

Victor Crespo de Oliveira
Ilda de Fátima Ferreira Tinôco
Leonardo França da Silva
Cristiano Márcio Alves de Souza
José Rafael Franco
Silvana Ferreira Bicalho
Larissa Porto Ale
Cássio Furtado Lima

MONITORAMENTO MICROAMBIENTAL DE INSTALAÇÕES PARA PRODUÇÃO INTENSIVA DE LEITE COM USO DE SENSORES ACESSÍVEIS



2025

Victor Crespo de Oliveira
Ilda de Fátima Ferreira Tinôco
Leonardo França da Silva
Cristiano Márcio Alves de Souza
José Rafael Franco
Silvana Ferreira Bicalho
Larissa Porto Ale
Cássio Furtado Lima

**MONITORAMENTO MICROAMBIENTAL DE
INSTALAÇÕES PARA PRODUÇÃO INTENSIVA
DE LEITE COM USO DE SENSORES ACESSÍVEIS**

EDITORA PASCAL

2025

Editor Chefe: Prof. Dr. Patrício Moreira de Araújo Filho

Edição e Diagramação: Eduardo Mendonça Pinheiro

Edição de Arte: Marcos Clyver dos Santos Oliveira

Bibliotecária: Rayssa Cristhália Viana da Silva – CRB-13/904

Revisão: Victor Crespo de Oliveira

Conselho Editorial

Dr. William de Jesus Ericeira Mochel Filho

Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua

Dr^a Elba Pereira Chaves

Dr^a Thais Roseli Corrêa

Dr^a Gerbeli de Mattos Salgado Mochel

Dr^a Giselle Cutrim de Oliveira Santos

Dr^a Sandra Imaculada Moreira Neto

Dr^a Anna Christina Sanazario de Oliveira

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

O48m

Oliveira, Victor Crespo de; Tinôco, Ilda de Fátima Ferreira; França da Silva, Leonardo; Souza, Cristiano Márcio Alves de; Franco, José Rafael; Bicalho, Silvana Ferreira; Ale, Larissa Porto; Lima, Cássio Furtado

Monitoramento microambiental de instalações para produção intensiva de leite com uso de sensores acessíveis / Victor Crespo de Oliveira *et al.* — São Luís: Editora Pascal, 2025.

52 f. : il.:

Formato: PDF

Modo de acesso: World Wide Web

ISBN: 978-65-6068-130-9

D.O.I.: 10.29327/5505834

1. Unidade de Produção de Leite. 2. Monitoramento. 3. Sensores. 4. Ambiente Térmico. 5. Concentração de Amônia. I. Oliveira, Víctor Crespo de. II. Tinôco, Ilda de Fátima Ferreira. III. França da Silva, Leonardo. IV. Souza, Cristiano Márcio Alves de. V. Franco, José Rafael. VI. Bicalho, Silvana Ferreira. VII. Ale, Larissa Porto. VIII. Lima, Cássio Furtado. IX. Título.

CDU: 614.31

Qualquer parte deste livro poderá ser reproduzida ou transmitida, sejam quais forem os meios empregados: eletrônicos, mecânicos, fotográficos, gravação ou quaisquer outros, desde que seja citado o autor.

PREFÁCIO

A pecuária de leite intensiva desempenha papel fundamental na oferta global de alimentos, especialmente diante do crescimento populacional e das crescentes exigências por qualidade, rastreabilidade e sustentabilidade. No entanto, a eficiência desse setor está atrelada à gestão do microambiente de produção, onde fatores como qualidade do ar e conforto térmico dos animais exercem influência determinante sobre a produtividade e o bem-estar dos rebanhos.

É nesse contexto que a presente obra “*Monitoramento Microambiental de Instalações para Produção Intensiva de Leite com Uso de Sensores Acessíveis*” se insere, trazendo uma abordagem sobre o monitoramento microambiental em Unidades de Produção de Leite por meio do uso de sensores que se destacam tanto pela acurácia, confiabilidade e viabilidade econômica, quanto pela facilidade de implementação e operação. A aplicação dessas tecnologias viabiliza a coleta de dados seguros e em tempo real, permitindo controle mais eficaz das condições ambientais, melhoria na tomada de decisão quanto a uso de diferentes sistemas de condicionamento ambiente e, conseqüentemente, assegura um sistema produtivo mais sustentável e eficiente.

Ao longo do livro, o leitor encontrará uma análise sobre os principais sensores utilizados para medir variáveis como temperatura e umidade relativa do ar, velocidade do ar, temperatura da cama e concentração de amônia. A obra também discute os aspectos econômicos da implementação desses dispositivos, destacando como sua integração com microcontroladores e plataformas de automação pode contribuir para melhoria do microambiente de instalações leiteiras.

Este trabalho se destaca pelo compromisso com a acessibilidade tecnológica, demonstrando que é possível desenvolver sistemas de monitoramento confiáveis e economicamente acessíveis para produtores e pesquisadores. Dessa forma, espera-se que este livro auxilie no desenvolvimento e na difusão de soluções acessíveis e eficazes para o monitoramento microambiental de instalações leiteiras, promovendo avanços significativos na produção sustentável e no bem-estar dos animais.

Boa leitura!

AUTORES



Victor Crespo de Oliveira

Engenheiro Agrícola pela Universidade Federal de Lavras, especialista em Análise de Dados e Engenharia de Segurança do Trabalho e, mestre em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa. Atualmente é docente do Centro Universitário Eduvale (UnEduvale) e pesquisador de doutorado em Engenharia Agrícola na Universidade Estadual Paulista (UNESP), atuando na integração de novas tecnologias para resolução de problemas do campo. Trabalha com processamento de imagem e áudio, estatística multivariada e modelos de inteligência artificial. Possui experiência internacional no desenvolvimento de projetos científicos e atua diretamente no

desenvolvimento de pesquisas na área de Construções Rurais e Ambiente e Uso de Inteligência Artificial na Agricultura.

Ilda de Fátima Ferreira Tinôco

Possui Graduação em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras (1980), Mestrado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (1988), Doutorado em Ciência Animal pela Universidade Federal de Minas Gerais (1996) e Pós-Doutorado na Iowa State University (2002), University of Kentucky - EUA (2002-2003), Universidade de Évora PT (2014); Università degli Studi di Firenze (2014-2015). Professora universitária a 41 anos, atualmente é Professora Titular Voluntária da Universidade Federal de Viçosa, Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq e Membro do Conselho Técnico Científico da AVIMIG. Foi Coordenadora brasileira, por 10 anos e pela UFV, do Convênio CAPES/FIPSE - Brasil-EUA com as University of Kentucky, Iowa State University e University of Illinois e Purdue University. Foi Coordenadora Técnico-Científico dos Convênios Guarda-Chuva entre a UFV e Universidade de Évora- Portugal, Universidade Nacional da Colômbia, Universidade CES-Colômbia, Iowa State University, University of Kentucky e Università degli Studi di Firenze - Itália. Foi fundadora, Coordenadora Geral e atualmente é membro da Comissão Coordenadora do AMBIAGRO (Núcleo de Pesquisa em Ambiente e Engenharia de Sistemas Agroindustriais). Foi presidente da Comissão Internacional do DEA/UFV e membro da Comissão de Pós Graduação em Engenharia Agrícola-UFV. Já orientou e co-orientou cerca de 110 teses de doutorado e/ou dissertações de mestrado em Engenharia Agrícola. Tem experiência na Área de Engenharia Agrícola com ênfase em Engenharia de Construções Rurais e Ambiente, atuando principalmente nos seguintes temas: conforto térmico e sistemas de acondicionamento ambiente; ambiência, instalações e sustentabilidade na produção animal, qualidade do ar, bem-estar animal, resfriamento adiabático evaporativo e outros..



AUTORES



Leonardo França da Silva

Engenheiro Agrônomo (UFMG), Matemático e Engenheiro de Segurança do Trabalho, especialista em Engenharia de Produção. Mestre em Agronomia (UNESP), Doutor em Engenharia Agrícola (UFV) e Pós-Doutorando em Engenharia Agrícola na UFGD, com foco em modelagem matemática em sistemas de produção agrícola. Professor universitário na graduação e pós-graduação, agente de extensão (Senar) e field scientist. Pesquisador colaborador em grupos do CNPq, incluindo AMBIAGRO-UFV, UFGD e LABOERGO-UFV. Atuou como professor na UFV – Campus Florestal, lecionando Desenho Técnico e Construções Rurais. Possui experiência em Engenharia Agrícola, Construções Rurais, Desenho Técnico e Assistido por Computador, Sustentabilidade em sistemas de produção, Segurança do Trabalho, Ergonomia, Agricultura Digital e Sequestro de Carbono. Atualmente, é professor colaborador na UFGD, lecionando Construções Rurais e Ambiência na graduação e Engenharia de Segurança do Trabalho na pós-graduação, além de coorientar mestrado e doutorados na UFGD, UNESP e UFRGS.

Cristiano Márcio Alves de Souza

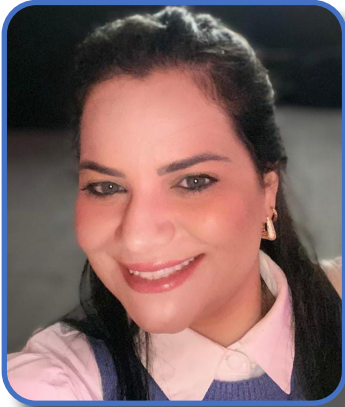
Professor Titular da Universidade Federal da Grande Dourados. Engenheiro Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (1999) e Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (2004). Orientador nos Programas de Pós-graduação em Engenharia Agrícola (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) e Agronomia (Doutorado em Produção Vegetal) da UFGD. Áreas pesquisadas: projeto de máquinas agrícolas e pós-colheita de produtos agrícolas - atuando nos seguintes temas: agricultura digital e de precisão, colheita, semeadura, compactação do solo, tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas, secagem e aeração de grãos, modelagem, simulação e otimização de sistemas agrícolas, energia na agricultura.



José Rafael Franco

Tecnólogo em Análise e Desenvolvimento de Sistemas pela Faculdade de Tecnologia de Botucatu (2017). Especialização em Banco de Dados na UNICESUMAR em Botucatu (2019), Mestrado em Irrigação e Drenagem na Faculdade de Ciências Agrônomicas (UNESP) de Botucatu (2021). Graduando em Ciência de Dados pela Faculdade Univesp. Doutorado em Engenharia Agrícola na Faculdade de Ciências Agrônomicas (UNESP) de Botucatu. Possui experiências nas áreas de Telecomunicações, Redes de Computadores, Desenvolvimento de Softwares, Banco de Dados, Agrometeorologia, Instrumentos Meteorológica, Microcontroladores e Aplicações de baixo custo no meio agrícola. Professor no Centro universitário Uneduvale desde 2023.

AUTORES



Silvana Ferreira Bicalho

Possui Graduação em Engenharia Ambiental, pela Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Pós-Graduada em Engenharia de Segurança do Trabalho, pela Faculdade de Tecnologia e Ciências, Vitória da Conquista-BA, Mestre em Ciências Ambientais, na Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga-BA e Doutorado em Produção Vegetal na Universidade Federal de Minas Gerais. Atualmente é docente da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, atuando nos cursos de graduação em Engenharia de Alimentos e Engenharia Ambiental.

Larissa Porto Ale

Possui graduação em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal da Grande Dourados (2022). Fez mestrado em Mecanização Agrícola - Universidade Federal da Grande Dourados (2023). Tem experiência na área de Mecanização Agrícola e Secagem de Grãos, atuando principalmente nos seguintes temas: colheita, semeadura, agricultura de precisão, compactação do solo, modelagem matemática e machine learning.



Cássio Furtado Lima



Atua como professor efetivo do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA), campus Ananindeua, onde exerceu a chefia do Setor de Pesquisa, Pós-graduação e Inovação. Doutorando em Ciência Florestal pela Universidade Federal de Viçosa, campus Viçosa (MG), possui Mestrado em Ciência Florestal e Engenheiro Florestal pela mesma instituição. Atuou como professor no IFPA campus Óbidos, onde coordenou o curso Técnico em Florestas. Possui experiência em cargos de gestão e atividades de ensino, pesquisa, extensão e inovação. Coordena trabalhos e projetos na

área de Engenharia de Segurança do Trabalho Florestal, Colheita e Logística Florestal, Recursos Florestais e Ergonomia.

RESUMO

A demanda por alimentos de origem animal cresce juntamente com o interesse da população em conhecer tanto a origem dos produtos consumidos, quanto os impactos advindos do processo de produção. Dessa forma, para que as unidades de produção de leite (UPL), sejam aptas para responder ao aumento de demanda, é necessária a adesão de novas tecnologias capazes de fornecer informações estratégicas para o mapeamento das condições de produção. Notadamente, o microclima de uma UPL apresenta grande impacto sobre a eficiência do sistema produtivo, pois pode afetar diretamente a saúde e bem-estar do rebanho alojado e, conseqüentemente, sobre o desempenho geral da atividade. Assim, objetivou-se, com este trabalho, descrever os sistemas intensivos de produção de leite mais praticados no Brasil e no mundo e fundamentar o desenvolvimento de plataformas de baixo custo para o monitoramento do ambiente térmico-gasoso aplicáveis a bovinocultura leiteira, em particular, bem como também em unidades destinadas à produção animal em geral, destacando formas de uso, comportamento e funcionamento de sensores disponíveis para tal fim. Serão apresentados os sensores relacionados com a medição das seguintes variáveis: velocidade do ar, temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar, temperatura e umidade da cama e concentração de amônia. Mediante as informações apresentadas, verificou-se que é possível desenvolver um sistema de monitoramento preciso, robusto, de custo acessível e fácil operacionalidade e aplicabilidade à bovinocultura leiteira e às unidades de produção animal em geral, haja vista que, no mercado, existem excelentes modelos de sensores disponíveis e que podem ser aplicados às necessidades de controle e monitoramento de uma UPL.

Palavras-chave: Unidade de Produção de Leite. Monitoramento. Sensores. Ambiente Térmico. Concentração de Amônia.

ABSTRACT

The demand for animal-based foods is growing, along with public interest in knowing both the origin of consumed products and the impacts of the production process. Thus, for dairy production units (DPUs) to meet this increasing demand, it is essential to adopt new technologies that provide strategic information for mapping production conditions. Notably, the microclimate of a DPU has a significant impact on the efficiency of the production system, as it can directly affect the health and well-being of the housed herd. This study aims to support the development of low-cost platforms for monitoring the thermal-gaseous environment in animal production units, highlighting the use, behavior, and operation of sensors available for this purpose. The sensors presented here are related to measuring the following variables: air velocity, dry-bulb temperature, relative humidity, bedding temperature and humidity, and ammonia concentration. Based on the information provided, it was found that it is possible to develop a precise, robust, cost-effective, and easy-to-operate monitoring system, given the availability of excellent sensor models on the market that can be applied to the control and monitoring needs of a DPU.

Keywords: Dairy Production Unit. Monitoring. Sensors. Thermal Environment. Ammonia Concentration.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	11
CAPÍTULO 1	13
INSTALAÇÕES DE CONFINAMENTO DE GADO DE LEITE	
<i>Sistema Tie Stall</i>	14
<i>Sistema Loose Housing</i>	16
<i>Sistema Free Stall</i>	17
<i>Sistema Compost Barn</i>	18
CAPÍTULO 2	20
SENSORES DE CUSTO REDUZIDO PARA MONITORAMENTO DAS CONDIÇÕES AMBIEN- TAIS EM INSTALAÇÕES PARA PRODUÇÃO ANIMAL	
Microcontroladores	21
<i>Microcontroladores da família ESP</i>	22
Sensor para determinação da velocidade do ar (anemômetros)	23
Sensor para determinação de temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar	25
Sensores para determinação da temperatura da cama	27
Sensores para determinação da umidade da cama	29
Sensores para determinação da concentração de amônia	31
<i>Sensores espectrométricos</i>	31
<i>Sensores eletroquímicos</i>	32
<i>Características do módulo sensor MQ137</i>	33
<i>Características do sensor Figaro FECS44-100</i>	36
<i>Características do módulo sensor Mixsen MIX2801</i>	37
CAPÍTULO 3	39
AMOSTRAGEM DE GASES EM INSTALAÇÕES DE CONFINAMENTO DE GADO DE LEITE	
CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
REFERÊNCIAS	45

*Monitoramento microambiental de instalações para produção
intensiva de leite com uso de sensores acessíveis*

INTRODUÇÃO



A demanda por alimentos de origem animal no mundo cresce diariamente, de modo que se projeta um aumento de 70% deste valor entre os anos de 2010 e 2050 (SEARCHINGER *et al.*, 2018). Este fato é esperado devido à expectativa de que haverá mais de 9,7 bilhões de habitantes no planeta em 2050, o que reflete um aumento de 2,0 bilhões de pessoas, quando comparado ao ano de 2019 (ONU, 2019). Concomitantemente a este aumento de demanda, os consumidores têm se tornado cada mais preocupados com os processos de concepção dos produtos e, assim, progressivamente tem sido exigido da cadeia produtiva não apenas a qualidade do bem produzido, mas também o bem-estar e a saúde animal, a sustentabilidade do sistema, a mensuração dos impactos ambientais e a ética nas relações de trabalho (ELLISON *et al.*, 2017; OCHS *et al.*, 2018). Ao seguir as exigências dos consumidores, os produtos agregam valor, uma vez que o mercado está disposto a pagar mais por eles (BASTOUNIS *et al.*, 2021; RONDONI; GRASSO, 2021).

