Esse prolongado período de inatividade pode ter favorecido processos de oxidação na placa de fenolite, comprometendo a condução elétrica do circuito e a estabilidade dos componentes. Situação semelhante foi observada na primeira placa artesanal, inicialmente desenvolvida para os ajustes preliminares do protótipo, a qual apresentou desgaste estrutural após algum tempo sem utilização.

A revisão preliminar para a elaboração deste estudo já apontava alguns desafios a serem enfrentados na mensuração da umidade da cama. Isso se deve ao fato de que a metodologia mais próxima encontrada para aplicação dos testes baseava-se em técnicas indiretas de mensuração da umidade do solo, o qual apresenta particularidades físicas distintas das camas de *compost barn*. Ainda assim, foi realizada uma pesquisa voltada para o desenvolvimento de protótipos com essa finalidade. Com base nisso, buscaram-se técnicas que pudessem servir de referência e que mais se aproximassem do escopo da invenção. Isso resultou na escolha da sonda capacitiva, devido à possibilidade de fabricação artesanal, à compatibilidade com microcontroladores e ao baixo custo.

A busca por anterioridade também revelou que outros dispositivos disponíveis comercialmente, e utilizados em estudos científicos para mensuração da umidade do solo, poderiam não ser adequados para os testes em questão por conta das características próprias da cama em galpões *compost barn*.

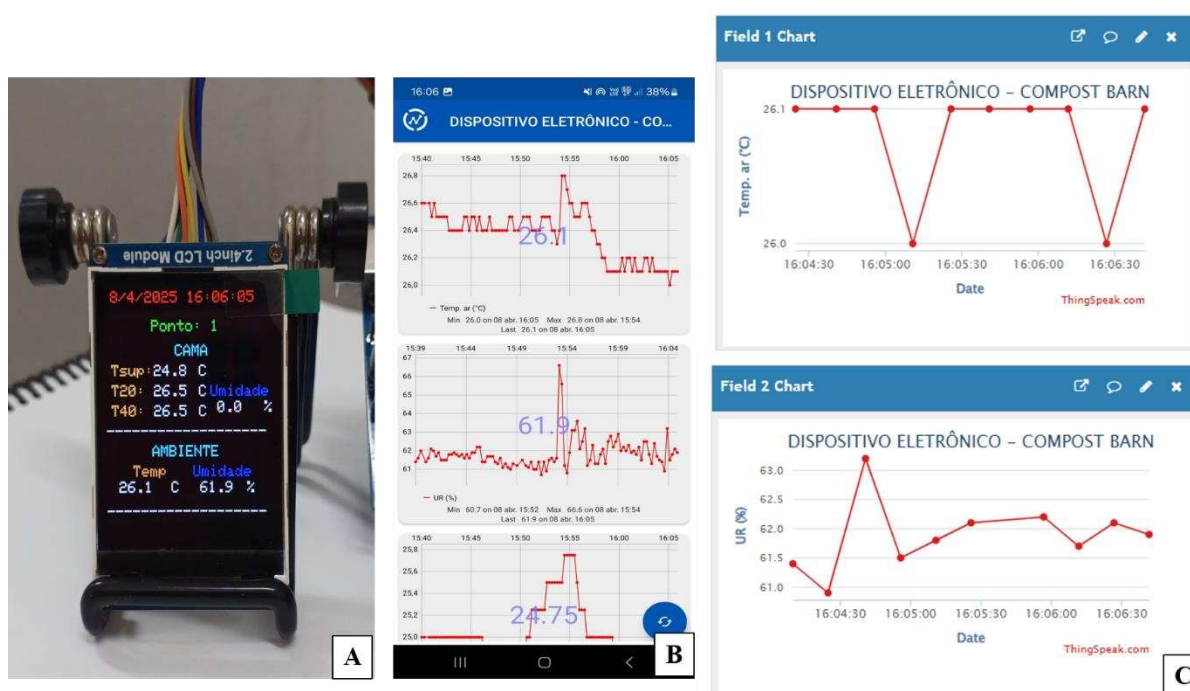
Com base nas falhas de comunicação entre a sonda e a placa PCB observadas neste estudo, sugere-se a realização de investigações adicionais que explorem alternativas de transmissão de dados, como a comunicação via Wi-Fi entre uma placa PCB personalizada para a sonda (equipada com um ESP32 ou outro microcontrolador com suporte à comunicação sem fio) e a placa PCB principal. Estudos semelhantes, envolvendo a prototipagem de baixo custo em projetos voltados à análise da umidade do solo, já foram desenvolvidos (DEAN *et al.*, 2012; FISHER; GOULD, 2012).

Além disso, alguns trabalhos também discutem o uso de microcontroladores compatíveis com a plataforma Arduino, como é o caso do Moteino, cuja aplicação poderia ser testada nesse contexto (FISHER *et al.*, 2018). Nessa perspectiva, a utilização de sensores com comunicação facilitada com placas da família Arduino, como o módulo sensor de umidade S12, mostra-se uma alternativa viável para testes de calibração e validação da sonda.

4.3.3 Interface do usuário (UI)

O ESP32, utilizado neste estudo como ferramenta de conexão IoT, coletou dados de forma integrada à placa PCB personalizada e os enviou diretamente para o "ThingSpeak" via internet. Este, por sua vez, funcionou como servidor *back-end* na nuvem, armazenando os dados e permitindo sua visualização e análise. A Figura 41 exemplifica o registro simultâneo dos dados, com base no mesmo horário de coleta, mostrando os valores no display do dispositivo (A), em um aparelho celular (B) e em um desktop (C).

Figura 41 - Exemplos de diferentes modos de exibição dos dados disponíveis ao usuário



Fonte: elaborada pelo autor.

Na prática, o produtor de leite pode enviar os dados coletados no galpão para a nuvem, independentemente da disponibilidade de uma rede Wi-Fi no local. Se houver Wi-Fi disponível, basta conectar o ESP32 integrado à placa PCB à rede local e transmitir os dados diretamente ao "ThingSpeak" via HTTP ou MQTT.

Já em locais sem conexão Wi-Fi, será necessário adotar alternativas, como o uso de um módulo GSM, que permite conectar o ESP32 à internet por meio de um chip de operadora, ou de um *gateway* celular, como um roteador 4G, que fornece Wi-Fi ao ESP32. Outra opção é a tecnologia LoRa associada a um *gateway* LoRaWAN, possibilitando comunicação de longo alcance sem depender de redes celulares. Para ambas as situações os produtores podem

visualizar os gráficos de representação dos dados tanto em computadores do tipo *desktop* quanto em dispositivo celular.

A plataforma “ThingSpeak” apresenta compatibilidade com os principais navegadores modernos, como Google Chrome, Microsoft Edge e Mozilla Firefox, os quais operam nos sistemas Windows, macOS e Linux. Dessa forma, o acesso à plataforma será possível desde que o usuário, que neste caso é o produtor de leite, utilize um desses navegadores devidamente atualizados em seu dispositivo.

Como sugestão para trabalhos futuros, verificou-se a relevância de utilizar um servidor próprio, onde o computador do usuário funcione como *back-end*. No presente estudo, como os dados são enviados diretamente para a nuvem (ThingSpeak), o computador atua apenas como um acesso ao *front-end* da plataforma para visualização das informações. Dessa forma, a implementação de uma função *gateway* personalizada por meio de API (*Application Programming Interface*) possibilitaria gerenciar a comunicação entre o *hardware* presente na placa de desenvolvimento do dispositivo e o sistema elaborado para o recebimento dos dados coletados em campo. A personalização da comunicação pode ser exemplificada pela criação de um *software mobile*, popularmente conhecido como “app”.

A API, ferramenta nativa do *hardware*, utiliza a conexão Wi-Fi para criar um documento único, compartilhável via link, permitindo o envio direto das informações entre sistemas. Isso garante uma integração mais ágil e eficiente, além de compatibilidade entre as plataformas e maior personalização ao usuário. Para o desenvolvimento do *software mobile*, recomenda-se a linguagem *Java*, pela compatibilidade e facilidade de execução de algoritmos, e o sistema *Android*, devido à sua predominância no Brasil em *smartphones* e *tablets*. O *Android Studio*, como IDE adaptada à linguagem e sistema operacional, se mostra vantajoso. Essas melhorias são aplicáveis a produtores de leite que preferem não usar a comunicação via “ThingSpeak” para obter dados. Em resumo, sugere-se a personalização da comunicação e visualização dos dados como melhorias ao presente estudo.

4.3.4 Banco de dados coletado

Os dados coletados no teste de bancada foram armazenados tanto por meio do cartão SD integrado à PCB quanto pela plataforma “ThingSpeak”. Os registros foram exportados de ambos os meios de coleta no formato CSV e, posteriormente, visualizados e organizados no *software* Microsoft Excel para fins de análise. Verificou-se, neste estudo, que a

planilha personalizada destinada ao recebimento dos dados via cartão de memória proporcionou melhor visualização dos dados brutos, apresentando colunas com formatação mais prática e adequada para o trabalho posterior de um analista. Por outro lado, a planilha gerada automaticamente pela plataforma “ThingSpeak” não exibia, inicialmente, os dados de forma tão clara ou facilitada. Ressalta-se que a plataforma “ThingSpeak” também oferece recursos adicionais, como integração com MATLAB, API REST e API MQTT para importação e exportação de dados do usuário. No entanto, tais funcionalidades não foram exploradas neste estudo. A Figura 42 apresenta a planilha personalizada desenvolvida para a leitura dos dados registrados em cartão de memória SD.

Figura 42 - Armazenamento dos dados experimentais em cartão de memória SD

PONTOS DE COLETA	DATA E HORA	TEMPERATURA	Tsup	T20	T40	Umid. cama
1	09/04/2025	10:32:14	27.50	76.80	26.50	27.25
2	09/04/2025	10:35:42	27.50	76.90	26.75	27.25
3	09/04/2025	10:37:01	27.70	76.90	26.75	27.25
4	09/04/2025	10:38:55	27.70	76.90	26.75	27.50
5	09/04/2025	10:41:34	27.70	76.90	26.00	27.25
6	09/04/2025	10:43:05	27.70	76.80	26.75	27.50
7	09/04/2025	10:44:08	27.70	76.80	26.50	28.25
8	09/04/2025	10:45:28	27.70	76.90	26.75	27.25
9	09/04/2025	10:46:40	27.60	76.90	26.50	27.25
10	09/04/2025	10:47:44	27.60	77.00	26.50	27.50
11	09/04/2025	10:48:49	27.60	76.80	26.75	27.25
12	09/04/2025	10:51:30	27.70	77.10	26.75	27.50
13	09/04/2025	10:53:02	27.70	77.40	26.75	28.25
14	09/04/2025	10:54:15	27.80	77.30	27.00	27.25
15	09/04/2025	10:54:23	27.80	77.10	26.75	27.50
16	09/04/2025	10:54:31	27.50	77.10	26.75	27.25
17	09/04/2025	10:55:08	27.70	77.50	26.75	27.25
18	09/04/2025	10:55:17	27.70	77.50	26.75	28.25
19	09/04/2025	10:55:26	27.70	77.40	26.75	27.25
20	09/04/2025	10:55:45	27.70	77.40	26.75	27.50
21	09/04/2025	10:56:05	27.50	77.40	26.75	27.50
22	09/04/2025	10:56:18	27.50	77.30	26.50	27.25

Fonte: elaborada pelo autor.

