UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, NATURAIS E DA SAÚDE
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO

DANIEL OLIVEIRA SOUZA SANTOS

DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR DE BAIXO CUSTO, BASEADO EM ARDUINO, PARA MENSURAÇÃO DE QUALIDADE DO AR EM UM SISTEMA COMPOST BARN

ALEGRE - ES
2026

DANIEL OLIVEIRA SOUZA SANTOS

DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR DE BAIXO CUSTO, BASEADO EM ARDUINO, PARA MENSURAÇÃO DE QUALIDADE DO AR EM UM SISTEMA COMPOST BARN

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Computação do Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Sistemas de Informação.

Orientador: Prof. Dr. Helder de Amorim Mendes.

ALEGRE - ES

2026

Daniel Oliveira Souza Santos

DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR DE BAIXO CUSTO, BASEADO EM ARDUINO, PARA MENSURAÇÃO DE QUALIDADE DO AR EM UM SISTEMA COMPOST BARN

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Computação do Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Sistemas de Informação.

Aprovado em 16 de julho de 2026.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Helder de Amorim Mendes
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Geraldo Regis Mauri
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Rafael Assis Torres de Almeida
Universidade Federal do Espírito Santo

Digitalizado com CamScanner

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo apoio incondicional, por me ensinarem o valor da educação e por sempre me incentivarem a nunca desistir dela.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador, Prof. Dr. Helder de Amorim Mendes, pela paciência, orientação e por me ensinar a importância da organização durante este trabalho.
Sou também profundamente grato à minha namorada, pelo incentivo constante, pela ajuda nos momentos difíceis e por me lembrar constantemente do valor da disciplina, e nunca desistir de mim.

RESUMO

A intensificação dos sistemas de produção animal, especialmente em regimes de confinamento como o *compost barn*, tem ampliado a necessidade de controle rigoroso das condições ambientais, com destaque para a qualidade do ar. O acúmulo de gases provenientes do metabolismo animal e da decomposição de dejetos, em especial o dióxido de carbono (CO_2), pode comprometer o bem-estar animal, a saúde dos trabalhadores e a eficiência produtiva. Embora existam métodos consolidados para mensuração de CO_2 em ambientes pecuários, estes geralmente apresentam elevado custo e complexidade operacional, limitando sua adoção por produtores e instituições de ensino. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um sensor de baixo custo, baseado na plataforma Arduino, para monitoramento de CO_2 em galpões de confinamento do tipo *compost barn* e para uso nos Laboratórios de Zootecnia da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) – *Campus* Alegre. A metodologia envolveu o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados, a integração dos sensores candidatos e a realização de ensaios em ambiente controlado, com geração de gases por meio de processo de pirólise. As medições obtidas foram comparadas com um sensor comercial de referência baseado em tecnologia NDIR (AZ77535), sendo analisados parâmetros estatísticos como correlação, regressão linear, viés, precisão e acurácia. Os resultados indicaram baixo desempenho dos sensores avaliados, com coeficientes de correlação próximos de zero e elevados erros em relação ao sensor de referência, evidenciando limitações na capacidade de estimar a concentração de CO_2 nas condições experimentais adotadas. Fatores como elevada umidade relativa e diferenças no princípio de medição dos sensores contribuíram para os resultados observados. Dessa forma, conclui-se que, nas condições deste estudo, os sensores analisados não apresentaram desempenho adequado para aplicação direta no monitoramento de CO_2 em sistemas de confinamento animal, sendo necessária a realização de estudos adicionais em condições controladas e com estratégias de calibração mais robustas.

Palavras-chave: monitoramento ambiental; dióxido de carbono; sensores de gases; confinamento animal; produção animal.

ABSTRACT

The intensification of animal production systems, particularly in confinement regimes such as compost barn, has increased the need for strict control of environmental conditions, with emphasis on air quality. The accumulation of gases resulting from animal metabolism and manure decomposition, especially carbon dioxide (CO_2), can negatively impact animal welfare, worker health, and production efficiency. Although there are established methods for measuring CO_2 in livestock environments, they are often costly and operationally complex, limiting their adoption by farmers and educational institutions. In this context, this study aimed to develop a low-cost sensing system based on the Arduino platform for monitoring CO_2 in livestock confinement environments and for use in laboratory applications. The methodology involved the development of a data acquisition system, integration of candidate sensors, and experimental tests conducted under controlled laboratory conditions, with gas generation through a pyrolysis process. The measurements obtained were compared with a commercial reference sensor based on NDIR (Non-Dispersive Infrared) technology (AZ77535), and statistical parameters such as correlation, linear regression, bias, precision, and accuracy were analyzed. The results indicated poor performance of the evaluated sensors, with correlation coefficients close to zero and high errors relative to the reference sensor, demonstrating limitations in their ability to estimate CO_2 concentration under the experimental conditions adopted. Factors such as high relative humidity and differences in the sensors' measurement principles contributed to the observed results. Therefore, it is concluded that, under the conditions of this study, the evaluated sensors are not suitable for direct application in CO_2 monitoring in animal confinement systems. Further studies under controlled conditions and with more robust calibration strategies are required.

Keywords: environmental monitoring; carbon dioxide; gas sensors; confined animal systems; animal production.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Sistema Compost Barn..... 14
Figura 2. Principais gases emitidos por ruminantes e suas respectivas proporções..... 15
Figura 3. Metodologias de monitoramento de gases de efeito estufa e gases prejudiciais..... 17
Figura 4. Fluxograma de atividades metodológicas..... 20
Figura 5. Sensor MG811..... 21
Figura 6. Sensor ENS160..... 21
Figura 7. Sensor AZ77535..... 22
Figura 8. Placa Arduino Uno..... 22
Figura 9. Forno de Pirólise do laboratório LaFTOP..... 23
Figura 10. Amostra utilizada..... 23
Figura 11. Protótipo montado..... 24
Figura 12. Amostra pronta para ir ao forno..... 25
Figura 13. Sistema auxiliar de condução e visualização dos gases..... 25
Figura 14. Balão de destilação..... 26
Figura 15. Evolução de valores de CO_2 ao longo do tempo..... 28
Figura 16. Gráfico de dispersão MG811..... 29
Figura 17. Gráfico de dispersão ENS160..... 29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:Resultados da análise estatística.....28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CH_4	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
FTIR	Espectrômetro de transformada de Fourier / *Fourier Transform Infrared Spectroscopy*
GC	Cromatografia gasosa / *Gas Chromatography*
GEE	Gases de efeito estufa
H	Hidrogênio
H_2S	Sulfeto de hidrogênio
IDE	Ambiente de desenvolvimento integrado / *Integrated Development Environment*
LMD	Detector portátil de metano a laser / *Handheld Laser Methane Detector*
MOx	Metal Oxide (Óxidos Metálicos): tecnologia de sensores baseada na variação da resistência elétrica de materiais semicondutores em resposta à presença de gases.
N_2O	Óxido nitroso
NDIR	Infravermelho não dispersivo / *Nondispersive Infrared Sensor*
NH_3	Amônia
PAS	Espectroscopia fotoacústica / *Photoacoustic Spectroscopy*
SWIR	Infravermelho de onda curta / *Short-Wave Infrared*
TDLAS	Espectroscopia de absorção a laser de diodo sintonizável / *Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO..... 11
1.1 OBJETIVO GERAL..... 12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... 12
2. REVISÃO DE LITERATURA..... 13
3.1 SISTEMAS INTENSIVOS DE PRODUÇÃO ANIMAL..... 13
3.2 AMBIENTE ANIMAL E QUALIDADE DO AR..... 14
3.3 MÉTODOS DE MONITORAMENTO DE CO2 EM AMBIENTES PECUÁRIOS..... 16
3.4 ARDUINO..... 17
3.5 PROCESSO DE PIRÓLISE..... 18
3. METODOLOGIA..... 19
4.1 EXPERIMENTO EM AMBIENTE LABORATORIAL..... 20
4. RESULTADOS..... 27
5. DISCUSSÃO..... 31
6. CONCLUSÃO..... 33
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 34
APÊNDICE A – DADOS EXPERIMENTAIS..... 37
ANEXO A – PERFIL DE TEMPERATURA DO FORNO E AMOSTRA DURANTE EXPERIMENTO..... 41

1. INTRODUÇÃO

A intensificação dos sistemas de produção animal tem se consolidado como uma estratégia amplamente adotada para aumento da eficiência produtiva e do controle zootécnico (BEWLEY et al., 2017). Em especial, sistemas de confinamento na pecuária leiteira, como o *compost barn*, permitem maior controle das condições ambientais às quais os animais são submetidos, impactando diretamente em fatores relacionados ao bem-estar animal, à sanidade e à produtividade (LESO et al., 2020). Entretanto, a concentração de animais em ambientes fechados favorece o acúmulo de gases provenientes do metabolismo animal e da decomposição de dejetos (LEYTEM et al., 2011), tornando a qualidade do ar um fator crítico nesses sistemas de produção.