Frente a este cenário, os sistemas produtivos possuem estreita faixa de operação, quando se trata da geração de lucro. Por este motivo, os cuidados com a gestão e o manejo do sistema produtivo e dos animais são primordiais para o desenvolvimento econômico sustentável da unidade de produção animal (UPA). Em virtude destas condições, o caminho para inserção de novas tecnologias já está traçado e ganha notoriedade à medida que a necessidade de controlar, de monitorar e de tomar decisões apuradas cresce no sistema produtivo, o que deriva da busca por melhoria global dos resultados (FOURNEL *et al.*, 2017; DAMASCENO, 2020).

Dessa forma, a preocupação em monitorar e controlar variáveis inerentes ao processo produtivo é categórica. Dentre estas variáveis, as relacionadas ao microclima da UPA são essenciais na busca por melhores resultados produtivos. Dado que, o microclima de uma instalação é composto por um conjunto de variáveis (umidade relativa, temperatura e velocidade do ar e gases, tais como: amônia, metano e dióxido de carbono) que influem diretamente no bem-estar, conforto e desenvolvimento dos animais, assim como na saúde e segurança dos colaboradores. (BAÊTA; SOUZA, 2010; DAMASCENO, 2020).

No entanto, mesmo cientes do papel do microclima sobre a eficiência do sistema, as unidades de produção raramente o monitoram e dispõem de dados atualizados sobre ele. Todavia, a disponibilidade destes dados tem grande relevância para o manejo do sistema, pois podem fornecer base sólida para o mapeamento das condições ambientais a que os animais estão expostos e, assim, possibilitar o diagnóstico rápido e a solução precisa quando há condições estressoras aos animais e danosas ao manejo da instalação. Para tanto, a aquisição de dados demanda o desenvolvimento de sistemas tecnológicos que são compostos por sensores, microcontroladores e meios de difusão das informações (FOURNEL *et al.*, 2017; KOLTES *et al.*, 2019; DAMASCENO, 2020; DENIZ *et al.*, 2021).

Desta maneira, fica evidente a relevância dos sistemas de aquisição de dados para ampliar a oferta de produtos de origem animal. Assim, para que estes sistemas sejam difundidos é necessário que apresentem precisão em suas medidas, sejam acessíveis financeiramente e de fácil manuseio e construção. Do exposto e com base nos argumentos mencionados, objetivou-se com este trabalho fundamentar o desenvolvimento de plataformas de baixo custo para o monitoramento do ambiente térmico-gasoso em unidades destinadas à produção animal, de uma maneira geral, e à bovinocultura leiteira intensiva, em particular, destacando formas de uso, comportamento e funcionamento de sensores disponíveis para tal fim.

Monitoramento microambiental de instalações para produção
intensiva de leite com uso de sensores acessíveis

CAPÍTULO 1

INSTALAÇÕES DE
CONFINAMENTO DE GADO DE
LEITE



O confinamento de bovinos leiteiros em sistemas intensivos tem como principal objetivo minimizar os impactos ambientais sobre os animais, proporcionando proteção contra condições climáticas adversas, especialmente à altas incidências de radiação solar. Para isso, são utilizadas instalações projetadas de maneira a oferecer um ambiente confortável, garantindo o bem-estar dos animais e favorecendo sua produtividade. Além disso, esse modelo produtivo possibilita maior controle sobre a nutrição e a sanidade do rebanho, assegurando uma dieta balanceada e um manejo sanitário eficiente ao longo de todo o ciclo produtivo (ARAÚJO, 2001).

O confinamento permite um aumento da densidade animal por área, promovendo o uso intensivo da terra e contribuindo para melhores índices produtivos e de sanidade do rebanho. Como resultado, há um incremento na eficiência da produção, já que o fornecimento contínuo e controlado de alimentos de qualidade reduz a variabilidade sazonal da produção de leite. Diferentemente de sistemas a pasto, onde fatores climáticos, como estiagem ou excesso de chuvas, podem comprometer a oferta de forragem e afetar a produtividade, o confinamento assegura uma produção estável ao longo do ano (SOUZA *et al.*, 2004).

Contudo, o sistema intensivo apresenta desafios que devem ser considerados na tomada de decisão do produtor. Entre as principais desvantagens estão os elevados custos de implantação e manutenção da infraestrutura e o aumento dos riscos sanitários e ambientais devido à alta concentração de animais em espaços reduzidos. Problemas como mastite, doenças respiratórias e desafios relacionados ao manejo adequado dos dejetos podem comprometer o desempenho dos animais e aumentar os custos operacionais. Para minimizar tais impactos, é essencial adotar um planejamento criterioso, com ênfase no bem-estar animal, biossegurança e sustentabilidade ambiental (CAMPOS *et al.*, 2005).

No que tange às instalações onde os animais são confinados, estas são base para a rentabilidade e segurança do sistema de produção. Neste sentido, é fundamental que as mesmas sejam amplas, bem ventiladas, de fácil higienização e projetadas para proporcionar conforto térmico e facilidade de manejo. O projeto do alojamento deve permitir a circulação eficiente de animais e insumos, além de facilitar o descarte e o tratamento adequado dos dejetos, minimizando impactos ambientais e melhorando as condições sanitárias. Além disso, a viabilidade econômica do sistema deve ser cuidadosamente analisada, considerando fatores como custo-benefício da estrutura, mão de obra qualificada e retorno sobre o investimento.

Entre os principais modelos de sistemas de confinamento utilizados para bovinos leiteiros, destacam-se o *Tie Stall* (TS), o *Loose Housing* (LH), o *Free Stall* (FS) e o *Compost Barn* (CB). Esses sistemas estão brevemente descritos nos tópicos que seguem.

Sistema *Tie Stall*

O *Tie Stall* (TS) é um sistema de confinamento no qual as vacas são mantidas presas por coleiras em baias individuais durante a maior parte do tempo, sendo liberadas apenas no momento da ordenha. Durante todo o período produtivo, os animais permanecem no interior da instalação, recebendo alimentação balanceada diretamente nos comedouros. Esse modelo de alojamento permite um controle rigoroso sobre a nutrição e o manejo sanitário, reduzindo a variabilidade na produção de leite e otimizando a eficiência produtiva (MOTA *et al.*, 2017).

Historicamente, o TS foi um dos sistemas mais utilizados nos Estados Unidos. Em 2007, segundo dados do *United States Department of Agriculture* (USDA), aproximadamente 62% das unidades de produção de leite adotavam esse modelo de confinamento (USDA, 2007; MORABITO; BEWLEY, 2015; DAMASCENO, 2020). Contudo, com a modernização das práticas leiteiras e o crescente interesse em alternativas que priorizam o bem-estar animal, sua utilização tem diminuído em algumas regiões, sendo substituído por sistemas que oferecem maior liberdade de locomoção, como o *Free Stall* (FS) e o *Compost Barn* (CB).

De acordo com Araújo (2001), o Tie Stall é mais adequado para vacas de alta produção, geralmente acima de 25 kg de leite por dia, garantindo viabilidade econômica ao sistema. Esse modelo de confinamento é frequentemente adotado em rebanhos menores, sendo bastante comum em propriedades que utilizam mão de obra familiar. No Brasil, o sistema é mais presente nas regiões Sul e Sudeste, onde predomina a pecuária leiteira de pequenas e médias propriedades (DAMASCENO, 2020).

Embora o TS permita um controle individualizado dos animais, facilitando a gestão da nutrição e da saúde, ele exige uma maior dedicação no manejo diário. A necessidade de alimentação individualizada, remoção frequente de dejetos e cuidados específicos com as camas faz com que a mão de obra seja um fator determinante para o sucesso do sistema (MOTA *et al.*, 2017; DAMASCENO, 2020).

O dimensionamento e o planejamento das instalações são fundamentais para o conforto dos animais e a eficiência da produção. Como as vacas passam longos períodos confinadas em baias individuais, é essencial que as instalações proporcionem condições adequadas de bem-estar, reduzindo o estresse e prevenindo problemas de saúde, como lesões musculoesqueléticas e doenças podais (BEWLEY, 2015; DAMASCENO, 2020).

Para garantir o conforto dos animais, a cama deve ter uma superfície macia e absorvente, sendo comumente composta por areia, serragem ou palha. A escolha do material deve levar em conta fatores como conforto térmico, absorção de umidade e facilidade de manutenção. Uma cama inadequada pode aumentar a incidência de problemas como lesões articulares, mastite e queda na produtividade (BEWLEY, 2015; MOTA *et al.*, 2017).

Outro aspecto importante do sistema TS é o manejo dos dejetos. Os resíduos são depositados nos corredores localizados atrás das baias, podendo haver ou não a presença de calhas coletoras para facilitar a drenagem. A remoção dos dejetos deve ser feita regularmente, variando conforme a rotina de manejo da propriedade. Em geral, a limpeza ocorre de uma a duas vezes ao dia, garantindo um ambiente mais higiênico e minimizando problemas sanitários (MORABITO; BEWLEY, 2015). A Tabela 1 lista algumas características do sistema TS.

Tabela 1. Principais aspectos do sistema *Tie Stall* (TS)

Aspectos	Descrição
Descrição	Sistema de confinamento onde as vacas ficam presas por coleiras em baias individuais, sendo soltas apenas para a ordenha.
Alimentação	Fornecida diretamente nos comedouros, com dieta balanceada e controlada.
Manejo sanitário	Controle individualizado reduz transmissão de doenças, mas exige limpeza frequente dos dejetos.
Conforto animal	Necessita de camas macias (areia, serragem ou palha) para reduzir impacto nas articulações. Restrição de movimento pode causar estresse e problemas locomotores.
Uso de mão de obra	Elevado. Indicado para propriedades que utilizam mão de obra familiar.
Tamanho do rebanho	Mais comum em rebanhos menores, geralmente abaixo de 100 vacas.
Principais desafios	Maior demanda de mão de obra, necessidade de higienização frequente e restrição de locomoção dos animais.

Fonte: MORABITO e BEWLEY, 2015; MOTA *et al.*, 2017; DAMASCENO, 2020.

Sistema *Loose Housing*

O *Loose Housing* (LH) é um sistema de confinamento onde os animais permanecem soltos dentro do estábulo, podendo circular livremente entre diferentes áreas da instalação. Esse sistema oferece espaços cobertos para repouso e alimentação, protegendo o rebanho das intempéries climáticas, e áreas descobertas que permitem a livre movimentação e o exercício dos animais. Essa característica promove maior conforto e melhora o bem-estar animal, reduzindo o estresse e incentivando comportamentos naturais dos bovinos (CAMPOS *et al.*, 2005; DAMASCENO, 2020).

O piso das instalações pode ser de terra batida ou concreto, sendo coberto por uma camada de cama, que pode ser composta por materiais como palha de trigo, areia, serragem, esterco desidratado ou outras alternativas. O objetivo da cama é aumentar o conforto dos animais e minimizar problemas locomotores, como lesões e escorregões. Entretanto, para garantir a eficiência desse sistema, é essencial que a cama esteja sempre limpa e seca, pois um ambiente úmido favorece a proliferação de fungos, moscas e ácaros, podendo comprometer a sanidade do rebanho (CAMPOS *et al.*, 2005).

A adoção do *Loose Housing* é mais indicada para regiões de clima seco, uma vez que a menor umidade reduz os desafios sanitários associados à proliferação de microrganismos. Em locais mais úmidos, o manejo da cama pode se tornar um grande desafio, exigindo maior frequência de troca e disponibilidade constante de materiais para reposição (CAMPOS *et al.*, 2005; DAMASCENO, 2020).

Como os animais têm liberdade de movimentação, a produção de dejetos ocorre de maneira dispersa por toda a instalação, exigindo um manejo eficiente para garantir um ambiente limpo e adequado à produção leiteira. O processo de higienização normalmente é feito por meio de raspagem mecânica ou manual, sendo essencial para evitar o acúmulo de umidade e a formação de lama, especialmente em períodos chuvosos. Um dos principais desafios desse sistema está no manejo da cama, pois a necessidade de reposição constante demanda mão de obra especializada, disponibilidade de materiais e destinação correta dos resíduos retirados. O descarte inadequado da cama suja pode representar um problema ambiental significativo, tornando-se um passivo ambiental caso não seja devi-

damente tratado ou reutilizado, por exemplo, como adubo orgânico (DAMASCENO, 2020). A Tabela 2 lista algumas características do sistema LH.

Tabela 2. Principais aspectos do sistema *Loose Housing* (LH)

Aspectos	Descrição
Descrição	Sistema de confinamento onde os animais permanecem soltos dentro do estábulo, com áreas cobertas para alimentação e repouso e áreas descobertas para movimentação e exercício.
Alimentação	Fornecida em áreas específicas dentro da instalação, com dieta balanceada e acesso contínuo à água.
Manejo sanitário	Exige higienização frequente da cama e remoção dos dejetos, pois a umidade pode favorecer a proliferação de microrganismos.
Conforto animal	Maior liberdade de movimento melhora o bem-estar, reduzindo estresse e problemas locomotores. Necessidade de cama macia e limpa.
Uso de mão de obra	Moderado a elevado, principalmente para limpeza e reposição da cama.
Tamanho do rebanho	Adequado para rebanhos de médio porte, podendo ser utilizado em sistemas menores ou maiores conforme a infraestrutura disponível.
Indicação climática	Mais indicado para regiões secas, pois o excesso de umidade dificulta o manejo da cama e pode aumentar problemas sanitários.
Principais desafios	Manejo eficiente da cama e dos dejetos, necessidade de espaço adequado e maior dependência das condições climáticas.

Fonte: CAMPOS *et al.*, 2005; DAMASCENO, 2020.

Sistema *Free Stall*

O *Free Stall* (FS) surgiu nos Estados Unidos na década de 1950 e rapidamente se popularizou, devido à facilidade de manejo e organização do rebanho em comparação ao sistema LH. No Brasil, sua introdução ocorreu nos anos 1980, com a construção de uma unidade demonstrativa pela Embrapa Brasília, evidenciando a viabilidade e os benefícios desse modelo para a produção leiteira (ARAÚJO, 2001).

O sistema FS se destaca por oferecer camas individuais, onde as vacas deitam confortavelmente. O piso dos corredores de circulação é geralmente feito de concreto, facilitando o deslocamento dos animais até os comedouros e bebedouros. A principal vantagem desse sistema é a separação entre as áreas de descanso e as áreas de dejetos, o que melhora a higiene e reduz o risco de contaminação. No entanto, falhas no dimensionamento das baias ou a variação no tamanho dos animais podem fazer com que algumas vacas depositem dejetos na área de cama, exigindo um manejo eficiente para evitar problemas sanitários.

A cama das baias pode ser composta por materiais como areia, serragem ou borracha triturada, proporcionando conforto e proteção contra problemas locomotores. O manejo da cama deve ser realizado regularmente, removendo dejetos e material úmido e repondo material seco para manter um ambiente adequado.

Nos corredores de circulação, os dejetos são geralmente removidos duas vezes ao dia, utilizando raspagem mecânica, sistema de flushing (lavagem com grandes volumes de água) ou jatos d'água de alta pressão (DAMASCENO, 2020). Esse processo reduz a proliferação de microrganismos e melhora a sanidade do ambiente. A Tabela 3 lista algumas características do sistema FS.

Tabela 3. Principais aspectos do sistema *Free Stall* (FS)

Aspectos	Descrição
Descrição	Sistema de confinamento com baias individuais, onde os animais podem circular livremente entre áreas de descanso, alimentação e hidratação.
Alimentação	Fornecida em cochos nos corredores, com dieta balanceada e acesso contínuo à água.
Manejo sanitário	Requer higienização rigorosa da cama e dos corredores para evitar acúmulo de dejetos, utilizando água como principal carreador das excretas.
Conforto animal	Camas individuais com areia, serragem ou borracha triturada para minimizar problemas locomotores.
Uso de mão de obra	Elevado, pois exige limpeza frequente e manutenção das camas.
Tamanho do rebanho	Indicado para rebanhos de médio a grande porte.
Indicação climática	Pode ser utilizado em diversas condições climáticas, desde que haja controle adequado da ventilação e umidade.
Principais desafios	Alto custo de implantação, necessidade de manejo rigoroso das camas e risco de deposição de dejetos na área de descanso. Alto volume de água necessária ao carreamento de excretas. Custo de implantação e manutenção muito elevado, principalmente devido a necessária infraestrutura para manejo dos resíduos em sua forma líquida e sólida.

