

Qualidade do ar em instalações agropecuárias: construção e aplicação de um sistema de baixo custo

Leonardo Almeida Delgado

Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental no âmbito da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientado por:

Manuel Joaquim Sabeça Feliciano

Getúlio Paulo Peixoto Igrejas

Laercio Mantovani Frare

Bragança

2019

Qualidade do ar em instalações agropecuárias: construção e aplicação de um sistema de baixo custo

Leonardo Almeida Delgado

Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental no âmbito da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientado por:

Manuel Joaquim Sabença Feliciano (IPB)

Getúlio Paulo Peixoto Igrejas (IPB)

Laercio Mantovani Frare (UTFPR)

Bragança

novembro de 2019

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus, que me deu o dom da vida e permitiu que eu chegasse até este momento. Aos meus pais, Zenilda Almeida de Jesus Delgado e Leonildo Delgado, que sempre foram grandes inspirações de força, fé e perseverança, que me apoiaram nas minhas decisões e foram meus alicerces durante toda a vida, principalmente durante minha formação e especialmente por tornar esta dupla diplomação uma realidade.

Aos meus irmãos Anderson e Roberto, por serem os guardiões das minhas melhores recordações e por incentivarem a correr atrás dos meus sonhos.

À minha namorada Gabriela Gómez, que, independentemente do momento, sendo ele difícil ou não, sempre me incentivou e tratou com muito amor e carinho, e também, por todas as aventuras que tivemos aqui em Portugal e na Europa.

Agradeço aos meus orientadores Manuel Feliciano e Getúlio Igrejas, por todo o conhecimento técnico-científico que pude adquirir sob a supervisão desses exímios professores, e por sempre se preocuparem e me motivarem nos momentos certos, dando mais combustível para a elaboração desta dissertação. Em especial, ao prof. Laercio Frare, que além de co-orientador, foi o meu tutor no grupo PETAmb, estimulando diversas habilidades durante a minha formação acadêmica, principalmente a proatividade. No geral, por confiarem o desenvolvimento deste trabalho a mim.

A todos os meus grandes amigos, Matheus Babinski, Sarah Portela, Rafael Sprea, Murilo Ordine, Francine Machado, Elena Niemeyer, Marcelo Hey, Thiago Hideyuki, Yago Idelfante, que fiz durante a minha graduação e que juntos talhamos as melhores memórias dos 4 anos e meio que partilhamos em Medianeira. E principalmente às minhas leucenas favoritas Ana Caroline Royer, Juliana Akemi, Bruna Capra, Ricardo Trudes e Flávia Manente, que além de grandes amigos, foram/são pessoas sensacionais com quem pude compartilhar os melhores momentos com muitas risadas e pizzas. Por onde eu for, levarei ótimas recordações desses grandes amigos que fiz.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Medianeira e seu corpo docente, no qual pude obter tantos ensinamentos e participar em tantos projetos, investigações, conferências, ter publicações e participar nesta incrível dupla diplomação. Ao grupo PETAmb, todas as excelentes pessoas que o compõe e todos os risos, cafés e projetos bem sucedidos. Ao Instituto Politécnico de Bragança, e seus docentes pelo ensino de qualidade e a excelente estrutura do campus.

Ao Leonardo Furst, que se tornou um grande amigo, pois sempre foi uma pessoa muito motivadora durante o mestrado e por todo auxílio no desenvolvimento da minha dissertação de mestrado, sempre disposto a tirar todas as dúvidas que eu tive. À Jessica Sibila, pela grande ajuda na sintetização de fumaça. Aos amados com quem tive a oportunidade de morar e que posso dizer que foram a minha família durante o tempo que passei aqui em Bragança, Ana Caroline Royer, Rafael Sprea, Isabele Catori, Maria Vertonha, Mariana Correia, Natália Zago e Gabriela Gómez.

Por fim, agradeço a todas as pessoas, que de alguma forma, contribuíram durante os caminhos que trilhei até aqui. O meu mais singelo e sincero, muito obrigado.

FINANCIAMENTOS

Este estudo foi apoiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT, Portugal) e FEDER ao abrigo do Programa PT2020 através do apoio financeiro ao Centro de Investigação de Montanha (UID / AGR / 00690/2013) e Centro de Investigação em Digitalização e Robótica Inteligente e pelo projeto bilateral estabelecido entre o Instituto Politécnico de Bragança (Portugal) e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (Brasil).



PUBLICAÇÕES

Delgado, L. A., Feliciano, M. J. S., Frare, L. M., & Igrejas, G. P. P. (2019). Construção de um sistema de baixo custo para a medição de gases e partículas no interior de instalações suínícolas e avícolas. In *Conferência Internacional de Sustentabilidade na Gestão Ambiental 2019 (SGA'19)*, Lisboa, Portugal. Retrieved from <https://conferenciasga2020.wixsite.com/sga19>

Delgado, L. A., Feliciano, M. J. S., Frare, L. M., & Igrejas, G. P. P. (2019, July). Construção e validação de um dispositivo de baixo custo para a análise da qualidade do ar interior em instalações pecuárias. In *The Double Diploma Summer School & Symposium 2019 (DD 2019)*. Bragança, Portugal.

Delgado, L. A., Feliciano, M. J. S., Frare, L. M., Furst, L. C., Igrejas, G. P. P. (2019). Sistema de baixo custo para a medição de gases e material particulado no interior de instalações pecuárias. In *III Congresso Nacional das Escolas Superiores Agrárias (CNEESA)*. Viseu, Portugal. Retrieved from <https://cnesa.esav.ipv.pt/resumos.html>

Delgado, L., Feliciano, M., Frare, L., Furst, L., Leitão, P., Igrejas, G. (2020). *Construction and validation of a low-cost system for indoor air quality measurements in livestock facilities*. Paper presented December 5 at the EAI International Conference on Sustainable Energy for Smart Cities (SESC 2019) and accepted for publication in SpringerLink Digital Library.

“Nothing in life is to be feared, it is only to be understood. Now is the time to understand more, so that we may fear less”.

“Nada na vida é para ser temido, é apenas para ser compreendido. Agora é tempo de entender mais, para que possamos temer menos”.

Marie Curie

RESUMO

Com o crescimento populacional e a elevada procura de produtos alimentares de origem animal em todo o mundo, a construção de novas unidades de confinamento de criação de espécies monogástricas como suínos e aves de capoeira, tem-se intensificado em alguns países como o Brasil, China, EUA, entre outros. A intensificação da produção também ocorre em resultado do melhoramento genético, excelente nutrição, novas formas de manejo, avanços tecnológicos e controlo ambiental. Tudo isto, proporciona uniformidade ao lote de animais e maior qualidade do produto final. No entanto, a grande quantidade de dejetos que é gerada como subproduto, e que, por sua vez, liberta enormes quantidades de gases podem contribuir para a deterioração do ambiente. Durante os processos digestivos e respiratórios dos animais, grandes quantidades de amónia (NH₃), sulfureto de hidrogénio (H₂S), dióxido de carbono (CO₂) são libertados. Por outro lado, a própria movimentação dos animais, combinada com as características dos locais e tipo de alimentação, faz com que grande quantidade de material particulado, como PM_{2,5} e PM₁₀, seja libertada e permaneça em suspensão no interior dessas instalações pecuárias, trazendo sérios riscos à saúde e segurança dos animais e dos trabalhadores destes locais. Por estas razões, a monitorização contínua de parâmetros de qualidade do ar destes ambientes é de extrema importância. Contudo, ela é limitada pelo elevado custo associado aos equipamentos que são habitualmente utilizados na realização das medições. Logo, uma alternativa é a utilização de sensores e componentes de baixo custo para a construção de dispositivos capazes de realizar a monitorização destes locais. Poucos estudos relatam a construção, validação, calibração e aplicação destes sistemas mais baratos. Em virtude disto, neste trabalho, é proposta a construção e aplicação de um sistema de baixo custo para a análise da qualidade do ar interior em instalações agropecuárias (suiniculturas e aviculturas). Para a construção do sistema foram utilizados sensores semicondutores, eletroquímicos e ópticos, além de componentes que auxiliam na visualização, armazenamento e envio de dados por rede móvel para uma plataforma IoT (ThingSpeak), que analisa e agrega os dados obtidos. Os sensores foram validados e calibrados a partir de análises realizadas em ambientes controlados. Também foram realizadas medições numa instalação de aves para corte e uma instalação suinícola no Oeste do Paraná – Brasil. A construção do dispositivo requereu cerca de 54 dias e um investimento total de 461,25 €. A validação do sistema demonstrou a necessidade de se ajustarem as respostas de alguns equipamentos, mas, em termos gerais o sistema proporcionou leituras muito fidedignas quando comparadas com as leituras de equipamentos mais sofisticados e disponíveis no mercado. A aplicação do sistema de monitorização no Brasil, numa avicultura e suinicultura, permitiu testar a robustez e fiabilidade do sistema, em condições reais, e a capacidade do mesmo para avaliar o comportamento das concentrações dos poluentes atmosféricos no interior das instalações. Os resultados obtidos mostram um bom desempenho do sistema em todos os testes a que foi submetido, indicando que este equipamento pode constituir uma alternativa mais barata para se realizar monitorizações contínuas dentro de instalações agropecuárias.

Palavras-chave: Sensores de gases; Baixo custo; QAI; monitorização.

ABSTRACT

With population growth and high demand for food products of animal origin worldwide, the construction of new confinement units for the breeding of monogastric species such as pigs and poultry, has intensified in some countries such as Brazil, China, USA, among others. The production intensification is also due to genetic and nutrition improvement, new management practices, technological advances, and environmental control. All this provides higher animal lot uniformity and greater quality of the final product. However, the large amount of manure that is generated as waste or by-product causes emissions of air contaminants which can contribute to the deterioration of the environment. During the digestive and respiratory processes of animals, large amounts of ammonia (NH₃), hydrogen sulfide (H₂S), carbon dioxide (CO₂) are released. Moreover, the animal movement together with the characteristics of the places and type of feeding is an important source of particulate matter, such as PM_{2.5} and PM₁₀, posing serious risks to the health and safety of animals and workers in these places. For these reasons, the continuous monitoring of air quality parameters of these environments is extremely important. However, it is limited by the high equipment cost that is usually used to perform those measurements. Therefore, the use of low-cost sensors and components for the construction of devices capable of monitoring these sites is a good alternative. Few studies report the construction, validation, calibration, and application of these cheaper systems. Because of this, in this work, it is proposed the construction and application of a low-cost system for the analysis of indoor air quality in agricultural installations (pig and poultry farming). For the construction of the system, semiconductor, electrochemical and optical sensors were used, in addition to components that help in the visualization, storage and sending of data by the mobile network to an IoT platform (ThingSpeak), which analyzes and aggregates the data obtained. The sensors were validated and calibrated from analyses performed under controlled environments. Measurements were also made in a poultry facility for cutting and a swine facility in western Paraná – Brazil. The construction of the device required about 54 days and a total investment of € 461.25. The validation of the system demonstrated the need to adjust the responses of some equipment, but in general terms, the system provided very reliable readings when compared with those provided by the most sophisticated and available equipment in the market. The use of the monitoring system in Brazil, in poultry and pig farming, allowed testing the robustness and reliability of the system, under real conditions, and its ability to assess the behavior of the concentrations of atmospheric pollutants in the interior of the facilities. The results obtained show a good performance of the system in all the tests to which it has been submitted, indicating that this equipment can be a cheaper alternative to perform continuous monitoring within agricultural facilities.

Keywords: Gas sensors; Low-cost; IAQ; monitoring.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.2.1. Objetivo Geral	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. ESTRUTURA DA TESE.....	3
2. PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA	5
2.1. PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA NO MUNDO	5
2.2. PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA EM PORTUGAL E NO BRASIL	7
2.2.1. Avicultura	8
2.2.2. Suinicultura.....	10
2.3. EMISSÕES GASES DE EFEITO ESTUFA (GEEs)	12
2.3.1. Qualidade do ar interior em suiniculturas e aviculturas	13
2.3.2. Sulfureto de hidrogénio (H ₂ S)	14
2.3.3. Amónia (NH ₃)	16
2.3.4. Dióxido de carbono (CO ₂).....	18
2.3.5. Material particulado (PM _{2,5} e PM ₁₀).....	19
2.3.6. Temperatura e Humidade relativa	21
3. SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE GASES E PARTÍCULAS	23
3.1. DISPOSITIVOS DE BAIXO CUSTO	23
3.2. SENSORES SEMICONDUTORES	25
3.3. SENSORES ELETROQUÍMICOS	26
3.4. SENSORES ÓPTICOS	27
3.5. SENSIBILIDADE CRUZADA	28
3.6. EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO DISPONÍVEIS NO MERCADO	28
4. MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO.....	30
4.1.1. Placa de Arduino Mega 2560	31
4.1.2. Sensor de H ₂ S	32
4.1.2. Sensor de NH ₃	34
4.1.3. Sensor de CO ₂	36

4.1.4.	Sensor de PM _{2,5} e PM ₁₀	38
4.1.5.	Sensor de Temperatura e Humidade Relativa	39
4.1.6.	Monitor de cristal líquido e módulo de cartão SD.....	40
4.1.7.	Módulo GPRS/GSM.....	41
4.1.8.	Evolução da arquitetura do sistema	42
4.2.	VALIDAÇÃO DO SISTEMA.....	43
4.3.	DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	48
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1.	AVALIAÇÃO DOS CUSTOS DO SISTEMA	53
5.2.	VALIDAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO SISTEMA	54
5.3.	ESTUDO DE CASO.....	61
5.3.1.	Níveis de gases e partículas em produção avícola.....	62
5.3.2.	Níveis de gases e partículas em produção suinícola.....	67
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
	ANEXO I	89
	ANEXO II	101
	ANEXO III	102
	ANEXO IV	103
	ANEXO V	104

ABREVIATURAS E SIGLAS

ABPA	Associação Brasileira de Proteína Animal
ACGIH	American Conference of Industrial Hygenists
APA	Agência Portuguesa do Ambiente
Arduino IDE	Arduino Integrated Development Environment
CCOHS	Canadian Centre for Occupational Health and Safety
CH₄	Metano
CO₂	Dióxido de carbono
CO₂eq	Dióxido de carbono equivalente
COP	Conference of Parts
COVS	Compostos orgânicos voláteis
FAO	Food and Agriculture Organization
FSA	Febre Suína Africana
GEE	Gases de Efeito Estufa
GND	Ground
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
H₂S	Sulfureto de hidrogénio
HCFs	Hidrofluorcarbonetos
HR	Humidade Relativa
IACUC	Institutional Animal Care and Use Committee
ILO	International Labour Organization
In₂O₃	Óxido de Índio III
INE	Instituto Nacional de Estatística
IoT	Internet of Things
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LCD	Liquid Crystal Display
MP	Material Particulado
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego
N₂O	Dióxido Nitroso
NCI	National Cancer Institute
NDRI	Non-dispersive Infrared

NH₃	Amónia
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
O₂	Oxigénio
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
PCB	Printed Circuit Board
PFCs	Perfluorcarbonetos
PWM	Pulse Width Modulation
QAI	Qualidade do Ar Interior
ROHS	Restriction of Certain Hazardous Substances
SCOEL	Scientific Committee on Occupational Exposure Limits
SF₆	Hexafluoreto de enxofre
SMD	Surface-mount Device
SnO₂	Dióxido de estanho
T	Temperatura
UE	União Europeia
UN	United Nations
USEPA	United States Environmental Protection
WHO	World Health Organization
ZnO	Óxido de Zinco