O código foi desenvolvido para que o dispositivo registre os dados em uma malha de pontos sobre a cama, permitindo que esses valores sejam facilmente utilizados por analistas na elaboração de mapas por krigagem, os quais contribuem para relatórios técnicos relevantes à tomada de decisão na fazenda. Além disso, o armazenamento dos dados em cartão SD se mostra fundamental em situações de instabilidade ou ausência de conexão com a internet local. Nessas circunstâncias, mesmo havendo falhas durante a coleta de dados no interior do galpão,

o operador pode continuar utilizando o equipamento normalmente, com a garantia de que os dados estão sendo devidamente registrados no cartão de memória.

4.3.5 Custos de fabricação do dispositivo

O custo dos componentes utilizados na versão mais atualizada do protótipo está expresso na Tabela 9. Não constam na tabela, os gastos com demais componentes e os custos de fabricação do primeiro dispositivo desenvolvido (MVP), incluindo a aquisição de ferramentas como, alicate, ferros de solda, protoboard, etc., bem como os gastos com frete.

Tabela 9 - Lista de itens utilizados na montagem do protótipo e os seus respectivos custos

Descrição	Quantidade	Preço (R\$)	
		Unitário	Total
ESP32 – 30 pinos*	1	40,14	40,14
Placa PCB**	1	2,12	2,12
DHT22 – Sensor de temperatura e umidade	1	49,90	49,90
DS18B20 – Sensor de temperatura/sonda 50mm*	3	13,73	41,19
Display TFT 2.4" 65K RGB – driver ILI9341*	1	73,34	73,34
RTC DS3231 para Raspberry Pi	1	25,56	25,56
Mini SD Card/Mini Leitor Micro SD Card	1	7,90	7,90
Power Bank Compacto 10000 mAh	1	159,93	159,93
Resistor 5% de tolerância 1/4W – 4.7 kΩ	1	0,13	0,13
Resistor 5% de tolerância 1/4W – 10 kΩ	6	0,13	0,78
Resistor 5% de tolerância 1/4W – 1 kΩ	5	0,13	0,65
Diodo tvs supressor unidirecional 1.5KE68A	1	2,15	2,15
Borne KRE3 – 3 conexões	4	2,00	8,00
Barra de pinos macho passo 2mm 1X40 180°	4	4,75	19,00
Buzzer 12mm contínuo – 5V ativo	1	3,80	3,80
Capacitor cerâmico de disco 50V – 100nF	3	0,13	0,39
Capacitor eletrolítico 16V 105 °C – 470uF	2	0,47	0,94
Led 3mm verde – difuso 100MCD 54°	1	0,54	0,54
Conversor bidirecional de tensão 3,3-5V	1	6,20	6,20
BC337 – Transistor	1	0,93	0,93
Conector USB Tipo B1 padrão furo DIP – 90° p/PCI	1	4,35	4,35
Cabo Micro USB 30cm	1	9,90	9,90
Sonda de umidade***	1	-	-
Total parcial (R\$)			457,84

*Item em peso colombiano (R\$ 1,00 = 818,36 COP) convertido para a moeda Real brasileira, abril/2022;

**Item em dólar (1US\$ = R\$ 5,06) convertido para a moeda Real brasileira, fevereiro/2023;

***Descrito em 4.2.6.

Fonte: elaborada pelo autor.

4.4 CONCLUSÃO

Os testes de prototipagem foram satisfatórios, uma vez que o dispositivo não apresentou falhas eletrônicas que comprometessem a recomendação de seu uso no monitoramento da temperatura da cama em sistemas *compost barn*, sendo que a mensuração do teor de umidade apresentou falhas eletrônicas significativas, exigindo estudos adicionais para sua validação.

Contudo, recomenda-se testes adicionais para a definição do melhor tempo de estabilização dos sensores DS18B20, inseridos em cama de *compost barn*, bem como para análise de desempenho de alimentação do sistema. Investigações adicionais são necessárias para explicar a variação de temperatura da cama, com a comparação dos diferentes métodos, tanto para a camada superficial quanto para as camadas internas, em virtude dos resultados significativamente estatísticos encontrados nas instalações *compost barn* avaliadas.

Quanto a viabilidade de uso dos sensores propostos com tecnologias IoT, no que se refere a comunicação entre a placas de desenvolvimento e a plataforma “ThingSpeak”, os testes apresentaram avanços satisfatórios.

O presente estudo concluiu que existe a possibilidade de as medições convencionais não estimarem valores próximos da condição real. Assim, sugere-se que as recomendações de dispositivos e métodos para coleta de dados térmicos em camas de *compost barn* sejam reavaliadas em futuras pesquisas.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, R. R. **Ambiência e bem-estar animal na produção intensiva de leite em sistemas Compost Barn fechados para a tipologia construtiva e clima do Brasil**. 2021. 158f. Tese (Doutorado em Engenharia agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021.
- ANDRIAMANDROSO, A. L. H. *et al.* Development of an open-source algorithm based on inertial measurement units (IMU) of a smartphone to detect cattle grass intake and ruminating behaviors. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 139, p. 126–137, 2017.
- AYAZ, M. *et al.* Internet-of-Things (IoT)-Based Smart Agriculture: Toward Making Fields Talk. **IEEE Access**, Piscataway, v. 7, p. 129551–129583, 2019.
- BEWLEY, J. *et al.* **Compost Bedded Pack Barn Design: Features and Management Considerations**. Lexington, 2012. Disponível em: <https://publications.ca.uky.edu/sites/publications.ca.uky.edu/files/ID206.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2022.
- BLACK, R. A. *et al.* Compost bedded pack dairy barn management, performance, and producer satisfaction. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 96, n. 12, p. 8060–8074, 2013.
- CODELUPPI, G. *et al.* LoRaFarM: A LoRaWAN-Based Smart Farming Modular IoT Architecture. **Sensors**, Basel, v. 20, n. 7, p. 2028, 2020.
- DALLAS. **DS18B20**. Seul, 2008. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/227472/DALLAS/DS18B20/216/1/DS18B20.html>. Acesso em 16 nov 2023.
- DAMASCENO, F. A. Processo de compostagem. *In*: DAMASCENO, F. A. **Compost barn: como alternativa para a pecuária leiteira**. Divinópolis: Adelante, 2020. p. 125-147.
- DAMASCENO, F. A.; FERRAZ, G. A. S. Materiais e manejo da cama. *In*: DAMASCENO, F. A. **Compost barn: como alternativa para a pecuária leiteira**. Divinópolis: Adelante, 2020. p. 93-123.
- DEAN, R. N. *et al.* A Capacitive Fringing Field Sensor Design for Moisture Measurement Based on Printed Circuit Board Technology. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Piscataway, v. 61, n. 4, p. 1105–1112, 2012.
- ECKELKAMP, E. A. *et al.* Sand bedded freestall and compost bedded pack effects on cow hygiene, locomotion, and mastitis indicators. **Livestock Science**, Amsterdam, v. 190, p. 48–57, 2016.
- FISHER, D. K.; GOULD, P. J. Open-Source Hardware Is a Low-Cost Alternative for Scientific Instrumentation and Research. **Modern Instrumentation**, Irvine, v. 01, n. 02, p. 8–20, 2012.
- FISHER, D. K. *et al.* Open-Source Wireless Cloud-Connected Agricultural Sensor Network. **Journal of Sensor and Actuator Networks**, Basel, v. 7, n. 4, p. 47, 2018.

JANNI, K. A. *et al.* Compost dairy barn layout and management recommendations. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 23, n. 1, p. 97-102, 2007.

LESO, L. *et al.* A survey on Italian compost dairy barns. **Journal of Agricultural Engineering**, Pavia, p. 203-207, 2013.

LIOHM. **Sensores ntc**: Sensores Injetados em TPE. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://cdn.media.liohm.com/uploads/2021/06/Datasheet-A75V004-Sensor-TPE-rev.-03-25.pdf>. Acesso em: 16 nov 2023.

LOKHORST, C. Practical experiences of IoT applications in the IoF2020 Dairy Trial. *In: Practical Precision Livestock Farming*. Wageningen Academic, 2022. p. 269-292.

PEIXOTO, M. S. M.; HERNÁNDEZ, R. O.; SARAZ, J. A. O. Pecuaria de Precisión PLF. *In: SARAZ, J. A.; HERNÁNDEZ, R. O.; DAMASCENO, F. A. Bioclimática Aplicada a la Producción Animal*. Medellín: Facultad de Ciencias Agrarias (UNAL), 2024. p.195-211.

PEIXOTO, M. S. M.; BARBOSA FILHO, J. A. D.; DAMASCENO, F. A. **Desenvolvimento de sensor de baixo custo para monitorar cama em compost barn**. Piracicaba, 2022. Disponível em: <https://www.milkpoint.com.br/artigos/producao-de-leite/sensores-para-uso-em-cama-de-compost-barn-sao-foco-de-pesquisa-230573/>. Acesso em: 4 nov. 2023.

RÖSLER, J. A. **Automação da ventilação em sistema compost barn**: implicações no comportamento e fisiologia térmica de vacas leiteiras. 2021. 96f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois vizinhos, 2021.

SARKAR, A. R.; DEY, D.; MUNSHI, S. Linearization of NTC thermistor characteristic using op-amp based inverting amplifier. **IEEE Sensors Journal**, Piscataway, v. 13, n. 12, p. 4621-4626, 2013.

SHENZHEN SHENGYUAN ELECTRONICS. **NTC thermistors and Temperature sensors**. Shenzhen, 2023. Disponível em: https://www.tinytronics.nl/product_files/000289_Data-Sheet-5X25-10K-3950-NTC.pdf. Acesso em: 16 nov 2023.

SILVA, M. V. DA *et al.* Spatial modeling via geostatistics and infrared thermography of the skin temperature of dairy cows in a compost barn system in the Brazilian semiarid region. **Smart Agricultural Technology**, Amsterdam, v. 3, p. 100078, 2023.

SILVA, M. V. DA *et al.* Spatial variability and exploratory inference of abiotic factors in barn compost confinement for cattle in the semiarid. **Journal of Thermal Biology**, Amsterdam, v. 94, p. 102782, 2020.

SIQUEIRA, I. *et al.* Characterization of the spatial variability of thermal comfort indices for dairy cows breeding in compost barn. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 8, p. 38001–38014, 2022.

VEGA, F. A. O. *et al.* Airflow profile study of a compost dairy barn using a lowcost 3D-printed anemometer network. **Agronomy Research**, Tartu, v. 18, p. 931-944, 2020.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo evidenciam o avanço do confinamento em *compost barn* no Ceará, apesar dos desafios estruturais e da necessidade de maior suporte técnico local. O crescimento do sistema na região reforça a importância de pesquisas futuras para otimizar as condições de manejo, especialmente no contexto climático do semiárido, promovendo maior eficiência produtiva e bem-estar animal.

Quanto a prototipagem explorada neste estudo, espera-se que seja possível a recomendação de uma nova técnica de mensuração de parâmetros térmicos da cama de bovinos alojados em instalações *compost barn*, com base em tecnologia IoT. Uma vez alcançados bons desempenhos com o protótipo, espera-se fornecer aos produtores melhorias para as tomadas de decisões para as fazendas.

Nesse sentido, com base nos testes da atual pesquisa são sugeridos projetos futuros, em paralelo, e que contemplem melhorias que não foram exploradas até o momento, a citar:

- a elaboração de um código capaz de informar alguns indicativos de estresse térmico, como ITU e entalpia no *display* do protótipo;
- o teste de módulos eletrônicos que incluam sensores de captação da temperatura por infravermelho, acoplados na base inferior do sistema embarcado, para a mensuração da temperatura superficial da cama.
- a utilização de hastes contendo células de carga para estimar o nível de compactação da cama;
- o desenvolvimento de um código capaz de gerar mapas de krigagem na própria *interface do usuário (UI)*.

Além disso, projetos de automatização de ventiladores podem ser elaborados a partir de comandos programados com base em parâmetros de qualidade da cama, assim como parâmetros ambientais, previamente obtidos pelos sensores do protótipo.