É importante ressaltar que a produção animal tem contribuição significativa na emissão de gases de efeito estufa (GEE). Os gases de efeito estufa (GEE) são o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O) e são caracterizados pelos impactos no ambiente interno das instalações e no ambiente global. Em sistemas de confinamento, o CO_2, proveniente principalmente do metabolismo animal e da decomposição de matéria orgânica (MA et al., 2024), influencia diretamente o conforto térmico, a dissipação de calor e a disponibilidade de oxigênio. Concentrações elevadas desses gases podem comprometer o bem-estar animal, a saúde dos trabalhadores e a eficiência produtiva, tornando essencial o monitoramento contínuo (DE PAULA et al., 2013).

Embora tenha sido originalmente concebido para regiões de clima temperado, o sistema *Compost Barn* consolidou-se como alternativa de confinamento adotada por produtores brasileiros nas últimas décadas (EMBRAPA, 2020). Sua implementação em condições tropicais e subtropicais, predominantes no Brasil, evidencia a necessidade de investigações adicionais que avaliem seu desempenho, especialmente quanto à adaptação às estruturas de galpões abertos amplamente utilizadas no contexto nacional (OLIVEIRA et al., 2023).

De acordo com Mendes et al. (2015), métodos tradicionais de mensuração de CO_2 em ambientes pecuários incluem técnicas como espectroscopia fotoacústica, laser de caminho aberto e sensores baseados em infravermelho não dispersivo (NDIR). Embora apresentem elevada precisão, esses métodos envolvem custos elevados e complexidade operacional, tornando-se inacessível para o produtor médio.

Nesse contexto, o avanço de plataformas de prototipagem eletrônica de baixo custo, como o Arduino, tem ampliado as possibilidades de desenvolvimento de sistemas de monitoramento ambiental acessíveis e personalizáveis (PEREIRA; RAMOS, 2020). Para Oliveira (2015), o Arduino apresenta potencial para aplicações em ambientes pecuários devido à sua versatilidade e baixo custo, o que permite a integração com diferentes tecnologias de sensores para o monitoramento ambiental. Essa flexibilidade possibilita a adoção de distintos métodos de mensuração, desde que os sensores utilizados sejam devidamente calibrados e validados em relação a equipamentos de referência (ARDUINO, 2022).

Diante disso, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sensor de CO_2 com base na plataforma Arduino para uso em ambientes de produção animal em regime de confinamento como o *compost barn*, comparar sua performance com um sensor portátil comercial disponível no mercado, avaliando sua viabilidade de uso em Laboratórios de Zootecnia da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) – *Campus* Alegre. Busca-se, assim, contribuir para o desenvolvimento de soluções tecnológicas acessíveis que auxiliem no monitoramento ambiental, no bem-estar animal e no suporte às atividades laboratoriais e produtivas da região.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um sensor de baixo custo, baseado em Arduino, com performance equiparável a um sensor comercial, para monitoramento dos níveis de CO_2 em galpões de criação de gado leiteiro do tipo *compost barn* e para uso em Laboratórios de Zootecnia da UFES - *Campus* Alegre.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar a viabilidade de sensores Arduino para mensuração de níveis de CO_2 para o uso em Análises laboratoriais nos Laboratórios de Zootecnia;
- Comparar a performance do protótipo com sensores disponíveis no mercado em ambiente controlado e traçar uma fórmula de ajuste de performance;
- Avaliar os resultados obtidos e disponibilizar uma ferramenta para uso dos Laboratórios de Zootecnia da UFES *Campus* Alegre e produtores parceiros locais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A presente revisão tem como objetivo fundamentar teoricamente os principais aspectos relacionados aos sistemas intensivos de produção animal e suas implicações ambientais. Inicialmente, são discutidas as características dos sistemas de confinamento, com ênfase no modelo *Compost Barn*. Em seguida, são apresentados os fatores relacionados ao ambiente animal e à qualidade do ar, destacando a emissão e o acúmulo de gases em instalações pecuárias. Posteriormente, são descritos os principais métodos de monitoramento de dióxido de carbono (CO_2) em ambientes de produção animal. Por fim, discute-se o uso da plataforma Arduino como alternativa tecnológica de baixo custo para sistemas de monitoramento ambiental.

3.1 SISTEMAS INTENSIVOS DE PRODUÇÃO ANIMAL

A escolha do ambiente de criação de animais de produção é uma decisão importante que impacta diretamente em fatores como saúde e bem-estar animal. Embora o regime extensivo, onde o gado encontra-se livre no pasto, permite uma maior liberdade e conforto para o animal, fatores como clima e higiene podem apresentar desafios, gerando impacto no desempenho produtivo e estresse térmico. Em resposta a esses desafios surge a necessidade de um regime de confinamento onde há maior controle, como por exemplo o uso de galpões para abrigo constante dos animais (BEWLEY et al., 2017).

Os sistemas intensivos de produção animal, como o confinamento ou semiconfinamento, tratam-se de uma prática utilizada na indústria pecuária que consiste na concentração de animais em uma área limitada, tornando-se dependentes dos humanos para suas necessidades (NONATO, 2023). Os sistemas intensivos de produção animal são amplamente adotados devido ao aumento da eficiência produtiva e controle zootécnico (BEWLEY et al., 2017).

Dentre os diferentes tipos de regime de confinamento destaca-se o *compost barn*, que consiste em uma área comum de descanso para animais e liberdade de livre circulação com acesso a uma pista de alimentação, como apresentado na Figura 1. A cama, material usado para cobrir o chão onde as vacas repousam, é geralmente composta de serragem e absorve os dejetos animais. Se a cama não for revirada, resulta no acúmulo de gases e resíduos, possibilitando a proliferação de microrganismos que representam um risco de contaminação para doenças infecciosas como a mastite (BLACK et al., 2014).

Figura 1. Sistema *Compost Barn*.
Fonte: Banco de imagens da Embrapa.
Por: MENDONÇA, Letícia Caldas, GUIMARÃES, Alessandro de Sá.

3.2 AMBIENTE ANIMAL E QUALIDADE DO AR

Os ruminantes possuem um sistema digestivo especializado, composto por rúmen, retículo, omaso e abomaso, que viabiliza o processo de ruminação. Durante o processo de fermentação dos alimentos no rúmen, os microrganismos ruminais produzem quantidades expressivas de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e amônia (NH_3), além de concentrações menores de hidrogênio (H_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S), monóxido de carbono (CO) e outros gases associados à atividade metabólica (MA et al., 2024). A Figura 2 ilustra os principais gases emitidos e suas proporções. Os gases de efeito estufa provenientes do metabolismo animal e de decomposição de dejetos em um ambiente fechado, geram o acúmulo de gases, impactando a qualidade do ar do ambiente (LEYTEM et al., 2011).

A região Sudeste do Brasil apresenta clima tropical (SEKI et al., 2021), caracterizado por altas temperaturas e elevada umidade ao longo do ano. Essas condições, em conjunto com o acúmulo de gases como dióxido de carbono (CO_2), que dificultam a dissipação de calor,

podem gerar estresse térmico e riscos de contaminação, que causam desconforto para os animais dentro do galpão, impactando diretamente seu bem-estar e a produtividade (MA et al., 2024; DE PAULA et al., 2013) . Por isso, torna-se essencial o controle rigoroso das condições ambientais, como temperatura, ventilação e umidade, para garantir tanto a saúde dos animais quanto a eficiência econômica da produção.