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Crescimento Populacional até o ano de 2100.	6
Figura 2 – Evolução da produção e abate de aves em diferentes países do mundo.	9
Figura 3 – Evolução da produção e abate de suínos em diferentes países do mundo. ...	11
Figura 4 – Classificação da matéria particulada (MP) e origem das partículas.	20
Figura 5 – Miniaturização e redução do consumo de energia de sensores de gases.	24
Figura 6 – Um típico sensor de gás eletroquímico.	26
Figura 7 – Arquitetura do protótipo construído.	30
Figura 8 – Placa Arduino Mega 2560.	32
Figura 9 – Sensor DGS-H ₂ S da SPEC Sensors de sulfureto de hidrogênio e suas respectivas conexões elétricas de saída.	33
Figura 10 – Conversor de nível lógico BOB-12009 da Sparkfun.	34
Figura 11 – Sensor EC4-NH ₃ -100 da Pewantron de amônia.	34
Figura 12 – Easyboard para o sensor EC4-NH ₃ -100.	35
Figura 13 – Conexões da vista superior.	36
Figura 14 – Sensor K30 da CO2meter de dióxido de carbono.	37
Figura 15 – Estrutura do sensor de CO ₂ baseado no princípio NDIR.	37
Figura 16 – Sensor SDS011 da Nova Fitness Co. Ltd de matéria particulada.	38
Figura 17 – Sensor Si7021 da Sparkfun de temperatura e humidade relativa.	39
Figura 18 – Monitor de cristal líquido.	40
Figura 19 – Módulo de cartão SD.	40
Figura 20 – Módulo GPRS/GSM SIM800L.	41
Figura 21 – Visão Geral da plataforma ThingSpeak.	41
Figura 22 – Protótipo de medição de gases interiores de instalações pecuárias.	42
Figura 23 – Encapsulamento preliminar do sistema.	43
Figura 24 – Esquema montado para validação dos sensores de NH ₃ , CO ₂ , T e HR.	44
Figura 25 – Instrumentos de "referência" utilizados na amostragem de gases e parâmetros ambientais.	45
Figura 26 – Esquema montado para validação do sensor de material particulado e narguilé utilizado para produção das partículas.	46
Figura 27 – Instrumentos de "referência" utilizados na amostragem de partículas.	47

Figura 28 – Mapa de localização das cidades de Serranópolis do Iguaçu e Entre Rios do Oeste.	49
Figura 29 – Sistema de exaustão e humidificação do aviário.	50
Figura 30 – Visão Interior da entrada para o fundo e visão traseira do aviário.....	51
Figura 31 – Suinicultura na qual foi realizada as amostragens.	51
Figura 32 – Série temporal de 8h da (a) NH ₃ , (b) CO ₂ , (c) T e (d) HR.....	55
Figura 33 – Série temporal de 4h30min da (a) NH ₃ , (b) CO ₂ , (c) T e (d) HR.....	56
Figura 34 – Diagrama de dispersão e reta de calibração do CO ₂ , análise de 8h.	58
Figura 35 – Diagrama de dispersão e reta de calibração do HR, análise de 4h30.....	59
Figura 36 – Diagrama de dispersão e reta de calibração do NH ₃ , análise de 4h30.	60
Figura 37 – Diagrama de dispersão e reta de calibração das PM _{2,5} , análise de 24h.	61
Figura 38 – Concentração da amónia em diferentes pontos do aviário.....	63
Figura 39 – Concentração do dióxido de carbono em diferentes pontos do aviário.	64
Figura 40 – Concentração do sulfureto de hidrogénio em diferentes pontos do aviário.	65
Figura 41 – Temperatura e Humidade Relativa média encontrado em diferentes pontos do aviário.	66
Figura 42 – Material Particulado PM _{2,5} e PM ₁₀ médio, encontrado em diferentes pontos dentro do aviário.....	67
Figura 43 – Concentração de amónia e dióxido de carbono encontrado na suinicultura.	68
Figura 44 – Concentração do sulfureto de hidrogénio em diferentes pontos da suinicultura.	69
Figura 45 – Temperatura e Humidade Relativa encontrado em diferentes pontos da suinicultura.	70
Figura 46 – Material Particulado PM _{2,5} e PM ₁₀ médio, encontrado em diferentes pontos dentro da suinicultura.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidade de animais produzidos no mundo em 1961 e 2017.....	6
Tabela 2 – Limiares de exposição máxima ao H ₂ S em curto e longo prazo para o ser Humano.	16
Tabela 3 – Limiares de exposição máxima ao NH ₃ em curto e longo prazo para o ser Humano.	18
Tabela 4 – Limiares de exposição máxima ao CO ₂ em curto e longo prazo para o ser Humano.	19
Tabela 5 – Analisadores de gases e monitores partículas de alta precisão.....	29
Tabela 6 – Gamas das concentrações dos poluentes do ar interior e parâmetros ambientais de suiniculturas e aviculturas encontradas na literatura.	31
Tabela 7 – Sensibilidade cruzada do sensor de sulfureto de hidrogénio aos outros gases.	33
Tabela 8 – Sensibilidade cruzada do sensor de NH ₃ aos outros gases.	35
Tabela 9 – Características dos ensaios de material particulado.....	47
Tabela 10 – Parâmetros estatísticos utilizados para avaliar os dados obtidos pelo sistema construído.	48
Tabela 11 – Custos envolvidos e tempo gasto na construção do sistema de QAI de instalações pecuárias.....	53
Tabela 12 – Resumo dos parâmetros estatísticos obtidos no processo de validação/calibração dos sensores.	61

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Nos últimos quarenta anos, houve uma explosão demográfica de mais de 3,3 milhões de milhões de pessoas, o equivalente a uma taxa de 90% a mais do que nas décadas anteriores e que se deveu essencialmente aos avanços tecnológicos e à melhor distribuição dos rendimentos (FAO, 2009b). Este crescimento traz consigo novos desafios para o século XXI, destacando-se as necessidades acrescidas de alimento, utilização de recursos naturais e o aumento da produção de resíduos sólidos, líquidos e atmosféricos.

Desde então, segundo Nieuwenhoven *et al.* (2013), o setor pecuário tem entrado em ascensão contínua, principalmente no que refere à produção de suínos e aves de capoeira criados em confinamento. A criação destes animais gera um enorme volume de dejetos, que por sua vez libertam grandes quantidades de poluentes atmosféricos devido à fermentação anaeróbica.

Estes poluentes atmosféricos contribuem amplamente para o aquecimento global, para a acidificação e eutrofização de habitats e podem causar danos na saúde humana (Gerber, 2013). Os principais contaminantes deste tipo de instalações são a amónia (NH₃), sulfureto de hidrogénio (H₂S), dióxido de carbono (CO₂) e material particulado com diâmetro aerodinâmico de 2,5 µm (PM_{2,5}) e 10 µm (PM₁₀), entre outros (Ni *et al.*, 2017).

Contudo, estes poluentes têm-se tornado uma preocupação crescente nas últimas décadas, tanto para a qualidade do ar interior (QAI), que pode afetar o bem-estar das espécies que ali vivem e os trabalhadores que realizam diferentes tarefas nesses ambientes, quanto para a qualidade do ar ambiente em torno das áreas residenciais próximas deste tipo de instalação de produção animal (Banhazi *et al.*, 2018). A QAI é um fenómeno multidisciplinar que envolve diferentes vias, nas quais os contaminantes químicos, físicos e biológicos podem-se tornar parte de uma composição total do ambiente interior (Tham, 2016).

Muitas investigações têm vindo a ser desenvolvidas no âmbito da caracterização quanti e qualitativamente das gamas de concentração destes contaminantes dentro de instalações pecuárias, sendo elas, bovinoculturas, suinoculturas, aviculturas e todas aquelas que têm como finalidade a criação e reprodução de animais em ambientes confinados.

Logo, a monitorização desses recintos é de suma importância, pois a partir dela, é possível gerir a qualidade do ar no interior dessas instalações com tratamentos e prevenções adequadas.

Todavia, a maioria dos equipamentos e métodos utilizados na monitorização contínua disponíveis no mercado requerem elevados investimentos financeiros, calibração frequente, manutenção rotineira, técnicos especializados e, normalmente, são equipamentos grandes e pesados (Kularatna e Sudantha, 2008; Marques e Pitarma, 2019).

Uma alternativa é a utilização de sensores de diversos tipos e de baixo custo na construção de um sistema que seja capaz de monitorizar as concentrações dos gases e parâmetros ambientais, como a temperatura e humidade relativa, de forma contínua e em tempo real e que consigam registar e armazenar os dados coletados (*datalogger*) nessas instalações (Delgado *et al.*, 2019).

Além da possibilidade de recolha e armazenamento dos dados de interesse, estes dispositivos podem ser distribuídos em larga escala (devido ao seu baixo custo) e incluir módulos de interação com plataformas remotas que possibilitem a visualização dos dados a partir de um terminal remoto com possibilidade de ligação à *internet*, integrados numa arquitetura distribuída segundo uma filosofia *Internet of Things - IoT* (Anandhakrishnan, 2013; Abraham e Li, 2016).

Neste trabalho foi construído um sistema baseado na plataforma Arduino capaz de medir gases e parâmetros ambientais presentes em instalações agropecuárias, como suiniculturas e aviculturas, a partir de sensores semicondutores, eletroquímicos e ópticos, em conjunto com os módulos de armazenamento de dados (cartão micro SD), de visualização (LCD) e de envio remoto de dados por rede móvel (GPRS).

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Construir e aplicar um sistema de baixo custo para análise da qualidade do ar interior em instalações agropecuárias – suiniculturas e aviculturas.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Desenvolver um dispositivo electrónico para medição de parâmetros de avaliação da qualidade do ar interior, como temperatura (T), humidade relativa (HR),

amónia (NH₃), sulfureto de hidrogénio (H₂S), dióxido de carbono (CO₂) e material particulado com diâmetro aerodinâmico de 2,5 µm (PM_{2,5}) e 10 µm (PM₁₀);

- Validar o desempenho e eficiência do dispositivo;
- Aplicar o sistema em instalações de aves para corte e suínos no Brasil.

1.3. ESTRUTURA DA TESE

O presente trabalho foi estruturado em 6 capítulos, que serão detalhados a seguir. No primeiro capítulo é delimitado o âmbito da dissertação, no qual é contextualizado o tema e abordada a relevância do trabalho. Também são apresentados os objetivos a atingir no decorrer da investigação e a estrutura que o trabalho apresenta.

O segundo capítulo, faz o leitor imergir no tema do trabalho, no qual é mostrado as potenciais origens dos poluentes atmosféricos dentro do setor agropecuário. Também são apresentados dados estatísticos representativos de 1961 até 2017 sobre o aumento da produção de animais dentro do setor pecuário e a previsão de como a população mundial irá aumentar nos próximos anos.

Também se aprofunda um pouco mais o setor pecuário. Neste ponto, são destacadas as principais produções agrícolas de Portugal e do Brasil, dando ênfase aos subsetores da avicultura e suinicultura e à importância que eles têm para esses países, em termos sociais e económicos, além da evolução que esses ramos da pecuária tiveram no decorrer dos anos.

São apresentadas as principais questões relacionadas com os gases do efeito estufa (GEE) e a relação que eles apresentam com o ramo da pecuária. São mostrados alguns dados de gases que são emitidos a partir da criação de animais em confinamento e alerta sobre os significativos impactos do intenso crescimento desse setor em todo o mundo, em relação à emissão de poluentes atmosféricos.

O leitor poderá verificar as questões associadas aos gases e partículas em ambientes interiores. Aqui será caracterizada a qualidade do ar interior (QAI) e mostrada a sua grande importância para os trabalhadores e os animais que ali vivem, além dos perigos associados à exposição a elevadas concentrações de contaminantes. Também são detalhados os contaminantes mais relevantes nesses ambientes, bem como as suas gamas de concentração e de outros parâmetros ambientais encontrados em diferentes estudos, enfatizando a real importância de se monitorizar esses poluentes atmosféricos.

No terceiro capítulo, é exposta a importância da monitorização de gases e partículas a partir de dispositivos de baixo custo. Aqui é mostrada a importância que a miniaturização trouxe para os sensores, o que permite a construção de dispositivos cada vez menores. A importância desses dispositivos estarem devidamente calibrados e a relevância da instalação de redes de monitorização em instalações pecuárias também é abordada, assim como as principais tecnologias utilizadas nos sensores desses contaminantes do ar. Os analisadores de gases e monitores de partículas disponíveis no mercado também são revistos neste capítulo.

No quarto capítulo, são detalhados os sensores e componentes utilizados para a construção do protótipo, a plataforma utilizada para o desenvolvimento do algoritmo e descrito o processo de prototipagem. São mostrados os métodos utilizados para a validação e calibração de cada sensor, assim como os analisadores de gases ou monitores de partículas que foram utilizados para isso. E por fim, as instalações pecuárias na qual foram realizadas as medições dos gases e partículas, utilizando o sistema construído.

No capítulo cinco, são mostrados os principais resultados obtidos durante todo o desenvolvimento do projeto, desde o dispositivo encapsulado com uma PCB (*Printed Circuit Board*) integrada e suas características, os resultados dos procedimentos utilizados para validar as leituras do protótipo e ainda os resultados do estudo de caso realizado na região sul do Brasil, numa avicultura e numa suinicultura. No capítulo seis, são destacadas as conclusões de todo o trabalho desenvolvido.

2. PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA

Este capítulo de revisão da literatura, inicia-se na produção agropecuária em todo o mundo e se aprofunda no conjunto destas atividades primárias em Portugal e no Brasil. Em específico, o capítulo trabalha os setores da avicultura e suinicultura e a maneira, de uma forma geral, como podem contribuir para a geração de gases de efeito estufa, a partir de poluentes gerados nos interiores de instalações de criação de animais em confinamento.

Adiante, o capítulo é centrado na problemática da qualidade do ar interior e foca em aspetos relacionados aos contaminantes mais comuns encontrados no interior destas instalações, nomeadamente as suas principais características, dinâmicas, gamas encontradas nestes ambientes interiores e seus efeitos adversos na saúde dos animais e dos trabalhadores.

2.1. PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA NO MUNDO

A produção de alimentos de origem animal entrou em ascensão nos últimos anos devido ao crescimento da população e, como efeito, gerou-se um maior consumo de carnes, ovos, laticínios, entre outros produtos derivados de animais. Tendo em mente que o setor agrícola alimenta o setor pecuário, grandes áreas são dedicadas para a criação de animais, conduzindo a significativas mudanças no ambiente (FAO, 2015).

No setor da criação de animais, entre 1961 e 2017, houve um significativo aumento na produção de bovinos, que passou de 1 para 1,6 milhões de milhões de cabeças por ano. A produção de suínos passou de 400 milhões para quase 1 milhão de milhões de cabeças ao ano e a produção de frangos de 3,9 para 22,8 milhões de milhões de cabeças ao ano. A produção de ovos de galinha teve um crescimento muito significativo, passando de 269 milhões de milhões para 1,4 triliões (FAO, 2019). Estes dados podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Quantidade de animais produzidos no mundo em 1961 e 2017.

Produção de animais	Quantidade de cabeças (1961)	Quantidade de cabeças (2017)
Galinhas	3.906.690.000	22.847.062.000
Patos	193.452.000	1.150.901.000
Perus	204.241.000	459.369.000
Cabras	348.726.793	1.034.406.504
Gado e búfalos	1.030.496.876	1.692.654.987
Porcos	406.180.364	967.385.101
Produção de produtos provenientes dos animais	Quantidade (1961)	Quantidade (2017)
Ovos de galinha	269.140.507.000	1.416.675.332.000
Leite de vaca	313.626.619	652.525.264

Fonte: Adaptado FAO (2017).

A produção mundial de animais é resultado do crescimento populacional e, conseqüentemente, da evolução da sua dieta, do crescimento, do rendimento das populações e da urbanização, pelo que, quanto maior for o rendimento das pessoas, maior será o consumo de produtos de origem animal (Tullo *et al.*, 2018; Gerber *et al.*, 2013).

De acordo com a *United Nations Department of Economic and Social Affairs – UNDESA* (2017), a previsão do crescimento da população mundial dos atuais 7,2 milhões de milhões de pessoas, passará a ser quase de 10 milhões de milhões em 2050 e mais de 11 milhões de milhões até 2100, como se pode observar na Figura 1.