Fonte: ARAÚJO, 2001; DAMASCENO, 2020.

Sistema *Compost Barn*

No final dos anos 1980, produtores de leite do estado de Virginia (EUA) inovaram introduzindo uma nova variação do sistema *Loose Housing*, chamado de *Compost Bedded Pack Barn*, também conhecido como *Compost Barn* (CB). A inovação teve o intuito de possibilitar melhor conforto e saúde dos animais, bem como facilitar o manejo dos dejetos. O sistema CB foi desenvolvido considerando as condições de clima temperado, contudo, sua disseminação por várias partes do mundo trouxe adaptações aos diferentes cenários, instalações e disponibilidade de mão de obra. (GUIMARÃES *et al.*, 2015).

No Brasil, a primeira instalação CB foi construída em 2012, na fazenda Santa Andrea em Itararé (SP), este fato é controverso. Uma vez que, produtores de Piracicaba (SP) afirmam que o sistema iniciou naquela região, no mesmo período. Com o decorrer do tempo, ao final de 2014, o número de instalações CB era superior a trinta instalações. Recentemente, em 2020, foi estimado mais de duas mil instalações construídas ao longo de todo território nacional (EMBRAPA, 2020).

De acordo Mota *et al.* (2017), o significativo crescimento pode ser atribuído às instalações CB serem mais ecologicamente corretas e economicamente viáveis para os produtores de leite que buscam por modernização e alternativas para suas instalações. Mesmo com o aumento da popularidade do sistema no Brasil, há pouco conhecimento científico sobre o tema, necessitando assim, de um maior volume de pesquisas que auxiliem o planejamento e a tomada de decisão do produtor, contribuindo com o melhor manejo do sistema.

Basicamente, a instalação CB é composta por uma grande área de cama (área de descanso) e corredor de alimentação, onde ficam posicionados os comedouros e bebedouros. A cama, normalmente, é constituída de maravalha, serragem ou outra fonte de material orgânico (fonte de carbono) que tenha disponibilidade na região (casca de café, casca de

arroz, dentre outros). A característica peculiar desse sistema é o processo de compostagem que ocorre no interior da instalação. Neste processo é responsável pela decomposição dos materiais de cama (fonte de carbono) e dos dejetos animais (fonte de nitrogênio), devido a ação de microrganismos decompositores (JANNI *et al.*, 2007; LESO *et al.*, 2019).

A deposição dos dejetos animais no interior da instalação CB ocorre tanto na área de cama quanto no corredor de alimentação. Dessa forma, no corredor de alimentação (piso de concreto) a limpeza pode ser feita por raspagem, sistema de descarga (*flushing*) ou jatos de água. De acordo com Oliveira *et al.* (2019), em instalações CB localizadas no estado de Minas Gerais, a limpeza do corredor ocorre de uma a duas vezes ao dia (93,3% das propriedades avaliadas).

Os dejetos depositados na área de cama são incorporados por meio de revolvimento. Esse processo é essencial para misturar os dejetos (fezes e urina) e descompactar a cama, além de incorporar oxigênio nas camadas mais profundas, o que é primordial para a manutenção do processo de compostagem aeróbio. Geralmente, o processo de revolvimento é realizado duas vezes ao dia, durante o período de ordenha (OLIVEIRA *et al.*, 2019; DAMASCENO, 2020; LESO *et al.*, 2020).

Assim como todos os sistemas de confinamento, o CB exige cuidados e observação quanto às orientações técnicas, para que sua viabilidade econômica e sanitária seja assegurada. As propriedades que visam alcançar bons resultados devem possuir estruturas bem projetadas e planejadas, além de contar com o suporte de profissionais qualificados, que devem se atentar ao manejo da cama, um dos pontos chave desse sistema (MOTA *et al.*, 2017). A Tabela 4 lista algumas características do sistema CB.

Tabela 4. Principais aspectos do sistema *Compost Barn* (CB)

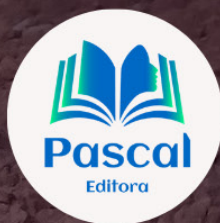
Aspectos	Descrição
Descrição	Sistema de confinamento baseado em uma grande área de cama orgânica, onde ocorre a compostagem natural dos dejetos. Possui corredor de alimentação separado.
Alimentação	Fornecida em cochos no corredor de alimentação, com acesso contínuo à água e dieta balanceada.
Manejo sanitário	A compostagem aeróbia reduz odores e inibe a proliferação de microrganismos patogênicos. A cama precisa ser revolvida regularmente para manter a higiene e a decomposição eficiente.
Conforto animal	Cama macia proporciona bem-estar e reduz problemas locomotores. O sistema permite liberdade de movimento.
Uso de mão de obra	Moderado a elevado, pois exige revolvimento constante da cama e limpeza do corredor.
Tamanho do rebanho	Indicado para rebanhos de médio a grande porte, devido à necessidade de espaço amplo e controle rigoroso da cama.
Indicação climática	Pode ser usado em diversas regiões, mas exige controle rigoroso da ventilação e umidade para manter a compostagem eficiente. Mais interessantes em climas secos.
Principais desafios	Necessidade de manejo cuidadoso da cama, dependência de materiais orgânicos para reposição e necessidade de mão de obra qualificada.

Fonte: MOTA *et al.*, 2017, OLIVEIRA *et al.* 2019, DAMASCENO, 2020, LESO *et al.*, 2020.

*Monitoramento microambiental de instalações para produção
intensiva de leite com uso de sensores acessíveis*

CAPÍTULO 2

**SENSORES DE CUSTO REDUZIDO
PARA MONITORAMENTO DAS
CONDIÇÕES AMBIENTAIS EM
INSTALAÇÕES PARA PRODUÇÃO
ANIMAL**



O monitoramento das condições ambientais de uma instalação de confinamento animal é indispensável para delimitar o funcionamento e eficiência do sistema produtivo, bem como para identificar as condições adversas para a vida dos animais e trabalhadores, além de ser fundamental para orientar a tomada de decisões sobre o manejo. Posto isso, para realizar a caracterização do ambiente interno das instalações é preciso avaliar variáveis físico-químicas no interior do sistema, tais como temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, ruído, iluminância e gases (amônia e metano, principalmente). Além destas, para os sistemas que utilizam algum tipo de cama, onde ocorre processos de estabilização da matéria orgânica no interior da instalação, tais como o sistema *Compost Barn* e de cama sobreposta em geral, dados sobre a temperatura e umidade da cama podem auxiliar de forma mais assertiva o manejo deste material, contribuindo para melhor adequação da concepção do sistema produtivo.

Microcontroladores

Os microcontroladores (μC) são dispositivos de pequeno tamanho que foram desenvolvidos para o controle e monitoramento de equipamentos, como sensores e atuadores. Pode-se dizer que, a origem dos μC s está relacionada com a evolução de microcomputadores de chip único e que o μC é composto por um conjunto de componentes eletrônicos interligados, de tal modo que, o funcionamento deste dispositivo depende apenas da conexão de uma fonte de alimentação externa. A aplicação dos μC s é ampla devido à sua versatilidade, podendo ser utilizados para automação residencial, automobilística e/ou industrial (*softstarters*, inversores, sensores inteligentes, controladores lógicos programáveis, indicadores digitais, dentre outros), para o desenvolvimento de sistemas de monitoramento de ambientes, e qualquer outra atividade que seja passível de controle e monitoramento. Vale destacar que, um único μC pode ser utilizado para diferentes atividades, basta somente realizar modificações em sua programação (RAFIQUZZAMAN, 2018; KERSCHBAUMER, 2018).

De modo geral, os microcontroladores são constituídos por unidade de processamento (Central Processing Unit - CPU) e uma série de componentes periféricos necessários ao seu funcionamento, tais com a memória de dados, memória de programa, sistemas de entradas e saídas de informações, circuito de clock e conversor analógico-digital (ADC). Os μC s têm como principal função o controle digital e, por isso, não é requerida a realização de operações complexas e sofisticadas. Ressalta-se que, os μC s possuem grande conectividade com equipamentos externos e, por este motivo, são amplamente difundidos e aplicados nas mais diversas áreas do conhecimento científico (ZELENOVSKY; MENDONÇA, 2017; RAFIQUZZAMAN, 2018; KERSCHBAUMER, 2018).

Dentre os diferentes modelos de μC s existentes no mercado, os mais comuns e difundidos são Arduino, ESP e Raspberry Pi. Os μC s que compõem a família ESP, destacam-se por apresentarem conexões via Wi-Fi e Bluetooth disponíveis e já integradas ao sistema. Desta forma, quando se trata de aplicações que envolvem conectividade (WiFi ou Bluetooth), como é o caso das aplicações com Internet das Coisas (IoT), os μC s da família ESP apresentam vantagens, deixando o projeto mais compacto, robusto e acessível financeiramente.

Microcontroladores da família ESP

Os microcontroladores que constituem a família ESP (ESP8266, ESP32, ESP32-S, ESP32-C e ESP32-H), foram projetados e produzidos pela Espressif Systems, empresa chinesa multinacional. Deve-se destacar que, esses μ Cs podem interpretar diferentes linguagens de programação (C, C++, JavaScript, Python), fato incomum quando se trata de outros modelos de μ Cs. Dentre os membros da família ESP, o ESP-32, lançado no ano de 2016, tem se destacado no mercado por causa da sua robustez, velocidade de processamento, acessibilidade e conectividade (KOLBAN, 2018; ESPRESSIF SYSTEMS, 2022).

O microcontrolador ESP-32, por sua vez, é de pequeno porte e resistente a condições variadas de temperatura. Este μ C possui módulos para conexão Wi-Fi e protocolo Bluetooth (incorporado ao chip), além de ser equipado com um robusto microprocessador, que apresenta dois núcleos físicos de processamento (32 bits) e pode chegar a operar com frequência de clock de até 240 MHz. Quando se trata de um microcontrolador de pequeno porte, o ESP-32, diante de suas propriedades e características, tem potencial para alavancar o avanço da automatização nos mais diversos setores, dado que, seu emprego em projetos auferirá diversidade de recursos tecnológicos a um preço acessível (3 a 12 dólares). A Tabela 5 lista características técnicas do microcontrolador ESP-32 (KOLBAN, 2018) e a Figura 1 ilustra o μ C ESP-32.

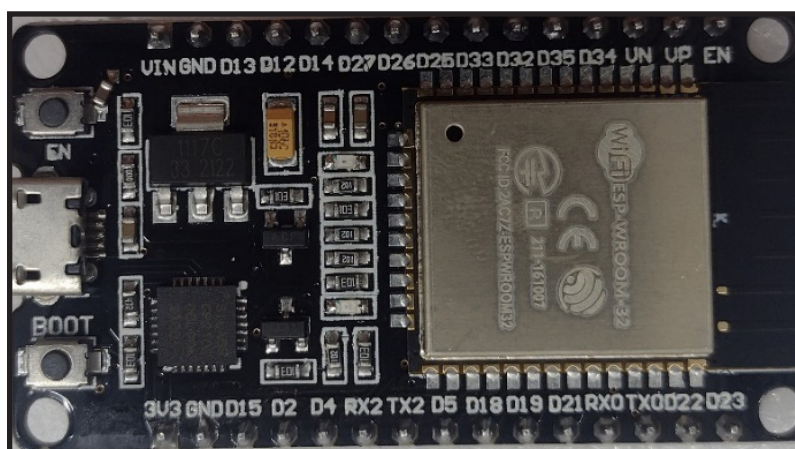
Tabela 5. Características técnicas do microcontrolador ESP-32.

Microcontrolador ESP-32	
Tensão de alimentação	3,3 V
Consumo de corrente elétrica	De 20 μ A (deep sleep) a 260mA (máximo)
Processador	Tensilica L108 32 bit (single/dual-core)
Velocidade do processador	Dual 160MHz
GPIO*	34 portas
Entrada analógico/digital	7 portas

* General Purpose Input Output

Fonte: KOLBAN, 2018.

Figura 1. Vista Superior do microcontrolador ESP-32.



Fonte: Os autores, 2025.

Sensor para determinação da velocidade do ar (anemômetros)

Existem muitos sensores comercialmente disponíveis que realizam a medição da velocidade do ar. Estes equipamentos podem ser unidirecionais, ou seja, realizam a leitura da velocidade do ar em uma única direção (tais como os anemômetros de canecas, de pás, de hélices, de fio quente e de Tubo de Pitot). Eles são indicados para situações em que o sentido do fluxo de ar é bem definido, como em instalações mecanicamente ventiladas. Por outro lado, há também anemômetros multidirecionais, que são equipamentos capazes de determinar velocidade do ar nos eixos X, Y e Z (anemômetros ultrassônicos e a laser), os quais são mais caros quando comparados aos unidirecionais, pois apresentam maior complexidade de projeto e construção (ASHRAE, 2013; GAO *et al.*, 2016).

Cada tipo de sensor opera com bom desempenho sob condições e ambientes específicos, de tal forma que as restrições de aplicabilidade do sensor são modeladas a partir do projeto e princípio de funcionamento que foi utilizado na construção do equipamento. Dessa forma, para atuar em um ambiente mais agressivo (elevada carga de material particulado em suspensão, presença de gases corrosivos e exposição a umidade, como instalações de confinamento animal), o sensor deve ser preparado e, o seu princípio de funcionamento adequado para suprir as demandas dos trabalhos de pesquisa em campo (significativa acurácia, fácil calibração e manuseio, trabalhar bem em diferentes faixas de medição, pequeno intervalo entre leituras, ser robusto, dentre outras). Partindo destas necessidades, as pesquisas científicas desenvolvidas nas mais diversas instalações de confinamento animal tendem a fazer o uso de anemômetros de fio quente, dado que este tipo de sensor possui uma das melhores relações custo-benefício, pequeno tamanho e grande faixa de medição (ASHRAE, 2013; DAMASCENO, 2020).

Os anemômetros de fio quente (AFQ) têm seu princípio de funcionamento baseado na transferência de calor via convecção e são classificados em três tipos: corrente constante, tensão constante e temperatura constante.

O AFQ do tipo temperatura constante é o sensor mais recente, sendo que apresenta bom funcionamento para a avaliação de baixas e elevadas velocidades do ar. Este sensor possui em sua estrutura um fino fio de platina ou tungstênio, com diâmetro de 5 μm e comprimento de poucos milímetros. O fio é aquecido e, através dos circuitos do sensor, é mantido a uma temperatura constante; ou seja, mesmo se houver variação da temperatura ambiente ou variação da velocidade do ar que passa pelo sensor, a temperatura do fio se manterá (WIKAKSANAA *et al.* 2009; BANDARA, 2011; SIVAKAMI *et al.*, 2020; LUNDSTRÖM 2021).

Dessa forma, a corrente elétrica que alimenta o sistema é proporcional à transferência de calor do sensor para o ambiente (desconsiderando possíveis perdas de calor via radiação e condução), o que torna possível estabelecer correlação entre a corrente elétrica e a velocidade do ar ambiente. À medida que a transferência de calor no fio aumenta, para manter constante a temperatura do fio, o sensor demandará maior quantidade de corrente elétrica e para conseguir determinar a velocidade do ar através do AFQ, é necessário que haja o processo de calibração, neste processo realiza-se a correlação de velocidades do ar previamente conhecidas com os valores de corrente elétrica medidas pelo sensor (SIVAKAMI *et al.*, 2020; LUNDSTRÖM 2021).

Existem muitos fatores que podem influenciar na transferência de calor do fio para o ambiente, sendo a temperatura do fluido a que o sensor está exposto (temperatura do ar), um dos mais importantes. Essa influência traduz-se em erros de leitura e comprometimento da acurácia do sensor e pode ocorrer em situações em que o sensor é utilizado em ambientes que possuem temperaturas diferentes da temperatura de calibração. Deste modo, a dependência da leitura do sensor com a temperatura ambiente deve ser reduzida

ou eliminada e, isto pode ser realizado por meio da utilização de sensor de temperatura integrado ao anemômetro (SIVAKAMI *et al.*, 2020).

O ajuste de temperatura na leitura dos AFQ vem sendo implementado e tem apresentado importantes evoluções no que se refere à melhoria da precisão destes sensores. O sensor de velocidade do vento Rev. P (fabricado pela empresa Modern Device) é um exemplo de AFQ que faz o ajuste das medições de velocidade do ar mediante a compensação dos efeitos da temperatura ambiente. Isso é possível pois, na arquitetura do sensor, foi acoplado termistor PTC (*Positive Temperature Coeficient*). Esse fato justifica a presença da letra P na nomenclatura do sensor, além de ser esta uma das evoluções que o sensor apresentou, quando comparado à versão anterior (Rev. C) (MODERN DEVICE, 2022).