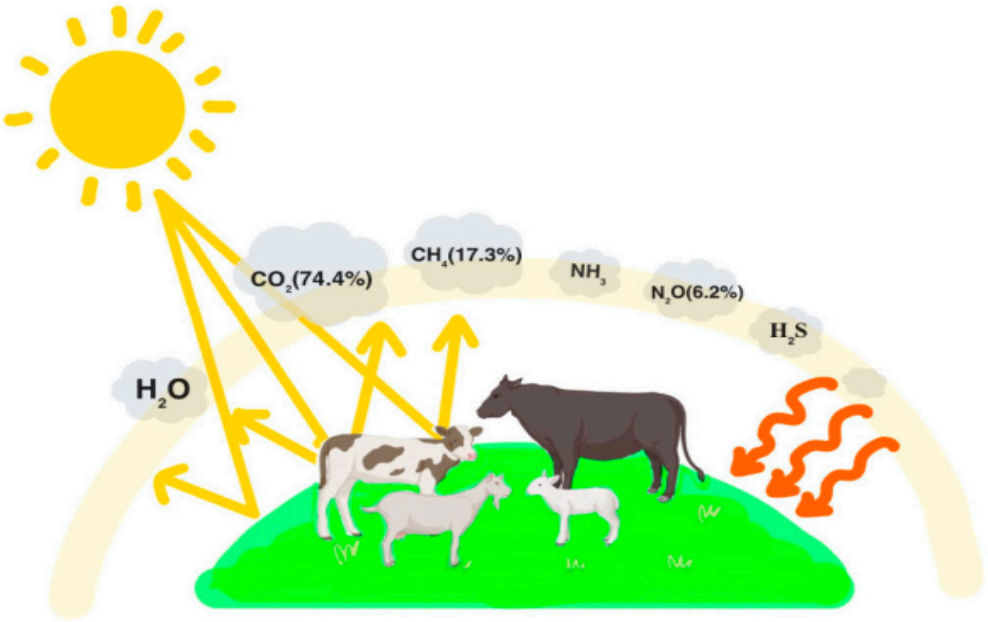


Figura 2. Principais gases emitidos por ruminantes e suas respectivas proporções**.**

Fonte: MA et al., 2024.

O bem-estar animal está intimamente ligado a fatores como temperatura, umidade relativa e qualidade do ar. Para De Paula et al. (2013), a qualidade do ar é um fator de suma importância na produção animal, pois afeta diretamente o oxigênio disponível, dissipação de calor, vapor d'água, gases provenientes de processos metabólicos dos animais e concentração de poeira e microorganismos. Quando esses fatores não são adequadamente controlados, podem causar estresse térmico ao animal e gerar ambiente ideal para proliferação de microorganismos causadores de infecções como a mastite, impactando diretamente na produtividade do animal (BLACK et al., 2014).

As condições ambientais e dos processos metabólicos do próprio animal, cujos dejetos, associados à transpiração, interagem com o material da cama em compostagem, intensificam a geração e o acúmulo de calor e gases, o que compromete a qualidade do ar e o bem-estar dos animais (LEÃO et al., 2015). A eficiência do processo de compostagem é fundamental para garantir a sustentabilidade do sistema sob a perspectiva da emissão de gases poluentes e de efeito estufa e bem estar animal.

Também é importante ressaltar que, a importância da mensuração da qualidade do ar é advinda das diretrizes do Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono), que define as práticas pecuárias de baixa emissão de carbono, proposto pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2018).

3.3 MÉTODOS DE MONITORAMENTO DE CO_2 EM AMBIENTES PECUÁRIOS

Mensurar a emissão de gases em instalações animais se tornou uma preocupação mundial devido ao seu impacto no meio ambiente e saúde tanto dos funcionários quanto dos animais. Dentro das opções de mensuração disponíveis atualmente, se destacam os métodos de *Photoacoustic spectroscopy* (Espectroscopia fotoacústica) ou PAS, o *Open-Path* laser e o *Non-dispersive Infrared* (Infravermelho Não Dispersivo) ou NDIR (MENDES et al., 2015).

Os métodos de monitoramento de gases de efeito estufa e gases prejudiciais abrangem diferentes tecnologias, como instrumentos eletroquímicos baseados em reações redox, detectores infravermelhos — a exemplo do FTIR e do NDIR — e sistemas a laser, como LMD e TDLAS. A cromatografia gasosa (GC) também é amplamente empregada para a separação e análise dos componentes gasosos, enquanto técnicas mais avançadas incluem monitoramento remoto por aeronaves, drones, satélites e câmeras de infravermelho de onda curta (SWIR) (MA et al., 2024). A Figura 3 apresenta uma síntese dessas abordagens, organizando-as em três grandes categorias: sensores químicos, sensores infravermelhos e detectores espectrais a laser, evidenciando a diversidade de estratégias disponíveis para a mensuração de gases em ambientes pecuários.

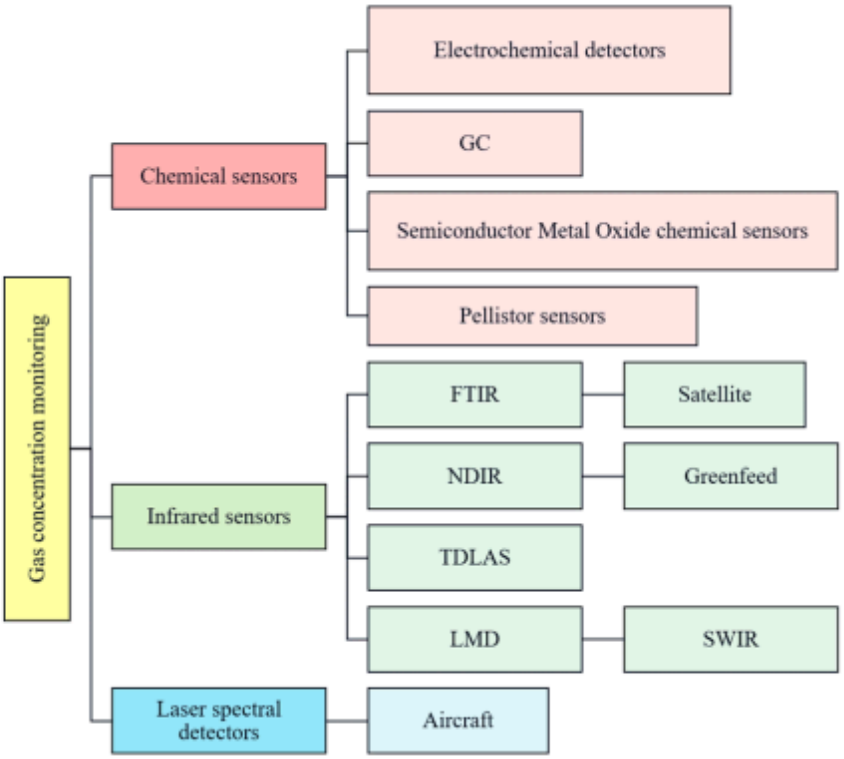


Figura 3. Metodologias de monitoramento de gases de efeito estufa e gases prejudiciais.

Fonte: MA et al., 2024.

3.4 ARDUINO

O Arduino consiste em uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto, fundamentada em *hardware* e *software* de fácil utilização, caracterizando-se pela flexibilidade e acessibilidade ao usuário. As placas Arduino são capazes de ler sinais de entrada provenientes de sensores ou dispositivos externos e convertê-los em saídas, como o acionamento de atuadores ou a comunicação com sistemas computacionais. O microcontrolador presente na placa é programado por meio de uma linguagem baseada em *Wiring*, utilizando o Arduino *Integrated Development Environment* (IDE), inspirado no ambiente *Processing*. Os sistemas desenvolvidos com Arduino podem operar de forma autônoma ou comunicar-se com computadores e aplicações externas, possibilitando sua aplicação em projetos educacionais, científicos, de prototipagem rápida e sistemas embarcados (ARDUINO, 2022).

Estudos recentes têm demonstrado o potencial de sensores de baixo custo associados a plataformas como Arduino para o monitoramento ambiental, desde que devidamente calibrados e validados em comparação com equipamentos de referência (PEREIRA; RAMOS, 2020).

No âmbito da pecuária, já foi utilizado como sistema de monitoramento de ambientes de produção. Um estudo realizado por Oliveira (2015), demonstra a aplicação de plataformas de prototipagem eletrônica, como o Arduino, no contexto da avicultura. Foi desenvolvido um sistema automatizado de monitoramento ambiental baseado em rede de sensores sem fio, capaz de acompanhar variáveis como temperatura, umidade e parâmetros físico-químicos do aviário, com transmissão de dados em tempo real por meio do protocolo ZigBee. Os resultados evidenciaram a viabilidade da utilização de sistemas embarcados de baixo custo para o controle ambiental em instalações de produção animal, destacando sua escalabilidade e eficiência na coleta e gerenciamento de dados.

3.5 PROCESSO DE PIRÓLISE

A pirólise consiste em um processo termoquímico de decomposição de materiais orgânicos na ausência ou em condições limitadas de oxigênio, promovendo a quebra de cadeias moleculares complexas em compostos de menor massa molar. Esse processo ocorre sob elevadas temperaturas, geralmente na faixa de 300 °C a 700 °C, e resulta na formação de três frações principais: sólida (biochar), líquida (bio-óleo) e gasosa (gases de pirólise) (BRIDGWATER, 2012).