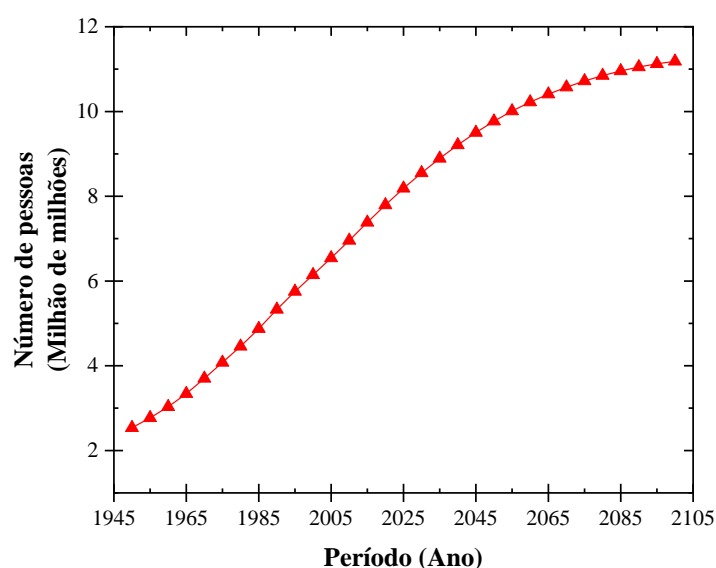


Figura 1 – Crescimento Populacional até o ano de 2100.

Fonte: Adaptado UNDESA, 2017.

Logo, esse crescimento populacional estará acompanhado de grandes e novos desafios, como a utilização de mais recursos naturais, para sustentar a produção global de alimentos e saciar o aumento das necessidades de sistemas alimentares e agrícolas (Gerber *et al.*, 2013).

Será um grande desafio garantir a segurança alimentar e nutricional mundial até o ano de 2050 (Fischer *et al.*, 2014). Contudo, Dixon *et al.* (2009) mostra a importância da utilização de banco de dados, como por exemplo o da FAO, na classificação, aplicação e mapeamento de sistemas agropecuários para satisfazer a segurança alimentar e reduzir a pobreza, assegurando soluções estratégicas.

Os sistemas atuais, provavelmente, são capazes de produzir a quantidade de alimentos para saciar a população no futuro. Porém, deve ser feita de maneira inclusiva e, principalmente, respeitando a sustentabilidade e o ambiente (FAO, 2011).

Contudo, Gerber *et al.* (2013) completam que, os recursos naturais como o solo, água e nutrientes que irão sustentar esse crescimento são escassos, pelo que a agricultura e pecuária desempenham um papel de grande impacto em questões ambientais no nosso planeta, tais como o desflorestamento, degradação do solo, poluição dos recursos hídricos, mudanças climáticas, emissões de gases do efeito estufa – GEE, a produção de resíduos, entre outros.

2.2. PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA EM PORTUGAL E NO BRASIL

Segundo a *European Commission* (2003), ao longo dos anos, o setor agropecuário tem contribuído cada vez menos para a economia portuguesa, tal qual se verifica em países industrializados. Ainda assim, têm um peso elevado em comparação com valores médios registados na União Europeia (UE).

Sendo assim, o setor da agricultura e indústria em Portugal tem diminuído cada vez mais nos últimos anos e, em contrapartida, registou-se um aumento moderado no setor de serviços profissionais e outras atividades de serviços (European Commission, 2018).

O Instituto Nacional de Estatística – INE (2017) diz que Portugal tem como suas principais produções agrícolas o milho, tomate, azeitonas, uvas e subprodutos como o vinho e o azeite. Já na produção animal destaca-se uma forte produção de frangos e suínos.

Em contrapartida, o Brasil tem forte destaque no setor primário desde o período colonial, do século XVI ao XIX, tendo uma atividade econômica baseada no cultivo, como as culturas de café, cacau, açúcar e no extrativismo do ouro e pau-brasil (Miranda *et al.*, 2009). Contudo, conforme Vargas (1987), o setor agrícola tem dado espaço cada vez maior para as atividades industriais e de serviços.

Segundo a FAO (2016), o país é atualmente uma grande potência agropecuária por ter uma rica biodiversidade aliada a uma grande extensão de terras, grandes suprimentos de água doce, grandes quantidades de energia solar e condições climáticas que vão do temperado ao tropical. Todos estes fatores, combinados com a aplicação de tecnologias, faz do Brasil um dos maiores produtores de alimentos do mundo.

De acordo com Pena (2019), o Brasil é o terceiro maior produtor e exportador agrícola do mundo, só perdendo para grandes potências como o Estados Unidos e a UE, contudo. Ainda assim é o maior produtor de cana-de-açúcar, café e laranja, o segundo maior produtor de soja, fumo e carne bovina e o terceiro país com maior volume produzido de milho anualmente em todo o planeta. Não obstante, o Brasil também se destaca com uma alta produção e exportação de suínos e aves de corte (USDA, 2018).

Em todo o mundo, o setor pecuário, em especial as espécies monogástricas em sistemas de produção intensivo em confinamento como suínos e aves de capoeira, é o maior contribuinte para impactos ambientais e esgotamento de recursos naturais (Davis *et al.*, 2015; Arrieta e González, 2019).

2.2.1. Avicultura

A avicultura, conforme o Despacho nº 69/1996, é a atividade de reprodução e criação com características industriais de galinhas, patos, perus, gansos, pombos, avestruzes entre outros, nomeados de aves de capoeira, com o interesse de produzir carne e ovos para o consumo humano.

A avicultura pode ser subdividida em avicultura de corte e postura: a primeira é caracterizada por Reck e Schultz (2016) pela utilização de sistemas modernos de planeamento, devido ao rápido ciclo produtivo e elevada necessidade do mercado por produtos avícolas; já a avicultura de postura é descrita por Pereira (2007) como um sistema de gaiolas mecanizadas, no qual são fornecidos alimentos e água para as aves e, posteriormente, são coletados os ovos para a comercialização.

O consumo de carnes de aves e a popularidade dos produtos avícolas tem sido cada vez mais frequente em todo o mundo, tanto em países em desenvolvimento quanto em países desenvolvidos, pois, a carne possui pequenas quantidades de gordura e baixos teores de ácidos gordos insaturados desejáveis, fazendo com que a carne seja mais saudável e nutritiva, além de não existirem restrições religiosas ou culturais para essa fonte de alimento (Mead, 2004). É possível verificar a evolução da produção e abate de aves na Figura 2.

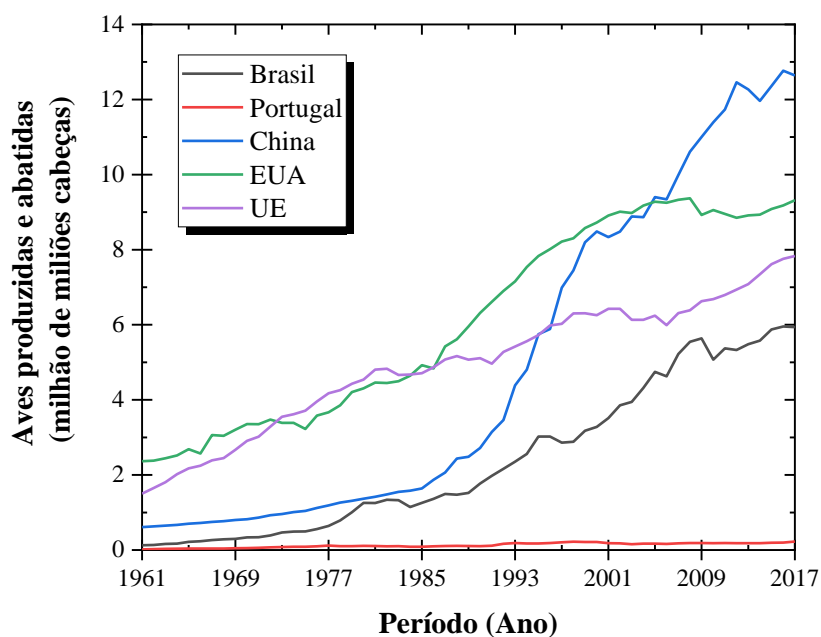


Figura 2 – Evolução da produção e abate de aves em diferentes países do mundo.

Fonte: Adaptado FAOSTAT, 2019.

Devido ao aumento das necessidades de carne de aves na UE e em outros locais do mundo, por causa de fatores socioeconómicos, a indústria teve uma resposta rápida, em termos produtivos, em relação ao mercado (Mead, 2004).

A perspectiva da produção global de carne de frango para o ano de 2019, segundo a *United States Department of Agriculture* (2018), é um crescimento de 2%, o equivalente a um recorde de 97,8 milhões de toneladas, mostrando que a crise económica não impactou a UE mas acabou por impulsionar a procura de carne de frango por ser uma carne mais barata que, no caso do Brasil, levou à recuperação das exportações e de uma maior estabilização da economia.

Mesmo com a crise económica na UE, verificou-se um crescimento na produção de aves de capoeira em Portugal no período de 1980 a 2009. A procura por esse tipo de

carne tornou-se maior devido ao custo mais vantajoso em relação a outros tipos de carne, como a vitela (INE, 2010). Atualmente, a produção de aves de capoeira em Portugal ultrapassou as 389 mil toneladas no ano de 2016 e é a segunda carne mais consumida no país, sendo 42,1 kg/hab (INE, 2017).

De acordo com Miele e Girotto (2006), devido ao desenvolvimento cada vez maior de pesquisas, a implantação de tecnologia e a capacidade de coordenação do consumo, produção e mercado, a cadeia produtiva de aves de corte no Brasil tem recebido cada vez mais destaque no cenário mundial.

Segundo a Associação Brasileira de Proteína Animal - ABPA (2018), o consumo *per capita* no Brasil é de 42,07 kg de frango e o país foi o segundo maior produtor de carne de frango em 2017, produzindo 13,1 milhões de toneladas de carne de frango, dos quais 34,32% foram abatidos no estado do Paraná, região sul do Brasil e, por fim, exportou 4,32 milhões de toneladas, assegurando o primeiro posto de exportação da carne.

2.2.2. Suinicultura

Segundo a FAO (2009a) e Veloni *et al.* (2015) a suinicultura é uma atividade da Zootecnia e Medicina Veterinária que se dedica na criação racional de suínos. A proteína proveniente dos suínos são a segunda mais consumida em todo o mundo, sendo uma atividade muito tradicional em muitos países que, nos últimos anos, têm desenvolvido e melhorado as técnicas de gestão, genética, bem-estar e sanidade dos animais, garantindo uma melhor qualidade dos produtos finais e reduzindo impactes ambientais (Guimarães *et al.*, 2017).

Mesmo com acontecimentos recentes como a Febre Suína Africana (FSA), a produção global de suínos deve aumentar em 1% no ano de 2019, o equivalente a 114,6 milhões de toneladas. Contudo, devido à febre, o mercado latino-americano deverá ganhar espaço para satisfazer as necessidades de importação de grandes países consumidores como a Rússia. A UE e a China continuarão a ser os principais países exportadores (USDA, 2018). É possível verificar na Figura 3 a evolução da produção e abate de suínos.

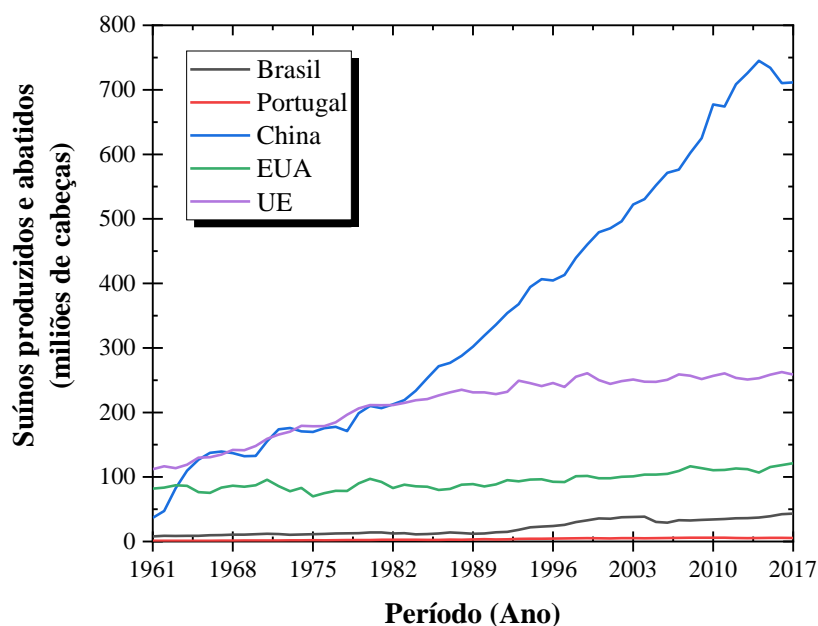


Figura 3 – Evolução da produção e abate de suínos em diferentes países do mundo.
Fonte: Adaptado FAOSTAT, 2019.

De acordo com o INE (2010), devido à produção em excesso de suínos, baixas exportações e um baixo consumo, a UE apresentou um mercado instável na produção de carne de suíno desde 1996, chegando em 2009 a um preço 17,2% menor em relação ao primeiro ano. Como consequência, houve uma diminuição do crescimento no setor suinícola em Portugal.

Desde 2015, os produtores portugueses têm tido problemas com a renovação dos suínos reprodutores, ocasionando uma produção cada vez menor ano após ano. Em 2017 a produção foi 5,5% menor que 2016, totalizando 378 mil toneladas de carne de suíno (INE, 2017).

Caminhando para o cenário brasileiro, a suinicultura tem cada vez mais relevância socio-económica pois favorece muito o pequeno produtor e, dessa forma, geram-se empregos em toda a cadeia produtiva (Guimarães *et al.*, 2017).

Conforme a ABPA (2018), entre os anos de 2006 a 2017, a produção suinícola brasileira passou de 2,94 para 3,75 milhões de toneladas, o equivalente a um crescimento de 27,6%. Em 2017, o estado que mais abateu foi Santa Catarina, com 28,38%, seguido do Paraná com 21,01%.

Portanto, observando todo este contexto, MacLeod (2013) afirma que o setor pecuário e de criação de animais forneceu um forte avanço na economia agrícola, resultado do crescimento populacional, com especial enfoque no setor dos suínos e aves que, respectivamente, contribuíram em 2010 para a produção global de carnes com 37%

e 24%. Sendo assim, MacLeod (2013) completa que, ao mesmo passo que esses setores vêm crescendo, há grandes mudanças no ambiente, principalmente nas grandes quantidades de emissões de gases do efeito estufa libertadas desses processos produtivos.

2.3. EMISSÕES GASES DE EFEITO ESTUFA (GEEs)

Conforme a organização científico-política *Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC* (2014), os gases de efeito estufa podem surgir a partir de reações naturais ou antropogênicas e têm a propriedade física de absorver e emitir comprimentos de onda do espectro eletromagnético (i.e. da região do infravermelho). Como consequência criam o efeito estufa, que pode ser potenciado com o tempo de permanência e a concentração desses gases na atmosfera.

Em concordância com a *United Nations - UN* (1998), a terceira Conferência das Partes (COP 3), responsável por aprovar o Protocolo de Quioto e por definir os principais gases causadores do efeito estufa, identificou o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorcarbonetos (HFCs), perfluorcarbonetos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF₆) como os principais GEEs.

Nos últimos anos a emissão de GEEs tem sido associada ao potencial de aquecimento global (Liu *et al.*, 2014). Observa-se que um dos campos que mais contribuem para a emissão de GEEs é o setor pecuário, estimulando cada vez mais as mudanças climáticas (Caro, 2019a).