Tendo como base os custos médios dos AFQs com características semelhantes ao Rev. P no mercado (de 70 a 700 dólares no ano de 2025), pode-se considerar o Rev. P como um sensor de baixo custo, custando 39.45 dólares, conforme site oficial (MODERN DEVICE, 2025 – cotado em 2025). Este é um sensor analógico, projetado para ser utilizado em microcontroladores, tais como: Arduino Uno, ESP-266, ESP-32, dentre outros. O sensor Rev. P deve ser alimentado com tensão de 9 a 12 volts e apresenta corrente máxima de operação de aproximadamente 40 mA, a depender da intensidade de velocidade do ar medido. A Tabela 6 lista as principais recomendações técnicas do sensor de velocidade do ar REV. P.

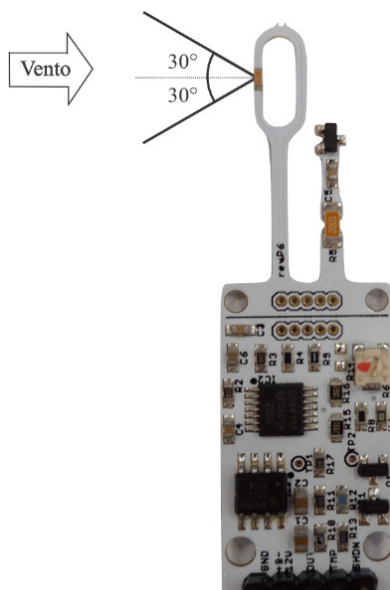
Tabela 6. Descrição de características técnicas do sensor de velocidade do ar (REV.P).

Sensor	Alimentação (V)	Comunicação	Velocidade do ar (m.s ⁻¹)
REV.P	9,0 a 12,0	Sinal analógico	0 a 67 (± 0,1)

Fonte: MODERN DEVICE, 2025.

Para assegurar medições confiáveis do sensor, é importante garantir que a direção do fluxo de ar não ultrapasse 30° em relação à orientação do elemento sensor, como ilustrado na Figura 2. Dada esta especificação, vale ressaltar a necessidade de conhecer bem a direção do fluxo de ar predominante no ambiente em que os dados serão coletados para assegurar maior confiabilidade dos mesmos (PROHASKY; WATKINS 2014; CASTRO; PROHASKY, 2014; CASTRILLÓN *et al.*, 2020; MODERN DEVICE, 2025).

Figura 2. Sensor de velocidade do vento REV. P, com destaque a amplitude limite de direções do vento recomendada para leitura.



Fonte: CASTRO e PROHASKY, 2014.

Sensor para determinação de temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar

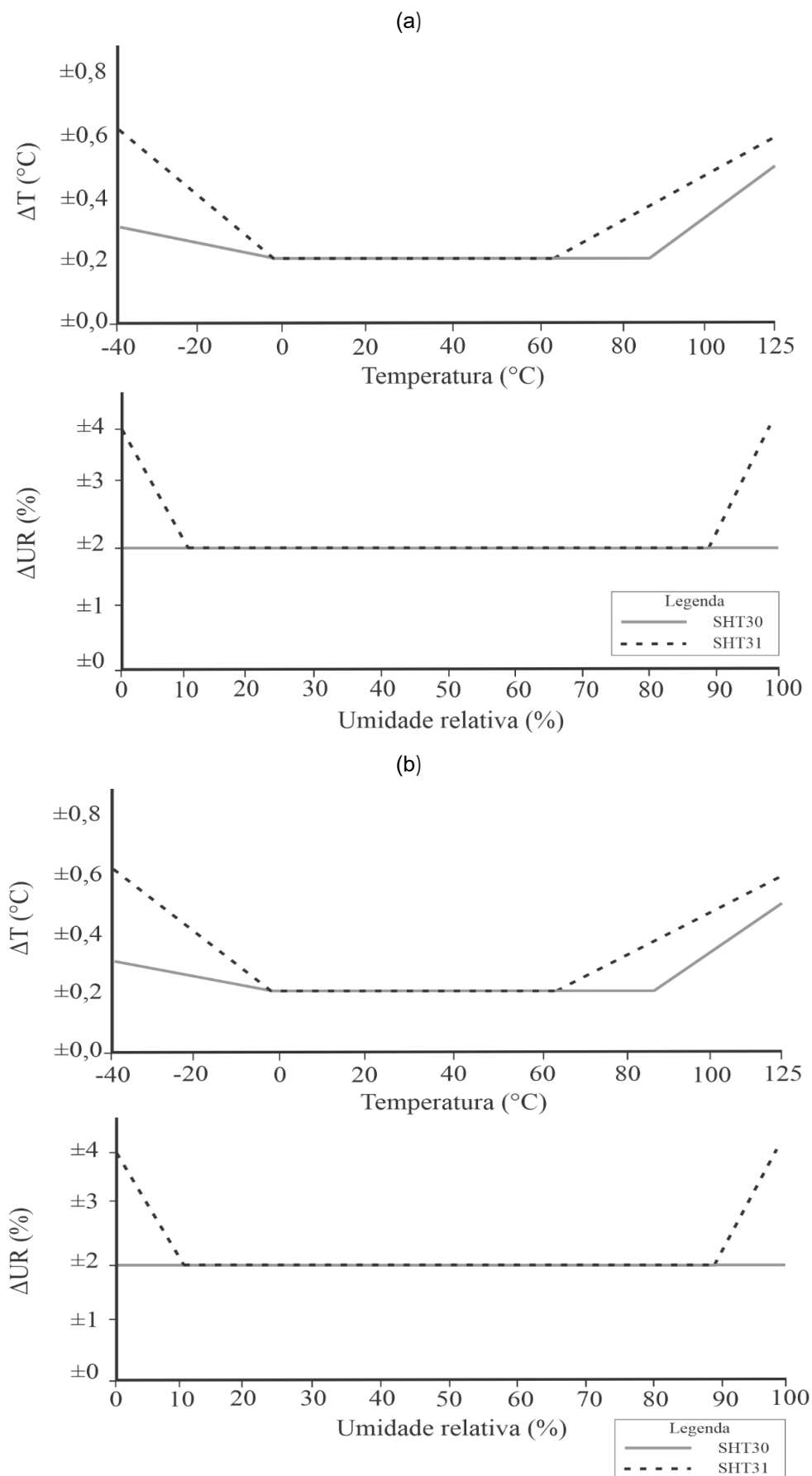
A temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar ambiente de uma unidade produção são fatores primordiais para assegurar a qualidade de vida dos animais e a manutenção de bons indicadores produtivos, dado que as condições de desconforto térmico podem tanto reduzir a produção como colocar o bem-estar e a vida dos animais em risco. O estresse térmico gerado no metabolismo animal é resultado de uma composição de fatores ambientais, como a radiação solar, a temperatura, a umidade e a velocidade ar. Para quantificar o estresse térmico nos animais, utilizam-se índices que combinam os efeitos das variáveis ambientais (HABEEB *et al.*, 2018; NAWAB *et al.*, 2018; SEJIAN *et al.*, 2018).

Atualmente, existem diversos tipos de índices que realizam diferentes combinações e composições das variáveis climáticas. Devido à maior disponibilidade e praticidade de aquisição de dados, o índice mais difundido no âmbito acadêmico é o Índice de Temperatura e Umidade (ITU), como o próprio nome remete, o ITU faz a combinação de dados de temperatura e umidade para mensurar as condições de conforto térmico do animal. Vale destacar que o ambiente de unidade de produção animal não apresenta uniformidade das variáveis climáticas ao longo de toda sua extensão; ou seja, na mesma instalação e em um mesmo horário do dia, os animais podem apresentar diferentes condições de conforto térmico (HABEEB *et al.*, 2018; SEJIAN *et al.*, 2018).

Sendo assim, os dados que caracterizam o conforto térmico dos animais precisam ser coletados em diferentes pontos e simultaneamente, para assegurar melhor caracterização do ambiente. Dessa forma, a adequada caracterização do ambiente térmico de uma Unidade de Produção de Leite demanda grande quantidade de sensores (as instalações são grandes e as leituras precisam ser realizadas simultaneamente em vários pontos). Assim, para que a aplicação um do sensor seja viabilizada, é importante que o sensor seja de baixo custo, de fácil instalação e apresente medições precisas. Quando se trata das medições de temperatura e umidade do ar, os sensores da série STH3x, desenvolvidos pela empresa Sensirion, suprem as necessidades descritas, pois são robustos, apresentam boa acurácia nos dados fornecidos e são acessíveis financeiramente, devido ao seu baixo custo de aquisição.

Os sensores da série STH3x são sucessores da série STH2x e apresentam, como evolução tecnológica, melhoria na inteligência, confiabilidade e aumento da precisão. A série STH3x conta com um aprimorado processamento de sinal, dois endereços distintos para utilização em protocolo I2C (*Inter-Integrated Circuit*) e velocidade de comunicação de até 1MHz. Ao todo, existem três modelos de sensores disponíveis dentro da série STH3x que são os modelos STH30 (simplificado), STH31 (padrão) e STH35 (premium). A diferença entre estes modelos consiste na precisão das medidas ao longo do intervalo de medição do equipamento, tanto de temperatura como de umidade. Isto pode ser verificado através da Figura 3, onde é comparada a precisão das medidas dos sensores STH30 e SHT31.

Figura 3. Curvas de precisão para medições de (a) temperatura e (b) umidade relativa do ar realizadas pelos sensores SHT30 e SHT31.



Fonte: Adaptado TEM ELETRONIC COMPONENTS, 2021

Ao analisar a Figura 3, verifica-se que os dois modelos apresentam mesma precisão, considerando o intervalo de 0 a 65 °C e 10 a 90 % de umidade (Figura 3), o que não ocorre fora do intervalo referido (TEM ELETRONIC COMPONENTS, 2021). Na Tabela 7, estão apresentadas as características do sensor SHT31, conforme consta no manual técnico do equipamento.

Tabela 7. Descrição de características técnicas do sensor de umidade de temperatura do ar, SHT31.

Sensor	Alimentação (V)	Comunicação	Temperatura (°C)	Umidade relativa (%)
STH31	2,15 a 5,5	I2C	0 a 90 (± 0,2)	0 a 100 (± 0,2)

Fonte: TEM ELETRONIC COMPONENTS, 2021.

STH31 está disponível no mercado por cerca de 11 dólares (orçado no ano de 2025), sendo que esse valor pode ficar menor, se forem compradas maiores quantidades deste item. No mercado, equipamentos semelhantes ao SHT31 apresentam custo de 90 a 450 dólares (HOBO UX100 e HOBO U23-001A, por exemplo – cotado em 2025). Assim, com base nesta comparação, é possível verificar que o SHT31 é um equipamento de baixo custo, sendo capaz de beneficiar o desenvolvimento de pesquisa devido à sua relação custo-benefício.

Sensores para determinação da temperatura da cama

Em instalações de confinamento animal que fazem o uso de cama para estabilização dos dejetos animais produzidos, como é o caso das instalações *Compost Bedded Pack Barn*, a temperatura da cama é uma variável importante. Este pode ser utilizada para a avaliação do processo de compostagem e a consequente emissão de gases no ambiente. A atividade microbiológica atuante no processo de compostagem é diretamente proporcional à temperatura da cama, ou seja, quanto maior for a velocidade da atividade e o desenvolvimento dos microrganismos decompositores, maior será a temperatura da cama e a emissão de gases (DAMASCENO, 2020).

Dessa forma, temperatura da cama está diretamente associada a atividade microbiológica que, por sua vez, é influenciada por fatores como umidade, pH, relação C/N, disponibilidade de oxigênio e nutrientes, assim como emissão de gases. Sendo assim, o monitoramento da temperatura da cama é importante, pois esta é uma variável que permite realizar inferência direta sobre o comportamento do processo de compostagem, o que viabiliza tomadas de decisões mais assertivas, quando se trata do manejo diário da cama na unidade de produção. Para a coleta dos dados de temperatura da cama, devido a versatilidade, preço e características técnicas pode-se utilizar o sensor DS18B20, que é sensor de baixo custo, muito difundido no mercado e utilizado em âmbito acadêmico (BLACK et al., 2013; LESO et al., 2020; DAMASCENO, 2020).

O sensor DS18B20 realiza medição de temperatura, sendo possível fornecer dados de 9 a 12 bits. Em sua configuração padrão, a leitura é realizada com 12 bits, o que entrega uma resolução de 0,0625°C aos dados coletados. O sensor estabelece comunicação com o microcontrolador via protocolo 1-Wire. Vale destacar que, em virtude da arquitetura eletrônica do sensor, é possível fornecer energia para o seu funcionamento no mesmo fio em que ocorre a transmissão de dados, a conexão do sensor ao controlador pode ser feita apenas com dois cabos (dados e terra). Contudo, existem situações (indicadas no manual) em que é mais viável realizar a conexão do sensor utilizando três cabos (dados, terra e Vdd), para

isso deve-se adicionar uma fonte de energia externa, de 3,0 a 5,5 volts (Vdd), conectando também um resistor de 4,7k Ω (DALLAS, 2019). A Tabela 8 lista as principais características do sensor em discussão.

Tabela 8. Descrição de características técnicas do sensor de temperatura DS18B20

Sensor	Alimentação (V)	Comunicação	Temperatura do ar (°C)
DS18B20	3,0 a 5,5	1-Wire	-55 a 125 (\pm 0,5)

Fonte: DALLAS, 2019.

Quando se trata de avaliação de grandes ambientes, como é o caso de unidades de produção animal, o sensor DS18B20 apresenta uma importante característica: ele possui número serial exclusivo, o que permite a conexão de mais de um sensor, via protocolo 1-Wire. Além desta disponibilidade técnica para a conexão de múltiplos sensores, também há viabilidade econômica, tendo em vista que o sensor é considerado de baixo custo, cujo preço varia de 2 a 8 dólares no mercado (DALLAS, 2019 – cotado em 2025).

Este tipo de sensor é muito utilizado em pesquisas que envolvem monitoramento e medição de temperatura, em pesquisas realizadas no setor agropecuário é comum ser utilizado para verificação da temperatura do solo (LOKHANDE *et al.*, 2019; CODELUPPI *et al.*, 2021; DENIZ *et al.*, 2021a), da água (TOLENTINO *et al.*, 2020) e, quando se trata de sua aplicação em unidade de produção animal, o sensor é aplicado para medições da temperatura de globo negro (DENIZ *et al.*, 2021b). Por outro lado, não se verifica amplo uso deste sensor para avaliação da temperatura da cama de instalações.

Para as aplicações supracitadas, faz-se necessário que o sensor esteja protegido, para que não seja danificado por líquidos e/ou partículas sólidas. Dessa forma, com o intuito de atender a esta especificação, já existe no mercado o sensor encapsulado (Figura 4), o sensor fica envolvido por uma cápsula metálica totalmente fechada.

Figura 4. Cápsula metálica que envolve o sensor DS18B20 e o sensor DS18b20.



Fonte: Os autores, 2025.

Sensores para determinação da umidade da cama

Atualmente, o fornecimento de dados de umidade do solo para sistemas de produção agrícola é fundamental, dada a importância que a água apresenta, tanto para o desenvolvimento da vida, quanto para os aspectos sustentáveis e econômicos. Dessa forma, é vital que as medições de umidade do solo sejam passíveis de automatização, apresentem resultados precisos e que os sensores não apresentem elevado custo de aquisição a ponto de inviabilizar o projeto de coleta de dados. A determinação da umidade do solo pode ser realizada por meio de diversos princípios, dentre eles o gravimétrico, o eletromagnético, o tensiométrico, o higrométrico e, até mesmo, o uso de sensoriamento remoto (ZAZUETA; XIN, 1994; EDOKOSSI *et al.*, 2020).

O uso de sensores de umidade que utilizam o princípio eletromagnético para seu funcionamento é amplamente difundido, sendo que, dentre os diferentes sensores existentes nesta categoria, o capacitivo é o mais utilizado. Isto ocorre, pois os sensores capacitivos apresentam menor custo de aquisição e confiabilidade em suas leituras (VAZ *et al.*, 2013; BOGENA *et al.*, 2017). O sensor capacitivo faz a medição da umidade do solo conforme ocorre a variação da capacitância e, de modo geral, este sensor possui duas placas metálicas paralelas, que funcionam como capacitor, ao passo que o solo atua como um material dielétrico. Para fazer a medição, o sensor gera um campo elétrico, carregando eletricamente o solo entre as placas (como um capacitor). Como a capacitância do solo está diretamente relacionada a sua umidade, é possível estabelecer relação entre tensão ou capacitância e umidade do solo. Dessa forma, quanto maior é a umidade do solo, menor é a tensão de resposta do sensor ou maior é o tempo de carga deste capacitor (MUZDRIKAH *et al.*, 2018).