A fração gasosa gerada durante a pirólise é composta por uma mistura de gases, incluindo dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4), hidrogênio (H_2) e compostos orgânicos voláteis (VOCs). A composição desses gases depende de fatores como temperatura, taxa de aquecimento, tipo de biomassa e condições operacionais do sistema (MOHAN et al., 2006).

No contexto da produção animal, a pirólise pode ser utilizada como ferramenta experimental para simular a degradação térmica de materiais orgânicos presentes na cama de sistemas como o *compost barn*. Esse processo permite a geração controlada de gases, possibilitando a avaliação do comportamento de sensores em condições que reproduzem, de forma acelerada, a emissão gasosa decorrente da decomposição de resíduos orgânicos.

Além disso, a presença de múltiplos compostos gasosos durante a pirólise torna o ambiente particularmente desafiador para sensores de gases de baixo custo, especialmente aqueles baseados em princípios eletroquímicos ou estimativas indiretas, devido à influência de interferentes gasosos e à variabilidade da composição da mistura gasosa. Dessa forma, a utilização da pirólise como metodologia experimental permite não apenas a geração de CO_2, mas também a análise das limitações e da seletividade dos sensores em ambientes complexos.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como um estudo de desenvolvimento tecnológico de um sistema de monitoramento de CO_2 de baixo custo baseado na plataforma Arduino, destinado à aplicação em ambientes pecuários de confinamento. O protótipo foi testado em ambiente controlado e comparado ao medidor de CO_2 do fabricante AZ Instrument Corp modelo AZ 77535, baseado na tecnologia NDIR (*Non-Dispersive Infrared*), com faixa de medição de 0–5000 ppm e precisão de ±50 ppm ±5% da leitura, a fim de determinar uma equação de ajuste para correção do desempenho do sistema proposto.

O sistema de aquisição de dados utilizou a plataforma Arduino, incluindo a implementação dos códigos de teste necessários para a leitura dos sensores de CO_2 avaliados. Nesta etapa, foram testados sensores previamente utilizados em estudos exploratórios e novos sensores candidatos, com o objetivo de verificar funcionamento básico, estabilidade do sinal e compatibilidade com o sistema de aquisição.

A análise do desempenho dos sensores de baixo custo foi conduzida com base em parâmetros amplamente utilizados na literatura científica para avaliação de sensores de gases, especialmente aqueles aplicados ao monitoramento ambiental. Os principais parâmetros considerados incluem: deriva de linha de base, linearidade, precisão, viés, acurácia, tempo de resposta, influência de interferentes gasosos, influência da temperatura e da umidade relativa, histerese e deriva de curto e longo prazo .

O experimento de análise dos sensores foi inicialmente estruturado em duas etapas: (i) ensaios em ambiente laboratorial controlado, destinados à coleta de dados para avaliação de desempenho e calibração dos sensores; e (ii) testes em ambiente pecuário de confinamento, previstos para validação do sistema em condições reais de operação.

Na etapa laboratorial, a calibração foi realizada por meio de regressão linear, utilizando um sensor comercial como referência, com o objetivo de ajustar a resposta dos sensores avaliados e estabelecer uma relação entre os valores medidos e a concentração de CO_2. A Figura 4 apresenta a sequência das etapas do estudo.

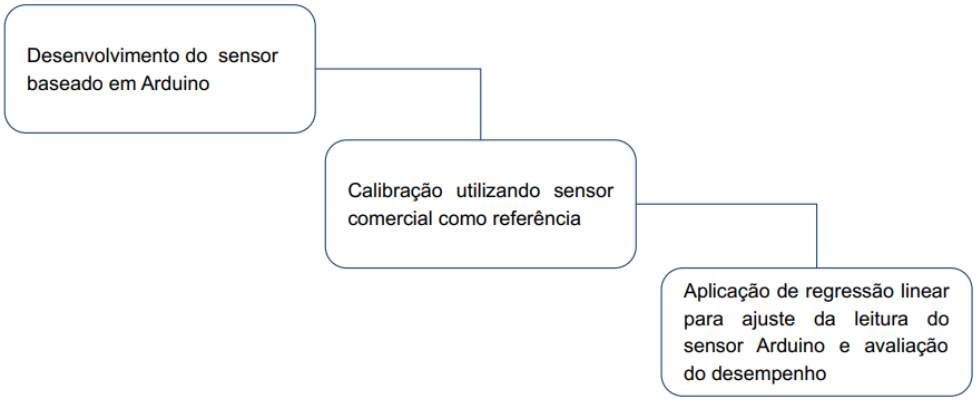


Figura 4. Fluxograma de atividades metodológicas.

Fonte: O Autor**.**

4.1 EXPERIMENTO EM AMBIENTE LABORATORIAL

O experimento teve como objetivo avaliar e comparar o desempenho de sensores de CO_2 de baixo custo em relação a um sensor de referência, com base em parâmetros como resposta, estabilidade e concordância das medições. Os ensaios foram realizados no laboratório LaFTOP, localizado no prédio REUNI da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) – Campus Alegre. A duração total do experimento foi de aproximadamente quatro horas, abrangendo desde a preparação da amostra e dos equipamentos até a realização da última medição. Os testes foram conduzidos em ambiente controlado, visando garantir a consistência das condições experimentais durante a coleta de dados.

4.1.1 Lista de Materiais

Os materiais e equipamentos utilizados na realização do experimento são apresentados a seguir.

- **Sensor MG811:** Foi utilizado para detecção de dióxido de carbono (CO_2), baseado em princípio eletroquímico. O sensor foi integrado ao sistema de aquisição de dados com Arduino, sendo empregado na medição da concentração de CO_2 gerada durante o processo de pirólise. Seus dados foram comparados com o sensor de referência, com o objetivo de avaliar seu desempenho e viabilidade como alternativa de baixo custo.

Figura 5. Sensor MG811.
Fonte: Ficha técnica.

- **Sensor ENS160:** Foi utilizado o sensor ENS160 para monitoramento da qualidade do ar, com capacidade de detecção de compostos orgânicos voláteis (VOCs) e estimativa indireta de dióxido de carbono (eCO_2). No presente trabalho, o sensor foi integrado ao sistema baseado em Arduino para aquisição de dados, sendo avaliado quanto ao seu desempenho na detecção de gases provenientes do processo de pirólise, em comparação com o sensor de referência.

Figura 6. Sensor ENS160.
Fonte: Ficha técnica.

- **Sensor AZ77535:** Foi utilizado o medidor digital portátil AZ77535 como instrumento de referência para a avaliação do desempenho dos sensores de baixo custo. O equipamento realiza medições de dióxido de carbono (CO_2), temperatura e umidade, utilizando a tecnologia NDIR (*Non-Dispersive Infrared*). Durante o experimento, suas leituras foram utilizadas como base para comparação direta e para o processo de calibração dos sensores avaliados.

Figura 7. Sensor AZ77535.
Fonte: Ficha técnica.

- **Arduino Uno:** Foi utilizada uma placa microcontroladora Arduino Uno como unidade de aquisição e processamento de dados do sistema. A placa foi responsável pela leitura dos sinais provenientes dos sensores de gases, bem como pelo envio e registro das medições em intervalos definidos durante o experimento. A alimentação do sistema foi realizada por meio de conexão USB.

Figura 8. Placa Arduino Uno.
Fonte: Ficha técnica.

- **Forno de Pirólise:** Utilizado para promover a decomposição térmica da amostra de material orgânico em condições controladas, com o objetivo de gerar gases para análise pelos sensores de CO_2. O equipamento foi responsável por viabilizar a simulação do processo de degradação térmica da cama de sistema *compost barn*, permitindo a avaliação do desempenho dos sensores em um cenário próximo ao real.

Figura 9. Forno de Pirólise do laboratório LaFTOP.
Fonte: O Autor.

- **Amostra de material orgânico:** Foi utilizado material proveniente da cama de sistema *compost barn*, constituído por resíduos orgânicos do solo misturados a dejetos bovinos. A amostra foi coletada de uma propriedade parceira da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

Figura 10. Amostra utilizada.
Fonte: O Autor

4.1.2 Montagem experimental

Os sensores de gases foram conectados à placa Arduino Uno e configurados por meio da plataforma Arduino IDE para aquisição automática de dados em intervalos de um minuto. O sistema foi projetado para permitir a leitura simultânea dos sensores de baixo custo e do sensor de referência, garantindo condições de comparação direta.