Diversos autores vêm tentando estimar a quantidade de emissões geradas no setor pecuário. Segundo Gerber *et al.* (2013), entre os anos de 2004 e 2005 foram estimados 7,1 Gt CO₂eq (dióxido de carbono equivalente), totalizando 14,5% de todas as emissões produzidas por fontes antropogênicas. Caro *et al.* (2014), reportam estimativas para 2010 de emissões denominadas de não-CO₂ (CH₄ e N₂O), geradas por meio da fermentação entérica e da gestão de dejetos de 3,1 Gt CO₂eq.

Segundo Vries e Boer (2010), a produção de 1 kg de carne bovina é a que traz maior impacto em questão de GEEs, além do consumo de terras e energia, libertando entre 14 a 32 kg de CO₂eq, seguido pela carne de suíno, de 3,9 a 10 kg de CO₂eq e, finalmente, a carne de frango com um contributo de 3,7 a 6,9 kg de CO₂eq por kg de carne.

Como consequência da expansão do setor pecuário em todo o mundo, houve uma maior ampliação das terras agrícolas, que estão associadas com o desmatamento, o

desequilíbrio de nutrientes, a eutrofização de águas superficiais e a emissão dos GEEs (Lesschen *et al.*, 2011).

De acordo com Caro (2019b), nos próximos anos, estratégias de mitigação devem ser testadas cada vez mais, para que as emissões de GEEs deixem de ser uma questão emergente, devido aos impactos significativos associados ao intenso crescimento da pecuária.

2.3.1. Qualidade do ar interior em suiniculturas e aviculturas

A qualidade do ar interior (QAI) em instalações pecuárias, conforme a *United States Environmental Protection Agency (USEPA)*, é caracterizada pela concentração dos poluentes do ar (material particulado e substâncias gasosas) e pelas condições do ambiente térmico (temperatura e humidade relativa) que podem afetar a saúde, o bem-estar e o desempenho dos trabalhadores e, principalmente, dos animais que vivem em confinamento (USEPA, 2008; Ecim-Djuric e Topisirovic, 2010; Shen *et al.*, 2019).

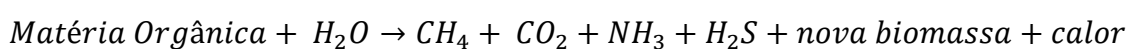
Existem estudos que descrevem a QAI em três importantes parâmetros: os químicos como os gases e partículas; os físicos como a temperatura, humidade relativa, fluxo de ventilação interior, etc.; e os biológicos como os fungos, esporos, bactérias, vírus, etc. (WHO, 2006; Burroughs e Hansen, 2011).

Segundo a *World Health Organization (WHO)*, já foram reportados diversos problemas com trabalhadores agrícolas, relacionados com a elevada exposição a gases e materiais particulados de atmosferas interiores, como a irritação dos olhos, congestão nasal, cefaleias, fadiga, tontura, náusea, espirros, dermatite, dores articulares, sonolência, entre outros (WHO, 2006). Já nos animais, há o aparecimento de problemas metabólicos e infecciosos, devido à elevada carga de poluentes atmosféricos no interior das instalações, fazendo com que os mesmos diminuam o consumo de ração, tenham problemas de crescimento e se eleve a taxa de mortalidade (Santos *et al.*, 2012; Silva, 2013).

Comumente, são encontrados diversos contaminantes gasosos, dentro e nos arredores destas instalações, sendo os mais perigosos o sulfureto de hidrogénio (H₂S), amónia (NH₃), dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄). Contudo, podem encontrar-se também material particulado, microrganismos, endotoxinas, entre outros (Cambra-López *et al.*, 2010; Ecim-Djuric e Topisirovic, 2010; Heyden *et al.*, 2015; Leip *et al.*, 2015; Masclaux, *et al.*, 2013; Zheng *et al.*, 2019).

A formação dos poluentes gasosos é devida à digestão anaeróbia dos resíduos gerados dentro das instalações de criação de animais (esterco, aparas de madeira, palha, ração, penas, pelos, ovos partidos, *etc*) e também do chorume produzido (Kelleher *et al.*, 2002).

Estas reações de degradação e estabilização da matéria orgânica sob condições mínimas ou ausentes de oxigénio (O₂), são orquestradas por microrganismos anaeróbios que utilizam catiões da matéria-orgânica para a formação de biogás e massa microbiana (Kelleher *et al.*, 2002). Abaixo é possível observar uma equação simplificada da digestão anaeróbia.



Sendo assim, investigações realizadas por Cambra-López *et al.* (2015) e Winkel *et al.* (2016), mostram a importância da avaliação da QAI em instalações suínolas e avícolas, sendo os poluentes caracterizados por meio de métodos de monitorização.

Desta forma, como mostra a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), é importante realizar uma monitorização estratégica no interior dessas instalações, avaliando a presença dos diferentes poluentes que ali se encontram e, portanto, caso se constate que ultrapassam limiares de proteção, serão necessárias aplicar técnicas de controlo e mitigação (APA, 2009).

Para tal, existem algumas técnicas para a gestão da qualidade do ar interior em instalações pecuárias, tais como: a filtração do ar, sedimentação eletrostática, ventilação, etc. (Ecim-Djuric e Topisirovic, 2010).

2.3.2. Sulfureto de hidrogénio (H₂S)

O sulfureto de hidrogénio, também conhecido como sulfeto de hidrogénio e gás ou ácido sulfídrico, cuja fórmula molecular é H₂S, é um gás incolor, inflamável e com características odoríferas similar a ovos podres. Além de ser muito tóxico para o Homem e animais quando em elevadas concentrações, a exposição a este gás pode resultar também em morte por paragem respiratória (Chou, 2003).

Na transformação e digestão anaeróbia, o sulfureto de hidrogénio é um dos produtos finais, sendo ele formado na fase da acidogénese pela digestão bacteriana de material orgânico, contendo azoto e fósforo na composição (Sommer *et al.*, 2013). É

comumente encontrado em estrume armazenado de suínos e quando o estrume é revolvido ou bombeado pode libertar grandes quantidades deste poluente no ambiente (Wang *et al.*, 2019).

O cheiro do H₂S é percebido em concentrações de 0,02 partes por milhão (ppm) e, nestas concentrações, pode anestésiar os sentidos olfativos. Para concentrações de 5 ppm, este composto pode causar irritações e, quando chega a níveis de 10 ppm, pode causar dores de cabeça e náuseas (Greenwood e Earnshaw, 2016). Os danos causados nos humanos, de acordo com Guo *et al.* (2019), podem ser edemas pulmonares, paralisia respiratória, neurotoxicidade, arritmia cardíaca, e irritação crónica nos olhos.

O sulfureto de hidrogénio é habitualmente encontrado em aviculturas e principalmente em suiniculturas (Liu *et al.*, 2014; Chi *et al.*, 2018). Logo, este contaminante pode ocasionar uma ampla gama de efeitos tóxicos nos animais que se encontram confinados nas instalações, tais como, problemas no sistema respiratório, sistema cardiovascular e sistema digestivo. Sendo assim, estes problemas resultam numa taxa de crescimento mais lenta e maior morbidade nas aves de capoeira e suínos (Attene-Ramos *et al.*, 2007; Haouzi *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2014; Lim *et al.*, 2016; Chi *et al.*, 2018).

Devido ao facto de os animais serem mais sensíveis e estarem expostos por longos períodos de tempo a poluentes interiores, níveis elevados destes contaminantes podem causar coma e morte nos mesmos (Guo *et al.*, 2019). Estudos como os de Heyden *et al.* (2015), mostram que a gama de concentração de H₂S encontrada em suiniculturas varia de 15 a 6180 ppb e em aviculturas a gama encontrada é entre 30 a 2240 ppb.

Portanto, diversas organizações de saúde e segurança ocupacional têm determinado e recomendado limiares de exposição máxima (Tabela 2), através de dados científicos coletados durante longos períodos de exposição a este tipo de gás em instalações de suínos, aves e outros tipos de animais em confinamento, como é mostrado pela *International Labour Organization – ILO* (2010).

Tabela 2 – Limiares de exposição máxima ao H₂S em curto e longo prazo para o ser Humano.

Tipo de organização	Limiares de H ₂ S	
	Média ponderada de tempo em 8 horas de trabalho	Limite de exposição de curto prazo
<i>Occupational Safety and Health Administration (OSHA)</i> - EUA	20 ppm (28 mg.m ⁻³)	50 ppm (70 mg.m ⁻³) durante 10 minutos
<i>National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)</i> - EUA	10 ppm (14 mg.m ⁻³)	15 ppm (21 mg.m ⁻³) durante 10 minutos
<i>American Conference of Industrial Hygienists (ACGIH)</i> - EUA	1 ppm (1,4 mg.m ⁻³)	5 ppm (7 mg.m ⁻³) durante 15 minutos
<i>Canadian Centre for Occupational Health and Safety (CCOHS)</i> - Canadá	1 ppm (1,4 mg.m ⁻³)	5 ppm (7 mg.m ⁻³) durante 15 minutos
<i>Scientific Committee on Occupational Exposure Limits (SCOEL)</i> – União Europeia	5 ppm (7 mg.m ⁻³)	10 ppm (14 mg.m ⁻³) durante 15 minutos
Ministério do Trabalho (MTE) - Brasil	8 ppm (12 mg.m ⁻³)	Não há dados

Fonte: Adaptado de ILO (2010); Dräger (2013); SCOEL (2007); Brasil (2019).

2.3.3. Amónia (NH₃)

Conforme o *National Cancer Institute – NCI* (2019), a amónia é um composto inorgânico incolor de odor extremamente forte, cuja fórmula molecular é NH₃, sendo este composto muito irritante aos olhos, pele, nariz, garganta e língua. De acordo com Wlazło *et al.* (2016), teve um aumento drástico das suas emissões no século XX, sendo que em algumas regiões do mundo até dobraram ou triplicaram a quantidade emitida, principalmente, devido à criação de novas instalações pecuárias.

A amónia é um dos gases alcalinos mais abundantes na atmosfera, tendo como uma das principais fontes de emissão a agricultura, aplicação de fertilizantes e principalmente a criação de animais, podendo também ter outras fontes como emissões veiculares, processos industriais e volatilização a partir dos solos e oceanos (Behera *et al.*, 2013). O lançamento de NH₃ na atmosfera em conjunto com óxido de azoto, pode dar origem a poluentes extremamente impactantes da qualidade do ar, sendo esses contaminantes o material particulado secundário e ozono troposférico (Leip *et al.*, 2015).

Na digestão anaeróbia dos resíduos gerados pelos animais, a amónia é formada como um dos produtos do processo de acidogénese, devido à alimentação das aves e suínos, além de outros compostos comentados anteriormente, como o sulfureto de hidrogénio (Sommer *et al.*, 2013). De acordo com Schauburger *et al.* (2018), é um dos

poluentes mais emitidos dentro de instalações pecuárias de criação de espécies monogástricas (suínos e aves), e que pode causar aborrecimento local e regional dos moradores, devido ao facto de ser um poluente mais persistente na atmosfera.

Na avicultura, são oferecidas rações com elevados teores de energia, proteínas e azoto em excesso, garantindo as necessidades nutricionais e o bom desempenho dos frangos de corte (Gay e Knowlton, 2009). Contudo, cerca de 45% do azoto é absorvido como proteína animal, os outros 55% são excretados pelas aves na forma de dejetos sobre a cama do aviário (Silva *et al.*, 2006).

Sob condições favoráveis de humidade, calor e dejetos na cama, a amónia é formada, por sua vez, o gás tem um efeito maléfico e afeta seriamente o estado de saúde das aves. Conforme Aziz e Barnes (2010), frangos de corte mantidos em um ambiente com o nível de concentração entre 50 e 75 ppm de NH₃, têm uma perda de 17 a 20 % do peso corporal, devido a exposição diária. No Brasil, frequentemente, produtores procuram que os frangos não fiquem expostos a valores de exposição superiores a 10 ppm.

Segundo Koerkamp *et al.* (1998), o NH₃ é responsável por problemas de acidificação e eutrofização de solos e cursos hídricos pois, a criação de suínos e aves de capoeira, pode libertar grandes quantidades do poluente gasoso, que acabam por resultar do armazenamento de estrume e chorume que é gerado dentro das instalações ou durante a aplicação do chorume por meio da fertirrigação.

Estudos desenvolvidos na monitorização da amónia, como os de Heyden *et al.* (2015), Shen *et al.* (2019) e Winkel *et al.* (2016), mostram que as gamas encontradas em suiniculturas variam de 2 a 87 ppm e em aviculturas essa variação é um pouco menor, sendo de 1 a 50 ppm.

Tendo por base muitas investigações realizadas em instalações pecuárias e as elevadas quantidades de dados recolhidos, organizações de saúde e segurança ocupacional orientam limiares de exposição também para a amónia (ILO, 2010). Tal qual pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3 – Limiares de exposição máxima ao NH₃ em curto e longo prazo para o ser Humano.

Tipo de organização	Limiares de NH ₃	
	Média ponderada de tempo em 8 horas de trabalho	Limite de exposição de curto prazo
<i>Occupational Safety and Health Administration (OSHA)</i> - EUA	25 ppm (17 mg.m ⁻³)	35 ppm (24 mg.m ⁻³) durante 15 minutos
<i>National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)</i> - EUA	25 ppm (17 mg.m ⁻³)	35 ppm (24 mg.m ⁻³) durante 10 minutos
<i>American Conference of Industrial Hygienists (ACGIH)</i> - EUA	25 ppm (17 mg.m ⁻³)	35 ppm (24 mg.m ⁻³) durante 15 minutos
<i>Canadian Centre for Occupational Health and Safety (CCOHS)</i> - Canadá	25 ppm (17 mg.m ⁻³)	35 ppm (24 mg.m ⁻³) durante 15 minutos
Ministério do Trabalho (MTE) - Brasil	20 ppm (14 mg.m ⁻³)	Não há dados

Fonte: Adaptado de CDC (2011); ACDC (2018); CCOHS (2019); Brasil (2019).

2.3.4. Dióxido de carbono (CO₂)

Conforme Hess-Kosa (2016), o dióxido de carbono (CO₂) é um gás incolor e inodoro, que normalmente é encontrado em elevadas concentrações em ambientes confinados, podendo ter como fonte a combustão, perdas de gases comprimidos e subprodutos da respiração de animais.

Segundo MacLeod *et al.* (2013), durante a criação de animais, um dos principais gases de efeito estufa que é libertado é o CO₂. Em geral, surge devido ao armazenamento do esterco e antes da aplicação do mesmo no solo, juntamente com outros gases como o N₂O e o CH₄, mas também pode ser de outras fontes, como o aquecimento, refrigeração, entre outros.

Heyden *et al.* (2015) e Winkel *et al.* (2016) referem também, em estudos por eles desenvolvidos, que as gamas encontradas de CO₂ em suiniculturas, variam de 1000 a 5000 ppm e em aviculturas de 500 a 3000 ppm. Em ambientes exteriores o CO₂ pode ser encontrado em torno de 400 ppm (Hess-Kosa, 2016).

Baixas concentrações de CO₂ não são prejudiciais para a saúde humana. Entretanto, à medida que a concentração de CO₂ vai aumentando, o oxigênio disponível é deslocado, acarretando uma série de problemas na pessoa que estiver exposta a essas grandes concentrações: respiração rápida, falta de ar, batimento cardíaco acelerado, náuseas, convulsões, coma e até morte (CCOHS, 2017).

Estudos apontados pela *Institutional Animal Care and Use Committee* – IACUC (2016), mostram que aves de capoeira expostas a concentrações de ar ambiente com mais de 45 % de dióxido de carbono na sua composição, num período entre 21 e 30 segundos, podem ter perda da consciência. Contudo, com 35 % de CO₂ na composição do ar e 8 segundos de exposição, já é o suficiente para fazer esses animais apresentarem sintomas como o fechamento dos olhos.

Agências governamentais de saúde e segurança ocupacional indicam níveis de exposição máxima para este poluente em ambientes interiores, podendo ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 – Limiares de exposição máxima ao CO₂ em curto e longo prazo para o ser Humano.