REFERÊNCIAS

- ABBA, S. *et al.* Design and Performance Evaluation of a Low-Cost Autonomous Sensor Interface for a Smart IoT-Based Irrigation Monitoring and Control System. **Sensors**, Basel, v. 19, n. 17, p. 3643, 2019.
- AGROLINK. **Guzolando reúne vantagens das raças Guzerá e Holandesa**. Fortaleza, 2010. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/noticias/guzolando-reune-vantagens-das-racas-guzera-e-holandesa_119569.html. Acesso em: 4 nov. 2023.
- AHMAD, Y. A. *et al.* On the Evaluation of DHT22 Temperature Sensor for IoT Application. In: 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AND COMMUNICATION ENGINEERING (ICCCE), 2021, Jeju Island. **Anais [...]**. Jeju Island: IEEE, 2021. p. 131-134.
- AHMED, N.; DE, D.; HUSSAIN, I. Internet of Things (IoT) for Smart Precision Agriculture and Farming in Rural Areas. **IEEE Internet of Things Journal**, Piscataway, v. 5, n. 6, p. 4890–4899, 2018.
- ALBINO, R. L. *et al.* Comparison of bacterial populations in bedding material, on teat ends, and in milk of cows housed in compost bedded pack barns. **Animal Production Science**, Melbourne, v. 58, n. 9, p. 1686–1691, 2017.
- ALBRIGHT, L. D. **Environment control for animals and plants**. St Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1990. 453 p.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ALVES, M. A. **Respostas termorreguladoras e ambiente térmico de bovinos leiteiros em regiões de clima tropical**. 2014. 77f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.
- AMAMOU, H. *et al.* Thermotolerance indicators related to production and physiological responses to heat stress of holstein cows. **Journal of thermal biology**, Amsterdam, v. 82, p. 90-98, 2019.
- ANDRADE, R. R. **Ambiência e bem-estar animal na produção intensiva de leite em sistemas Compost Barn fechados para a tipologia construtiva e clima do Brasil**. 2021. 158f. Tese (Doutorado em Engenharia agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021.
- ANDRADE, R. R. *et al.* Lighting and noise levels in compost dairy barns with natural and forced ventilation. **Agronomy Research**, Tartu, v. 18, p. 689–698, 2020.
- ANDRADE, R. R. *et al.* Spatial analysis of microclimatic variables in compost-bedded pack barn with evaporative tunnel cooling. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 94, n. 3, p. e20210226, 2022a.
- ANDRADE, R. R. *et al.* Spatial distribution of bed variables, animal welfare indicators, and

milk production in a closed compost-bedded pack barn with a negative tunnel ventilation system. **Journal of Thermal Biology**, Amsterdam, v. 105, p. 103111, 2022b.

ANDREW, R. C.; MALEKIAN, R.; BOGATINOSKA, D. C. IoT solutions for precision agriculture. In: 41ST INTERNATIONAL CONVENTION ON INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGY, ELECTRONICS AND MICROELECTRONICS (MIPRO), 2018, Opatija. **Anais [...]**. Opatija: IEEE, 2018. p. 0345-0349.

ANDRIAMANDROSO, A. L. H. *et al.* Development of an open-source algorithm based on inertial measurement units (IMU) of a smartphone to detect cattle grass intake and ruminating behaviors. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 139, p. 126–137, 2017.

ARCIDIACONO, C. *et al.* IoT device-based data acquisition system with on-board computation of variables for cow behaviour recognition. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 191, p. 106500, 2021.

AYAZ, M. *et al.* Internet-of-Things (IoT)-Based Smart Agriculture: Toward Making Fields Talk. **IEEE Access**, Piscataway, v. 7, p. 129551–129583, 2019.

AZEVEDO, D. M. M. R.; ALVES, A. A. **Bioclimatologia aplicada à produção de bovinos leiteiros nos trópicos**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2009. 83 p.

BAÊTA, F. C.; SOUZA, C. F. **Ambiência em edificações rurais: conforto animal**. Viçosa: UFV, 2010. 269 p.

BAO, J.; XIE, Q. Artificial intelligence in animal farming: A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 331, p. 129956, 2022.

BARBERG, A. E.; ENDRES, M. I.; JANNI, K. A. Compost Dairy Barns in Minnesota: a descriptive study. **Applied Engineering In Agriculture**, St. Joseph, v. 23, n. 2, p. 231-238, 2007.

BARBERG, A. E. *et al.* Performance and Welfare of Dairy Cows in an Alternative Housing System in Minnesota. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 90, n. 3, p. 1575–1583, 2007.

BARBOSA FILHO, J. A. D. *et al.* Avaliação Direta e Prática – Caracterização do ambiente interno de galpões de criação de frangos de corte utilizando tabelas práticas de entalpia. **Avicultura industrial**, Itu, v. 97, n. 4, p. 54-57, 2006.

BENAISSA, S. *et al.* On the use of on-cow accelerometers for the classification of behaviours in dairy barns. **Research in Veterinary Science**, Londres, v. 125, p. 425–433, 2019.

BERCKMANS, D. Precision livestock farming technologies for welfare management in intensive livestock systems. **Revue scientifique et technique**, Paris, v. 33, n. 1, p. 189–196, 2014.

BERMAN, A. *et al.* A comparison of THI indices leads to a sensible heat-based heat stress index for shaded cattle that aligns temperature and humidity stress. **International Journal of Biometeorology**, Berlim, v. 60, n. 10, p. 1453–1462, 2016.

BERNABUCCI, U. *et al.* The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 97, n. 1, p. 471–486, 2014.

BEWLEY, J. M.; ROBERTSON, L. M.; ECKELKAMP, E. A. A 100-Year Review: Lactating dairy cattle housing management. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 100, n. 12, p. 10418–10431, 2017.

BEWLEY, J. *et al.* **Compost Bedded Pack Barn Design: Features and Management Considerations**. Lexington, 2012. Disponível em: <https://publications.ca.uky.edu/sites/publications.ca.uky.edu/files/ID206.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2022.

BEWLEY, J.; TARABA, J. **Understanding Bedding materials for Compost Bedded Pack Barn**. Lexington, 2009. Disponível em: https://static1.squarespace.com/static/5a313bdc8c56a875ad7a89be/t/5a5e451671c10b3c9174ba0f/1516127510389/understanding_bedding_materials_for_compost_bedded_pack_barns.pdf. Acesso em: 13 jan. 2022

BEZEN, R.; EDAN, Y.; HALACHMI, I. Computer vision system for measuring individual cow feed intake using RGB-D camera and deep learning algorithms. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 172, p. 105345, 2020.

BIONDI, G. *et al.* IoTracker: A probabilistic event tracking approach for data-intensive IoT Smart Applications. **Internet of Things**, Amsterdam, v. 19, p. 100556, 2022.

BLACK, R. A. *et al.* Compost bedded pack dairy barn management, performance, and producer satisfaction. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 96, n. 12, p. 8060–8074, 2013.

BLACK, R. A. *et al.* The relationship between compost bedded pack performance, management, and bacterial counts. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 97, n. 5, p. 2669–2679, 2014.

BOHMANOVA, J.; MISZTAL, I.; COLE, J. B. Temperature-Humidity Indices as Indicators of Milk Production Losses due to Heat Stress. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 90, n. 4, p. 1947–1956, 2007.

BORCHERS, M. R. *et al.* Machine-learning-based calving prediction from activity, lying, and ruminating behaviors in dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 100, n. 7, p. 5664–5674, 2017.

BOUFFARD, V. *et al.* Effect of following recommendations for tiestall configuration on neck and leg lesions, lameness, cleanliness, and lying time in dairy cows. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 100, n. 4, p. 2935–2943, 2017.

BOVO, M. *et al.* A Smart Monitoring System for a Future Smarter Dairy Farming. In: IEEE INTERNATIONAL WORKSHOP ON METROLOGY FOR AGRICULTURE AND FORESTRY (METROAGRIFOR), 2020, [s.l.]. **Anais [...]**. [s.l.]: IEEE, 2020. p. 165-169.

BRAN, J. A. *et al.* Factors associated with lameness prevalence in lactating cows housed in

freestall and compost-bedded pack dairy farms in southern Brazil. **Preventive Veterinary Medicine**, Amsterdam, v. 172, p. 104773, 2019.

BREITENBACH, R. Economic Viability of Semi-Confined and Confined Milk Production Systems in Free-Stall and Compost Barn. **Food and Nutrition Sciences**, Irvine, v. 9, n. 5, p. 609–618, 2018.

BRITO, Eduardo Corrêa. **Produção intensiva de leite em compost barn: uma avaliação técnica e econômica sobre sua viabilidade**. 2016. 57f. Dissertação (Mestrado profissional) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

BRITTO, J. F. B. Considerações sobre psicrometria. **Revista SBCCv**, São Paulo, v. 45, p. 35-41, 2010.

CAJA, G.; CASTRO-COSTA, A.; KNIGHT, C. H. Engineering to support wellbeing of dairy animals. **Journal of Dairy Research**, Cambridge, v. 83, n. 2, p. 136–147, 2016.

CALDATO, E. M. R.; CALDATO, A.; MARCONDES, M. I.; ROTTA, P. P. **Manual técnico de construção e manejo de Compost Barn para vacas leiteiras**. Viçosa: Editora UFV, 2020. 35 p.

CAMARGO, E. C. G. Geoestatística: fundamentos e aplicações. *In*: CAMARA, G.; MEDEIROS, J. S. **Geoprocessamento em projetos ambientais**. São José Dos Campos: Inpe, 1998. p. 5-36.

CAMBARDELLA, C.A. *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1501–1511, 1994.

CHANGIRATH, S.; HALBACH, T. R.; DORFF, R. **Media and media mix evaluation for dairy barn compost bedding systems**. St. Paul, 2011. Disponível em: https://auri.org/wp-content/uploads/2011/08/Compost_Bedding_Report.pdf. Acesso em: 13 jan. 2022.

CHUNG, H. *et al.* Using implantable biosensors and wearable scanners to monitor dairy cattle's core body temperature in real-time. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 174, p. 105453, 2020.

CLEMENTE, N. L. S.; RAGAZZI, F. G. Efeitos do estresse térmico na proporção sexual da cria de gado leiteiro da raça Guzolando criado na região Noroeste Fluminense. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, São José dos Pinhais, v. 7, n. 1, p. 612–620, 2024.

CODELUPPI, G. *et al.* LoRaFarM: A LoRaWAN-Based Smart Farming Modular IoT Architecture. **Sensors**, Basel, v. 20, n. 7, p. 2028, 2020.

COOPER, M. D.; ARNEY, D. R.; PHILLIPS, C. J. C. Two- or Four-Hour Lying Deprivation on the Behavior of Lactating Dairy Cows. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 90, n. 3, p. 1149–1158, 2007.

COSTA, D. G.; DURAN-FAUNDEZ, C. Open-Source Electronics Platforms as Enabling Technologies for Smart Cities: Recent Developments and Perspectives. **Electronics**, Basel, v.

7, n. 12, p. 404, 2018.

COSTA, J. H. C. *et al.* Prevalence of lameness and leg lesions of lactating dairy cows housed in southern Brazil: Effects of housing systems. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 101, n. 3, p. 2395–2405, 2018.

COTTA, J. A. DE O. *et al.* Compostagem versus vermicompostagem: comparação das técnicas utilizando resíduos vegetais, esterco bovino e serragem. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 20, p. 65–78, 2015.

DALLAS. **DS18B20**. Seul, 2008. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/html-pdf/227472/DALLAS/DS18B20/216/1/DS18B20.html>. Acesso em 16 nov 2023.