Para a condução dos gases gerados no processo de pirólise, foi desenvolvido um dispositivo físico sob medida, fabricado por impressão 3D. O dispositivo consiste em uma estrutura com encaixes específicos para os sensores, acoplada a um tubo de PVC transparente responsável pela condução do fluxo gasoso.

Os sensores foram posicionados em uma mesma câmara de medição, de forma a serem expostos simultaneamente aos gases gerados. O sistema não possuía vedação completa, caracterizando uma condição de medição em ambiente parcialmente aberto.

Durante o experimento, os gases provenientes da decomposição térmica da amostra foram direcionados pelo tubo até a região de sensores, permitindo medições sob condições equivalentes entre os dispositivos. A placa Arduino Uno foi conectada a um computador via USB, sendo utilizada para monitoramento e registro contínuo das leituras por meio do ambiente Arduino IDE.

Figura 11. Protótipo montado.

Fonte: O Autor.

4.1.3 Procedimento experimental

Após a montagem do protótipo, foi realizada a preparação da amostra, que foi então posicionada no interior do forno de pirólise. Em seguida, o sistema foi selado e o processo de aquecimento foi iniciado.

Figura 12. Amostra pronta para ir ao forno.

Fonte: O Autor.

O forno era controlado por software dedicado, que apresentava a temperatura interna em tempo real, além de uma representação gráfica da evolução térmica ao longo do tempo (Anexo A). O sistema também contava com um mecanismo auxiliar de condução dos gases, permitindo o acompanhamento do fluxo gerado durante o processo.

Figura 13. Sistema auxiliar de condução e visualização dos gases.

Fonte: O Autor.

O experimento foi iniciado com a amostra em temperatura ambiente, sendo posteriormente aquecida até que houvesse geração suficiente de gases para garantir leituras consistentes pelos sensores. Quando o sistema atingiu condições estáveis de emissão gasosa, que se deu por volta de 100° C, iniciou-se a coleta efetiva dos dados.

Figura 14. Balão de destilação.
Fonte: O Autor.

Os gases provenientes da decomposição térmica foram conduzidos até o protótipo com os sensores, onde foram registradas as variáveis de temperatura (°C), umidade relativa (%rH) e concentração de CO_2 estimada pelos sensores candidatos, enquanto simultaneamente eram observados os valores do sensor de referência. As medições foram realizadas em intervalos de um minuto e registradas para posterior análise comparativa.

As medições obtidas foram registradas simultaneamente de duas formas: manualmente durante a execução do experimento e automaticamente por meio do ambiente Arduino IDE, que gerou arquivos de saída em formato de texto contendo os valores lidos pelos sensores ao longo do tempo. Esses registros foram posteriormente utilizados para organização e análise dos dados.

4. RESULTADOS

As medições foram realizadas em ambiente laboratorial, sob temperatura aproximadamente constante de 26 °C e umidade relativa variável, atingindo valores de até 99% RH. Ao todo, foram registradas 112 leituras, das quais 107 foram consideradas válidas após a aplicação de critérios de exclusão.

Inicialmente, procedeu-se à análise dos dados coletados, com a remoção de valores considerados inválidos. A primeira leitura do sensor ENS 160 foi desconsiderada por apresentar valor nulo, incompatível com sua faixa operacional (400 a 65000 ppm), além de corresponder ao período inicial de estabilização do sensor (*warm-up*), conforme especificado na ficha técnica do equipamento. Adicionalmente, foram excluídas as leituras 17, 18, 21 e 41 devido à uma falha técnica que causou a ausência de registro do sensor de referência AZ 77535, o que inviabilizaria o cálculo das métricas comparativas. Feita a limpeza dos dados, foi efetuada a análise estatística dos sensores.

Estatística/Sensor	ENS160	MG811
Correlação	0,08	-0,08
Coeficiente Angular	0,44	-77,21
Intercepto	2997,83	5484,49
Viés	-2023,95	-3752,93
Precisão	2093,22	2089,33
Acurácia(MAE)	2093,97	3752,93

Tabela 1: Resultados da análise estatística.

Fonte: O Autor.

A Figura 15 apresenta a evolução temporal das leituras dos sensores ao longo do experimento. Observa-se que o sensor de referência AZ77535 apresentou variação significativa na concentração de CO_2, com valores entre aproximadamente 1600 ppm e 9800 ppm. Em contraste, o sensor ENS160 manteve-se praticamente constante na faixa de 1700 a

1900 ppm, enquanto o MG811 apresentou variação mínima, entre 16 e 27 ppm, configurando-se visualmente como uma linha quase constante ao longo do tempo.

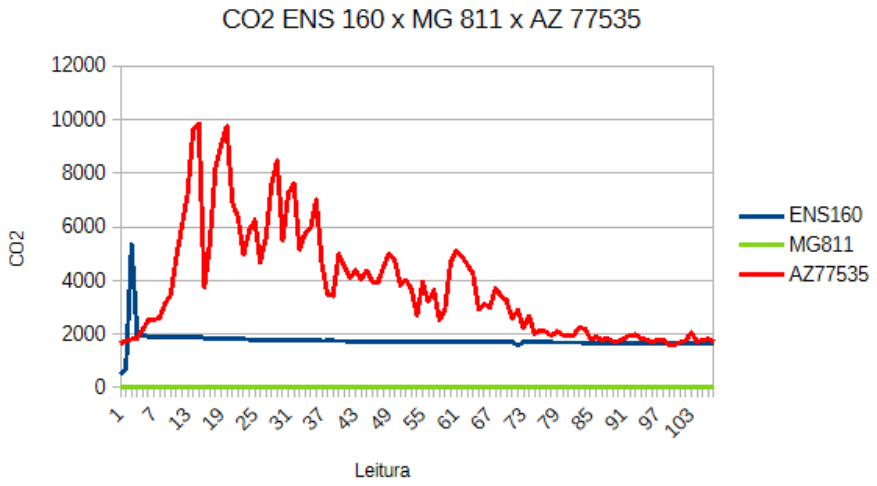


Figura 15. Evolução de valores de CO_2 ao longo do tempo.

Fonte: O Autor.

A análise de correlação entre os sensores de baixo custo e o sensor de referência evidenciou ausência de relação linear significativa. O sensor ENS160 apresentou coeficiente de correlação de Pearson igual a 0,08 (R^2 = 0,0068), enquanto o MG811 apresentou correlação de -0,08 (R^2 = 0,0071). Esses valores indicam que menos de 1% da variação observada no sensor de referência pode ser explicada pelos sensores avaliados.

Apesar da magnitude semelhante dos coeficientes de correlação, a análise visual dos dados revela que tal associação não representa uma relação física real entre as variáveis. Esse comportamento pode ser atribuído à presença de tendências temporais similares nos sinais, caracterizando um caso de correlação espúria, na qual a associação estatística não reflete capacidade efetiva de detecção da variável de interesse.

A regressão linear reforça a ausência de relação funcional entre os sensores. As Figuras 16 e 17 apresentam o gráfico de dispersão dos dois sensores. Para o ENS160, obteve-se a equação AZ = 0,44 × ENS160 + 2997,83, enquanto para o MG811 foi obtida a equação AZ = -77,21 × MG811 + 5484,49.

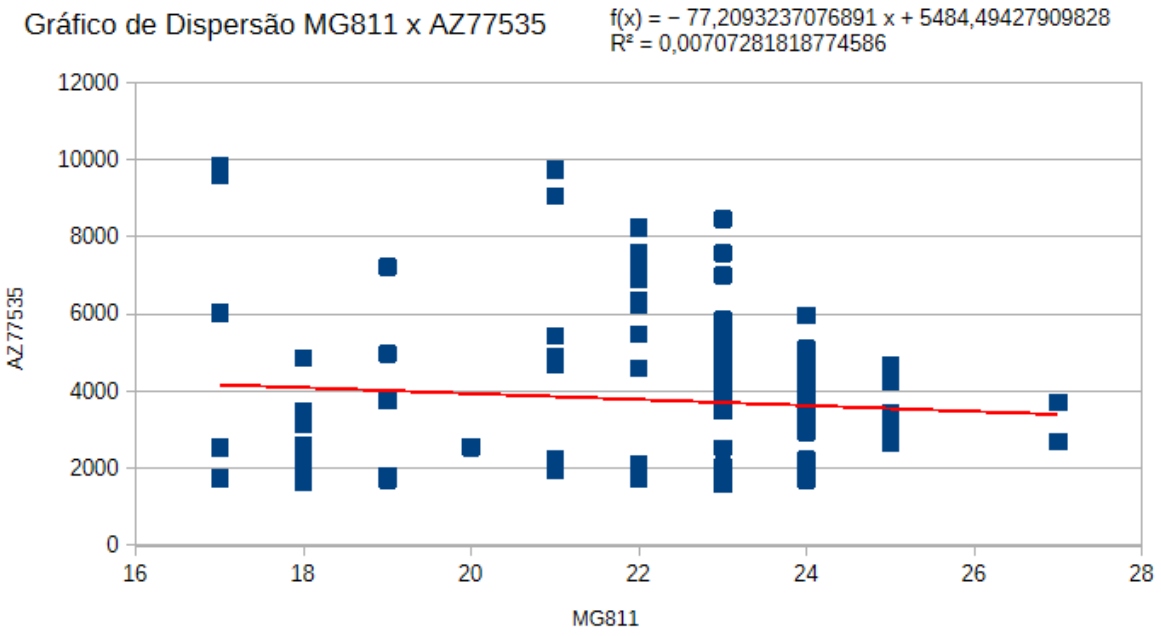


Figura 16. Gráfico de dispersão MG811.