O sensor SKU:SEN0193 (DFRobot, S.D.) é um exemplo de sensor capacitivo de baixo custo disponível no mercado e utilizado em pesquisas científicas para medições de umidade (MUZDRIKAH *et al.*, 2018; NAGAHAGE *et al.*, 2019, PLACIDI *et al.*, 2020 e ADLA *et al.*, 2020). Este sensor pesa cerca de 15 gramas e é resistente à corrosão, o que ajuda a aumentar sua vida útil, contudo, não é resistente à água, por isso é importante respeitar o limite de profundidade demarcado no sensor (Figura 5). Se caso for necessário deixar o sensor exposto a ambiente aberto, pode-se realizar a aplicação de um filme plástico na região que os componentes eletrônicos estão dispostos.

Figura 5. Sensor SKU:SEN0193, com destaque em vermelho à faixa limite de profundidade do sensor.



Fonte: O autor, 2022.

A resposta de saída do sensor é analógica e pode variar de 0 a 3 volts. Além disso, o SKU:SEN0193 deve ser alimentado com tensão de 3,3 a 5,5 volts, o que facilita sua aplicação em microcontroladores, como Arduino e ESP32. O custo deste sensor no mercado (orçado no ano de 2025), pode variar de 3 a 20 dólares, a depender da qualidade, quantidade e robustez do produto (RFROBT, S.D). A Tabela 9 lista as principais informações técnicas do sensor SKU:SEN0193.

Tabela 9. Descrição de características técnicas do sensor de umidade SKU:SEN0193

Sensor	Alimentação (V)	Comunicação	Temperatura (°C)
SKU:SEN0193	3,3 a 5,5	Sinal analógico	-55 a 125 (\pm 0,5)

Fonte: RFROBT, S.D.

Os autores Muzdrikah *et al.* (2018), Nagahage *et al.* (2019), Placidi *et al.* (2020) e Adla *et al.* (2020), realizaram trabalhos científicos para melhor entender o comportamento, a resposta, a precisão e a usabilidade do sensor SKU:SEN0193 sob diferentes condições, variando, por exemplo, a temperatura ambiente, a umidade e o volume de solo amostrado.

Em condições de laboratório, com temperatura ambiente controlada (25°C) e volume de amostra padronizado, os autores Nagahage *et al.* (2019), verificaram que a precisão e confiabilidade do SKU:SEN0193 foram satisfatórias quando o teste foi realizado em um solo para jardinagem (mistura de solo, nutrientes e materiais orgânicos prontos para aplicações em jardins). Contudo, o sensor não apresentou resultados favoráveis quando testado em uma mistura de solo composta por metade do volume em vermiculita e outra metade por solo de jardinagem. De acordo com os autores, esta variação de resposta do sensor pode estar relacionada aos materiais que constituem os substratos amostrados. Os autores também enfatizam que ainda é preciso determinar quais são os efeitos da temperatura do substrato, da compactação e salinidade sob a precisão das medições do sensor, uma vez que são variáveis que apresentam potencial de afetar a leitura do sensor, considerando o seu princípio de funcionamento.

Os autores Placidi *et al.* (2020), verificaram que a preparação da amostra de solo influenciou diretamente os valores de umidade que serão medidos via sensor capacitivo. No estudo conduzido pelos mesmos, notou-se que diferentes volumes de amostras e graus de compactação do solo (variações de porosidade) geravam diferentes respostas do sensor, mesmo as amostras tendo o mesmo percentual de umidade (esperava-se respostas semelhantes estatisticamente). Tendo em vista este comportamento do sensor, os autores sugeriram desenvolver a pesquisa padronizando o volume amostral, a forma de amostragem e o tipo de substrato avaliado. Dessa forma, foi apurado que o sensor SKU:SEN0193 apresentou respostas confiáveis (forte correlação entre a voltagem de saída do sensor e o percentual de umidade do substrato), desde que as características do substrato sejam bem definidas e o volume das amostras seja constante.

A aplicação deste sensor capacitivo pode ser estendida para verificação da umidade da cama de instalações tipo *Compost Barn (CB)*. Entretanto, esse tipo de aplicação é escasso na literatura e faz-se interessante pois, o monitoramento desta variável é importante para o manejo do sistema *CB*, tendo em vista que a umidade da cama é um dos parâmetros de mais difícil adequação, devido sua estreita faixa ótima recomendada, de 40 a 60%. Esta faixa é indicada para assegurar condições aeróbias aos microrganismos decompositores, favorecer a sanidade do rebanho e qualidade do leite. Desta forma, a disponibilidade de dados dessa variável pode auxiliar no manejo diário da unidade de produção, contribuindo para adequações da densidade animal, verificação da necessidade de reposição de cama e ajustes no sistema de ventilação (BLACK *et al.*, 2013; LESO *et al.*, 2020).

Neste sentido, fica evidente a possibilidade e necessidade de realização de estudos futuros implementando o uso de sensores capacitivos, como o SKU:SEN0193, na avaliação da umidade da cama de sistemas *CB*. Entretanto, ressalta-se que, primariamente, deve-se realizar o estudo do comportamento do sensor sob a avaliação deste novo substrato (cama), considerando diferentes condições de temperatura ambiente, temperatura e composição da cama, a fim de expor o sensor às diversas situações que podem ser encontradas em

campo. Para realização dessa etapa, é importante considerar as características técnicas do sensor SKU:SEN0193, bem como utilizar volume de amostra padrão e realizar a calibração do sensor especificamente para o substrato que será avaliado.

Sensores para determinação da concentração de amônia

A qualidade do ar das instalações pode ser analisada por sistema de medição de concentração e emissão de gases. Os sistemas podem ser constituídos por dispositivos de amostragem, sensores ou algum tipo de instrumento de medição e sistemas para o armazenamento dos dados. Estes equipamentos devem ser robustos e calibrados adequadamente a fim de resistirem às condições adversas que existem no ambiente interno da instalação (excesso de umidade, elevada quantidade de material particulado suspenso, gases corrosivos (NH_3) e amplitude térmica) e para apresentarem leituras confiáveis (DAMASCENO, 2020).

Em relação aos sensores que realizam a medição de NH_3 , pode-se dizer que existem diversos modelos que operam por diferentes princípios de funcionamento. A definição do tipo de sensor deve ser baseada nas características do ambiente em que a amônia será caracterizada, dado que, os sensores atuam em faixas específicas de medição, ou seja, existem sensores apropriados para mensurar a amônia em baixas concentrações (menor que 0,1 ppm), como os sensores quimioluminescentes e fotoacústicos, e existem sensores para mensurar amônia em concentrações mais elevadas (acima de 1,0 ppm), como é o caso dos eletroquímicos (INSAUSTI *et al.*, 2020).

Os sensores que são capazes de medir menores concentrações de amônia (abaixo de 1,0 ppm) são mais caros e podem custar até 25.000,00 dólares, ao passo que os sensores que determinam maiores concentrações de amônia (acima de 1,0 ppm) tendem a custar menos, de 500,00 a 2.500,00 dólares (cotado em 2025). Vale destacar que, geralmente, a concentração de NH_3 nos mais diversos ambientes estudados da agropecuária, varia de 0,1 a 100 ppm (INSAUSTI *et al.*, 2020).

A escolha do sensor a ser utilizado também deve levar em consideração a velocidade de operação, tamanho do intervalo da faixa de medição (range), precisão, confiabilidade, seletividade, dimensões e custos de aquisição. Por conta das condições presentes em unidades de produção animal, comumente se utiliza, para a determinação da concentração de amônia, os sensores do tipo espectrométrico e eletroquímico (INSAUSTI *et al.*, 2020; BIELECKI *et al.*, 2020).

Sensores espectrométricos

Os sensores baseados na espectroscopia são fortemente resistentes a ruídos eletromagnéticos e estáveis, apresentam baixo consumo de energia e podem ser usados em ambientes de atmosfera explosiva, como é o caso de silos graneleiros. Este tipo de sensor é amplamente utilizado nas mais diversas áreas científicas e industriais por causa das suas características positivas (INSAUSTI *et al.*, 2020). Dentro da classificação dos sensores baseados na espectroscopia, existem diversos princípios de funcionamento, tais como, os baseados na absorbância, fluorescência, quimiluminescência e fotoacústica.

Os sensores fotoacústicos são promissores em relação à sua utilização em ambientes agropecuários, pois permitem a mensuração contínua, seletiva e automática dos dados de concentração. Contudo, é ainda baseado em uma técnica muito sensível, de forma que

gases como metano e óxido nitroso causam interferências nas leituras, além do equipamento ser caro, podendo custar mais de 12.000,00 dólares (BIELECKI *et al.*, 2020; INSAUSTI *et al.*, 2020 – valores estimados para 2025).

A determinação da concentração dos gases pelo sensor fotoacústico, simplificada, é realizada através da emissão de laser modulado (comprimento de onda específico para o gás avaliado, no caso da amônia utilizam-se 1530 nm). As partículas do gás (alvo da análise) absorvem parte da energia luminosa e a converte em sinal acústico, que é captado por um microfone de baixo ruído. A composição básica do sensor é dada por uma fonte emissora de laser, uma célula ressonante fotoacústica, um microfone e um módulo de controle eletrônico para realizar a modulação do laser e o controle do sinal (DUMITRAS *et al.*, 2007; CELESTI, 2014).

O tempo médio de medição de cada ponto amostrado, quando se usa o sensor fotoacústico, é cerca de 30 segundos, quando se avalia apenas um gás. Entretanto, há a possibilidade de analisar diversos gases de uma só vez, o que irá demandar maior tempo de análise do equipamento. A faixa de concentração de NH_3 tipicamente avaliada por esses sensores varia de 0,1 a 100 ppm. Dessa forma, o uso deste sensor em instalações de confinamento animal e em suas respectivas infraestruturas (silos, estruturas de tratamento de dejetos e galpões) é viável, haja vista que a concentração de NH_3 típica destes locais coincide com o intervalo de medição do sensor (DUMITRAS *et al.*, 2007; CELESTI, 2014; BIELECKI *et al.*, 2020; INSAUSTI *et al.*, 2020).

Sensores eletroquímicos

O princípio de funcionamento dos sensores eletroquímicos é baseado na detecção de variações do sinal elétrico, decorrente da absorção de amônia pelos diferentes tipos de materiais constituintes do sensor. A variação do sinal elétrico é proporcional à concentração de NH_3 e pode ser detectada pela mudança da resistência, diferença de potencial ou corrente elétrica do sistema. Dessa forma, esse tipo de sensor possibilita a determinação direta e contínua da concentração de amônia e é amplamente utilizado em instalações de confinamento animal. Estes sensores podem ser desenvolvidos para diferentes tipos de gases, mas quanto mais específico for o gás, melhor será a precisão na medida, uma vez que a interferência de outros possíveis contaminantes é reduzida (GATES *et al.*, 2005; JI *et al.*, 2015; TANGUY *et al.*, 2018).

De acordo com Xiong e Compton (2014), os sensores eletroquímicos mostram-se mais vantajosos quando comparado a outros sensores. Isto se deve ao fato de apresentarem elevada sensibilidade, por serem portáteis e de baixo custo de aquisição. O sensor eletroquímico constitui-se normalmente por eletrodo de detecção de gases, um contra eletrodo, um eletrodo de referência, um eletrólito e uma membrana gás permeável hidrofóbica (GIDDEY *et al.*, 2013; KWAK *et al.*, 2019).

De acordo com a revisão de literatura desenvolvida pelos autores Insausti *et al.* (2020), os sensores eletroquímicos, comumente, apresentam faixa de medição da concentração NH_3 de 1 a 50 ppm, o que viabiliza o uso destes sensores para instalações de confinamento animal. As marcas mais difundidas no mercado que comercializam esse tipo de sensor são Dräger, Alphasense, Membrapor, Pemtech and Transducer Tech, empresas dos seguintes países: Alemanha, Suíça, Reino Unido e Estados Unidos, respectivamente (WILHELM *et al.*, 2001; WHEELER *et al.*, 2003; ZHANG *et al.*, 2013; WOLF., 2017; INSAUSTI *et al.*, 2020).

Características do módulo sensor MQ137

O módulo sensor MQ137 é um sensor do tipo eletroquímico (semicondutor de óxido metálico) que foi desenvolvido para detectar gás amônia. O emprego do MQ137 em projetos científicos é recorrente na literatura e abrange diversas áreas do conhecimento, dentre elas o monitoramento do ambiente aéreo de aviários (PEREIRA *et al.*, 2020; HOFSTETTER *et al.*, 2021), de instalação para bovinos (QU *et al.*, 2021), de túneis rodoviários (BUJŇÁK *et al.*, 2021) e até mesmo em investigação de doenças pulmonares (ACEVEDO *et al.*, 2021). O difundido uso deste sensor pode ser explicado por sua robustez, relação custo-benefício, precisão e acurácia, resposta e recuperação rápida, disponibilidade de mercado e de informações e compatibilidade com microcontroladores (WINSEN, 2015). Ao ser comparado com sensores eletroquímicos disponíveis no mercado [que custam por volta de 500,00 a 3000,00 dólares (INSAUSTI *et al.*, 2020)], o MQ137 é considerado de baixo custo, pois apresenta preços de 10,00 a 50,00 dólares, no ano de 2025, a depender da quantidade, fabricante e fornecedor.

O princípio de funcionamento do módulo sensor MQ137 advém de uma camada de dióxido de estanho (SnO_2), elemento semicondutor sensível ao gás amônia. O emprego do SnO_2 foi adotado pois esse material modifica seu comportamento elétrico sob a presença de amônia, de tal forma que, quanto maior for a concentração de amônia a que o SnO_2 estiver exposto, menor será a sua resistência elétrica (aumento da condutividade elétrica sob aumento da concentração). Este processo funciona por meio de reações de redução que ocorrem entre a superfície da camada de SnO_2 e o gás alvo. Os íons de oxigênio presentes na superfície do metal reagem com as moléculas de gás, provocando mudança da resistência elétrica do sensor e, por consequência, ocorre a variação da tensão presente entre o pino analógico e terra. Dessa forma, com a devida calibração, é possível determinar a concentração de amônia do ambiente em que o sensor está exposto (WINSEN, 2015; HANWEI ELECTRONICS, S.D.; ANTUNES, 2019).

O MQ137 pode ser usado para avaliar diferentes tipos de gases que contenham amônia (Figura 6), sendo aplicável para a determinação de concentração de amins orgânicas. Na parte interna da estrutura do sensor há um micro tubo cerâmico de óxido de alumínio (Al_2O_3), uma placa de dióxido de estanho (SnO_2), um elétrodo de medição e um aquecedor, todos estes elementos ficam envolvidos por uma malha metálica (envoltório de proteção), como ilustrado na Figura 6a. O aquecedor é uma resistência elétrica que possui a função de manter a temperatura adequada para o funcionamento dos componentes sensíveis, por conta disso antes de realizar as medições é necessário aguardar um tempo de aquecimento de 3 a 5 minutos (*warm up*), seguindo a recomendação do fabricante (HANWEI ELECTRONICS, S.D.).

Figura 6. (a) Sensor MQ137 e (b) Placa e componentes do circuito do sensor MQ137.

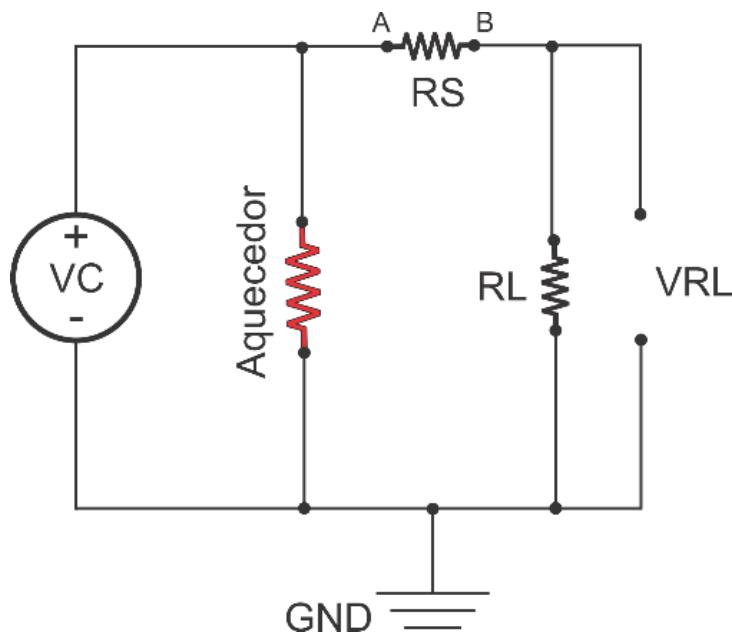


Fonte: Os Autores, 2025.

Conforme pode ser verificado na Figura 6b, o sensor MQ137 apresenta seis pinos para conexão, quatro deles são para a comunicação e os outros dois são usados para conduzir corrente elétrica a fim de suprir a demanda do aquecedor (HAREVA; MARSYAF, 2019). Atualmente no mercado, existem sensores já conectados a um módulo (placa de circuito com componentes eletrônicos), como é o caso do sensor apresentado na Figura 6, isto simplifica as conexões e o uso do sensor, dado que as ligações e componentes eletrônicos necessários para o funcionamento do sensor já estão integrados no módulo (Figura 6b). Na maioria dos casos, esses módulos são equipados com uma saída digital (funcionam como um comparador interno) e, por meio de um potenciômetro, é possível calibrar o sinal recebido e, assim, detectar a presença ou não do gás alvo (HANWEI ELECTRONICS, S.D.; WINSEN, 2015).