DALCHIAVON, A. *et al.* Análise comparativa de custos e produtividade de leite em diferentes sistemas de produção. In: XXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE CUSTOS (ABC), 2017, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: ABC, 2017. p. 1-16.

DAMASCENO, F. A. **Compost bedded pack barns system and computational simulation of airflow through naturally ventilated reduced model**. 2012. 391f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

DAMASCENO, F. A. **Compost barn**: como alternativa para a pecuária leiteira. Divinópolis: Adelante, 2020. 396 p.

DAMASCENO, F. A. Processo de compostagem. In: DAMASCENO, F. A. **Compost barn**: como alternativa para a pecuária leiteira. Divinópolis: Adelante, 2020a. p. 125-147.

DAMASCENO, F. A. Sistemas de confinamento para bovinos leiteiros. In: DAMASCENO, F. A. **Compost barn**: como alternativa para a pecuária leiteira. Divinópolis: Adelante, 2020b. p. 19-31.

DAMASCENO, F. A.; BRANDÃO, L. F. Projeto de instalações compost barn. In: DAMASCENO, F. A. **Compost barn**: como alternativa para a pecuária leiteira. Divinópolis: Adelante, 2020. p. 53-92.

DAMASCENO, F. A.; FERRAZ, G. A. S. Materiais e manejo da cama. In: DAMASCENO, F. A. **Compost barn**: como alternativa para a pecuária leiteira. Divinópolis: Adelante, 2020. p. 93-123.

DAMASCENO, F. A. *et al.* Spatial distribution of thermal variables, acoustics and lighting in compost dairy barn with climate control system. **Agronomy Research**, Tartu, v. 17, n. 2, p. 385-395, 2019.

DAMASCENO, F. A. *et al.* Estimate of manure present in compost dairy barn systems for sizing of manure storage. **Agronomy research**, Tartu, v. 18, p. 1213-1219, 2020.

DAMASCENO, F. A. *et al.* Determination of Thermal, Chemical and Physical Properties of Bedding Materials for Compost Dairy Barns. **Animals**, Basel, v. 12, n. 18, p. 2450, 2022.

DAMASCENO, F. A.; OLIVEIRA, V. C. Instalações de Compost Barn no estado de Minas

Gerais. **Balde Branco**, São Paulo, p. 56 - 61, 2019.

DEAN, R. N. *et al.* A Capacitive Fringing Field Sensor Design for Moisture Measurement Based on Printed Circuit Board Technology. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, Piscataway, v. 61, n. 4, p. 1105–1112, 2012.

DE ANDRADE KOGIMA, P. *et al.* The Welfare of Dairy Cows in Pasture, Free Stall, and Compost Barn Management Systems in a Brazilian Subtropical Region. **Animals**, Basel, v. 12, n. 17, p. 2215, 2022.

DE BOER, H. C.; WIERSMA, M. Thermophilic composting of the pack can reduce nitrogen loss from compost-bedded dairy barns. **Biosystems Engineering**, Londres, v. 210, p. 20–32, 2021.

DE CASTRO JÚNIOR, S. L.; SILVA, I. J. O. The specific enthalpy of air as an indicator of heat stress in livestock animals. **International Journal of Biometeorology**, Berlim, v. 65, n. 2, p. 149–161, 2021.

DIAS BATISTA, P. H. *et al.* Thermal images to predict the thermal comfort index for Girolando heifers in the Brazilian semiarid region. **Livestock Science**, Amsterdam, v. 251, p. 104667, 2021.

DIMOV, D. *et al.* Effect of stall surface temperature and bedding type on comfort indices in dairy cows. **Sylwan**, Varsóvia, v. 161, n. 8, p. 2-16, 2017.

DRIEHUIS, F.; LUCAS-VAN DEN BOS, E.; WELLS-BENNIK, M. H. J (org.). **Sporen van thermofiele aërobe sporenvormers in compost en andere beddingmaterialen bij melkveebedrijven met een vrijloop- of ligenboxenstal**. Kernhemseweg: NIZO-Rapport E, 2014.

DUTTA, D. *et al.* MOOnitor: An IoT based multi-sensory intelligent device for cattle activity monitoring. **Sensors and Actuators A: Physical**, Amsterdam, v. 333, p. 113271, 2022.

DYER, R. M. *et al.* Objective Determination of Claw Pain and Its Relationship to Limb Locomotion Score in Dairy Cattle. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 90, n. 10, p. 4592–4602, 2007.

DŽERMEIKAITĖ, K.; BAČĖNINAITĖ, D.; ANTANAITIS, R. Innovations in Cattle Farming: Application of Innovative Technologies and Sensors in the Diagnosis of Diseases. **Animals**, Basel, v. 13, n. 5, p. 780, 2023.

EBERL, D. T. *et al.* Innovative bedding materials for compost bedded pack barns: enhancing dairy cow welfare and sustainable dairy farming. **Environment, Development and Sustainability**, Dordrecht, p. 1-25, 2024.

ECKELKAMP, E. A. *et al.* CASE STUDY: Characterization of lying behavior in dairy cows transitioning from a freestall barn with pasture access to a compost bedded pack barn without pasture access. **The Professional Animal Scientist**, Savoy, v. 30, n. 1, p. 109–113, 2014.

ECKELKAMP, E. A. *et al.* Sand bedded freestall and compost bedded pack effects on cow

hygiene, locomotion, and mastitis indicators. **Livestock Science**, Amsterdam, v. 190, p. 48–57, 2016a.

ECKELKAMP, E. A. *et al.* Understanding compost bedded pack barns: Interactions among environmental factors, bedding characteristics, and udder health. **Livestock Science**, Amsterdam, v. 190, p. 35–42, 2016b.

EMBRAPA. **ANUÁRIO Leite 2023: leite baixo carbono**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2023. 118 p.

EMBRAPA. **ANUÁRIO Leite 2024: avaliação genética multirracial**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2024. 137 p.

EMANUELSON, U. *et al.* Animal Health in Compost-Bedded Pack and Cubicle Dairy Barns in Six European Countries. **Animals**, Basel, v. 12, n. 3, p. 396, 2022.

ENDRES, M. I. Compost Bedded Pack Barns – Can They Work For You? **WCDS Advances in Dairy Technology**, Edmonton, v. 21, p. 271-279, 2009.

FAGUNDES, B. *et al.* Comparison of airflow homogeneity in Compost Dairy Barns with different ventilation systems using the CFD model. **Agronomy Research**, Tartu, v. 18, p. 788-796, 2020.

FAO; IFAD; UNICEF; WFP; WHO (org.). **The State of Food Security and Nutrition in the World 2024 – Financing to end hunger, food insecurity and malnutrition in all its forms**. Rome, 2024. Disponível em: <https://www.fao.org/publications/fao-flagship-publications/the-state-of-food-security-and-nutrition-in-the-world/en>. Acesso em: 14 jan. 2025.

FÁVERO, S. **Fatores associados à qualidade do leite, higiene animal e concentração bacteriana na cama de vacas leiteiras confinadas no sistema de compostagem**. 2015. 117f. Dissertação (Mestrado em Medicina Veterinária) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2015.

FÁVERO, S. *et al.* Factors associated with mastitis epidemiologic indexes, animal hygiene, and bulk milk bacterial concentrations in dairy herds housed on compost bedding. **Livestock Science**, Amsterdam, v. 181, p. 220–230, 2015.

FERNÁNDEZ, A. *et al.* Impacts of Compost Bedded Pack Barns on the Welfare and Comfort of Dairy Cows. **Animals**, Basel, v. 10, n. 3, p. 431, 2020.

FERRAZ, P. F. P. *et al.* Properties of conventional and alternative bedding materials for dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 103, n. 9, p. 8661–8674, 2020a.

FERRAZ, P. F. P. *et al.* Evaluation of the Physical Properties of Bedding Materials for Dairy Cattle Using Fuzzy Clustering Analysis. **Animals**, Basel, v. 10, n. 2, p. 351, 2020b.

FERREIRA, J. C. *et al.* Spatial variability of methane and carbon dioxide gases in a Compost-Bedded Pack Barn system. **Agronomy Research**, Tartu, v. 22, p. 110-126, 2024.

FERRAZ, P. F. P. *et al.* Evaluation of the Physical Properties of Bedding Materials for Dairy

Cattle Using Fuzzy Clustering Analysis. **Animals**, Basel, v. 10, n. 2, p. 351, 2020.

FISHER, D. K.; FLETCHER, R. S.; ANAPALLI, S. S. Python Software Integrates with Microcontrollers and Electronic Hardware to Ease Development for Open-Source Research and Scientific Applications. **Advances in Internet of Things**, Irvine, v. 11, n. 1, p. 42–58, 2021.

FISHER, D. K.; GOULD, P. J. Open-Source Hardware Is a Low-Cost Alternative for Scientific Instrumentation and Research. **Modern Instrumentation**, Irvine, v. 1, n. 2, p. 8–20, 2012.

FISHER, D. K.; KEBEDE, H. A low-cost microcontroller-based system to monitor crop temperature and water status. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 74, n. 1, p. 168–173, 2010.

FISHER, D. K. *et al.* Open-Source Wireless Cloud-Connected Agricultural Sensor Network. **Journal of Sensor and Actuator Networks**, Basel, v. 7, n. 4, p. 47, 2018.

FONSECA, M. *et al.* Epidemiology of mastitis and interactions of environmental factors on udder health in the compost barn system. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 75, p. 14–26, 2023.

GALAMA, P. J. **On farm development of bedded pack dairy barns in the Netherlands**. Report 707. Lelystad: Wageningen UR Livestock Research, 2014. 22 p.

GALAMA, P. J. *et al.* (org.). **Sustainability aspects of ten bedded pack dairy barns in The Netherlands**. Wageningen: Wageningen UR Livestock Research, 2015.

GALAMA, P. J. *et al.* 2014. **Vrijloopstallen voor melkvee in de praktijk**. Lelystad: Wageningen UR Livestock Research, 2014. 85 p.

GARCIA, P. R. **Galpão freestall com sistema de resfriamento evaporativo e ventilação cruzada: desempenho térmico, zootécnico e o nível de bem-estar animal**. 2017. 149f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo/ Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2017.

GERMANI, L. *et al.* An IoT Architecture for Continuous Livestock Monitoring Using LoRa LPWAN. **Electronics**, Basel, v. 8, n. 12, p. 1435, 2019.

GREENOUGH, P. R. **E-Book - Bovine Laminitis and Lameness: A Hands On Approach**. Filadélfia: Elsevier Health Sciences, 2007.

GUESINE, G. D.; SILVEIRA, R. M. F.; DA SILVA, I. J. O. Thermoregulatory, behavioral, and productive responses and physical integrity of primiparous and multiparous cows on compost barn in Brazilian tropical conditions. **International Journal of Biometeorology**, Berlin, v. 67, n. 6, p. 1003–1015, 2023.

GZAR, D. A.; MAHMOOD, A. M.; AL-ADILEE, M. K. A. Recent trends of smart agricultural systems based on Internet of Things technology: A survey. **Computers and Electrical Engineering**, Oxford, v. 104, p. 108453, 2022.

HABEEB, A. A. *et al.* The detrimental impact of high environmental temperature on physiological response, growth, milk production, and reproductive efficiency of ruminants. **Tropical Animal Health and Production**, Dordrecht, v. 55, n. 6, p. 388, 2023.

HAHN, G. L.; PARKHURST, A. M.; GAUGHAN, J. B. Cattle respiration rate as a function of ambient temperature. **ASAE Paper NMC97**, St. Joseph, v. 121, 1997.

HARRIS-BRIDGE, G. *et al.* The use of infrared thermography for detecting digital dermatitis in dairy cattle: What is the best measure of temperature and foot location to use? **The Veterinary Journal**, Londres, v. 237, p. 26–33, 2018.