Fonte: O Autor.

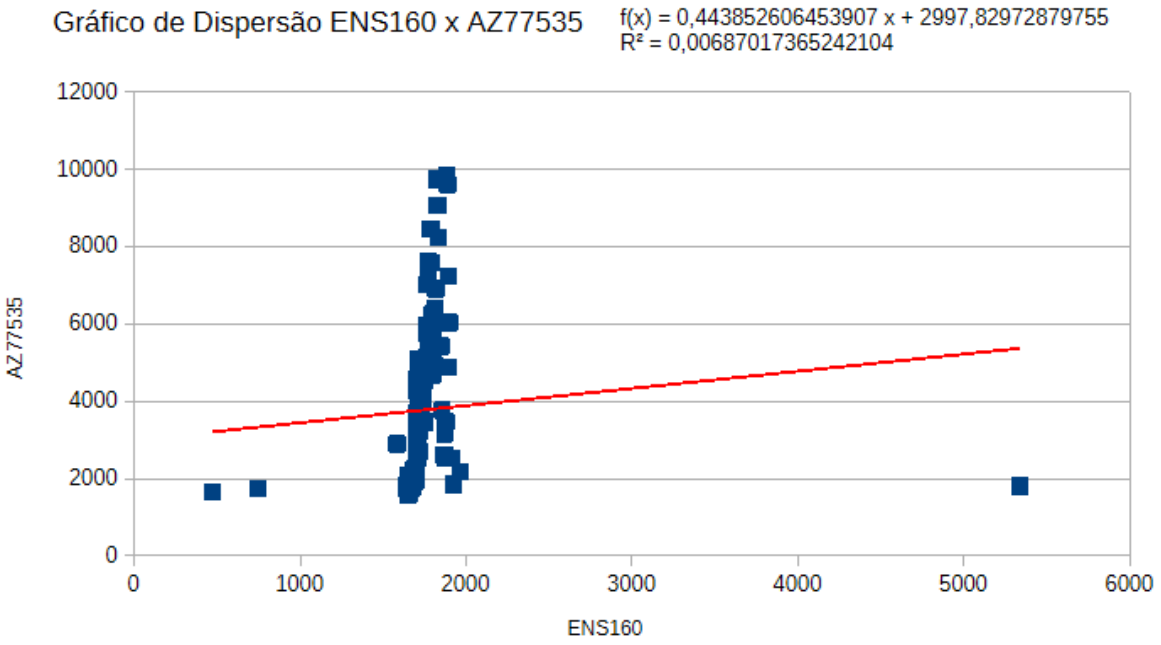


Figura 17. Gráfico de dispersão ENS160.

Fonte: O Autor.

A análise dos gráficos de dispersão evidencia que, no caso do ENS160, os pontos encontram-se concentrados em uma faixa estreita de valores, indicando baixa variabilidade do sensor frente às variações observadas no sensor de referência. Já o MG811 apresenta uma

distribuição praticamente vertical, com variação mínima no eixo do sensor, evidenciando ausência de sensibilidade às mudanças de concentração de CO_2.

Embora o MG811 tenha apresentado valor de R^2 ligeiramente superior ao do ENS160, essa diferença não indica melhor desempenho. Ambos os sensores apresentaram coeficientes de determinação próximos de zero, evidenciando ausência de relação linear significativa com o sensor de referência.

A análise do viés indica que ambos os sensores apresentam tendência sistemática de subestimação das concentrações de CO_2. O ENS160 apresentou viés médio de -2023,95 ppm, enquanto o MG811 apresentou viés de -3752,93 ppm, evidenciando maior desvio sistemático neste último.

Em relação à precisão e acurácia, o ENS160 apresentou desvio padrão do erro de 2093,22 ppm e erro absoluto médio (MAE - *Mean Absolute Error*) de 2093,97 ppm. A proximidade entre esses valores indica que os erros são consistentes em magnitude e predominantemente negativos, sem compensação entre superestimação e subestimação. Já o MG811 apresentou MAE de 3752,93 ppm, indicando desempenho inferior em termos de acurácia.

Não foi possível avaliar parâmetros como deriva de linha de base, tempo de resposta, histerese e influência de interferentes gasosos de forma isolada, em função de limitações experimentais relacionadas à ausência de equipamentos e infraestrutura específicos para controle rigoroso das variáveis ambientais e da composição gasosa.

A análise desses parâmetros requer condições controladas, como câmaras de calibração com atmosfera padronizada, controle preciso de temperatura e umidade, além da introdução seletiva de gases interferentes em concentrações conhecidas. Tais condições não estavam disponíveis no presente estudo, o que inviabilizou a avaliação individual desses efeitos sobre o desempenho dos sensores.

5. DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste estudo estão de acordo com a literatura, que aponta limitações significativas no desempenho de sensores de baixo custo quando utilizados sem calibração adequada. Segundo Pereira e Ramos (2020), sensores baseados em plataformas como Arduino podem apresentar desvios consideráveis em relação a equipamentos de referência, especialmente quando operados em condições ambientais não controladas.

Os sensores avaliados neste trabalho baseiam-se em princípios de medição distintos, o que influencia diretamente seu desempenho. O sensor ENS160 utiliza tecnologia baseada em óxidos metálicos (MOx), sendo sensível a compostos orgânicos voláteis (VOCs) e fornecendo uma estimativa indireta de dióxido de carbono (eCO_2), enquanto o sensor MG811 é baseado em eletrólito sólido, operando por meio da geração de uma força eletromotriz dependente da concentração de CO_2. Essa diferença implica que apenas o MG811 realiza, em princípio, a detecção direta de CO_2, ao passo que o ENS160 depende de correlações indiretas, o que já representa uma limitação importante para sua aplicação em medições quantitativas.

Apesar dessas diferenças, ambos os sensores apresentaram desempenho insatisfatório quando comparados ao sensor de referência. No caso do MG811, o baixo desempenho pode ser explicado por limitações associadas às suas características elétricas e operacionais. De acordo com o fabricante, o sensor apresenta uma variação de saída da ordem de 30 a 50 mV para uma ampla faixa de concentração de CO_2 (350 a 10000 ppm), o que representa uma sensibilidade relativamente baixa. Essa característica torna o sinal altamente suscetível a ruídos elétricos e limita a resolução das medições, especialmente na ausência de circuitos de amplificação e condicionamento adequados.

Além disso, o MG811 apresenta forte dependência de variáveis ambientais, como temperatura e umidade relativa. No presente estudo, foram observados níveis de umidade próximos a 99%RH durante grande parte do experimento, condição significativamente superior àquela utilizada como referência pelo fabricante (aproximadamente 65%RH). Essa discrepância pode ter afetado o equilíbrio eletroquímico do sensor, comprometendo sua resposta e contribuindo para a baixa variação observada nos dados, independentemente das mudanças na concentração de CO_2 registradas pelo sensor de referência.

Por outro lado, o desempenho do ENS160 pode ser compreendido a partir das limitações inerentes aos sensores do tipo MOx. Conforme discutido por Piedrahita et al. (2014), esses sensores apresentam comportamento não linear em relação à concentração de

gases e são fortemente influenciados por variáveis ambientais, como temperatura e umidade, além de estarem sujeitos a fenômenos como deriva de linha de base e variações de sensibilidade ao longo do tempo. Essas características dificultam sua aplicação em medições quantitativas sem o uso de modelos de calibração robustos.

No contexto deste estudo, a elevada umidade relativa (até 99%RH) ultrapassou significativamente a faixa recomendada de operação do ENS160 (20% a 80%RH), conforme especificado pelo fabricante, podendo ter comprometido a estabilidade e a resposta do sensor. A baixa variabilidade observada nas leituras do ENS160, mesmo diante de variações expressivas de CO_2 registradas pelo sensor de referência, sugere que o dispositivo não foi capaz de responder adequadamente às condições impostas pelo experimento.