Na Figura 7 está ilustrado o diagrama simplificado do circuito eletrônico do módulo do sensor MQ137, neste diagrama há a presença de uma resistência de carga (R_L), fundamental para o funcionamento do sensor, pois faz ajustes na sensibilidade e precisão do sensor, dado que o sensor trabalha em uma ampla faixa de medição (1 a 200 ppm) (INSTRUCTABLES CIRCUITS, 2017; ASWINTH, 2018; JAYCON SYSTEMS, 2019; OMIJEH e MACHIAVELLI, 2019; PETRIC et al., 2019).

Figura 7. Diagrama elétrico do sensor MQ137



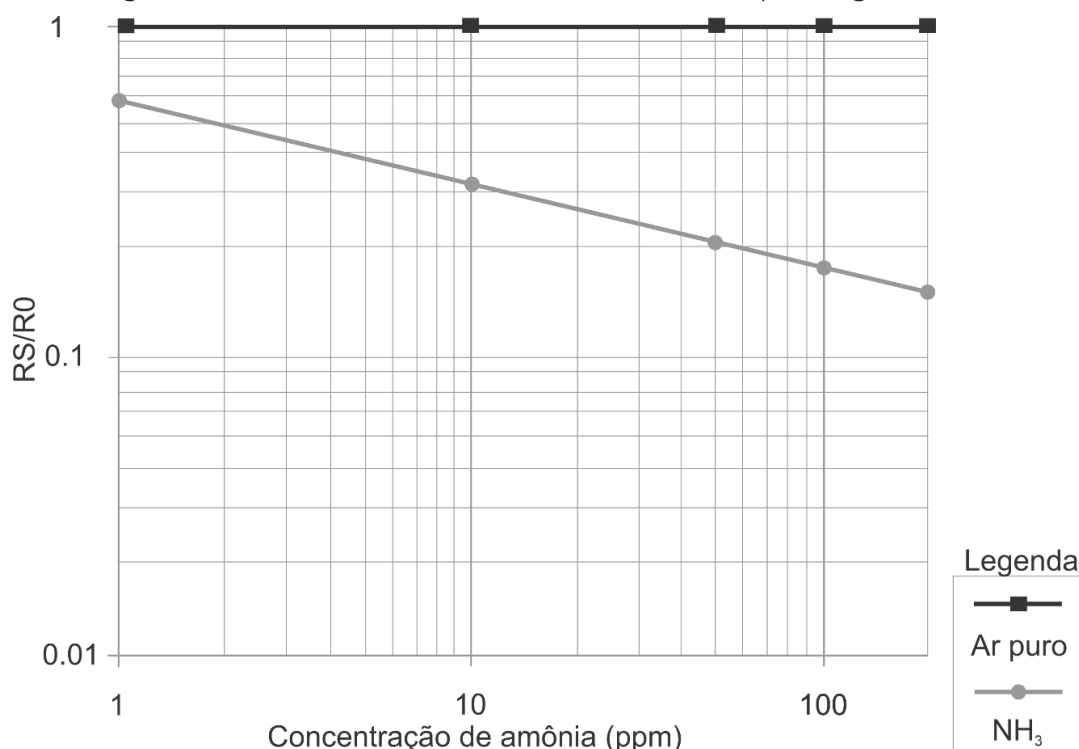
*VC – tensão de entrada do sensor; R_L -resistência de carga (47K ohms, recomendação); R_S – resistência do elemento sensor sob diferentes concentrações de gases; V_{RL} – tensão de resposta do sensor).

Fonte: Adaptado Omijeh e Machiavelli, 2019.

Destaca-se que, a resistência R_L (Figura 7) pode variar de 10 k Ω até 100 k Ω , o que depende diretamente dos níveis de concentração de amônia a ser mensurado. Vale destacar que, quanto maior for o valor de R_L mais sensível o sensor se torna, a recomendação do fabricante é que a R_L seja de 47 k Ω e que a calibração do sensor seja feita para a concentração de 10 ppm de amônia (HANWEI ELECTRONICS, S.D.; WINSEN, 2015).

Conforme discutido acima, o sensor fornece dados de tensão que estão correlacionados à concentração de amônia do ambiente em que está exposto. Contudo, faz-se necessário obter dados de concentração do gás alvo em partes por milhão (ppm). Para isso, é preciso consultar o gráfico de características de sensibilidade do sensor, informação que consta no manual técnico do equipamento e está ilustrada na Figura 8. O referido procedimento foi descrito detalhadamente pelo autor Aswint (2018).

Figura 8. Curva de sensibilidade do sensor MQ137 para o gás amônia



*RS - Resistência interna do sensor sob determinada concentração de gás; R0 – Resistência do sensor sob a presença de ar puro.

Fonte: Adaptado WINSEN, 2015.

Vale destacar que os módulos sensores de gases apresentam temperatura e umidade do ar ideais para sua operação, o padrão de fábrica do MQ137 é 20°C e 65%, respectivamente (WINSEN, 2015). Dessa forma, para o sensor entregar resultados apurados, deve-se realizar sua calibração mediante as condições reais de temperatura e umidade do ar a que está exposto. Este procedimento deve embasar-se nas curvas típicas do sensor sob diferentes condições de temperatura e umidade, as quais são apresentadas no manual do equipamento (WINSEN, 2015). Antunes (2019) aplicou a referida calibração em seu projeto, podendo-se verificar, neste trabalho mais detalhes sobre o sequenciamento lógico deste procedimento, bem como obter o código que foi implementado na Arduino IDE. A seguir estão listadas, na Tabela 10, informações técnicas sobre o sensor MQ137.

Tabela 10. Descrição de características técnicas do sensor MQ137

Tensão de alimentação	5 V DC
Comunicação	Sinal Analógico
Intervalo de medição	1 a 200 ppm
Precisão	3%
Tempo de pré-aquecimento*	48 horas
Tempo de aquecimento**	3 a 5 minutos
Tempo de resposta	30 segundos
Validade	5 anos

* Refere-se ao tempo em que sensor deve permanecer ligado durante a primeira vez que for usado ou após período de armazenamento.

** Refere-se ao tempo que o sensor deve permanecer ligado antes de realizar qualquer medição, período destinado para que haja equilíbrio térmico entre os componentes internos.

Fonte: WINSEN, 2015.

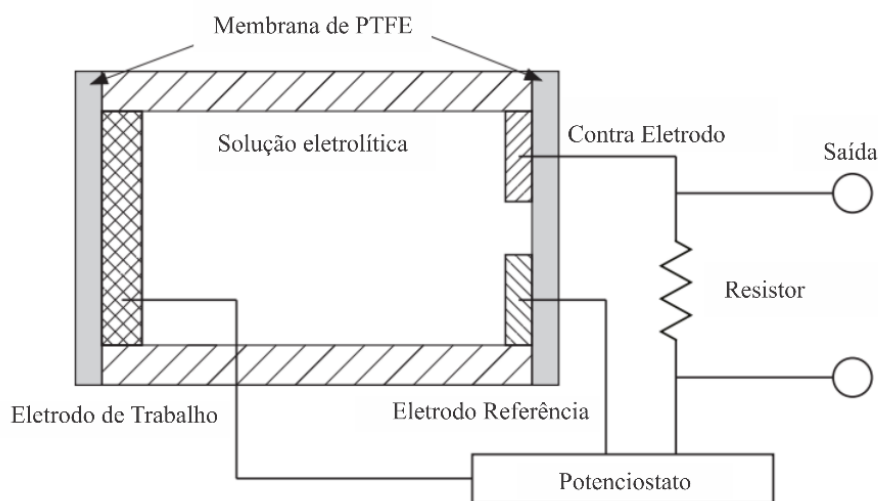
Características do sensor Figaro FECS44-100

O sensor FECS44-100 foi desenvolvido para detecção de amônia e pertence à família de sensores eletroquímicos FECS, desenvolvidos pela empresa Figaro. O FECS44-100 possui precisa sensibilidade para baixas concentrações de amônia (1 ppm), elevada seletividade, boa estabilidade nas leituras, saída de dados linear e durabilidade à exposição de amônia e material particulado (FIGARO, 2021).

As características do sensor FECS44-100 fazem com que ele seja aplicável à trabalhos acadêmico-científicos voltados para avaliação emissão e concentração de amônia em sistemas de produção intensivos pecuários. Contudo, o uso deste sensor para o desenvolvimento de pesquisas não é difundido, fato que pode estar relacionado a maior dificuldade de acesso ao sensor, devido a questões econômicas, de disponibilidade e de acessibilidade (importação).

O sensor FECS44-100 é composto por três pinos, pré-filtro (acoplado na parte superior da proteção) e proteção de resina (envoltório externo do sensor), dentro desta proteção existem eletrodos, eletrólitos e filtros. O sistema funciona devido à presença de três eletrodos, sendo eles: Eletrodo de Trabalho (ET), onde ocorre reação de oxidação; Contra Eletrodo (CE), onde ocorre reação de redução; Eletrodo de Referência (ER), que monitora a diferença de potencial elétrico (DDP) do ET. Um circuito potenciostático externo integra o sensor e, durante o período de operação, é responsável por manter o ET sob tensão constante (o referencial é o potencial elétrico do ER), independentemente da queda de tensão que houver. Dessa forma, há diferença de potencial entre o ET e CT, o que permite ocorrência de corrente elétrica (proporcional a concentração de amônia que o sensor está exposto) entre estes dois eletrodos (Figura 9). Devido a estas características, o FECS44-100 é um tipo de sensor amperométrico, sendo conhecido como Sensor Tipo Célula de Três Eletrodos ou Sensor Tipo Eletrolise de Potencial Controlado (LOWINSOHN; BERTOTTI, 2006 e FIGARO, 2021).

Figura 9. Esquema do princípio de funcionamento do sensor FECS44-100.



Fonte: Figaro, 2021.

Conforme supramencionado, o sensor FECS44-100 gera corrente elétrica proporcional à concentração da amônia, entretanto para realizar conexão à microcontroladores é preciso que o sinal de saída seja emitido em forma de tensão elétrica. Dessa forma, o módulo EM-FECS(B), compatível com toda série de sensores FECS, é responsável por realizar a conversão da corrente elétrica de saída do sensor para tensão (FIGARO, 2022), e está

ilustrado na Figura 10. O módulo é vendido separadamente, contudo o preço do FECS44-100 e módulo EM-FECS(B) pode chegar a custar 1250,00 dólares (orçamento realizado em 2025), valor que torna o uso deste sensor mais restrito, mas que é justificado por sua competência técnica. Na Tabela 11 estão listadas características técnicas do sensor FECS44-100.

Figura 10. Sensor FECS44-100 acoplado ao módulo EM-FECS(B)



*1- Tensão de entrada (V_{in}); 2- Tensão de base (V_{base}); 3- Tensão de saída (V_{out}); 4- Sem conexão; 5- Terra (GND).

Fonte: Os autores, 2025.

Tabela 11. Descrição de características técnicas do sensor FECS44-100

Tensão de alimentação	$5 \pm 0,2$ V DC
Comunicação	Sinal Analógico
Intervalo de medição	0 a 100 ppm
Precisão	± 1 ppm
Máxima concentração de exposição	200 ppm
Tempo de resposta	60 segundos
Validade	2 anos
Faixa de temperatura para operação	-30 a 50°C
Faixa de umidade relativa para operação	15 a 90%

Fonte: FIGARO, 2021 e FIGARO, 2022.

Características do módulo sensor Mixsen MIX2801

O módulo sensor MIX2801 é do tipo eletroquímico, desenvolvido pela empresa chinesa Mixsen, para mensuração de vários tipos de gases, incluindo a amônia. São diversas as recomendações de uso do sensor, dentre elas: monitoramento de vazamento de gás em plantas industriais, proteção ambiental e monitoramento de ambientes aéreos de unidade de produção agropecuária. O módulo sensor possui boa sensibilidade, estabilidade e acurácia, baixo consumo de energia e é capaz de emitir sinal digital e analógico, ao mesmo tempo (MIXSEN, S.D).

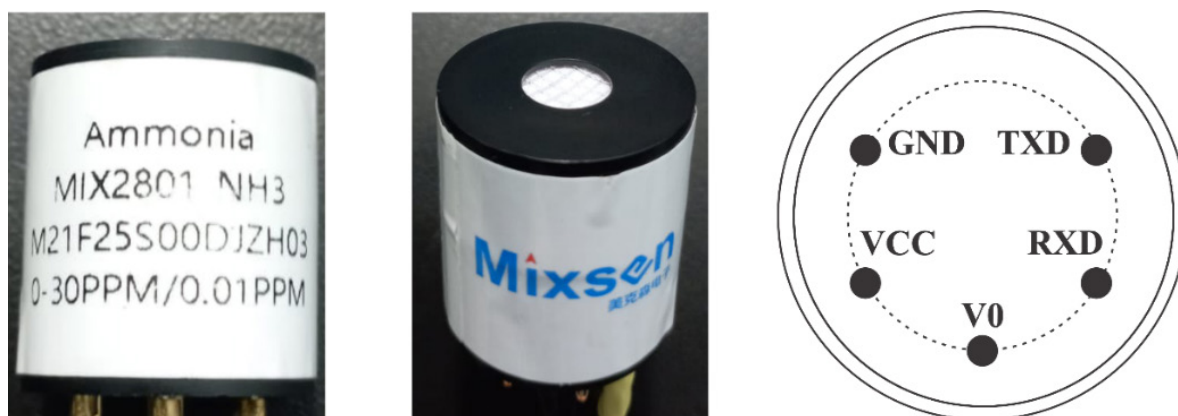
Mediante às características citadas, o MIX2801 pode ser aplicado no desenvolvimento de equipamentos portáteis ou fixos. Contudo, assim como é o caso do sensor FECS44-100,

o uso MIX2801 não é amplamente difundido na literatura científica, o que pode ser associado a dificuldades de aquisição, visibilidade/disponibilidade no mercado e à escassez de informações técnicas.

No próprio corpo do sensor MIX2801 já vem integrado um microprocessador de alto desempenho e um sensor de temperatura, componentes estes utilizados para corrigir o efeito da temperatura do ambiente na medição do sensor. O MIX2801 apresenta, em sua composição, três eletrodos, sendo que o seu princípio de funcionamento é semelhante ao do sensor FECS44-100. Sendo assim, o MIX2801 também é classificado como sensor amperométrico, ou seja, os dados de saída do sensor são enviados em forma de corrente elétrica, que, por sua vez, é proporcional à concentração de amônia (MIXSEN, S.D.). De acordo com a empresa fabricante, o MIX2801 (0-30 ppm) custa 65 dólares cada e o custo de envio/importação para o Brasil é de 42 dólares (orçamento realizado em 2025).

A representação do módulo sensor e suas especificações técnicas podem ser verificadas na Figura 11 e Tabela 12, respectivamente.

Figura 11. Módulo sensor MIX2801 e identificação de seus pinos.



GND (*Ground*) – Pino de referência de terra do sensor; VCC (*Voltage Common Collector*) – Pino de Alimentação do sensor; TXD (*Transmit Data*) – Pino de transmissão de dados seriais; RXD (*Receive Data*) – Pino de recebimento de dados; V0 (*Analog Output*) – Saída analógica do sensor.

Fonte: Os autores, 2025.

Tabela 12. Descrição de características técnicas do módulo sensor MIX2801.

Tensão de alimentação	5 ± 0,1 V DC
Comunicação	Sinal Analógico e Digital
Intervalo de medição	0 a 30 ppm
Precisão	±1 ppm
Tempo de resposta	120 segundos
Validade	2 anos
Temperatura do ar para operação/armazenamento	-20 a 25°C / -20 a 50°C
Umidade relativa para operação e armazenamento	15 a 90%

Fonte: MIXSEN, S.D.

Monitoramento microambiental de instalações para produção
intensiva de leite com uso de sensores acessíveis

CAPÍTULO 3

AMOSTRAGEM DE GASES
EM INSTALAÇÕES DE
CONFINAMENTO DE GADO DE
LEITE



Em clima tropical e subtropical, devido as condições climáticas e econômicas, viabiliza-se a adoção de instalações abertas para o confinamento do gado leiteiro. Sendo assim, do ponto de vista da representação do ambiente aéreo, é necessário planejar estrategicamente como será a distribuição dos sensores e pontos de amostragem, contribuindo para uma caracterização fidedigna da variabilidade espacial da concentração dos gases avaliados no interior da instalação.