Tipo de organização	Limiares de CO ₂	
	Média ponderada de tempo em 8 horas de trabalho	Limite de exposição de curto prazo
<i>Occupational Safety and Health Administration (OSHA)</i> - EUA	5000 ppm (9000 mg.m ⁻³)	30.000 ppm (54.000 mg.m ⁻³) durante 15 minutos
<i>National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)</i> - EUA	5000 ppm (9000 mg.m ⁻³)	30.000 ppm (54.000 mg.m ⁻³) durante 10 minutos
<i>American Conference of Industrial Hygienists (ACGIH)</i> - EUA	5000 ppm (9000 mg.m ⁻³)	30.000 ppm (54.000 mg.m ⁻³) durante 15 minutos
Ministério do Trabalho (MTE) - Brasil	3900 ppm (7020 mg.m ⁻³)	Não há dados

Fonte: Adaptado de OSHA (2019), Brasil (2019).

Em espaços fechados, o dióxido de carbono em determinadas circunstâncias é um excelente indicador de ventilação, dando uma ótima indicação para a taxa de ventilação do local (APA, 2009). Portanto, em instalações pecuárias o processo de renovação do ar é imprescindível, para que a situação de conforto seja atingida para os animais (Barbosa *et al.*, 2007).

2.3.5. Material particulado (PM_{2,5} e PM₁₀)

Material particulado (MP), ou do termo em inglês *Particulate Matter* (PM), é distribuído no ambiente de forma onnipresente, podendo ter tamanhos variados no espaço e tempo (Mühlfeld *et al.*, 2008). Um termo muito utilizado para caracterizar o tamanho das partículas é o diâmetro aerodinâmico equivalente, sendo ele definido como,

o diâmetro de uma partícula esférica com uma densidade de 1 g.cm^{-3} com a mesma velocidade de sedimentação da partícula em questão (Hinds, 1999).

Segundo Harrison *et al.* (2016), o material particulado pode ser dividido em vários tamanhos conforme o seu diâmetro aerodinâmico: podendo ser partículas grossas (PM_{10} - $\text{PM}_{2,5}$), que são todas as partículas entre o diâmetro de 10 e $2,5 \mu\text{m}$; partículas finas ($\text{PM}_{2,5}$), são aquelas partículas menores ou iguais ao diâmetro de $2,5 \mu\text{m}$; partículas ultrafinas ($\leq \text{PM}_{0,1}$) e nanopartículas ($\leq \text{PM}_{0,05}$). Na Figura 4 é possível observar como é feita a classificação do material particulado e a fonte das partículas.

De acordo com a WHO (2013), as PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$ são respiráveis e pequenas o suficiente para penetrar no sistema respiratório, sendo que a exposição a curto e longo prazo incluem como principais sintomas: morbidade respiratória e cardiovascular, ou seja, agravamento da asma e insuficiência respiratória; e mortalidade, devido a doenças cardiovasculares e respiratórias, além de poder causar cancro de pulmão.

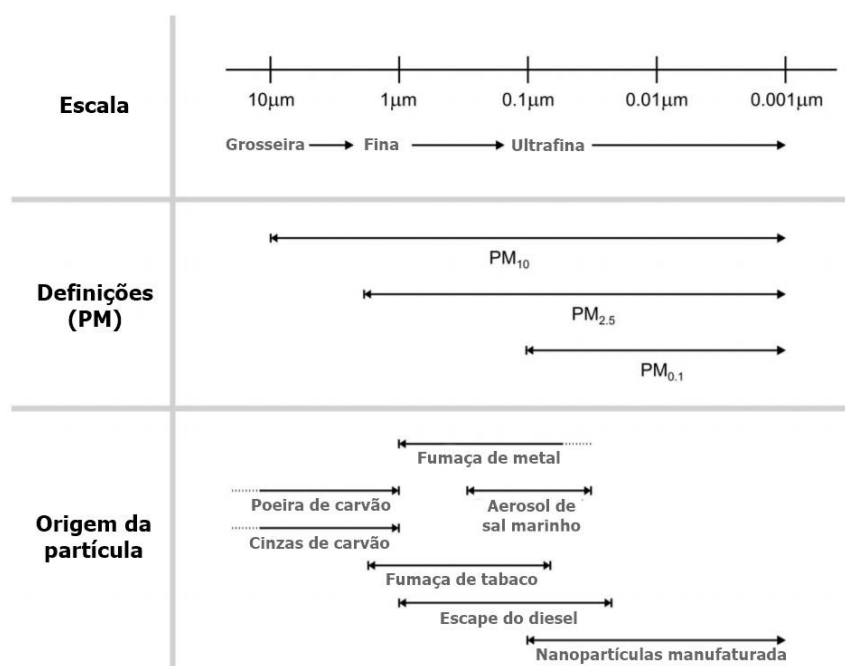


Figura 4 – Classificação da matéria particulada (MP) e origem das partículas.

Fonte: Adaptado de Mühlfeld et al. (2008).

A elevada emissão e a conseqüente elevada concentração de matéria particulada, é um dos principais problemas em instalações pecuárias em geral, o que acaba por afetar as condições físicas, químicas e microbiológicas do ar desses edifícios (Ecim-Djuric e Topisirovic, 2010). Os ambientes confinados como suiniculturas e aviculturas apresentam grandes quantidades de material particulado, que é composto por proteínas,

glicoproteínas, hormonas, peptídios, fármacos, entre outros compostos químicos (Hess-Kosa, 2016).

A principal fonte de matéria particulada das aves pode estar associada ao movimento destas e da circulação de ar sobre as camas dos aviários, bem como, a agitação das asas que acumulam poeiras e material particulado de outra natureza; nas suiniculturas a matéria particulada pode ser originada a partir do estrume, pele e ração, sendo que uma pequena parcela – entre 0 a 44 %, tanto em número quanto em massa – pode advir da envolvente exterior (Cambra-López *et al.*, 2011).

Pesquisas desenvolvidas na monitorização de partículas mostram que as $PM_{2,5}$ em suiniculturas podem variar de 15,2 a 415 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ e em aviculturas de 81 a 380 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Em relação às PM_{10} em suiniculturas, a gama encontrada varia de 116 a 1746 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ e para as aviculturas a variação é bem maior, entre 135 a 5003 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (Shen *et al.*, 2019; Winkel *et al.*, 2016; Ransbeeck *et al.*, 2013; Melse & Hol, 2012).

Não existem estudos que detalhem os limites de exposição a PM_{10} e $PM_{2,5}$ dos seres humanos ou dos animais que vivem nessas instalações e os efeitos que podem ser causados conforme cada limiar. A questão das matérias particuladas é abordada na Diretiva 2008/50/EC do Parlamento e Conselho Europeu, que trata sobre a qualidade do ar ambiente e mais limpo na Europa. De acordo com a diretiva, um valor seguro para a saúde humana é uma média diária de 40 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ para as PM_{10} , entretanto, esta média diária não pode exceder 50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, durante 35 dias no período de um ano. Não há limites de segurança para as $PM_{2,5}$.

2.3.6. Temperatura e humidade relativa

Segundo Seedorf *et al.* (1997), o ambiente térmico dentro de uma instalação pecuária pode ser definido em termos de temperatura do ar (T), humidade relativa (HR), radiação térmica e velocidade de renovação do ar.

Muito calor é produzido pelos animais, devido à alimentação e à conversão desse alimento em carne, energia e esterco. Portanto este calor irá variar conforme a espécie, grau de atividade, ingestão de alimentos e as condições ambientais interiores. Sendo assim, é possível utilizar parte deste calor suplementar no controle do ambiente interior dessas instalações (Jones *et al.*, 2015).

Juntamente com o calor, a humidade é gerada nestes edifícios confinados, principalmente, devido aos processos de respiração dos animais. Logo, a humidade

relativa, é um parâmetro ambiental muito importante, pois uma HR entre 50 a 80 % pode eliminar muitas bactérias que são transportadas pelo ar. Níveis muito baixos podem causar doenças respiratórias nos animais e níveis acima de 80 % podem viabilizar um ambiente propício para a sobrevivência dos microrganismos e, portanto, contribuir para a disseminação de doenças. Além disso, uma HR elevada contribui também para a deterioração dos equipamentos e do próprio edifício (Jones *et al.*, 2015).

Conforme os estudos desenvolvidos por Chmielowiec-Korzeniowska (2009) e Cambra-López *et al.* (2015) a temperatura dentro de instalações suínolas pode variar entre 18,1 a 29,4 °C e a humidade relativa de 41 a 84%. Contudo, em instalações avícolas a gama encontrada de temperatura foi de 16,2 a 29,1 °C e a humidade relativa variou de 41,2 a 92,9%.

Portanto, é necessário um bom sistema de ventilação em edifícios de animais para remover o excesso de humidade relativa e calor, deixando o ambiente interior em condições propícias (Ecim-Djuric e Topisirovic, 2010). Zhang *et al.* (2018), mostra que é possível realizar medições simultâneas da temperatura e da humidade relativa utilizando pequenos sensores.

3. SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE GASES E PARTÍCULAS

Neste capítulo será abordado a importância da utilização de sistemas de medição de gases e partículas gerados em ambientes interiores agropecuários, a partir de dispositivos de baixo custo. Aqui serão mostradas algumas das tecnologias utilizadas na detecção e monitorização de gases e material particulado. Por fim, são mostrados equipamentos de medição que são disponibilizados no mercado, e respectivamente, seus benefícios e desvantagens.

3.1. DISPOSITIVOS DE BAIXO CUSTO

Desde décadas atrás já se pensava na miniaturização de dispositivos eletrônicos, como é mostrado por Atherton (1984), com o objetivo de difundir no cotidiano das pessoas, buscando continuamente a diminuição do tamanho, peso e consumo de energia.

Com o passar dos anos, a miniaturização tornou-se realidade abrindo espaço para uma ampla gama de sensores e transdutores, que são produzidos e comercializados a baixo custo e em larga escala, sendo facilmente integrados em redes de sensores e sistemas portáteis, capazes de realizar monitorizações ambientais (Li *et al.*, 2008).

Além disso, de acordo com Capone (2004), esses sensores apresentam-se cada vez mais pequenos e com alta sensibilidade para detetar pequenas concentrações de gases (em partes por milhão – ppm ou até mesmo em partes por bilhão – ppb).

Desde a invenção dos sensores de gás semicondutores de metal oxidado, a necessidade da miniaturização e o melhoramento do consumo de energia tem sido o grande foco, Figura 5, sendo que atualmente o mercado disponibiliza sensores microeletromecânicos (*Microelectromechanical Systems - MEMS*), adequados para sistemas portáteis e que usem baterias (Figaro, 2018).

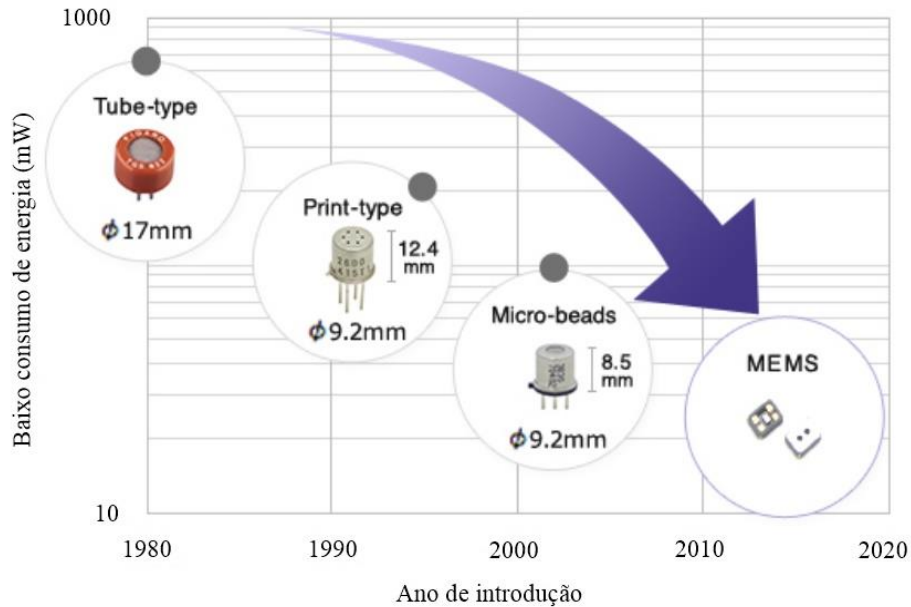


Figura 5 – Miniaturização e redução do consumo de energia de sensores de gases.
 Fonte: Figaro (2018).

Desta maneira, estes pequenos dispositivos acabam por ser muito atrativos por oferecerem monitorização contínua e por possibilitarem a integração de múltiplos sensores de baixo custo (Chong e Kumar, 2003; European Commission, 2017). Os preços destes sensores arquitetados para a deteção de poluentes atmosféricos, como os gases e as partículas, podem variar de 10 € até 2000 € (Clements *et al.*, 2017; European Commission, 2017).

Logo, a instalação de redes de monitorização de gases e partículas, que muitas vezes exigem elevados investimentos económicos, podendo ultrapassar as dezenas de milhares de euros, além de recursos adicionais para a manutenção rotineira e a calibração desses dispositivos (Ropkins e Colville, 2000), acabam por serem substituídas por esses sistemas de baixo custo, sendo uma excelente alternativa para a construção dessas redes.

Portanto, essas redes de monitorização podem ser substituídas por dispositivos eletrónicos, que utilizam sensores semicondutores, eletroquímicos, ópticos e outros componentes elétricos de baixo custo, para coletar dados temporais e espaciais de diferentes poluentes com alta densidade dentro de uma ou várias instalações (Moreno-Rangel *et al.*, 2018; Delgado *et al.*, 2019).

Conforme Berckmans (2014), quando esses sistemas de gases e partículas são combinados com câmaras, microfones, armazenamento em nuvem, algoritmos, comunicações sem fios e conexão à internet, é possível obter uma resposta rápida a possíveis problemas que possam vir a acontecer, além de uma melhoria significativa no

bem-estar dos animais e dos trabalhadores. Os algoritmos desses sistemas podem ser desenvolvidos na plataforma de código aberto Arduino IDE (*Integrated Development Environment*), com a qual se pode facilmente programar, apagar e reprogramar em poucos minutos (Louis, 2016).

3.2. SENSORES SEMICONDUTORES

Em geral, o princípio de funcionamento desses sensores é baseado na resistência da camada superior que os constituem, uma superfície de óxido de metal, a qual sofre variações quando o gás de interesse entra em contacto. A magnitude das variações depende da concentração de gás ao longo do tempo, sendo que este tipo de sensores podem reagir com gases oxidantes ou redutores, permitindo a detecção de CO, NH₃, H₂S e até aromas complexos como os COVS (Fraunhofer, 2019; Yamazoe e Shimano, 2013).

Conforme Batista (2009), os sensores semicondutores são dispositivos eletrônicos, cujo material semicondutor é determinante para a sua operação. Existem vários materiais semicondutores (Barsan *et al.*, 1999), como o dióxido de estanho (SnO₂), óxido de índio (III) (In₂O₃) (Korotcenkov, 2005), óxido de zinco (ZnO) (Williams, 1999), entre outros, que envolvem diferentes princípios de operação.

De acordo com Korotcenkov (2005) e Barsan *et al.* (2013), esses sensores oferecem grandes vantagens como o baixo custo, a boa resistência em condições severas (e.g., elevadas temperaturas, ambientes corrosivos), baixo consumo de energia; manuseio simples e fácil integração em projetos de engenharia que visam detectar gases.

Todavia, esta tipologia de sensores apresenta também algumas limitações na sua aplicação como a elevada sensibilidade cruzada a outros gases, alta sensibilidade a atmosfera ambiente (Korotcenkov, 2005), baixa reprodutibilidade e instabilidade do sinal à medida que o seu tempo de exposição e o seu envelhecimento aumentam (Capone *et al.*, 2004). Portanto, isto faz com que estes sensores de óxido de metal sejam dispositivos não-lineares, ou seja, há mudanças na sua linha de base, a mesma que define a resposta do sensor do gás de interesse para um gás ou equipamento de referência, requerendo frequentes calibrações do sensor e até mesmo implicando a substituição do dispositivo (Capone *et al.*, 2004).