De forma geral, os resultados obtidos reforçam a necessidade de calibração adequada e controle das condições experimentais para a utilização de sensores de baixo custo em aplicações quantitativas. Conforme destacado por Spinelle et al. (2015), a calibração desses sensores representa um desafio significativo, uma vez que fatores como seletividade limitada, instabilidade e influência de variáveis ambientais comprometem sua concordância com sensores de referência, mesmo quando técnicas como regressão linear são empregadas.

Adicionalmente, Lewis e Edwards (2016) ressaltam que a redução de custo nesses dispositivos está frequentemente associada à diminuição da sensibilidade e da especificidade, o que limita sua capacidade de detectar e quantificar gases com precisão. Nesse sentido, os resultados obtidos neste trabalho corroboram a literatura, evidenciando que, nas condições avaliadas, os sensores ENS160 e MG811 não apresentaram desempenho adequado para a quantificação direta de CO_2.

Com base nos resultados obtidos, a etapa de validação em campo originalmente prevista não foi realizada. Os coeficientes de correlação próximos de zero, os elevados valores de viés e erro absoluto médio (MAE), bem como a ausência de resposta dinâmica dos sensores frente às variações de CO_2 registradas pelo sensor de referência, evidenciaram desempenho insuficiente dos dispositivos avaliados.

Nessas condições, a aplicação dos sensores em ambiente real comprometeria a confiabilidade dos dados coletados e a validade das análises subsequentes. Dessa forma, optou-se por não prosseguir com a etapa em campo, uma vez que não foram estabelecidas condições mínimas de desempenho que justificassem sua execução.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho de sensores de baixo custo para o monitoramento de dióxido de carbono (CO_2), utilizando como base comparativa um sensor de referência comercial baseado em tecnologia NDIR. Para isso, foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados com plataforma Arduino e realizados ensaios em ambiente controlado, com geração de gases por meio de processo de pirólise.

Os resultados obtidos indicaram que os sensores avaliados, ENS160 e MG811, não apresentaram desempenho adequado para a quantificação de CO_2 nas condições experimentais adotadas. As análises estatísticas evidenciaram coeficientes de correlação próximos de zero, elevados valores de erro e ausência de relação significativa com o sensor de referência, inviabilizando a obtenção de modelos de calibração confiáveis a partir dos dados coletados.

A partir da discussão dos resultados, verificou-se que o baixo desempenho dos sensores está associado tanto às suas limitações intrínsecas quanto às condições experimentais. O sensor ENS160, por se basear em tecnologia MOx, não realiza a medição direta de CO_2, mas sim uma estimativa indireta (eCO_2), sendo altamente sensível a variáveis ambientais como temperatura e umidade. Já o sensor MG811, embora projetado para detecção direta de CO_2, apresenta limitações relacionadas à baixa amplitude de sinal, alta dependência de condições ambientais e necessidade de condicionamento eletrônico adequado.

Adicionalmente, a elevada umidade relativa observada durante o experimento, atingindo valores próximos a 99%RH, ultrapassou significativamente os limites recomendados de operação dos sensores, contribuindo para a degradação do desempenho e reforçando a influência das condições ambientais na resposta desses dispositivos.

Dessa forma, conclui-se que, nas condições avaliadas, os sensores ENS160 e MG811 não são adequados para a quantificação direta de CO_2 sem o emprego de estratégias adicionais de calibração, controle ambiental e tratamento de sinal. Os resultados obtidos estão em concordância com a literatura, que aponta limitações importantes na utilização de sensores de baixo custo para aplicações quantitativas sem validação adequada.

Como perspectivas para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de experimentos em condições ambientais com especial atenção ao controle da umidade relativa, bem como a implementação de técnicas de calibração mais robustas, incluindo modelos multivariados e aquisição de maior volume de dados. Além disso, a utilização de sensores baseados em

tecnologias mais específicas para detecção de CO_2 pode ser considerada, visando melhorar a confiabilidade das medições.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARDUINO. **What is Arduino?** 2022. Disponível em: https://docs.arduino.cc/learn/starting-guide/whats-arduino/. Acesso em: 26 jan. 2026.

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

BLACK, R. A. et al. **The relationship between compost bedded pack performance, management, and bacterial counts.** *Journal of Dairy Science*, Champaign, v. 97, n. 5, p. 2669–2679, 2014. DOI: https://doi.org/10.3168/jds.2013-6779.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass and Bioenergy, v. 38, p. 68–94, 2012. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.01.048.

DE PAULA, M. O. et al. **Parâmetros para avaliação de bem-estar, desempenho e qualidade do ar em instalações zootécnicas.** In: COLETÂNEA DA II JORNADA CIENTÍFICA DA PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS VETERINÁRIAS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. Espírito Santo: UFES, 2013. p. 135.

EMBRAPA. **Brasil tem a primeira instalação de compost barn destinada à pesquisa**. 16 jun. 2020. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/53360675/brasil-tem-a-primeira-instalacao-de-compost-barn-destinada-a-pesquisa#compost%20barn. Acesso em: 22 fev. 2026.

LEÃO, J. M. et al. **Uso da termografia infravermelha na pecuária de precisão.** *Cadernos Técnicos de Veterinária e Zootecnia*, n. 79, p. 97–109, 2015.

LESO, L. et al. **Invited review: Compost-bedded pack barns for dairy cows.** *Journal of Dairy Science*, v. 103, n. 2, p. 1072–1099, 2020. DOI: 10.3168/jds.2019-16864.

LEWIS, Alastair; EDWARDS, Pete. Validate personal air-pollution sensors. *Nature*, v. 535, p. 29–31, 2016. DOI: 10.1038/535029a.

LEYTEM, A. B. et al. **Emissions of ammonia, methane, carbon dioxide, and nitrous oxide from dairy cattle housing and manure management systems.** *Journal of Environmental Quality*, v. 40, n. 5, p. 1383–1394, 2011. DOI: 10.2134/jeq2009.0515.

MA, Weihong et al. **Automatic monitoring methods for greenhouse and hazardous gases emitted from ruminant production systems: a review.** *Sensors*, Basel, v. 24, p. 4423, 2024. DOI: 10.3390/s24134423.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Pecuária de baixa emissão de carbono.** Brasília, 2018. 88 p. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/. Acesso em: 15 jan. 2026.

MENDES, L. B. et al. **NDIR gas sensor for spatial monitoring of carbon dioxide concentrations in naturally ventilated livestock buildings.** *Sensors*, v. 15, p. 11239–11257, 2015. DOI: https://doi.org/10.3390/s150511239.

MOHAN, D.; PITTMAN JR., C. U.; STEELE, P. H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. Energy & Fuels, v. 20, n. 3, p. 848–889, 2006. DOI: 10.1021/ef0502397.

NONATO, Henrico Dainezi. **Modelos de confinamento para vacas leiteiras: revisão bibliográfica.** 2023. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Campus de Jaboticabal, 2023.

OLIVEIRA, Marcelo Eduardo de. **Desenvolvimento de sistema automatizado de monitoramento de ambientes de produção animal, utilizando uma rede de sensores sem fio.** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Zootecnia) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2015.

OLIVEIRA, Victor C. de; TINÔCO, Ilda de F. F.; SILVA, Leonardo F. da; OLIVEIRA, Carlos E. A.; DAMASCENO, Flávio A.; SARAZ, Jairo A. O. **Evaluation of ammonia sensor modules in a compost barn system during winter in Brazil**. *Engenharia Agrícola*,

Jaboticabal, v. 43, n. 4, 2023. DOI: https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v43n4e20230062/2023.

PEREIRA, P. F.; RAMOS, N. M. M. **Low-cost Arduino-based temperature, relative humidity and CO_2 sensors: an assessment of their suitability for indoor built environments.** *Journal of Building Engineering*, v. 32, 101390, 2020. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101390.

PIEDRAHITA, Ricardo et al. The next generation of low-cost personal air quality sensors. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 7, n. 10, p. 3325–3336, 2014. DOI: 10.5194/amt-7-3325-2014.

SEKI, M. S. et al. **Classificação climática do Estado do Espírito Santo segundo as zonas de vida de Holdridge.** *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, Maringá (PR), v. 14, supl. 2, e8007, 2021. DOI: 10.17765/2176-9168.2021v14Supl.2.e8007.