HUBER, J. T. Alimentação de vacas de alta produção sob condições de estresse térmico. *In*: PEIXOTO, A. M.; MOURA, J. C.; FARIA, V. P. **Bovinocultura leiteira**. Piracicaba: FEALQ, 1990. p. 33-48.

IDRIS, M. R.; IRDAYANTI, M. N.; RAMLEE, M. A review of microcontroller design in future industrial revolution. **AIP Conference Proceedings**, Nova Iorque, v. 2750, n. 1, p. 050031, 2023.

INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais climatológicas do Brasil**. Brasília, 2022. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em: 22 jan. 2023.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa da Pecuária Municipal: produção da pecuária municipal 2022**. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/ppm/quadros/brasil/2023>. Acesso em: 07 nov. 2024.

JANNI, K. A. *et al.* Compost dairy barn layout and management recommendations. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 23, n. 1, p. 97-102, 2007.

JAVOID, M. *et al.* Enhancing smart farming through the applications of Agriculture 4.0 technologies. **International Journal of Intelligent Networks**, Beijing, v. 3, p. 150–164, 2022.

JL, B. *et al.* Modelling of heat stress in a robotic dairy farm. Part 1: Thermal comfort indices as the indicators of production loss. **Biosystems Engineering**, Londres, v. 199, p. 27-42, 2020.

JIANG, B. *et al.* Dairy cow lameness detection using a back curvature feature. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 194, p. 106729, 2022.

JORQUERA-CHAVEZ, M. *et al.* Modelling and validation of computer vision techniques to assess heart rate, eye temperature, ear-base temperature and respiration rate in cattle. **Animals**, Basel, v. 9, n. 12, p. 1089, 2019.

KADZERE, C. T. *et al.* Heat stress in lactating dairy cows: a review. **Livestock Production Science**, Amsterdam, v. 77, n. 1, p. 59–91, 2002.

- KAPLYA, V. I.; KAPLYA, E. V.; SILAEV, A. A. Identification of the Transient Response of a Capacitive Relative Humidity Sensor. **Measurement Techniques**, Nova Iorque, v. 62, n. 12, p. 1099–1105, 2020.
- KAPPES, R. *et al.* Cow's functional traits and physiological status and their relation with milk yield and milk quality in a compost bedded pack barn system. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 49, p. e20190213, 2020.
- KARUNATHILAKE, E. M. B. M. *et al.* The Path to Smart Farming: Innovations and Opportunities in Precision Agriculture. **Agriculture**, Basel, v. 13, n. 8, p. 1593, 2023.
- KERA, D. Science Artisans and Open Science Hardware. **Bulletin of Science, Technology & Society**, Thousand Oaks, v. 37, n. 2, p. 97–111, 2017.
- KHALIFEH, A. *et al.* Microcontroller Unit-Based Wireless Sensor Network Nodes: A Review. **Sensors**, Basel, v. 22, n. 22, p. 8937, 2022.
- KNIGHT, C. H. Review: Sensor techniques in ruminants: more than fitness trackers. **Animal**, Cambridge, v. 14, p. 187–195, 2020.
- KUIPERS, A. *et al.* A Composting Bedding System for Animals as a Contribution to the Circular Economy. **Processes**, Basel, v. 10, n. 3, p. 518, 2022.
- LAURINDO, G. M. *et al.* Thermal Environment and Behavior Analysis of Confined Cows in a Compost Barn. **Animals**, Basel, v. 12, n. 17, p. 2214, 2022.
- LEDGERWOOD, D. N.; WINCKLER, C.; TUCKER, C. B. Evaluation of data loggers, sampling intervals, and editing techniques for measuring the lying behavior of dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 93, n. 11, p. 5129–5139, 2010.
- LEE, I.; LEE, K. The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. **Business Horizons**, Bloomington, v. 58, n. 4, p. 431–440, 2015.
- LESO, L. *et al.* A survey on Italian compost dairy barns. **Journal of Agricultural Engineering**, Pavia, p. 203–207, 2013.
- LESO, L. *et al.* Invited review: Compost-bedded pack barns for dairy cows. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 103, n. 2, p. 1072–1099, 2020.
- LLONCH, L. *et al.* Effect of forest biomass as bedding material on compost-bedded pack performance, microbial content, and behavior of nonlactating dairy cows. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 103, n. 11, p. 10676–10688, 2020.
- LLONCH, L. *et al.* Agronomic Characteristics of the Compost-Bedded Pack Made with Forest Biomass or Sawdust. **Processes**, Basel, v. 9, n. 3, p. 546, 2021.
- LI, P. *et al.* A Comparison of Rice Husks and Peanut Shells as Bedding Materials on Dairy Cows' Preferences, Behaviour, and Health. **Animals**, Basel, v. 11, n. 7, p. 1887, 2021.

LIOHM. **Sensores ntc: Sensores Injetados em TPE**. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://cdn.media.liohm.com/uploads/2021/06/Datasheet-A75V004-Sensor-TPE-rev.-03-25.pdf>. Acesso em: 16 nov 2023.

LISEUNE, A. *et al.* Leveraging sequential information from multivariate behavioral sensor data to predict the moment of calving in dairy cattle using deep learning. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 191, p. 106566, 2021.

LOBECK, K. M. *et al.* Animal welfare in cross-ventilated, compost-bedded pack, and naturally ventilated dairy barns in the upper Midwest. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 94, n. 11, p. 5469–5479, 2011.

LOKHORST, C. Practical experiences of IoT applications in the IoF2020 Dairy Trial. *In: Practical Precision Livestock Farming*. Wageningen Academic, 2022. p. 269-292.

LÓPEZ, J. J.; LAMO, P. Rapid IoT Prototyping: A Visual Programming Tool and Hardware Solutions for LoRa-Based Devices. **Sensors**, Basel, v. 23, n. 17, p. 7511, 2023.

LOWE, G. *et al.* Infrared thermography—A non-invasive method of measuring respiration rate in calves. **Animals**, Basel, v. 9, n. 8, p. 535, 2019.

MADER, T. L.; DAVIS, M. S.; BROWN-BRANDL, T. Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 84, n. 3, p. 712–719, 2006.

MALÁ, G.; NOVÁK, P. 2021: Housing for unweaned dairy calves. *In: SZENCI, O.; MEE, J. F.; BLEUL, U.; TAVERNE, M. A. M. Bovine Prenatal, Perinatal and Neonatal Medicine*. Budapest: Hungarian Association for Buiatrics, 2021, p. 309-341.

MATHERON, G. **Treaty of applied geostatistics**. Paris: Editions Technip, 1962. 333 p.

MCDOWELL, R. E. **Improvement of livestock production in warm climates**. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1972. 711 p.

MELZER, N.; FORIS, B.; LANGBEIN, J. Validation of a real-time location system for zone assignment and neighbor detection in dairy cow groups. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 187, p. 106280, 2021.

MEUNIER, B. *et al.* Image analysis to refine measurements of dairy cow behaviour from a real-time location system. **Biosystems Engineering**, Londres, v. 173, p. 32–44, 2018.

MICHIE, C. *et al.* The Internet of Things enhancing animal welfare and farm operational efficiency. **Journal of Dairy Research**, Cambridge, v. 87, n. S1, p. 20–27, 2020.

MILANEZ, A. Y. *et al.* **Conectividade rural: situação atual e alternativas para superação da principal barreira à agricultura 4.0 no Brasil**. 2020. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/20180>. Acesso em: 28 nov 2022.

MISHRA, D. *et al.* Smart agriculture system using IoT. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED INFORMATICS FOR COMPUTING RESEARCH*, 2019,

Shimla. **Anais** [...]. New York: Association for Computing Machinery, 2019. p. 1-7.

MISHRA, S.; SHARMA, S. K. Advanced contribution of IoT in agricultural production for the development of smart livestock environments. **Internet of Things**, Amsterdam, v. 22, p. 100724, 2023.

MORRONE, S. *et al.* Industry 4.0 and Precision Livestock Farming (PLF): An up to Date Overview across Animal Productions. **Sensors**, Basel, v. 22, n. 12, p. 4319, 2022.

MOTA, V. *et al.* Feedlot for dairy cattle: history and characteristics. **PUBVET**, Maringá, v. 11, p. 433, 2017.

MOTA, V. C.; ANDRADE, E. T. DE; LEITE, D. F. Bed temperature in compost barns turned with rotary hoe and offset disc harrow. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 39, p. 280–287, 2019.

MÜLLER, P. B. **Bioclimatologia aplicada aos animais domésticos**. 2. ed. Porto Alegre: Sulina, 1982. 158 p.

NÃÃS, I. A. **Princípios de conforto térmico na produção animal**. São Paulo: Ícone, 1989. 183 p.

NAVARRO, J. *et al.* Real-time classification of cattle behavior using Wireless Sensor Networks. **Internet of Things**, Amsterdam, v. 25, p. 101008, 2024.

NOGARA, K. *et al.* Characterization and relationship between bulk tank milk composition and compostbedded variables from dairy barns in Rio Grande do Sul state, Brazil. **Turkish Journal of Veterinary & Animal Sciences**, Ankara, v. 45, n. 5, p. 890–900, 2021.

NRAES-54. NORTHEAST REGIONAL AGRICULTURAL ENGINEERING SERVICE. **On-Farm Composting Handbook**. Ithaca: Waste Management Publications, 1992.

OBANDO VEGA, F.A. *et al.* Airflow profile study of a compost dairy barn using a low-cost 3D-printed anemometer network. **Agronomy Research**, Tartu, v. 18, p. 931–944, 2020.

OBANDO VEGA, F. A. *et al.* CFD Study of a Tunnel-Ventilated Compost-Bedded Pack Barn Integrating an Evaporative Pad Cooling System. **Animals**, Basel, v. 12, n. 14, p. 1776, 2022.

O'BRIEN, M. D. *et al.* Metabolic adaptations to heat stress in growing cattle. **Domestic Animal Endocrinology**, Nova Iorque, v. 38, n. 2, p. 86–94, 2010.

OJHA, T.; MISRA, S.; RAGHUWANSHI, N. S. Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 118, p. 66–84, 2015.

OLIVEIRA, A. S.; ANDRADE, F. S. **Sistemas embarcados: hardware e o firmware na prática**. São Paulo: Érica, 2010.

OLIVEIRA, C. E. A. *et al.* Assessment of spatial variability of bedding variables in compost bedded pack barns with climate control system. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**,

Rio de Janeiro, v. 93, p. e20200384, 2021.

OLIVEIRA, C. E. A. *et al.* Geoestatística aplicada a distribuição espacial das condições térmicas e ruído em instalações Compost Barn com diferentes sistemas de ventilação. **Ciência et Praxis**, Passos, v. 9, n. 18, p. 41-48, 2016.

OLIVEIRA, C. E. A. *et al.* Geostatistics applied to evaluation of thermal conditions and noise in compost dairy barns with different ventilation systems. **Agronomy Research**, Tartu, v. 17, n. 3, p. 783–796, 2019a.

OLIVEIRA, C. E. A. *et al.* Mapping of air temperature and relative humidity in Compost-Bedded Pack Barn systems using a network of easily obtainable recording sensors. *In*: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION LIVESTOCK FARMING, 2024, Bologna. **Anais [...]**. Bologna: Labanti E Nanni Industrie Grafiche, 2024a. p. 1681-1688.

OLIVEIRA, C. E. A. *et al.* Mapping of the Thermal Microenvironment for Dairy Cows in an Open Compost-Bedded Pack Barn System with Positive-Pressure Ventilation. **Animals**, Basel, v. 12, n. 16, p. 2055, 2022.