Outra grande aplicação para estes dispositivos semicondutores é na sensorização de temperatura e humidade relativa. Logo, o mecanismo de detecção de humidade depende

do tipo de sensor, podendo ser de impedância ou capacitivo, sendo que eles utilizam propriedades de condutância ou capacitância na camada de detecção para detetar a humidade relativa (Farahani *et al.*, 2014).

3.3. SENSORES ELETROQUÍMICOS

Os sensores eletroquímicos, segundo Yunusa *et al.* (2014), são constituídos por um eléctrodo de trabalho, um contra-eléctrodo, separados por uma fina película de electrólito, e um eléctrodo de referência, cuja função é manter o potencial do sensor estável e constante, devido a consecutivas reacções químicas que ocorrem na superfície do eléctrodo, Figura 6.

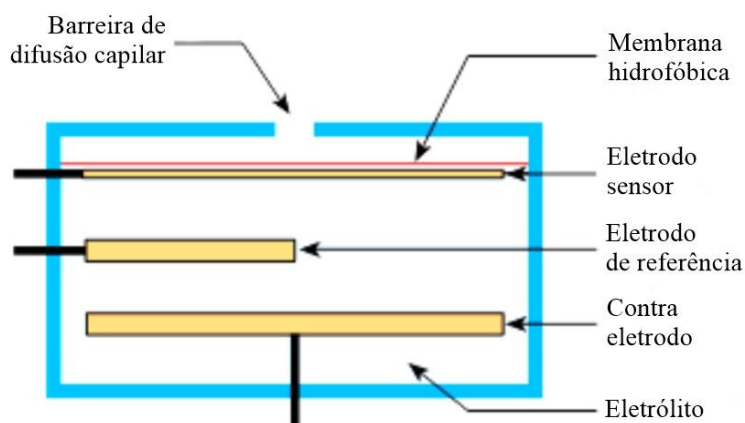


Figura 6 – Um típico sensor de gás eletroquímico.
Fonte: Adaptado de Yunusa *et al.*, (2014).

O princípio de medição eletroquímica, baseia-se no contacto do sensor com o gás alvo. O gás irá passar por pequenos interstícios do tipo capilar e depois difundir-se por uma barreira hidrofóbica até chegar à superfície do eléctrodo. Portanto, a reacção química que acontece cria um fluxo de corrente de cargas iónicas entre ambos os eléctrodos, a qual é transportada pelo electrólito, sendo o sinal eléctrico convertido numa concentração do gás, através de uma dada proporcionalidade (Guth *et al.*, 2009; Yunusa *et al.*, 2014).

Dependendo do electrólito utilizado, esta classe de sensores pode ser aplicada em matrizes reais de temperatura entre -30°C e 1600°C , sendo usados amplamente em diversos ramos da indústria, tráfego, monitorização médica e, principalmente, monitorização ambiental (Guth *et al.*, 2009).

De entre as maiores vantagens de se utilizar os sensores eletroquímicos estão: o baixo consumo de energia; a adequabilidade para baixas concentrações, com uma ampla gama de medição na casa dos ppm; dimensões reduzidas, sendo uma excelente escolha para dispositivos portáteis e leves; não sofrerem interferência cruzada do vapor de água (Korotcenkov, 2013).

Contudo, existem algumas pequenas desvantagens no seu uso, como o facto de alguns poderem ser de maior dimensão e apresentarem sensibilidade limitadas a gases simples ou de baixo peso molecular como H_2S , NO_2 , O_2 , NH_3 , entre outros gases (Korotcenkov, 2013).

3.4. SENSORES ÓPTICOS

Os sensores ópticos são dispositivos que podem medir propriedades físicas, químicas e biológicas. O seu princípio de funcionamento baseia-se na emissão de um feixe de luz, que é recebido por um fotodetector (Haus, 2010). Conforme demonstrado por Plümpe *et al.* (2017), a avaliação de medições de um fenómeno ou composto a partir de sensores ópticos, é cada vez mais competitiva e vantajosa.

Os sensores ópticos podem detetar e quantificar a concentração de um volume específico de compostos no ar, utilizando sempre o ar ambiente como parâmetro (Vargas-Bernal, 2017).

Segundo Paliwal *et al.* (2017), os sensores ópticos são uma excelente alternativa aos convencionais sensores de gás condutométricos. Quando estes dispositivos são projetados cuidadosamente, eles oferecem rápidas respostas (menor que 1s em alguns casos) e desvios mínimos na deteção e sensibilidade cruzada nula a outros gases, caracterizando-se por uma elevada especificidade do gás de interesse (Hodgkinson e Tatam, 2013).

Ao longo dos últimos anos, a aplicação de uma variada gama de sensores ópticos para a deteção de gases tem sido realizada de diferentes formas, como a técnica de infravermelho não dispersivo (NDIR), a espectrofotometria (Hodgkinson e Tatam, 2013), espectroscopia fotoacústica (Liu *et al.*, 2018), técnica utilizada para detecção de gases oxidantes, como o ozono (O_3) ou corrosivos, como o óxido nitroso (N_2O) em condições adversas, entre outras técnicas.

3.5. SENSIBILIDADE CRUZADA

Segundo Onuska (2018), a sensibilidade cruzada são gases interferentes que levam o sensor a responder mesmo não havendo o gás que se deseja detectar. Devido a essa característica apresentada nos sensores e aos inúmeros gases presentes na atmosfera com as suas respectivas quantidades (78,08% azoto, 20,95% de oxigénio, 0,93% de argon, além de outros tipos de gases), o desenvolvimento de sistemas de deteção de gases fica limitado. A eliminação/minimização da resposta cruzada é, por isso, um grande desafio, pois existem muitos sensores susceptíveis a gases interferentes (Manap et al., 2009).

Sendo assim, Onuska (2018) refere que é muito complexo construir um sensor que responda somente ao gás alvo. As respostas dos sensores a gases interferentes podem resultar em sinais falsos, positivos e/ou negativos (SPEC Sensors, 2016). A empresa *MSA Safety Incorporated* (2013), complementa que a sensibilidade cruzada é comum em sensores eletroquímicos e podem ser limitadas com a utilização de filtros.

Outras técnicas que têm sido desenvolvidas para solucionar este problema é a utilização de sensores ópticos (Manap *et al.*, 2009), a aplicação de membrana de polipropileno (Ohira *et al.*, 2002), a utilização de redes neuronais na construção de um olfato artificial para o reconhecimento de padrões na deteção de gases (Di Natale *et al.*, 1995) ou o desenvolvimento de dispositivos eletrónicos que detetam gás a partir de nanotecnologia (Liao *et al.*, 2006).

3.6. EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO DISPONÍVEIS NO MERCADO

Atualmente, existem diversos analisadores de gases e partículas no mercado, sendo equipamentos mais robustos, calibrados, com uma elevada gama de medição em ppm ou até mesmo em ppb, além de uma elevada precisão na recolha de dados e que muitas vezes necessitam de softwares específicos.

Contudo, segundo Furst *et al.* (2017), esses equipamentos são extremamente dispendiosos, tendo-se que fazer grandes investimentos financeiros para os obter e que na sua maioria são para uso laboratorial e, habitualmente, são necessárias pessoas especializadas para os operar, Tabela 5.

Tabela 5 – Analisadores de gases e monitores partículas de alta precisão.

Equipamentos	Tecnologia	Faixa de Custo (€)
Gasera One	Espectroscopia fotoacústica	25.000 – 30.000
Sonda DirectSense® IQ-610 + PDA Socket® SoMo 650-DX	Infravermelho não dispersivo (NDIR) + software GrayWolf Sense 2010	5.000 – 6.000
Sonda DSII-8-KIT + AdvancedSense Pro IAQ Plus	Sensores eletroquímicos <i>plug-and-play</i>	11.000 – 12.000
ADR 1200S™	Detecção por foto-dispersão da luz	10.000 – 12.000
TSI-3330 OPS	Espectrometria (contagem de partículas)	12.000 – 15.000

Como alternativa, é possível encontrar diversos modelos de sensores de gases e partículas de baixo custo em vários *websites*, de diferentes marcas e modelos, que apresentam tecnologias comentadas anteriormente. Por conseguinte, esses sensores dependem que se faça as ligações por meio de conectores, utilizando algum microcontrolador. Também é necessário a elaboração de um código que permitirá o funcionamento do sistema e que seja realizada a validação e calibração desses sensores, além de uma prototipagem para uma proteção dos mesmos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Ao longo deste capítulo será exposto os aspetos técnicos, como sensores e módulos utilizados para o desenvolvimento do sistema construído e a evolução da arquitetura do mesmo. Em seguida, será referido como realizou-se a validação do sistema e a descrição dos ensaios experimentais de intercomparação, além de quais equipamentos de referência foram utilizados. Por conseguinte, serão apresentados os métodos estatísticos usados para validar os sensores. Por fim, são caracterizados os ambientes de estudo, com o intuito de avaliar o comportamento do dispositivo.

4.1. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

Na construção e desenvolvimento do protótipo foram integrados diferentes sensores, uma placa microcontroladora, diferentes módulos e uma nuvem para o envio e armazenamento dos dados.

Para a deteção das substâncias, foram incorporados os seguintes sensores: um sensor digital DGS-H₂S utilizado para a mensuração de gás sulfídrico; um sensor analógico EC4-NH₃ acoplado numa *Easyboard* para a mensuração de amónia; um sensor digital SDS011 para a deteção e medição de material particulado PM_{2,5} e PM₁₀; um sensor digital K30 para a mensuração de dióxido de carbono; um sensor digital Si7021 para a medição da temperatura e humidade relativa do ar. Na Figura 7 pode ser vista a arquitetura do sistema.

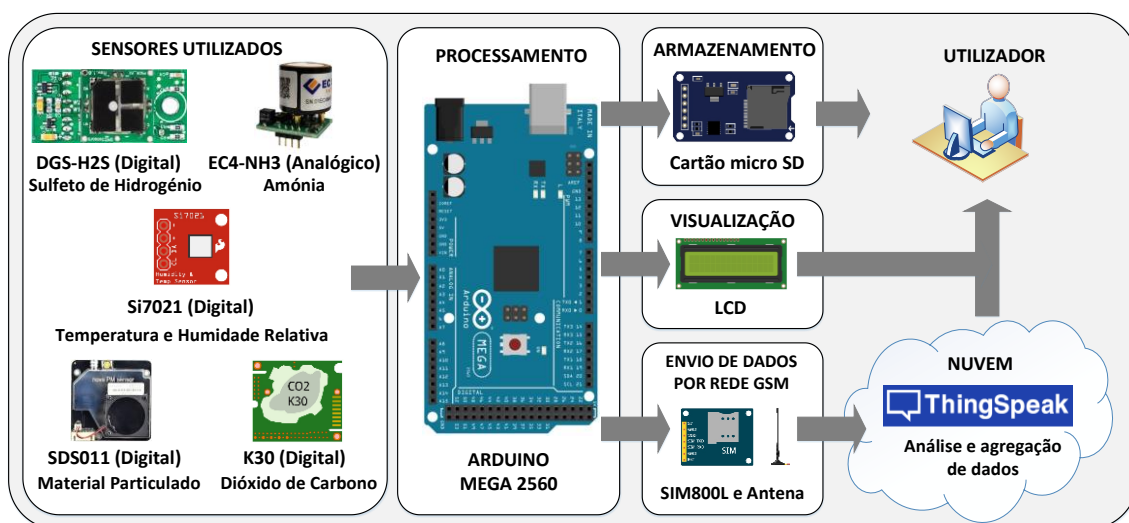


Figura 7 – Arquitetura do protótipo construído.

Os sensores de medição foram escolhidos minuciosamente, com base nos diferentes limites de deteção, todos supracitados, sugeridos ou regulamentados pelas principais organizações de saúde ocupacional e diferentes investigações realizadas na deteção desses contaminantes e parâmetros ambientais, Tabela 6.

Tabela 6 – Gamas das concentrações dos poluentes do ar interior e parâmetros ambientais de suiniculturas e aviculturas encontradas na literatura.

Poluentes e Parâmetros Ambientais	Gama de operação dos sensores	Gama encontrada em suiniculturas	Gama encontrada em aviculturas	Unidade
H ₂ S	DGS-H ₂ S (0 – 10000)	15 – 6180 ^[1]	30 – 2240 ^[1]	ppb
NH ₃	EC4-NH ₃ -100 (0 – 100)	2 – 87 ^[1, 2]	1 – 50 ^[1, 3]	ppm
CO ₂	K30 (0 – 10000)	1000 – 5000 ^[1]	500 – 3000 ^[1, 3]	ppm
PM _{2.5} PM ₁₀	SDS011 (0 – 1000)	15,2 – 415 ^[2, 4] 116 – 1746 ^[2, 4]	81 – 380 ^[3] 135 – 5003 ^[3, 5]	µg.m ⁻³
T	Si7021-A20 (-40 – 125)	18,1 – 29,4 ^[6, 7]	16,2 – 29,1 ^[7]	°C
HR	Si7021-A20 (0 – 100)	41,0 – 84,0 ^[6, 7]	41,2 – 92,9 ^[7]	%

Fonte: [1] Heyden *et al.* (2015); [2] Shen *et al.* (2019); [3] Winkel *et al.* (2016); [4] Ransbeeck *et al.* (2013); [5] Melse & Hol (2012); [6] Chmielowiec-Korzeniowska (2009); [7] Cambra-López *et al.* (2015).

Para se processar os dados detetados pelos sensores e convertê-los em respostas perceptíveis para os utilizadores, foi utilizada uma placa microcontroladora Arduino Mega 2560. Também se utilizou um módulo de cartão micro SD para a realização de *backup* dos dados recolhidos, um *display* LCD para a visualização local dos dados e um módulo de rede GSM com a capacidade de envio dos dados em tempo real para uma plataforma analítica de *IoT*, nomeadamente a ThingSpeak.

O software Arduino IDE, versão 1.8.8, foi utilizado para a elaboração do código, juntamente com diversas bibliotecas disponibilizadas na plataforma GitHub.

4.1.1. Placa de Arduino Mega 2560

A placa de Arduino Mega 2560, Figura 8, é baseada num chip microcontrolador ATmega2560. Esta placa disponibiliza 54 pinos digitais de entrada e saída, sendo que 14 desses pinos podem ser usadas como saídas *Pulse Width Modulation* – PWM, além de 16 entradas analógicas, 4 portas série de comunicação para envio e receção de informações,

uma fonte externa de 7 a 12 V (*power jack*) e um conector do tipo USB (Hertzog e Swart, 2015; Arduino, 2019a; Atmel, 2015).

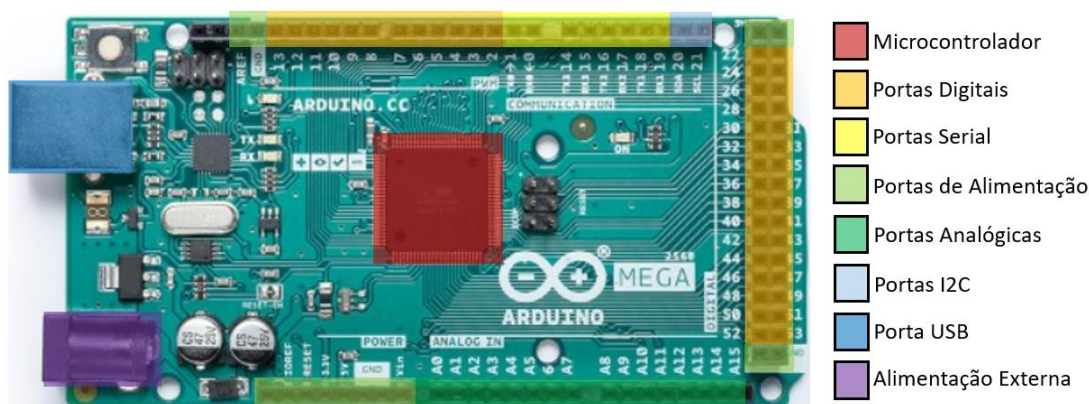


Figura 8 – Placa Arduino Mega 2560.
Fonte: Adaptado Arduino (2019b).