As informações sobre a qualidade do ar das instalações podem ser obtidas utilizando métodos diretos ou indiretos, fazendo-se o uso de amostras individuais ou compostas. As medições devem ser realizadas ao longo das estações do ano, dando-se prioridade para verão e inverno (condições normalmente mais críticas). A qualidade do ar interna da unidade de produção é afetada pelos poluentes ali emitidos, que de forma geral são constituídos por gases poluentes (NH_3 , CO_2 , CH_4 , dentre outros), microrganismos e material particulado. As fontes emissoras destes poluentes são superfícies de pisos e paredes, alimentos, dejetos e metabolismo animal (DAMASCENO, 2020). É importante ressaltar que, as condições de qualidade do ar são dinâmicas, apresentando mudanças significativas e contínuas, de acordo com as condições ambientais momentâneas e as variações do tempo. Assim, para avaliar a qualidade do conhecimento, os pontos de medição devem ser bem posicionados. Deve-se objetivar a redução de possíveis interferências e a representatividade máxima da atmosfera interna. A escolha correta da configuração dos pontos de avaliação pode desencadear erros de 50% a 200% nos valores medidos (LEFCOURT, 2002; DAMASCENO, 2020).

As coletas dos dados podem ser pontuais ou compostas por vários pontos, para o último caso, verifica-se em literatura que os pesquisadores fazem o uso de linhas de tubulações com orifícios, essas geralmente são acopladas a uma bomba que faz a sucção do gás e o encaminha para o equipamento de análise. Ressalta-se que, é necessário considerar o tipo de tubo utilizado, a distância que o gás percorre até a análise e a duração desse processo (NGWABIE *et al.*, 2009; NGWABIE *et al.*, 2011; JOO *et al.*, 2015; JANKE *et al.*, 2020).

Isto é necessário, pois a amônia é facilmente absorvida pelas superfícies de contato, dependendo da temperatura, pressão, concentração e velocidade do fluxo de gases. A absorção de NH_3 pode mascarar as amostras, induzindo a uma caracterização errônea das regiões amostradas. O uso de amostras compostas e mais pontos de coletas permite verificar com maior precisão a variabilidade espacial dos gases no ambiente interno da instalação (DUMITRAS *et al.*, 2007; CALVET *et al.*, 2013; DAMASCENO, 2020).

De acordo com Pedersen *et al.* (2004), as fontes emissoras de gases podem ser pontuais (instalações mecanicamente ventiladas), pseudo-pontuais (instalações naturalmente ventiladas) ou superficiais (lagoas de tratamento de dejetos e aplicação de resíduos animais no campo). A determinação de métodos para avaliação do ambiente interno depende diretamente das características do galpão de confinamento. Para galpões fechados e mecanicamente ventilados (fonte pontual), a emissão pode ser calculada através da determinação da concentração do gás e a taxa de troca de ar. Nestas condições, é possível realizar essas medições, pois a fronteira (entradas e saídas de ar) é bem definida (PEDERSEN *et al.*, 2004; GATES *et al.*, 2009; CALVET *et al.*, 2013).

Em galpões abertos, quantificar as emissões de gases é um processo mais complexo e desafiador, uma vez que, enfrenta-se grande dificuldade para a determinar precisamente a taxa do fluxo de ar, devido às dificuldades de estabelecer as fronteiras. A passagem de ar pela instalação depende de uma série de parâmetros, como a velocidade e direção do vento, topografia da região, temperatura, calor proveniente dos animais e características do galpão. Todos esses fatores impactam na concentração do gás no interior da instalação,

ocasionando incerteza e elevada variabilidade temporal e espacial (OGINK *et al.*, 2013).

Devido a desafiadora tarefa de medir emissões de gases nas instalações abertas é importante que se tenha protocolos que apresentem métodos e padronizações para a execução de pesquisa, de forma a viabilizar a comparação e qualidade dos dados obtidos em diferentes estudos. À vista disto, o protocolo *Verification of Environmental Technologies for International Agricultural Production - VERA* (VERA, 2018), desenvolvido conjuntamente pela Alemanha, Holanda e Dinamarca, fornece padrões para avaliação do desempenho ambiental de instalações pecuárias, propondo padrões e métodos para caracterização das emissões de propriedade de produção animal.

De acordo com VERA (2018), para instalações de bovinos leiteiros naturalmente ventiladas, a determinação da emissão de amônia, material particulado e odores deve ser realizada durante um ano todo, em ao menos seis períodos independentes (igualmente distribuídos ao longo do ano). Durante esses períodos, o ambiente interno da instalação deve ser analisado por no mínimo 24 horas. Dessa forma, obedecendo o protocolo, se for estabelecido seis dias de coleta de dados, deverá se ter um dia de coleta a cada dois meses.

Essa recomendação foi sustentada pela pesquisa desenvolvida pelos autores Hempel *et al.* (2020), onde se avaliou a emissão de gases proveniente de um sistema tipo *Loose Housing*, naturalmente ventilado e localizado na região nordeste da Alemanha. Por meio da técnica de aprendizado de máquinas, coletou-se os dados ao longo de quarenta semanas, para determinar o menor período de coleta de dados que seria capaz de proporcionar uma estimativa precisa e confiável das emissões de gases na instalação.

Os autores verificaram que, dentre os cenários avaliados (vinte e sete ao todo), os que consideraram seis dias de coletada de dados, apresentaram menores erros na estimativa da emissão. Fato que vai de encontro com a recomendação estabelecida no protocolo VERA (2018). O cenário que apresentou o melhor desempenho geral foi o que considerou quatro períodos de coletas durante o ano, uma realizada no verão (junho a agosto) e as outras três realizadas no período de transição (março a maio e de setembro a dezembro), cada período com duração de quatorze dias.

Outro aspecto a ser considerado acerca da obtenção de dados representativos é o posicionamento dos pontos de medição, que variam conforme o projeto da instalação. Contudo, deve-se respeitar uma distância de 2 metros entre paredes ou aberturas, a altura do ponto deve ser de 3 metros no mínimo, para reduzir possíveis interferências dos animais e obstáculos. Recomenda-se que, as linhas de coletas de dados sejam distribuídas no máximo a cada 10 metros do comprimento do galpão e que seja utilizado mais de um ponto de coleta por linha (VERA, 2018).

De acordo com Janke *et al.* (2020), a maior quantidade de pontos por linha favorece o aumento da resolução da distribuição espacial da concentração dos gases. Os autores enfatizam que não há na literatura uma tendência explícita indicando se as linhas devem ser alocadas de forma a cobrir todas as saídas de ar, o meio do galpão ou estarem dispostas a fim de abranger a maior quantidade de área possível.

Dentre a variedade de gases emitidos pelas instalações de confinamento de bovinos leiteiro, a amônia pode acarretar danos à saúde dos animais e seres humanos, além de apresentar elevado potencial poluidor. Haja visto que, a emissão desse gás contribui para acidificação do solo, eutrofização de recursos hídricos, aumento da incidência de chuva ácida e formação de material particulado inalável ($PM_{2,5}$) (KOERKAMP, 1994; PUSHKARSKY *et al.*, 2003; NASEEM; KING, 2018; DAMASCENO, 2020). Posto isto, devido a maiores pressões governamentais, mercadológicas e sociais por produções cada vez mais sustentáveis é imperativa necessidade de quantificar as concentrações e emissões de NH_3 nas instala-

ções de bovinos leiteiros. De forma a viabilizar a elaboração de inventário de gases, dando base para processos de avaliação de impactos ambientais e prejuízos relacionados à saúde de trabalhadores, da população vizinha e dos animais.

*Monitoramento microambiental de instalações para produção
intensiva de leite com uso de sensores acessíveis*

CONSIDERAÇÕES FINAIS



O aumento da população mundial, as mudanças das exigências dos consumidores e as necessidades de uma produção mais sustentável, são fatores que impõem desafios à cadeia de produção animal. Desta forma, a cadeia produtiva opera sob justas margens e, assim, cresce a busca por melhorias na eficiência de processos ao longo de todo sistema de produção e, cada oportunidade de melhoria que houver será progressivamente valorizada e implementada no setor.

Este cenário, notadamente, abre caminho para a inserção de novas tecnologias, visando maior controle e monitoramento do sistema produtivo. Portanto, em consonância com as informações apresentadas neste trabalho, verifica-se que a implementação de projetos de monitoramento e controle baseados na integração de microcontroladores e sensores é uma tecnologia factível de aplicação nas unidades de produção animal brasileiras. Posto que, certos componentes eletrônicos são economicamente viáveis e apresentam compatibilidade com o tamanho e especificidade das instalações, o que permite adequar a quantidade de sensores ao tamanho da unidade de produção

No que diz respeito ao desenvolvimento de plataformas para o monitoramento do microclima das unidades de produção animal, vários resultados de trabalhos de pesquisa realizados demonstraram que é possível desenvolver um sistema preciso, robusto e economicamente viável. Ademais, atualmente existem diferentes tipos de sensores, os quais estão sendo aprimorados constante e rapidamente, que realizam as medições das variáveis de interesse e operam sob diferentes princípios de funcionamento.

Em relação aos sensores utilizados para aferir a concentração de amônia, deve-se destacar que eles requerem cuidados especiais, sendo de fundamental relevância seguir as recomendações e instruções constantes no manual técnico de cada equipamento.

Finalizando, verifica-se que é possível desenvolver um sistema de monitoramento preciso, robusto, de custo acessível e fácil operacionalidade e aplicabilidade à bovinocultura leiteira em específico, bem como às unidades de produção animal de uma maneira geral, tendo em vista que, no mercado, existem excelentes modelos de sensores disponíveis e que podem ser aplicados às necessidades de controle e monitoramento de uma UPL.

Monitoramento microambiental de instalações para produção intensiva de leite com uso de sensores acessíveis

REFERÊNCIAS

- ACEVEDO, C. M. D.; VASQUEZ, C. A. C.; GÓMEZ, J. K. C. Electronic nose dataset for COPD detection from smokers and healthy people through exhaled breath analysis. **Data in Brief**, v. 35, p. 106767, 2021.
- ADLA, S.; RAI, N. K., KARUMANCHI, S. H., TRIPATHI, S., DISSE, M., & PANDE, S. Laboratory calibration and performance evaluation of low-cost capacitive and very low-cost resistive soil moisture sensors. **Sensors**, v. 20, n. 2, p. 363, 2020.
- ANTUNES, A. M. S. **Development of an ammonia portable low-cost air quality station**. 2019. Dissertação (Mestrado) - Engenharia da Energia e do Ambiente, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2019.
- ARAÚJO, A. P. D. **Estudo comparativo de diferentes sistemas de instalações para produção de leite tipo B, com ênfase nos índices de conforto térmico e na caracterização econômica**. Dissertação (Mestrado em Zootecnia na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos), Universidade de São Paulo, Pirassununga. p.69. 2001.
- ASHRAE (AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS). **Fundamentals handbook. IP Edition**, v. 21, 2013.
- ASMAN, WILLEM AH. Factors influencing local dry deposition of gases with special reference to ammonia. **Atmospheric Environment**, v. 32, n. 3, p. 415-421, 1998.
- ASWINTH R. Measuring PPM from MQ Gas Sensors using Arduino (MQ-137 Ammonia). 2018. Disponível em: <<https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/arduino-mq137-ammonia-sensor>>. Acesso em: 25 mai. 2024.
- BACKER, J.; BATTYE, W.H.; ROBARGE, W.; ARYA, S.P.; ANEJA, V.P. Modeling and measurements of ammonia from poultry operations: Their emissions, transport, and deposition in the Chesapeake Bay. **Science of The Total Environment**, v. 706, p. 135290, 2020.
- BAÊTA, F. C.; SOUZA, C. F. **Ambiência em edificações rurais: conforto animal**. **Viçosa: UFV**, v. 2, 2010.
- BANDARA, A. Constant Current Hot-wire Anemometer. 2011. Tese de Doutorado. Ph. D. Thesis, University of Peradeniya.
- BASTOUNIS, A.; BUCKELL, J.; HARTMANN-BOYCE, J.; COOK, B.; KING, S.; POTTER, C.; JEBB, S. A. The Impact of Environmental Sustainability Labels on Willingness-to-Pay for Foods: A Systematic Review and Meta-Analysis of Discrete Choice Experiments. **Nutrients**, v. 13, n. 8, p. 2677, 2021.
- BLACK, R. A.; TARABA, J. L.; DAY, G. B.; DAMASCENO, F. A.; BEWLEY, J. M. Compost bedded pack dairy barn management, performance, and producer satisfaction. **Journal of dairy science**, v. 96, n. 12, p. 8060-8074, 2013.
- BOGENA, H. R.; HUISMAN, J. A.; SCHILLING, B.; WEUTHEN, A.; VEREECKEN, H. Effective calibration of low-cost soil water content sensors. **Sensors**, v. 17, n. 1, p. 208, 2017.
- BRASIL. Portaria nº 3214, de julho 1978. Normas regulamentadoras de segurança e saúde no trabalho. NR-15: atividades e operações insalubres. **Diário Oficial da União**, 1978.
- BUJŇÁK, M.; PIRNÍK, R.; NEMEC, D.; HRUBOŠ, M. Universal firefighter sensor for dangerous road tunnel environment. **Transportation research procedia**, v. 55, p. 1019-1025, 2021.
- CAMPOS, O. F.; LIZIEIRE, R. S.; CAMPOS, A.; CAMPOS, A. T. **Recria em rebanhos leiteiros**. **Embrapa Gado de Leite-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 2005.
- CASTRILLÓN, N.; GONZÁLEZ, V.; OSORIO, J. A.; MONTROYA, A. P.; CORREA, G. Assessment of the methane emission for different typologies of fattening swine facilities in the department of Antioquia-Colombia. **Agronomy Research**. v.18, p. 1189-1202, 2020.
- CASTRO, M R; PROHASKY D. **Mini airflow tunnel project tutorial**. 2014. Disponível em < <https://miniwindtunnel.wordpress.com/tutorial/>>. Acesso em: 26 de abril de 2024.
- CELESTI, A. **Analysis of ammonia release and best available practices to support farm management in the reduction of ammonia emissions in dairy houses**. Tese (Doutorado pelo Departamento de Gestão de Sistemas Agroalimentares e Ambientais, Secção de Construção e Território),

Università Degli Studi di Catania, Catania, p.102. 2014.

CHADWICK, D.; SOMMER, S.; THORMAN, R.; FANGUEIRO, D.; CARDENAS, L.; AMON, B.; MISSEL-BROOK, T. Manure management: Implications for greenhouse gas emissions. **Animal Feed Science and Technology**, v. 166, p. 514-531, 2011.

CODELUPPI, G.; CILFONE, A.; DAVOLI, L.; FERRARI, G. (2020). A LoRaWAN-based smart farming modular IoT architecture. **Sensors**, v. 20, n. 7, p. 2028, 2020.

DALLAS. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire® Digital Thermometer. 2019. Disponível em: < <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf> >. Acesso em: 29 de abr. de 2024.

DAMASCENO, F. A. **Compost Barn como alternativa para a pecuária leiteira**. 1. ed. Divinópolis: Adelante, 2020.

DENIZ, M.; SOUSA, K. T.; MORO, M. F.; VALE, M. M.; DITTRICH, J. R.; MACHADO FILHO, L. C. P.; HÖTZEL, M. J. Social hierarchy influences dairy cows' use of shade in a silvopastoral system under intensive rotational grazing. **Applied Animal Behaviour Science**, v. 244, p. 105467, 2021a.

DENIZ, M.; SOUSA, K. T.; GOMES, I. C.; FABRO, J. A.; VALE, M. M.; DITTRICH, J. R. Development and application of an autonomous data logger to measure environmental variables in livestock farming. **International Journal of Environmental Science and Technology**, p. 1-14, 2021b.

DFROBOT. SKU:SEN0193. Disponível em: < https://wiki.dfrobot.com/Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0193>. Acesso em: 03 mai. 2024.

DUMITRAS, D. C.; DUTU, D. C.; MATEI, C.; MAGUREANU, A. M.; PETRUS, M.; POPA, C. Laser photoacoustic spectroscopy: principles, instrumentation, and characterization. **Journal of Optoelectronics and Advanced Materials**, v. 9, n. 12, p. 3655, 2007.

EDOKOSSI, K.; CALABIA, A.; JIN, S.; MOLINA, I. GNSS-Reflectometry and remote sensing of soil moisture: A review of measurement techniques, methods, and applications. **Remote Sensing**, v. 12, n. 4, p. 614, 2020.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). **Anuário Leite 2020**: Leite de vacas felizes. 104 p, 2020. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1124722/anuario-leite-2020-leite-de-vacas-felizes>>. Acesso em: 05 set. 2021.

ESPRESSIF SYSTEMS. About Espressif. Shanghai – China. Disponível em: < <https://www.espressif.com/en/company/about-espressif> > . Acesso em: 03 jun. 2024.

FIGARO. EM-FECS(B) - Evaluation Module for FECS-series Sensors. Figaro Engineering INC. Osaka - Japão, 2022. 2 p. Disponível em: < https://www.figaro.co.jp/en/product/docs/em-fecs%28b%29_product%20infomation%28en%29_rev00.pdf>. Acesso em: 29 mai. 2024.