OLIVEIRA, F. *et al.* Internet of Intelligent Things: A convergence of embedded systems, edge computing and machine learning. **Internet of Things**, Amsterdam, v. 26, p. 101153, 2024b.

OLIVEIRA, S. S. *et al.* Intellectual property and the Internet of Things: a bibliometric search. **International Business Management**, Dubai, v. 14, n. 4, p. 145-156, 2020

OLIVEIRA, V. C. *et al.* Compost-bedded pack barns in the state of Minas Gerais: architectural and technological characterization. **Agronomy Research**, Tartu, v. 17, n. 5, p. 2016-2028, 2019b.

OLIVEIRA, V. C. DE *et al.* Evaluation of ammonia sensor modules in a compost barn system during winter in Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 43, p. e20230062, 2023.

PAGANO, A. *et al.* A Survey on LoRa for Smart Agriculture: Current Trends and Future Perspectives. **IEEE Internet of Things Journal**, Piscataway, v. 10, n. 4, p. 3664–3679, 2023.

PANDORFI, H.; ALMEIDA, G. L. P.; GUISELINI, C. Zootecnia de precisão: princípios básicos e atualidades na suinocultura. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, Salvador, v. 13, p. 558–568, 2012.

PAPAKONSTANTINO, G. I. *et al.* Precision Livestock Farming Technology: Applications and Challenges of Animal Welfare and Climate Change. **Agriculture**, Basel, v. 14, n. 4, p. 620, 2024.

PARK, M. C.; HA, O. K. Development of effective cattle health monitoring system based on biosensors. **Advanced Science and Technology Letters**, Jeju, v. 117, p. 180-185, 2015.

PEARCE, J. M. Building Research Equipment with Free, Open-Source Hardware. **Science**, Washington, v. 337, n. 6100, p. 1303–1304, 2012.

PEIXOTO, M. S. M. **Termorregulação de bovinos leiteiros confinados em instalação**

compost barn em Região Semiárida. 2017. 78f. Dissertação (Mestrado em Engenharia agrícola) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

PEIXOTO, M. S. M. *et al.* Thermoregulatory behavior of dairy cows submitted to bedding temperature variations in Compost barn systems. **Biological Rhythm Research**, Abingdon, v. 52, n. 7, p. 1120–1129, 2019.

PEIXOTO, M. S. M.; HERNÁNDEZ, R. O.; SARAZ, J. A. O. Pecuaria de Precisión PLF. *In*: SARAZ, J. A.; HERNÁNDEZ, R. O.; DAMASCENO, F. A. **Bioclimática Aplicada a la Producción Animal**. Medellín: Facultad de Ciencias Agrarias (UNAL), 2024. p.195-211.

PEIXOTO, M. S. M.; BARBOSA FILHO, J. A. D.; DAMASCENO, F. A. **Desenvolvimento de sensor de baixo custo para monitorar cama em compost barn**. Piracicaba, 2022. Disponível em: <https://www.milkpoint.com.br/artigos/producao-de-leite/sensores-para-uso-em-cama-de-compost-barn-sao-foco-de-pesquisa-230573/>. Acesso em: 4 nov. 2023.

PEREIRA, J. C. C. **Fundamentos de bioclimatologia aplicados à produção animal**. Belo Horizonte: FEPMVZ, 2005. 195 p.

PILATTI, J. A. *et al.* Diurnal behaviors and herd characteristics of dairy cows housed in a compost-bedded pack barn system under hot and humid conditions. **Animal**, Cambridge, v. 13, n. 2, p. 399–406, 2019.

PILATTI, J. A.; VIEIRA, F. M. C. Environment, behavior and welfare aspects of dairy cows reared in compost bedded pack barns system. **Journal of Animal Behaviour and Biometeorology**, Mossoró, v. 5, n. 3, p. 97-105, 2017.

PINTO, S. *et al.* Influence of Barn Climate, Body Postures and Milk Yield on the Respiration Rate of Dairy Cows. **Annals of Animal Science**, Kraków, v. 19, n. 2, p. 469–481, 2019.

PIOVESAN, S. M.; OLIVEIRA, D. dos S. de. Fatores que influenciam a sanidade e conforto térmico de bovinos em sistemas compost barn. **Vivências**, Erechim, v. 16, n. 30, p. 247–258, 2019.

POLAT, M. Y. A Low-Cost Microcontroller Based Air Temperature, Humidity and Pressure Datalogger System Design for Agriculture. **Yuzuncu Yıl University Journal of Agricultural Sciences**, Van, v. 30, n. 1, p. 211–219, 2020.

PORTO, S. M. C. *et al.* A computer vision-based system for the automatic detection of lying behaviour of dairy cows in free-stall barns. **Biosystems Engineering**, Londres, v. 115, n. 2, p. 184–194, 2013.

PRATAMA, Y. P. *et al.* Designing of a smart collar for dairy cow behavior monitoring with application monitoring in microservices and internet of things-based systems. *In*: INTERNATIONAL ELECTRONICS SYMPOSIUM, 2019, Surabaya. **Anais [...]**. Surabaya: IEEE, 2019. p. 527-533.

QIAO, Y. *et al.* Intelligent perception for cattle monitoring: A review for cattle identification, body condition score evaluation, and weight estimation. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 185, p. 106143, 2021.

RADAVELLI, W. M. *et al.* Compost barns in Brazilian Subtropical region (Part 1): facility, barn management and herd characteristics. **Research, Society and Development**, Vargem Grande do Sul, v. 9, n. 8, p. e445985198–e445985198, 2020a.

RADAVELLI, W. M. *et al.* Compost barns in Brazilian Subtropical region (Part 2): classification through multivariate analysis. **Research, Society and Development**, Vargem Grande do Sul, v. 9, n. 8, p. e480985229–e480985229, 2020b.

RAO, T. K. S. *et al.* Improving comfort and welfare to mitigate stress in dairy animals-a review. **Wayamba Journal of Animal Science**, Lunuwila, v. 6, p. 1070-1084, 2014.

RAY, P. P. Internet of things for smart agriculture: Technologies, practices and future direction. **Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments**, Amsterdam, v. 9, n. 4, p. 395–420, 2017.

REN, Y. *et al.* An automated system for cattle reproductive management under the IoT framework. Part I: the e-Synch system and cow responses. **Frontiers in Animal Science**, Lausanne, v. 4, 2023.

RENN, N.; ONYANGO, J.; MCCORMICK, W. Digital Infrared Thermal Imaging and manual lameness scoring as a means for lameness detection in cattle. **Veterinary clinical Science**, Los Baños, v. 2, n. 2, 2014.

RIZAN, N. *et al.* Internet-of-Things for Smart Agriculture: Current Applications, Future Perspectives, and Limitations. **Agricultural Sciences**, Irvine, v. 15, n. 12, p. 1446–1475, 2024.

ROBERTSHAW, D. Regulação da temperatura e o ambiente térmico. *In*: REECE, W. O. (org.). **Dukes, fisiologia dos animais domésticos**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2006. p. 897-908.

RODRIGUES, V. C. *et al.* A correct enthalpy relationship as thermal comfort index for livestock. **International Journal of Biometeorology**, Berlim, v. 55, n. 3, p. 455–459, 2011.

RODRIGUES, M. S. *et al.* Compostagem: reciclagem de resíduos sólidos orgânicos. *In*: SPADOTTO, C. A.; RIBEIRO, W. **Gestão de Resíduos na agricultura e agroindústria**. FEPAF. Botucatu, 2006. p. 63-94.

RÖSLER, J. A. **Automação da ventilação em sistema compost barn**: implicações no comportamento e fisiologia térmica de vacas leiteiras. 2021. 96f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois vizinhos, 2021.

SAAR, M. *et al.* A machine vision system to predict individual cow feed intake of different feeds in a cowshed. **Animal**, Cambridge, v. 16, n. 1, p. 100432, 2022.

SADIQ, M. B. *et al.* Association between Lameness and Indicators of Dairy Cow Welfare Based on Locomotion Scoring, Body and Hock Condition, Leg Hygiene and Lying Behavior. **Animals**, Basel, v. 7, n. 11, p. 79, 2017.

SADOWSKI, S.; SPACHOS, P. Wireless technologies for smart agricultural monitoring using internet of things devices with energy harvesting capabilities. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 172, p. 105338, 2020.

SALAU, J.; KRIETER, J. Analysing the space-usage-pattern of a cow herd using video surveillance and automated motion detection. **Biosystems Engineering**, Londres, v. 197, p. 122–134, 2020.

SALFER, J. A.; SIEWERT, J. M.; ENDRES, M. I. Housing, management characteristics, and factors associated with lameness, hock lesion, and hygiene of lactating dairy cattle on Upper Midwest United States dairy farms using automatic milking systems. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 101, n. 9, p. 8586–8594, 2018.

SAMPAIO, L. C. *et al.* Carnauba (copernicia prunifera) straw as an alternative bedding material for dairy cows housed in a Compost barn system. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 73, p. 1361–1370, 2021.

SARKAR, A. R.; DEY, D.; MUNSHI, S. Linearization of NTC thermistor characteristic using op-amp based inverting amplifier. **IEEE Sensors Journal**, Piscataway, v. 13, n. 12, p. 4621–4626, 2013.

SARNIGHAUSEN, V. C. R. Estimation of thermal comfort indexes for production animals using multiple linear regression models. **Journal of Animal Behaviour and Biometeorology**, Mossoró, v. 7, n. 2, p. 73–77, 2019.

SCHILLINGS, J.; BENNETT, R.; ROSE, D. C. Exploring the Potential of Precision Livestock Farming Technologies to Help Address Farm Animal Welfare. **Frontiers in Animal Science**, Lausanne, v. 2, 2021.

SCHMELING, L. *et al.* Training and Validating a Machine Learning Model for the Sensor-Based Monitoring of Lying Behavior in Dairy Cows on Pasture and in the Barn. **Animals**, Basel, v. 11, n. 9, p. 2660, 2021.

SCHÜTZ, K. E. *et al.* Effects of 3 surfaces types on dairy cattle behavior, preference, and hygiene. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 102, n. 2, p. 1530–1541, 2019.

SCHWEINZER, V. *et al.* Evaluation of an ear-attached accelerometer for detecting estrus events in indoor housed dairy cows. **Theriogenology**, Nova Iorque, v. 130, p. 19–25, 2019.

SHANE, E. M.; ENDRES, M. I.; JANNI, K. A. Alternative bedding materials for compost bedded pack barns in Minnesota: a descriptive study. **Applied engineering in agriculture**, St. Joseph, v. 26, n. 3, p. 465–473, 2010.

SHENZHEN SHENGYUAN ELECTRONICS. **NTC thermistors and Temperature sensors**. Shenzhen, 2023. Disponível em: https://www.tinytronics.nl/product_files/000289_Data-Sheet-5X25-10K-3950-NTC.pdf. Acesso em: 16 nov 2023.

SHEPARD, R. W; MALONEY, S. K. A review of thermal stress in cattle. **Australian Veterinary Journal**, Richmond, v. 101, n. 11, p. 417–429, 2023.

SHI, Z. *et al.* Internet-of- Things Behavior Monitoring System Based on Wearable Inertial Sensors for Classifying Dairy Cattle Health Using Machine Learning. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN ENGINEERING AND TECHNOLOGY*, 2023, Kota Kinabalu. **Anais [...]**. Kota Kinabalu: IEEE, 2023. p. 277-282.

SILANIKOVE, N. Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants. **Livestock Production Science**, Amsterdam, v. 67, n. 1, p. 1–18, 2000.

SILVA, G.R.O. *et al.* Profitability analysis of compost barn and free stall milk-production systems: a comparison *Análise de rentabilidade de sistemas de produção de leite em compost barn e free stall: um comparativo*. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 40, n. 3, p. 1165-1184, 2019.