Segundo Monk (2013), o microcontrolador é o coração do Arduino Mega, sendo ele um pequeno computador que contém um processador, uma memória de acesso aleatório RAM de 8 kB e memória apenas de leitura, programável e possível de apagar e reprogramar, EEPROM de 4 kB, além de 128 kB de memória flash para armazenar os *sketches* e dados fixos. O autor também refere que o projeto do hardware é *open source*, ou seja, o diagrama esquemático da placa e o projeto do circuito impresso (PCB) são todos de acesso livre ao público, para que assim qualquer pessoa possa produzir os seus projetos independentes.

4.1.2. Sensor de H₂S

Segundo o ficheiro de dados da SPEC Sensors (2017), o sensor digital de sulfureto de hidrogénio ou DGS-H₂S, Figura 9, é um sensor eletroquímico que pode ser aplicado na monitorização da qualidade do ar e segurança industrial, com uma faixa de medidas de 0 até 10 ppm e resolução de 10 ppb.

De acordo com o mesmo ficheiro, o sensor é provido de diversos benefícios, como: baixa potência (1 mW); saída calibrada dos resultados do sensor e com a temperatura compensada; resposta rápida, sendo inferior a 30 segundos; vem com sensores de temperatura e humidade relativa integrados no *breakout*; o tempo de vida é de 10 anos; além de conexão USB e por porta série.

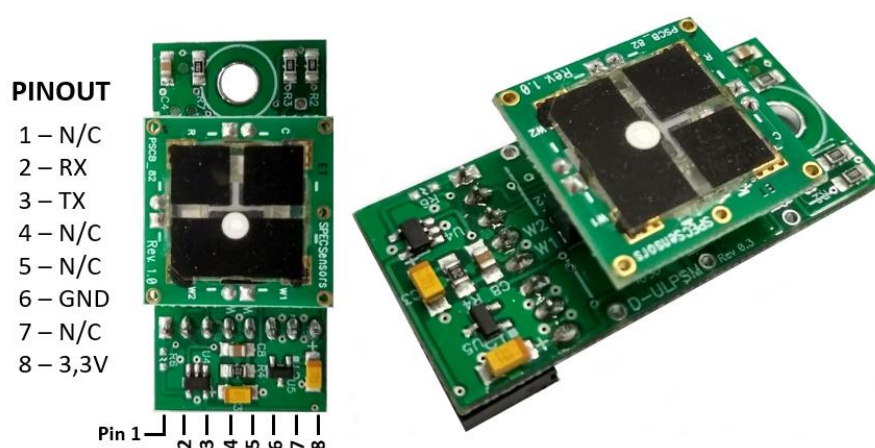


Figura 9 – Sensor DGS-H₂S da SPEC Sensors de sulfureto de hidrogénio e suas respectivas conexões elétricas de saída.

O DGS-H₂S é um sensor digital, sendo por isso muito atrativo em relação aos sensores analógicos disponíveis no mercado, pois converte digitalmente os sinais elétricos e armazena os valores medidos por meio de um processador e memória integrados. Apesar deste sensor apresentar sensibilidade cruzada a outros gases, um grande benefício é que ele não é influenciado por eles na faixa da resposta típica ao H₂S, como pode ser observado na Tabela 7.

Tabela 7 – Sensibilidade cruzada do sensor de sulfureto de hidrogénio aos outros gases.

Gás/Vapor	Fórmula molecular	Concentração Aplicada (ppm)	Resposta Típica do Sensor (ppm)
Sulfureto de hidrogénio	H ₂ S	10	10
Cloro	Cl	10	-2,2
Dióxido de azoto	NO ₂	10	-2
Dióxido de enxofre	SO ₂	20	1,7
Óxido nítrico	NO	50	1,2
Monóxido de Carbono	CO	400	1,1
Ozono	O ₃	5	-0,9
Metano	CH ₄	500	0,1
Amónia	NH ₃	100	0,1
N-heptano	C ₇ H ₁₆	500	<0,5

Fonte: Adaptado de SPEC Sensors (2017).

No Arduino Mega 2560 as portas digitais operam a uma tensão de 5 V. Contudo módulos mais recentes como o DGS-H₂S, usam uma alimentação digital de 3,3 V, sendo necessária a utilização de um conversor de nível lógico bidirecional, Figura 10, para a comunicação segura entre o sensor e a placa Arduino. Para tal, o conversor é alimentado pela baixa e alta tensão em simultâneo e os sinais de 5 V serão reduzidos para 3,3 V e *vice-versa* (Sparkfun, 2019a). O conversor escolhido foi o BOB-12009.

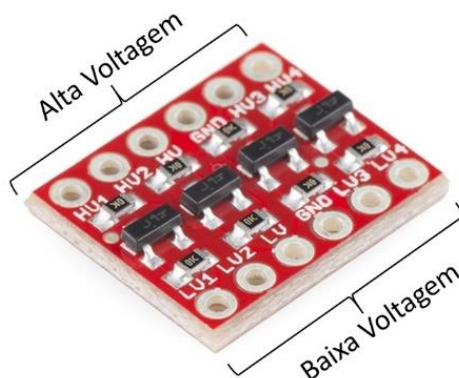


Figura 10 – Conversor de nível lógico BOB-12009 da Sparkfun.
Fonte: Adaptado Sparkfun (2019a).

4.1.2. Sensor de NH₃

O sensor de amónia, o EC4-NH₃-100, ilustrado na Figura 11, também é um sensor eletroquímico e foi escolhido com base na sua qualidade e nas concentrações de amónia expectáveis em aviários e suiniculturas.



Figura 11 – Sensor EC4-NH₃-100 da Prewatron de amónia.

De acordo com a empresa suíça Prewatron (2016a), este sensor pode ser aplicado na deteção de fugas de amónia, indústrias em geral, avicultura, sistemas de refrigeração de indústria alimentícia e qualidade do ar interior, entre outros. Na ficha técnica apresentada pela Prewatron (2016a), é possível verificar características como a deteção até

100 ppm com resolução de 0,1 ppm, para uma gama de temperatura de -30 até 50 °C. A gama de humidade não condensada é de 10 até 95%. Além disso, a expectativa de vida de 24 meses e o facto de não apresentar sensibilidade cruzada, como pode ser observado na Tabela 8, constituem aspetos positivos deste sensor.

Tabela 8 – Sensibilidade cruzada do sensor de NH₃ aos outros gases.

Gás/ Vapor	Fórmula Molecular	Concentração Aplicada (ppm)	Resposta Típica do Sensor (ppm)
Dióxido de Carbono	CO ₂	5000	0
Monóxido de Carbono	CO	100	0
Cloro	Cl	1	0
Hidrogénio	H	100	0
Sulfureto de Hidrogénio	H ₂ S	50	0
Isopropanol	C ₃ H ₅ OH	1000	0
Óxido Nítrico	NO	25	Não existe

Fonte: Adaptado de Pewatron (2016a).

Como o EC4-NH₃-100 é um sensor analógico que requer a adaptação dos seus sinais de saída às tensões admissíveis de entrada do conversor analógico-digital da plataforma Arduino. Para este efeito, optou-se pela utilização de uma placa *Easyboard*, Figura 12, fornecida pelo próprio fabricante do sensor e que nos libertou da necessidade de desenvolvimento de eletrónica adicional para o condicionamento do sinal.

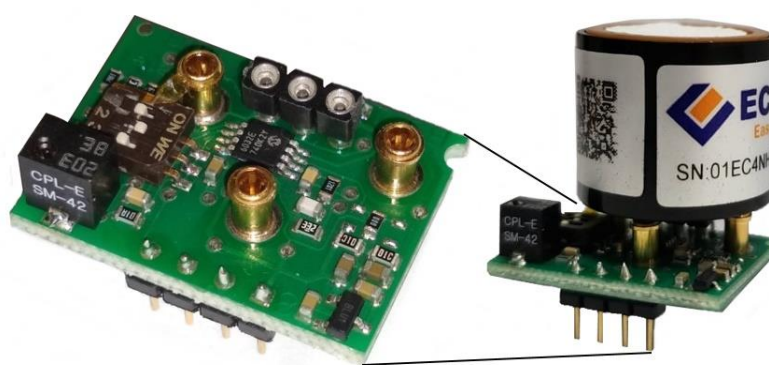


Figura 12 – *Easyboard* para o sensor EC4-NH₃-100.

A *Easyboard* é um transmissor eletrónico que oferece uma maneira mais rápida de conectar os sensores da EC-Sense, fornecendo uma tensão estável, resultados digitais, medição de temperatura integrada e uma capacidade de auto teste (Pewatron, 2016b).

Desta forma, problemas com a conversão analógico-digital, e já referidos, são contornados.

Ao acoplar o sensor de amónia ao transmissor eletrónico é possível realizar as conexões entre o Arduino e o último, Figura 13. A saída analógica da *Easyboard*, sinal de interesse, foi conectada à entrada analógica A0 do Arduino.

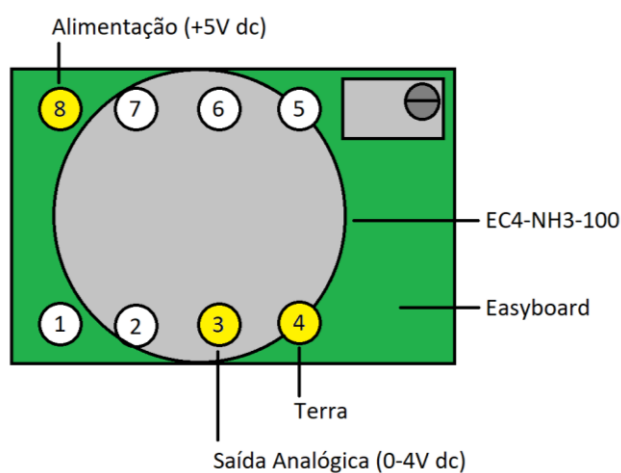


Figura 13 – Conexões da vista superior.
Fonte: Adaptado de Pawatron, 2016b.

O Arduino Mega 2560 opera com um conversor analógico-digital de 10 bits, sendo possível mapear a tensão analógica de entrada (correspondente ao valor da concentração do gás) em 1024 valores digitais distintos. Desta forma, é possível estabelecer uma relação entre o valor digital obtido e a concentração de amónia com uma resolução analógica de cerca de 4,8 V, correspondente a uma resolução de 100 ppm.

4.1.3. Sensor de CO₂

Por ser um gás de efeito estufa e estar presente na criação de animais em ambientes confinados, o dióxido de carbono foi outro gás escolhido para avaliação. A sua concentração nestes locais, pode atingir valores prejudiciais para a saúde do homem e dos animais, além de ser um excelente indicador de ventilação dos espaços. Para a medição da sua concentração foi selecionado o sensor óptico K30, Figura 14.



Figura 14 – Sensor K30 da CO2meter de dióxido de carbono.
Fonte: Adaptado de CO2meter (2015).

Esse sensor de baixo custo é capaz de detetar concentrações entre 0 e 10.000 ppm, com uma precisão de ± 30 ppm. Possui saídas analógicas e digitais, tem uma taxa máxima de medição de 2 segundos e uma expectativa de vida de 15 anos (CO2meter, 2015).

O princípio de operação é *Non-dispersive Infrared (NDIR)* ou Infravermelho Não-dispersivo. De acordo com Kwon *et al.* (2009), para que a luz não seja afetada por outros gases, o gás ambiente é aspirado para dentro do sensor que se dispersa por toda parte, posteriormente, a luz infravermelha é direcionada para o detetor, o qual possui um filtro óptico que remove toda a luz, desviando somente o comprimento de onda de interesse (banda 4,28 μm), ideal para absorver somente as moléculas de CO_2 , Figura 15.

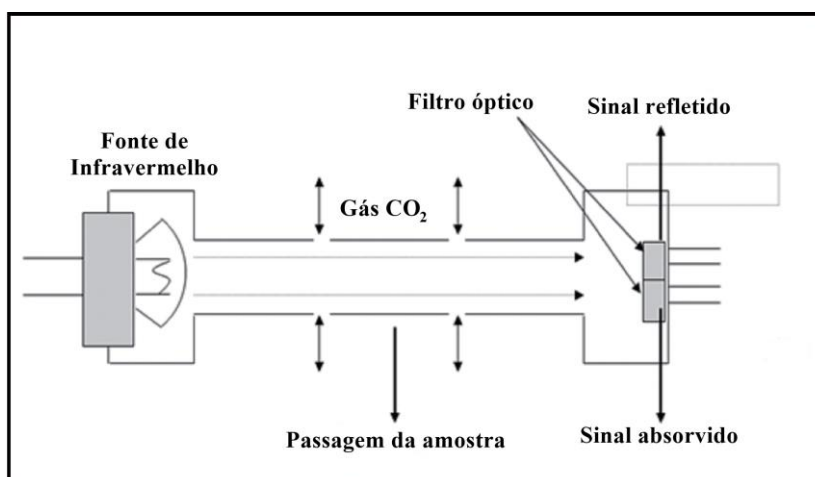


Figura 15 – Estrutura do sensor de CO_2 baseado no princípio NDIR.
Fonte: Adaptado de Kwon *et al.*, 2009.

Também de acordo com a CO2meter (2015), o sensor vem com um algoritmo integrado capaz de autocorrigir-se ao longo de um período de tempo de 7,5 dias, ao

registar constantemente as leituras e corrigir lentamente os pequenos desvios registados, com base no ar ambiente que tem por volta de 400 ppm de CO₂ em ambientes exteriores.

4.1.4. Sensor de PM_{2,5} e PM₁₀

O sensor escolhido para material particulado teve como base características como a gama de medição, a resolução e o diâmetro das partículas presentes em ambientes de confinamento onde são criados animais.

O SDS011, Figura 16, é um sensor óptico de baixo custo produzido pela Nova Fitness Co. Ltd. Segundo a ficha técnica do produto fornecida pelo fabricante, é um módulo que vem com um ventilador embutido e usa o princípio de dispersão de luz emitida por um laser. A gama de deteção é de 0,3 a 10 µm de diâmetro, ou seja, permite medir com rigor as concentrações de PM_{2,5} e PM₁₀, com uma resolução de 0,3 µg.m⁻³, uma resposta rápida de 10 segundos e um tempo de vida aproximado a um ano (cerca de 8.000 h). A deterioração do sensor deve-se essencialmente, à acumulação de poeiras (Nova Fitness Co. Ltd., 2015). A especificação técnica também sugere que o sensor trabalhe com uma humidade máxima de 70 % e temperaturas no intervalo de -10 a 50°C.

É importante que a instalação do sensor seja realizada com a saída de matéria particulada, onde se localiza o ventilador, virada para baixo. Desta forma a saída de partículas estará a um nível mais baixo do que a entrada e, portanto, as partículas terão o auxílio da gravidade para entrar e sair do sensor, melhorando o desempenho na deteção das partículas.

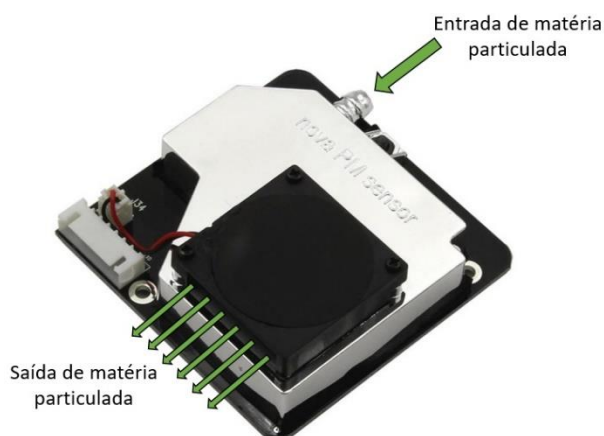


Figura 16 – Sensor SDS011 da Nova Fitness Co. Ltd de matéria particulada.
Fonte: Adaptado de Nova Fitness Co. Ltd. (2015).