SPINELLE, L.; GERBOLÉS, M.; VILLANI, M. G.; ALEIXO, R.; BONNEL, P. Field calibration of a cluster of low-cost available sensors for air quality monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*, v. 8, p. 343–356, 2015. DOI: 10.5194/amt-8-343-2015.

APÊNDICE A – DADOS EXPERIMENTAIS

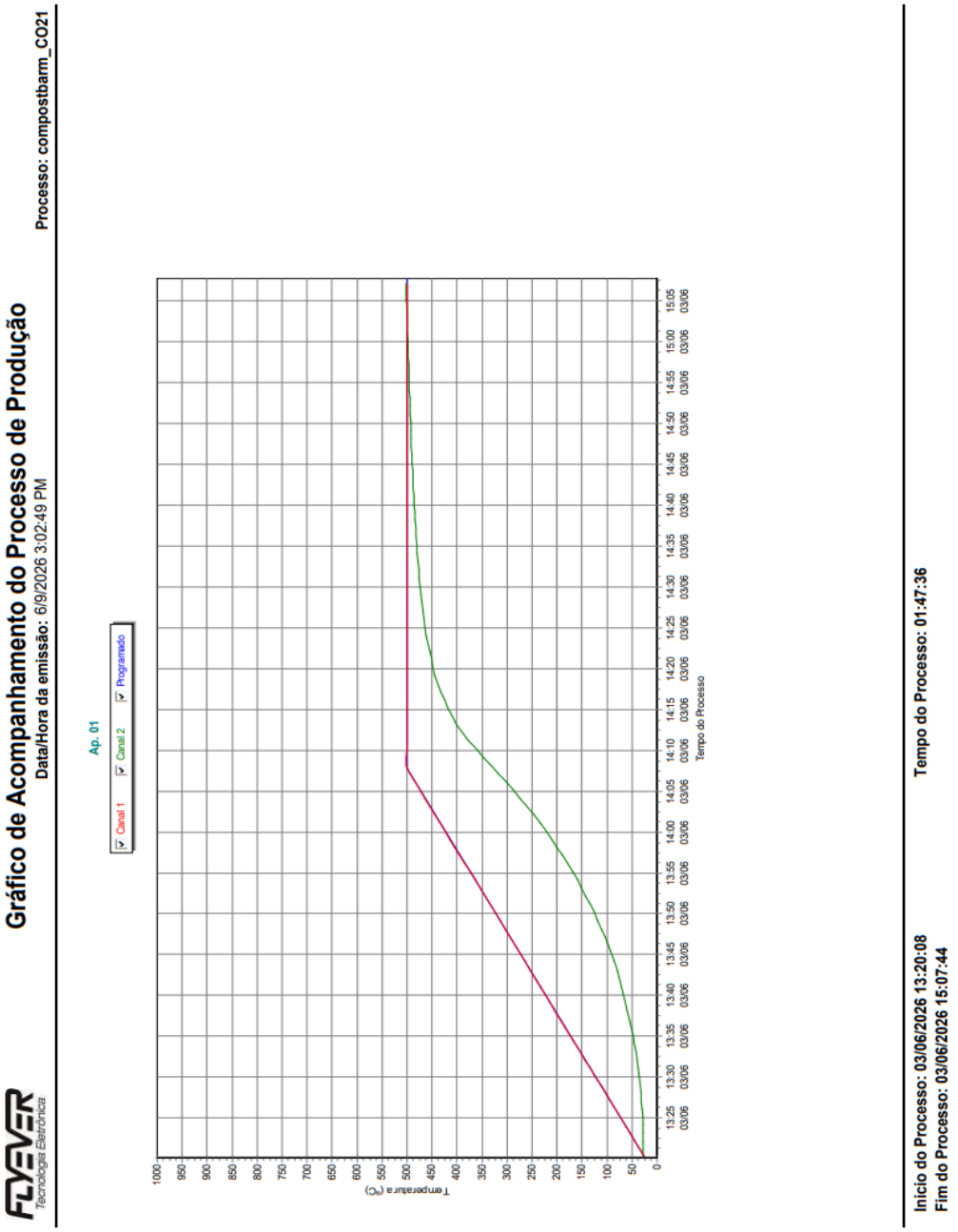
Este apêndice apresenta os dados experimentais obtidos durante a realização dos ensaios em ambiente laboratorial. As medições correspondem às variáveis de temperatura, umidade relativa e concentração de dióxido de carbono (CO_2) registradas pelos sensores de baixo custo (MG811 e ENS160) e pelo sensor de referência (AZ 77535).

Leitura	Temp (°C)	Umidade(%rH)	ENS160	MG811	AZ77535
2	26	58	473	18	1642
3	26	58	744	17	1747
4	26	58	5338	18	1805
5	26	59	1925	18	1840
6	26	61	1966	18	2178
7	26	63	1914	17	2531
8	26	64	1870	20	2539
9	26	65	1869	18	2610
10	26	65	1870	18	3150
11	26	66	1876	18	3469
12	26	70	1888	18	4869
13	26	75	1897	17	6025
14	26	85	1893	19	7225
15	26	99	1889	17	9599
16	26	99	1881	17	9854
19	26	99	1855	19	3761
20	26	99	1848	21	5427
22	26	99	1833	22	8240
23	26	99	1827	21	9069
24	26	99	1820	21	9746
25	26	99	1815	22	6903
26	26	99	1810	22	6376

27	26	99	1809	23	4952
28	26	99	1800	23	5851
29	26	99	1797	22	6246
30	26	99	1795	21	4686
31	26	99	1788	23	5618
32	26	99	1785	23	7583
33	26	99	1785	23	8459
34	26	99	1777	22	5490
35	26	99	1772	22	7269
36	26	99	1772	22	7605
37	26	99	1768	23	5169
38	26	99	1764	23	5734
39	26	99	1762	24	5961
40	26	99	1759	23	7010
42	26	99	1748	22	4597
43	26	99	1750	23	3491
44	26	99	1750	24	3435
45	26	99	1745	19	4971
46	26	99	1745	24	4526
47	26	99	1742	24	4090
48	26	99	1739	23	4380
49	26	99	1734	24	4040
50	26	99	1736	23	4360
51	26	99	1732	23	3963
52	26	99	1732	23	3916
53	26	99	1731	24	4500
54	26	99	1731	24	5009
55	26	99	1727	24	4797
56	26	99	1720	24	3824
57	26	99	1723	24	4013
58	26	99	1722	24	3672

59	26	99	1720	27	2689
60	26	99	1717	24	3938
61	26	99	1717	25	3211
62	26	99	1714	23	3636
63	26	99	1712	23	2530
64	26	99	1711	25	2929
65	26	99	1711	25	4683
66	26	99	1710	24	5097
67	26	99	1710	21	4900
68	25	99	1705	23	4593
69	26	99	1706	25	4255
70	26	99	1703	24	2932
71	26	99	1706	24	3130
72	26	99	1705	24	2984
73	26	99	1704	27	3708
74	26	99	1702	25	3434
75	26	99	1704	25	3255
76	26	99	1702	20	2569
77	26	99	1581	25	2900
78	26	99	1699	24	2231
79	26	99	1701	25	2672
80	26	99	1697	24	2015
81	26	99	1695	21	2131
82	26	99	1696	22	2090
83	26	99	1693	21	1941
84	26	99	1687	21	2103
85	26	99	1688	22	1978
86	26	99	1687	22	1943
87	26	99	1687	21	1973
88	26	99	1687	21	2234
89	26	99	1684	21	2203

90	26	99	1682	19	1819
91	26	99	1677	23	1883
92	26	99	1677	22	1786
93	26	99	1676	22	1838
94	26	99	1671	22	1741
95	26	99	1669	22	1739
96	26	99	1670	22	1835
97	25	99	1666	22	1958
98	25	99	1661	24	1985
99	26	99	1665	23	1846
100	26	99	1662	22	1792
101	25	99	1661	19	1701
102	26	99	1658	22	1777
103	26	99	1658	22	1806
104	26	99	1656	23	1582
105	26	99	1650	23	1596
106	26	99	1650	24	1695
107	26	99	1644	23	1760
108	26	99	1648	23	2062
109	26	99	1650	23	1723
110	26	97	1648	24	1764
111	26	98	1646	24	1828
112	26	99	1642	23	1707

ANEXO A – PERFIL DE TEMPERATURA DO FORNO E AMOSTRA DURANTE EXPERIMENTO

Este anexo apresenta o perfil de temperatura do forno de pirólise ao longo do experimento, obtido por meio do software de controle do equipamento. O gráfico ilustra a variação da temperatura do forno e da amostra durante o processo de aquecimento.