SILVA, M. V. DA *et al.* Spatial variability and exploratory inference of abiotic factors in barn compost confinement for cattle in the semiarid. **Journal of Thermal Biology**, Amsterdam, v. 94, p. 102782, 2020.

SILVA, M. V. DA *et al.* Spatial modeling via geostatistics and infrared thermography of the skin temperature of dairy cows in a compost barn system in the Brazilian semiarid region. **Smart Agricultural Technology**, Amsterdam, v. 3, p. 100078, 2023.

SILVA, K. H. E *et al.* Classification of compost barns system of milk producers from cooperatives in the mission region. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 7, n. 4, p. 36263–36282, 2021.

SILVA, R. G. **Introdução à bioclimatologia animal**. São Paulo: Nobel, 2000. 286 p.

SIQUEIRA, I. *et al.* Characterization of the spatial variability of thermal comfort indices for dairy cows breeding in compost barn. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 8, p. 38001–38014, 2022.

STRUTZKE, S. *et al.* Technical note: Development of a noninvasive respiration rate sensor for cattle. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 102, p.690–695, 2019.

SURESH, A.; SARATH, T. V. An IoT Solution for Cattle Health Monitoring. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, Bristol, v. 561, n. 1, p. 012106, 2019.

SYMEONAKI, E.; ARVANITIS, K.; PIROMALIS, D. A Context-Aware Middleware Cloud Approach for Integrating Precision Farming Facilities into the IoT toward Agriculture 4.0. **Applied Sciences**, Basel, v. 10, n. 3, p. 813, 2020.

TEMPLE, D. *et al.* **Heat stress and efficiency in dairy milk production: A practical approach**. The farm animal welfare fact sheet. Barcelona, 2015. Disponível em: <https://awecadvisors.org/wp-content/uploads/2023/08/fs12-en.pdf> Acesso em: 16 nov. 2024.

THOM, E. C. The Discomfort Index. **Weatherwise**, Philadelphia, v. 12, p. 57-61, 1959.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. **Sensores industriais: fundamentos e aplicações**. São Paulo: Érica, 2011.

- THORNTON, P. *et al.* Increases in extreme heat stress in domesticated livestock species during the twenty-first century. **Global Change Biology**, Oxford, v. 27, n. 22, p. 5762–5772, 2021.
- TSAKIRIDIS, N. L. *et al.* Versatile Internet of Things for Agriculture: An eXplainable AI Approach. *In*: MAGLOGIANNIS, I. (org.). **Artificial intelligence applications and innovations**. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 180-191.
- TZOUNIS, A. *et al.* Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. **Biosystems Engineering**, Londres, v. 164, p. 31–48, 2017.
- VALENTE, D. A. *et al.* Comparative analysis of performance by cows confined in different typologies of compost barns. **Agronomy Research**, Tartu, v. 18, p. 1547-1555, 2020.
- VAUCLIN, M. *et al.* The Use of Cokriging with Limited Field Soil Observations 1. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, n. 2, p. 175-184, 1983.
- VEGA, F. A. O. *et al.* Airflow profile study of a compost dairy barn using a lowcost 3D-printed anemometer network. **Agronomy Research**, Tartu, v. 18, p. 931-944, 2020.
- VEIT, H. M. *et al.* Bioacústica como método de avaliação do comportamento em pastejo de novilhas Girolando. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 70, n. 03, p. 873-880, 2018.
- VIAZZI, S. *et al.* Analysis of individual classification of lameness using automatic measurement of back posture in dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 96, n. 1, p. 257–266, 2013.
- VIEIRA, F. M. C. *et al.* Spatio-Thermal Variability and Behaviour as Bio-Thermal Indicators of Heat Stress in Dairy Cows in a Compost Barn: A Case Study. **Animals**, Basel, v. 11, n. 5, p. 1197, 2021.
- VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. *In*: NOVAIS, R. F *et al.* (org.). Tópicos em Ciência do Solo, 1. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p. 1–53, 2000.
- VIEIRA, S. R.; CARVALHO, J. R. P. D.; GONZÁLEZ, A. P. Jack knifing for semivariogram validation. **Bragantia**, Campinas, v. 69, p. 97-105, 2010.
- VIEIRA, S. R. *et al.* Detrending non stationary data for geostatistical applications. **Bragantia**, Campinas, v. 69, p. 01–08, 2010.
- WANG, Y. *et al.* Accurate detection of dairy cow mastitis with deep learning technology: a new and comprehensive detection method based on infrared thermal images. **Animal**, Cambridge, v. 16, n. 10, p. 100646, 2022.
- WANG, X. *et al.* A review and quantitative assessment of cattle-related thermal indices. **Journal of Thermal Biology**, Amsterdam, v. 77, p. 24–37, 2018.

WARNER, D. *et al.* A machine learning based decision aid for lameness in dairy herds using farm-based records. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 169, p. 105193, 2020.

WEST, J. W. Effects of Heat-Stress on Production in Dairy Cattle. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 86, n. 6, p. 2131–2144, 2003.

WILSON, A. M. *et al.* Development of a novel stall design for dairy cattle: Part II. The effect of minimal stall partitioning on lying behavior, rumination, stall cleanliness, and preference. **Animal**, Cambridge, v. 16, n. 1, p. 100428, 2022.

WOLFE, T. *et al.* Effects of alternative deep bedding options on dairy cow preference, lying behavior, cleanliness, and teat end contamination. **Journal of Dairy Science**, Savoy, v. 101, n. 1, p. 530–536, 2018.

YANG, C. *et al.* Udder skin surface temperature variation pre- and post- milking in dairy cows as determined by infrared thermography. **Journal of Dairy Research**, Cambridge, v. 85, n. 2, p. 201–203, 2018.

ZANETONI, H. H. R. *et al.* Caracterização da cama utilizada em sistemas Compost Barn: Characterization of the beds used in compost Barn Systems. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, São José dos Pinhais, v. 5, n. 4, p. 4014–4018, 2022.

ZANETONI, H. H. R. *et al.* Esp8266 module use in animal production: a review. **Revista Engenharia na Agricultura - REVENG**, Viçosa, v. 31, n. Contínua, p. 120–126, 2023.

ZILLNER, J. C. *et al.* Using walking speed for lameness detection in lactating dairy cows. **Livestock Science**, Amsterdam, v. 218, p. 119–123, 2018.

APÊNDICE A – FICHA APLICADA NAS ENTREVISTAS



Universidade Federal do Ceará
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
Tese (discente): Maria Simone Mendes Peixoto



Questionário de avaliação de instalações

Autorizo a divulgação, para fins científicos e acadêmicos, das informações fornecidas por mim durante a entrevista, com a garantia de que minha identidade será preservada e os dados utilizados de forma ética, conforme os objetivos da pesquisa.

(assinatura)

☐ Identificação:

Pesquisadores responsáveis: _____

Fazenda: _____ Proprietário: _____

Localização: _____ Data da visita: ____/____/____

Quem gerencia a propriedade: _____

Possui computador na propriedade: _____

☐ Implantação do Compost Barn:

Tipo de sistema utilizado antes do Compost Barn: _____

Porque mudou para o Compost Barn? _____

Quando mudou para o sistema? _____

Teve assistência técnica? _____

Instalação nova ou adaptada? _____

Grau de satisfação com o sistema: _____

Possui vacas em lactação fora do sistema? _____

Os animais têm acesso ao pasto? _____

☐ Custo de Implantação:

Estrutura: R\$ _____ Ventiladores: R\$ _____ Implemento: R\$ _____

☐ Animais:

Raça: _____ Quantidade: _____ Produção média: _____

Problemas de casco: _____ Mastite: _____

☐ **Manejo do rebanho:**

Alimentação do rebanho: _____ Atendimento zootécnico: _____
Atendimento veterinário: _____

☐ **Ordenha:**

Tipo de ordenha usada: _____
Número de ordenhas por dia: _____
Número de ordenhadores: _____

☐ **Informações arquitetônicas:**

Geral - Orientação da cumeeira: _____ Comprimento _____ Largura total: _____

Pé direito: _____ Altura da mureta: _____ Altura da abertura lateral: _____

Cama - Comprimento _____ Largura: _____ Material de cama: _____

Corredor de alimentação - Comprimento: _____ Largura: _____ Material do piso: _____