FIGARO. Technical Information for FECS44-100/-200. Figaro Engineering INC. Osaka – Japão, 2021. 9 p.

FOURNEL, S.; ROUSSEAU, A. N.; LABERGE, B. Rethinking environment control strategy of confined animal housing systems through precision livestock farming. **Biosystems Engineering**, v. 155, p. 96-123, 2017.

GAO, Yun; RAMIREZ, Brett C.; HOFF, Steven J. Omnidirectional thermal anemometer for low air-speed and multi-point measurement applications. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 127, p. 439-450, 2016.

GATES, R. S.; CASEY, K. D.; XIN, H.; BURNS, R. T. Building emissions uncertainty estimates. **Transactions of the ASABE**, v. 52, n. 4, p. 1345-1351, 2009.

GATES, R. S.; XIN, H.; CASEY, K. D.; LIANG, Y.; WHEELER, E. F. Method for measuring ammonia emissions from poultry houses. **Journal of applied poultry research**, v. 14, n. 3, p. 622-634, 2005.

GIDDEY, S.; BADWAL, S. P. S.; KULKARNI, A. Review of electrochemical ammonia production technologies and materials. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 34, p. 14576-14594, 2013.

GUIMARÃES, A.S.; MENDONÇA, L. C. **Compost barn: um novo sistema para a atividade leiteira**. IN:

- Embrapa, Informativo Técnico- Panorama do Leite- Ano 7, n 75, 7-8, 2015.
- HABEEB, Alsaied Alnaimy; GAD, Ahmed Elsayed; ATTA, Mostafa Abas. Temperature-humidity indices as indicators to heat stress of climatic conditions with relation to production and reproduction of farm animals. **International Journal of Biotechnology and Recent Advances**, v. 1, n. 1, p. 35-50, 2018.
- HANWEI ELECTRONICS. Technical data MQ-137 Gas Sensor. Disponível em: < <https://www.meterkala.com/media/uploads/files/products/MQ137.pdf>>. Acesso em: 24 mai. 2024.
- HAREVA, D. H.; MARSYAF, C. D. P. Air quality monitoring at Pelita Harapan university using the MQ-135 sensor. In: Proceedings of the 3rd **International Conference on Telecommunications and Communication Engineering**. p. 6-10. 2019.
- HEMPEL, S.; ADOLPHS, J.; LANDWEHR, N.; JANKE, D.; AMON, T. How the selection of training data and modeling approach affects the estimation of ammonia emissions from a naturally ventilated dairy barn—Classical statistics versus machine learning. **Sustainability**, v. 12, n. 3, p. 1030, 2020.
- HOFSTETTER, D.; FABIAN, E.; LORENZONI, A. G. Ammonia Generation System for Poultry Health Research Using Arduino. **Sensors**, v. 21, n. 19, p. 6664, 2021.
- INSTRUCTABLES CIRCUITS. Arduino MQ137 PPM Sensor. 2017. Disponível em: < <https://www.instructables.com/MQ137-PPM-Sensor/>>. Acesso em: 25 mai. 2024.
- JANKE, D.; WILLINK, D.; AMMON, C.; HEMPEL, S.; SCHRADE, S.; DEMEYER, P.; AMON, T. Calculation of ventilation rates and ammonia emissions: Comparison of sampling strategies for a naturally ventilated dairy barn. **Biosystems Engineering**, v. 198, p. 15-30, 2020.
- JANNI, K. A.; M. I. ENDRES; J. K. RENEAU; W. W. SCHOPER. Compost dairy barn layout and management recommendations. **Applied Engineering in Agriculture**, v.23, p.97-102, 2007.
- JAYCON SYSTEMS. Understanding a gas sensor. 2019. Disponível em: <<https://jayconsystems.com/blog/understanding-a-gas-sensor>> . Acesso em: 25 mai. 2024.
- JI, B.; GATES, R. S.; ZHENG, W.; GRIFT, T. E.; GREEN, A. R., KOELKEBECK, K. W. Design and Performance Evaluation of Upgraded Portable Monitoring Units for Barn Air Quality. In: **2015 ASABE Annual International Meeting**. American Society of Agricultural and Biological Engineers, p. 1. 2015.
- JI, B.; GATES, R. S.; ZHENG, W.; GRIFT, T. E.; GREEN, A. R., KOELKEBECK, K. W. Design and Performance Evaluation of Upgraded Portable Monitoring Units for Barn Air Quality. In: **2015 ASABE Annual International Meeting**. American Society of Agricultural and Biological Engineers, p. 1. 2015.
- JOO, H. S.; NDEGWA, P. M.; HEBER, A. J.; NI, J. Q.; BOGAN, B. W.; RAMIREZ-DORRONSORO, J. C.; CORTUS, E. Greenhouse gas emissions from naturally ventilated freestall dairy barns. **Atmospheric Environment**, v. 102, p. 384-392, 2015.
- KERSCHBAUMER, R. **Engenharia de controle e Automação: Microcontroladores**. Instituto Federal Catarinense. Santa Catarina (BR). 2018.
- KOERKAMP, P.W.G. Review on emissions of ammonia from housing systems for laying hens in relation to sources, processes, building design and manure handling. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 59, n. 2, p. 73-87, 1994.
- KOLBAN, N. **Kolban's book on ESP32**. [s. n.]. Texas (USA). 2018.
- KWAK, D.; LEI, Y.; MARIC, R. Ammonia gas sensors: A comprehensive review. **Talanta**, v. 204, p. 713-730, 2019.
- LEFCOURT, A. M. Some potential problems for measuring ammonia emissions from farm structures. **Transactions of the ASAE**, v. 45, n. 5, p. 1585, 2002.
- LESO, L.; BARBARI, M.; LOPES, M. A.; DAMASCENO, F. A.; GALAMA, P., TARABA, J. L.; KUIPERS, A. Invited review: Compost-bedded pack barns for dairy cows. *Journal of Dairy Science*, v. 103, n. 2, p. 1072-1099, 2020.
- LESO, L.; PELLEGRINI, P.; BARBARI, M. Effect of two housing systems on performance and longevity

- of dairy cows in Northern Italy. **Agronomy Research**, v.17, n. 2, p. 97 – 102, 2019.
- LOKHANDE, K.; BHONGADE, M.; MESHARAM, N.; KHOPE, N.; KOTHE, N.; SEGANWAR, P.; DHOLE, P. IOT based Automatic Farm Monitoring. **International Journal of Scientific Research in Science and Technology**. vol, v. 6, p. 332-337, 2019.
- LOWINSOHN, D.; BERTOTTI, M. Sensores eletroquímicos: considerações sobre mecanismos de funcionamento e aplicações no monitoramento de espécies químicas em ambientes microscópicos. **Química Nova**, v. 29, n. 6, p. 1318-1325, 2006.
- LUNDSTRÖM, Hans. Investigation of heat transfer from thin wires in air and a new method for temperature correction of hot-wire anemometers. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 128, p. 110403, 2021.
- MIXSEN. MIX2801 Toxic Gas Detection Module. Shenzhen Mixsen Electronics Co. Ltd. Shenzhen – China, S.D. 4 p. Disponível em: < <https://www.mixsensors.com/uploads/soft/1911/MIX2801.pdf>>. Acesso em: 30 mai. 2024.
- MODERN DEVICE. Wind Sensor Rev. P. 2025. Disponível em: < <https://moderndevice.com/products/wind-sensor-rev-p>>. Acesso em: 02 de fev. de 2025.
- MOTA, V. C.; CAMPOS, A. T.; DAMASCENO, F. A.; MELO, E. A. R.; AMARAL, C. P. R.; ABREU, L. R.; VAREIRO, T. Confinamento para bovinos leiteiros: histórico e características. **PUBVET**, v. 11, p. 424-537, 2017.
- MUZDRIKAH, F. S.; NUHA, M. S.; RIZQI, F. A. Calibration of capacitive soil moisture sensor (SKU: SEN0193). In: **2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST)**. IEEE, 2018. p. 1-6.
- NAGAHAGE, E. A. A.; NAGAHAGE, I. S. P.; FUJINO, T. Calibration and validation of a low-cost capacitive moisture sensor to integrate the automated soil moisture monitoring system. **Agriculture**, v. 9, n. 7, p. 141, 2019.
- NASEEM, S.; KING, A. J. Ammonia production in poultry houses can affect health of humans, birds, and the environment—techniques for its reduction during poultry production. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 16, p. 15269-15293, 2018.
- NAWAB, A; IBTISHAM, F., LI, G., KIESER, B., WU, J., LIU, W. Heat stress in poultry production: Mitigation strategies to overcome the future challenges facing the global poultry industry. **Journal of Thermal Biology**, v. 78, p. 131-139, 2018.
- NGWABIE, N. M.; JEPSSON, K. H.; GUSTAFSSON, G.; NIMMERMARK, S. Effects of animal activity and air temperature on methane and ammonia emissions from a naturally ventilated building for dairy cows. **Atmospheric Environment**, v. 45, n. 37, p. 6760-6768, 2011.
- NGWABIE, N. M.; JEPSSON, K. H.; NIMMERMARK, S.; SWENSSON, C.; GUSTAFSSON, G. Multi-location measurements of greenhouse gases and emission rates of methane and ammonia from a naturally-ventilated barn for dairy cows. **Biosystems Engineering**, v. 103, n. 1, p. 68-77, 2009.
- OGINK, N. W.; MOSQUERA, J.; CALVET, S.; ZHANG, G. Methods for measuring gas emissions from naturally ventilated livestock buildings: Developments over the last decade and perspectives for improvement. **Biosystems engineering**, v. 116, n. 3, p. 297-308, 2013.
- OLIVEIRA, V. C.; DAMASCENO, F. A.; OLIVEIRA, C. E. A.; FERRAZ, P. F. P.; FERRAZ, G. A. S.; SARAZ, J. A. O. Compost-bedded pack barns in the state of Minas Gerais: architectural and technological characterization. **Agronomy Research**, v. 17, n. 5, p. 2016-2028, 2019.
- OMIJEH, B.; MACHIAVELLI, A. O. Optimizing a Sensor to Detect Ammonium Nitrate Based IEDS in Vehicles Using Artificial Neural Networks. **American Journal of Neural Networks and Applications**, v. 5, n. 1, p. 1-6, 2019.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **World population prospects 2019: Highlights**. Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2019.
- PEDERSEN, S.; MONTENY, G. J.; XIN, H.; TAKAI, H. Progress in research into ammonia and green-

- house gas emissions from animal production facilities. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, 2004.
- PEREIRA, W. F.; FONSECA, L. S.; PUTTI, F. F.; GÓES, B. C.; NAVES, L. P. Environmental monitoring in a poultry farm using an instrument developed with the internet of things concept. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 170, p. 105257, 2020.
- PETRIC, M.; DODIGOVIĆ, F.; GRČIĆ, I.; MARKUŽIĆ, P.; RADETIĆ, L.; TOPIĆ, M. Ammonia concentration monitoring using arduino platform. **Environmental Engineering-Inženjerstvo okoliša**, v. 6, n. 1, p. 21-26, 2019.
- PLACIDI, P.; GASPERINI, L.; GRASSI, A.; CECCONI, M.; SCORZONI, A. Characterization of low-cost capacitive soil moisture sensors for IoT networks. **Sensors**, v. 20, n. 12, p. 3585, 2020.
- PROHASKY, D.; WATKINS, S. Low cost hot-element anemometry verses the TFI Cobra. In: **19th Australasian Fluid Mechanics Conference**. 2014.
- PUSHKARSKY, M. B.; WEBBER, M. E.; PATEL, C. K. N. Ultra-sensitive ambient ammonia detection using CO₂-laser-based photoacoustic spectroscopy. **Applied Physics B**, v. 77, n. 4, p. 381-385, 2003.
- QU, Q.; GROOT, J. C.; ZHANG, K.; SCHULTE, R. P. Effects of housing system, measurement methods and environmental factors on estimating ammonia and methane emission rates in dairy barns: **A meta-analysis. Biosystems Engineering**, v. 205, p. 64-75, 2021.
- QU, Y.; SUN, G.; ZHENG, B.; LIU, W. Environment Monitoring System of Dairy Cattle Farming Based on Multi Parameter Fusion. **Information**, v. 12, n. 7, p. 273, 2021.
- RAFIQUZZAMAN, M. **Microcontroller Theory and Applications with the PIC18F**. 2 Ed. New Jersey (USA). John Wiley & Sons, 2018.
- SEJIAN V.; BHATTA R.; MALIK P.K.; MADIAJAGAN B.; AL-HOSNI Y.A.S.; SULLIVAN M.; GAUGHAN J.B. Livestock as sources of greenhouse gases and its significance to climate change. **Greenhouse Gases**, p. 243-259, 2016.
- SEJIAN, V.; BHATTA, R.; GAUGHAN, J. B.; DUNSHEA, F. R.; LACETERA, N. Adaptation of animals to heat stress. **Animal**, v. 12, n. s2, p. s431-s444, 2018.
- SIVAKAMI, V.; VASUKI, B. Experimental Investigation and Uncertainty Analysis of Constant Voltage Anemometer Using Low-Cost Sensor. **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering**, v. 44, n. 4, p. 1605-1617, 2020.
- TANGUY, N. R.; THOMPSON, M.; YAN, N. A review on advances in application of polyaniline for ammonia detection. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 257, p. 1044-1064, 2018.
- TEM ELETRONIC COMPONENTS. SHT-series Humidity Sensors. 2021. Disponível em: < <https://www.tme.eu/en/news/library-articles/page/43548/sht-series-humidity-sensors/> >. Acesso em: 27 de abr. de 2024.
- TOLENTINO, L. K. S.; FERNANDEZ, E. O.; AMORA, S. N. D.; BARTOLATA, D. K. T.; SARUCAM, J. R. V.; SOBREPENA, J. C. L.; SOMBOL, K. Y. P. Yield evaluation of Brassica rapa, Lactuca sativa, and Brassica integrifolia using image processing in an IoT-based aquaponics with temperature-controlled greenhouse. **AGRIVITA, Journal of Agricultural Science**, v. 42, n. 3, p. 393-410, 2020.
- VAZ, C. M.; JONES, S.; MEDING, M.; TULLER, M. Evaluation of standard calibration functions for eight electromagnetic soil moisture sensors. **Vadose Zone Journal**, v. 12, n. 2, 2013.
- VERDOES, N.; BOKMA, S. Scheiding van urine en feces bij melkvee: fysiologie, gedragsherkenning en techniek. **Wageningen Livestock Research**, 2017.
- Verification of Environmental Technologies for International Agricultural Production (VERA). Test Protocol for Livestock Housing and Management Systems*. International VERA Secretariat: Delft, The Netherlands, p.60, 2018.
- WHEELER, E. F.; ZAJACZKOWSKI, J. S.; TOPPER, P. A.; GATES, R. S.; XIN, H.; CASEY, K. D.; LIANG, Y. Ammonia emissions from broiler houses in Pennsylvania during cold weather. In: **Proceedings of**

International Symposium on Gaseous and Odour Emissions from Animal Production Facilities. Horsens, Denmark, June 1-4, p. 221-228. 2003.

WICAKSANA, F; FANE, A. G.; LAW, A. W. The use of constant temperature anemometry for permeate flow distribution measurement in a submerged hollow fibre system. **Journal of Membrane Science**, v. 339, n. 1-2, p. 195-203, 2009.

WILHELM, L. R.; MILNER, J. M.; SNYDER, S. D.; MCKINNEY, D. B. An instrumentation system for environmental measurements in broiler and swine housing. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 17, n. 5, p. 677, 2001.

WINSEN. Ammonia Gas Sensor Manual. 2015. Disponível em: < <https://www.winsen-sensor.com/d/files/semiconductor/mq137.pdf>>. Acesso em: 24 mai. 2024.

WOLF, K. **A Portable Sensor for Measuring Gas Emissions from Dairy Compost Bedded Pack Barns**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Biosistemas), University of Kentucky, Lexington, p.103. 2017.

XIONG, L.; COMPTON, R. G. Amperometric gas detection: A review. **Int. J. Electrochem. Sci**, v. 9, n. 12, p. 7152-7181, 2014.

ZELENOVSKY, R; MENDONÇA, A. **Microcontroladores: Programação e Projeto com a Família 8051**. 3 Ed. Rio de Janeiro (BR). MZ Editora, 2017.

ZHANG, S. R.; WANG, J. H.; DONG, D. M.; ZHENG, W. G.; ZHAO, X. D. A review of contact sensors used for monitoring malodorous gas in animal facilities. In: **Advanced Materials Research**. Trans Tech Publications Ltd, p. 655-661. 2013.

ZOU, B.; SHI, Z.; DU, S. Gases emissions estimation and analysis by using carbon dioxide balance method in natural-ventilated dairy cow barns. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 13, n. 2, p. 41-47, 2020.