Forma de raspagem: _____ Frequência de raspagem: _____

Realiza resfriamento no corredor de alimentação? _____

Telhado - Material: _____ Cor: _____ Inclinação: _____

Largura do beiral: _____ Tipo de abertura da cumeeira: _____

Tipo de estrutura: _____

Bebedouro - Quantidade: _____ Tipo: _____ Comprimento: _____

Largura: _____ Altura: _____

Pilar - Material: _____ Forma: _____ Dimensão 1: _____ Dimensão 2: _____

☐ **Ventilação:**

Quantidade de ventiladores: _____ Potência: _____ Dimensão: _____

Marca: _____

☐ **Iluminação:**

Tipo de lâmpada: _____ Quantidade: _____ Potência: _____

☐ **Manejo da cama:**

Trator - Modelo: _____ Marca: _____ Potência: _____

Implemento - Tipo: _____ Modelo: _____

Frequência de revolvimento: _____

Possui lagoa de decantação de resíduos? _____

Possui biodigestor? _____

☐ **Resistência a penetração:**

Responsável pela coleta: _____

Nome da pasta salva: _____ N° de pontos: _____

☐ **Coleta de material de cama:**

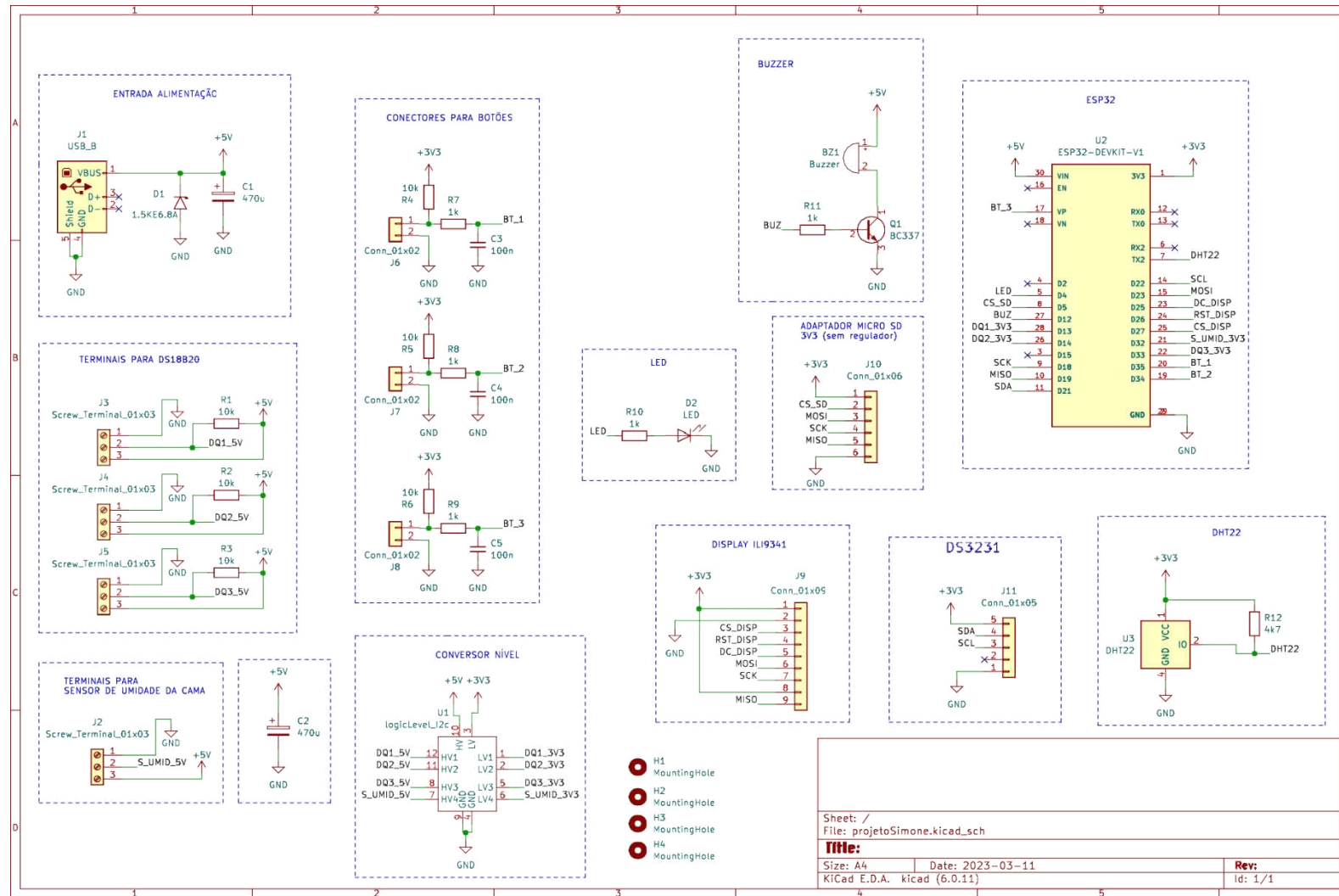
Responsáveis pela coleta: _____

Número de pontos coletados: _____

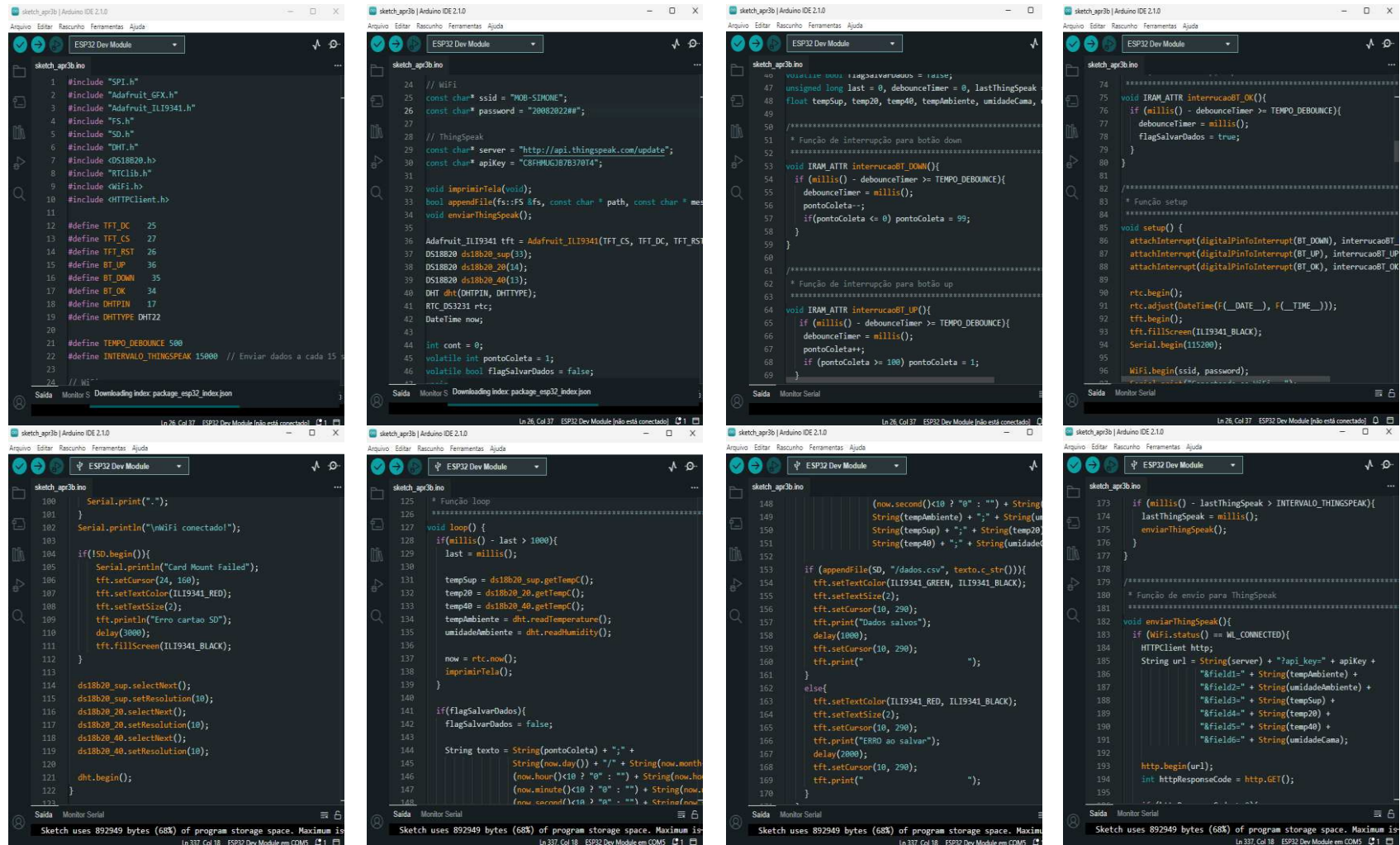
☐ **Observações:**

☐ **Croqui da instalação:**

APÊNDICE B – ESQUEMÁTICO COMPLETO DO PROJETO DA PLACA PCB



APÊNDICE C – FIRMWARE EXECUTADO NO DISPOSITIVO



```

196 if (httpResponseCode > 0){
197   Serial.println("Dados enviados ao ThingSpeak com sucesso");
198 } else {
199   Serial.print("Erro ao enviar: ");
200   Serial.println(httpResponseCode);
201 }
202 http.end();
203 } else {
204   Serial.println("Erro: Sem conexão Wifi");
205 }
206 }
207
208 //*****
209 * Função para atualizar o display
210 * Atualiza o display com data, hora e valores das variáveis
211 //*****
212 void imprimirTela(void){
213   // data e hora
214   tft.setCursor(10, 10);
215   tft.setTextColor(IL19341_RED, IL19341_BLACK);
216   tft.setTextSize(2);
217   tft.print(now.day(), DEC);
218   tft.print("/");

```

```

216 tft.setTextSize(2);
217 tft.print(now.day(), DEC);
218 tft.print("/");
219 tft.print(now.month(), DEC);
220 tft.print("/");
221 tft.print(now.year(), DEC);
222 tft.print(" ");
223 if(now.hour() < 10) tft.print("0");
224 tft.print(now.hour(), DEC);
225 tft.print(":");
226 if(now.minute() < 10) tft.print("0");
227 tft.print(now.minute(), DEC);
228 tft.print(":");
229 if(now.second() < 10) tft.print("0");
230 tft.print(now.second(), DEC);
231
232 // ponto
233 tft.setCursor(67, 45);
234 tft.setTextColor(IL19341_GREEN, IL19341_BLACK);
235 tft.setTextSize(2);
236 tft.print("Ponto: ");
237 tft.print(pontoColeta, DEC);
238 tft.print(" ");

```

```

239
240 // temperaturas e umidade da cama
241 tft.setCursor(100, 75);
242 tft.setTextColor(IL19341_CYAN, IL19341_BLACK);
243 tft.setTextSize(2);
244 tft.print("CAMA");
245
246 tft.setCursor(10, 100);
247 tft.setTextColor(IL19341_ORANGE, IL19341_BLACK);
248 tft.setTextSize(2);
249 tft.print("Tsup:");
250 tft.setCursor(70, 100);
251 tft.setTextColor(IL19341_WHITE, IL19341_BLACK);
252 tft.setTextSize(2);
253 tft.print(tempSup, 1);
254 tft.setCursor(122, 100);
255 tft.print(" C");
256
257 tft.setCursor(10, 125);
258 tft.setTextColor(IL19341_ORANGE, IL19341_BLACK);
259 tft.setTextSize(2);
260 tft.print("T20:");
261 tft.setCursor(70, 125);

```

```

262 tft.setTextColor(IL19341_WHITE, IL19341_BLACK);
263 tft.setTextSize(2);
264 tft.print(temp20, 1);
265 tft.setCursor(122, 125);
266 tft.print(" C");
267
268 tft.setCursor(10, 150);
269 tft.setTextColor(IL19341_ORANGE, IL19341_BLACK);
270 tft.setTextSize(2);
271 tft.print("T40:");
272 tft.setCursor(70, 150);
273 tft.setTextColor(IL19341_WHITE, IL19341_BLACK);
274 tft.setTextSize(2);
275 tft.print(temp40, 1);
276 tft.setCursor(122, 150);
277 tft.print(" C");
278
279 tft.setCursor(150, 125);
280 tft.setTextColor(IL19341_BLUE, IL19341_BLACK);
281 tft.setTextSize(2);
282 tft.print("Umidade");
283 tft.setCursor(160, 145);
284 tft.setTextColor(IL19341_WHITE, IL19341_BLACK);

```

```

284 tft.setTextColor(IL19341_WHITE, IL19341_BLACK);
285 tft.setTextSize(2);
286 tft.print(umidadeCama, 1);
287 tft.setCursor(215, 145);
288 tft.print(" %");
289
290 tft.setCursor(3, 175);
291 tft.setTextColor(IL19341_WHITE, IL19341_BLACK);
292 tft.setTextSize(2);
293 tft.print("-----");
294
295 // temperatura e umidade do ambiente
296 tft.setCursor(67, 200);
297 tft.setTextColor(IL19341_CYAN, IL19341_BLACK);
298 tft.setTextSize(2);
299 tft.print("AMBIENTE");
300
301 tft.setCursor(40, 225);
302 tft.setTextColor(IL19341_ORANGE, IL19341_BLACK);
303 tft.setTextSize(2);
304 tft.print("Temp");
305 tft.setCursor(20, 245);
306 tft.setTextColor(IL19341_WHITE, IL19341_BLACK);
307 tft.setTextSize(2);

```

```

307
308 tft.setTextSize(2);
309 tft.print(temperaturaAmbiente, 1);
310 tft.setCursor(82, 245);
311 tft.print(" C");
312
313 tft.setCursor(125, 225);
314 tft.setTextColor(IL19341_BLUE, IL19341_BLACK);
315 tft.setTextSize(2);
316 tft.print("Umidade");
317 tft.setCursor(135, 245);
318 tft.setTextColor(IL19341_WHITE, IL19341_BLACK);
319 tft.setTextSize(2);
320 tft.print(umidadeAmbiente, 1);
321 tft.setCursor(190, 245);
322 tft.print(" %");
323
324 tft.setCursor(3, 275);
325 tft.setTextColor(IL19341_WHITE, IL19341_BLACK);
326 tft.setTextSize(2);
327 tft.print("-----");
328
329

```

```

318 tft.setTextSize(2);
319 tft.print(umidadeAmbiente, 1);
320 tft.setCursor(190, 245);
321 tft.print(" %");
322
323 tft.setCursor(3, 275);
324 tft.setTextColor(IL19341_WHITE, IL19341_BLACK);
325 tft.setTextSize(2);
326 tft.print("-----");
327
328 }
329
330 //*****
331 * Função para salvar no cartão SD
332 //*****
333 bool appendFile(fs::FS &fs, const char * path, const char * data){
334   File file = fs.open(path, FILE_APPEND);
335   if(!file) return 0;
336   if(!file.print(message)) return 0;
337   file.close();
338   return 1;
339 }
340

```