4.1.5. Sensor de Temperatura e Humidade Relativa

Para a monitorização da temperatura e humidade relativa, seleccionou-se o sensor semicondutor Si7021-A20, integrado no *breakout* da Sparkfun, como é possível observar na Figura 17. Este sensor, de acordo com a Silicon Labs (2016), opera numa gama de 0 a 100 % de HR, com uma precisão de $\pm 3\%$. A gama de temperatura de operação situa-se no intervalo de -40 a 125 °C e apresenta uma precisão de $\pm 0,4\text{ °C}$. Possui interface I²C o que facilita a sua ligação à plataforma Arduino.

Ainda segundo a fabricante, estes dispositivos vêm com dados de calibração de fábrica guardados numa memória não-volátil integrada no próprio chip, pelo que não é necessária a recalibração.



Figura 17 – Sensor Si7021 da Sparkfun de temperatura e humidade relativa.
Fonte: Adaptado de Sparkfun (2019b); Silicon Labs (2016).

O Si7021 vem com uma membrana de politetrafluoroetileno hidrofóbica acoplada na superfície do chip. Desta forma, os contaminantes são filtrados, protegendo-o contra danos que podem ser causados por água, permitindo a passagem de vapor de água e mantendo leituras precisas do dispositivo. Não obstante, o fabricante sugere que o sensor não entre muito em contato com poeiras e líquidos, pois como o princípio de funcionamento do sensor é baseado na mudança de capacitância, qualquer variação na constante dielétrica da membrana, irá variar a humidade relativa (Sparkfun, 2019b).

No estudo realizado por Smith & Smith (2018), no qual é comparado nove tipos de sensores de baixo custo disponíveis no mercado, capazes de medir humidade relativa e temperatura, foi apontado que o sensor Si7021, na gama de 0 – 100 % de HR, apresenta erros absolutos maiores do que é apresentado no ficheiro de dados da Silicon Labs e histerese maior, em relação a sensores como o HTU21D e o SHT71, sendo esta, uma característica de um estado físico depender do seu estado passado. Em contrapartida, os próprios autores dizem que este sensor tem boa repetibilidade, baixa dependência térmica e não necessita de filtro para suavização digital (Smith & Smith, 2018).

4.1.6. Monitor de cristal líquido e módulo de cartão SD

O monitor de cristal líquido ou display de LCD, Figura 18, é um importante módulo utilizado para a visualização de todos os dados num ecrã de 2 linhas x 16 colunas.

No *display* é possível visualizar a quantidade de amónia, sulfureto de hidrogénio, dióxido de carbono, material particulado (PM_{2,5} e PM₁₀) compostos orgânicos voláteis totais, humidade relativa e temperatura. Também é possível modificar o contraste do monitor por meio de um potenciómetro, melhorando a visualização em função das características luminotécnicas do local. As informações são apresentadas no ecrã por um período pré-definido e repetidas ciclicamente.

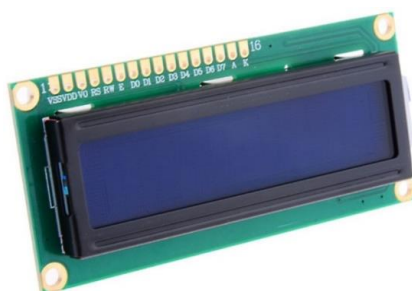


Figura 18 – Monitor de cristal líquido.
Fonte: Electrofun (2019a)

O módulo de cartão SD, Figura 19, possui um leitor de cartão micro SD integrado que comunica com a plataforma de controlo através de uma interface SPI. A escrita e leitura no cartão utiliza o sistema SCM. É um componente fundamental, desenvolvido para facilitar projetos eletrónicos e utilizá-lo por meio da plataforma Arduino IDE, logo é possível gravar todos os valores que são mensurados pelos sensores, e, conseqüentemente, trabalhar da maneira desejada (Electrofun, 2019b).

Este módulo, permite a gravação local de todas as medições num cartão micro SD, funcionamento como elemento de *backup* e garantindo a salvaguarda dos dados nos casos em que a comunicação com o servidor seja interrompida.

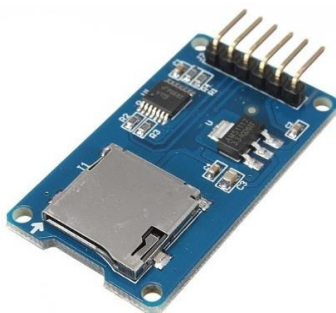


Figura 19 – Módulo de cartão SD.
Fonte: Electrofun (2019b).

4.1.7. Módulo GPRS/GSM

O módulo de envio de dados por rede móvel escolhido foi o SIM800L, Figura 20. Este dispositivo contém a tecnologia *General Packet Radio Service* (GPRS), a qual permite aumentar as taxas de transferência de dados nas redes *Global System Mobile* (GSM).

Conforme a SIMCom Wireless Solutions Ltd. (2013), trata-se de um dispositivo quad-band, ou seja, opera nas frequências 800/950/1800/1900 MHz, permitindo ser usado em todo o mundo. Também, segundo a fabricante, o módulo pode trabalhar em ambientes com temperaturas entre -40 a 85 °C (SIMCom, 2013).



Figura 20 – Módulo GPRS/GSM SIM800L.

Os valores obtidos pelo sistema de medição, são encaminhados através da rede móvel para um servidor *IoT* (*Internet of Things*), denominado de ThingSpeak, Figura 21. Esta plataforma permite que os dados sejam agregados, visualizados e analisados em tempo real, na nuvem.

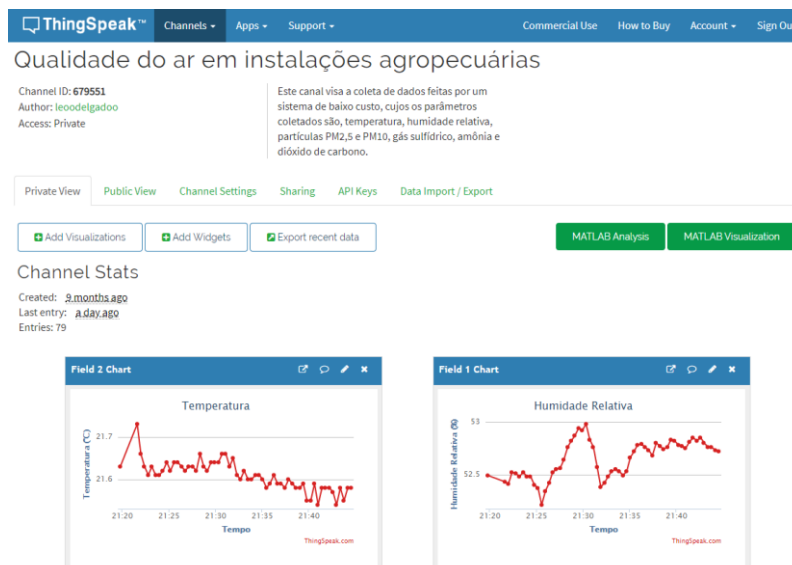


Figura 21 – Visão Geral da plataforma ThingSpeak.

4.1.8. Evolução da arquitetura do sistema

Durante a fase preliminar de testes, os módulos e sensores foram reunidos sobre uma superfície resistente de papel cartão, juntamente com uma *breadboard*, também conhecida como matriz de contacto, Figura 22. Sobre essa matriz, foram feitas as ligações entre os componentes sem soldadura e o microcontrolador, por meio da utilização de fios de contacto (*jumper*s), facilitando, desta forma, as conexões, remoções e adaptações desejadas, entre os componentes do circuito eletrónico.

No ANEXO I, apresenta-se o algoritmo desenvolvido no *software* Arduino IDE, que permite o sistema adquirir, visualizar, armazenar, enviar remotamente e corrigir os dados obtidos pelos sensores.

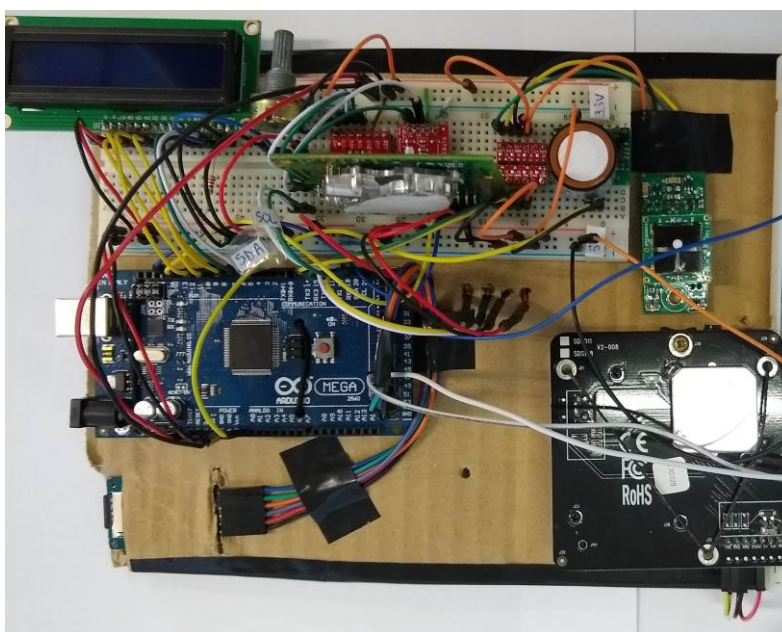


Figura 22 – Protótipo de medição de gases interiores de instalações pecuárias.

Posteriormente, para facilitar o transporte e o manuseio do sistema, todos os componentes foram acoplados e ajustados dentro de uma caixa de derivação. Essa caixa permite uma maior robustez do equipamento, trazendo consigo maior proteção aos componentes eletrónicos contra qualquer intrusão, poeira, contacto acidental e até pequenas quantidades de água. A energia do sistema é fornecida por uma fonte de alimentação AC/DC, com entrada de 100 a 240 V e AC50/60 Hz e saída de 9 V e 2 A.

A partir deste momento, os sensores foram validados e calibrados com maior segurança, sem perigo de danificar qualquer *hardware*. Este primeiro encapsulamento pode ser observado na Figura 23.

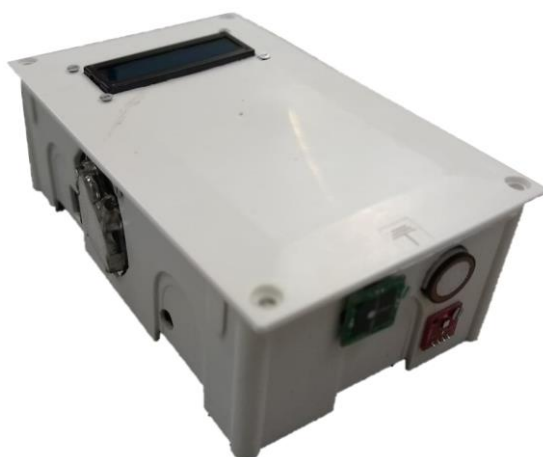


Figura 23 – Encapsulamento preliminar do sistema.

Em seguida, com o intuito de deixar um aspeto mais profissional e miniaturizar o sistema, os fios de contacto foram substituídos por uma placa de circuito impresso (*Printed Circuit Board – PCB*) e os componentes eletrónicos substituídos por componentes de montagem superficial (*Surface-mount Device – SMD*), que têm a mesma função, mas que permitem um aproveitamento otimizado da área da placa.

O desenho da placa foi realizado com recurso ao *software* Eagle versão 9.4.2 *education* e pode ser visualizado no ANEXO II. Em anexo são ainda apresentadas as características e as dimensões da PCB, ANEXO III, uma renderização tridimensional que facilita a visualização da placa, com as projeções ortogonais e cilíndricas, respectivamente, apresentadas no ANEXO IV e ANEXO V.

4.2. VALIDAÇÃO DO SISTEMA

Numa primeira fase, foi necessário realizar a validação dos sensores, comparando os valores medidos pelo protótipo construído, com os dados de analisadores de gases e monitores de partículas disponíveis no mercado e com respostas comprovadamente fiáveis.

Para a validação dos sensores EC4-NH₃-100 (amónia), K30 (dióxido de carbono) e Si7021 (temperatura e humidade relativa), o protótipo foi colocado dentro de um ambiente controlado, dando a possibilidade de ter maior controlo dos gases que são gerados a partir do estrume utilizado.

O estrume foi disposto dentro de uma caixa pequena, que continha diversos pequenos orifícios na parte superior. Posteriormente, essa caixa foi colocada dentro de

uma caixa maior, em conjunto com o protótipo construído e instrumentos disponíveis comercialmente, utilizados como equipamentos de “referência”, nomeadamente a sonda DirectSense® IQ-610 da GrayWolf e o analisador de gás Gasera One Pulse, como se ilustra na Figura 24.



Figura 24 – Esquema montado para validação dos sensores de NH₃, CO₂, T e HR.

A sonda DirectSense® IQ-610 foi posicionada dentro da caixa maior. Para além de medir as concentrações de CO₂ com base no princípio de funcionamento do infravermelho não dispersivo, esta sonda permite também medir a temperatura e humidade relativa, pelo que foi usado como equipamento de referência para estas variáveis também. Este dispositivo é conectado a um PDA Socket® SoMo 650-DX que permite a configuração da sonda, assim como a visualização e armazenamento dos dados. Os dados foram coletados em períodos de 1 minuto e armazenados no equipamento. Esta mesma taxa foi usada pelo protótipo.

O analisador de gases Gasera One Pulse, foi acoplado à caixa maior por meio de um tubo de Teflon de ¼ de polegada. Os gases são aspirados para dentro do equipamento com o auxílio de uma bomba e as concentrações de NH₃ são obtidas por meio do princípio de operação de espectroscopia fotoacústica. Cada medição requer um período inferior a 3 minutos, dependendo do número de poluentes a medir. Os equipamentos utilizados podem ser visualizados na Figura 25.



Figura 25 – Instrumentos de "referência" utilizados na amostragem de gases e parâmetros ambientais.
 Fonte: Adaptado de Gasera (2019) e Graywolf (2014).

Foram realizados 2 ensaios. O primeiro teve uma duração de 8 h e o segundo ensaio de 4 h 30 min. A primeira análise foi iniciada com a caixa destapada durante 20 min, após o que permaneceu durante 2 h tapada. No final deste período, a caixa foi aberta novamente por 30 min. Este processo foi repetido mais duas vezes, totalizando 8 h de ensaio. Para a segunda análise, a caixa novamente foi tapada após 20 min do início do teste, permanecendo assim durante 1 h. De seguida foi destapada por mais 20 min e o procedimento repetido mais duas vezes, totalizando 4 h 30 min de ensaio.

Foram ainda utilizados o monitor ADR-1200STM da fabricante Thermo Scientific e o espectrómetro de partículas TSI-3330 (OPS) da fabricante Trust Science Innovation[®] para a validação do sensor SDS011 de material particulado PM_{2,5} e PM₁₀. Em conjunto, foi também colocado o sistema de medição desenvolvido.

Estes instrumentos foram instalados no centro de um laboratório, Figura 26, que é utilizado para armazenamento de materiais de grupos de trabalhos da área do ambiente e silvicultura, cujas características físicas apresentadas são: volume de 117 m³; não apresenta janelas, 1 porta de 2,15 x 0,98 m; revestimento do teto, piso e das paredes de betão. O instrumento utilizado como fonte de poluição foi o *narguilé*, que é um cachimbo de água capaz de realizar a combustão do tabaco e produzir fumaça.



Figura 26 – Esquema montado para validação do sensor de material particulado e *narguilé* utilizado para produção das partículas.

Conforme a Thermo Scientific (2004), o monitor de partículas ADR-1200STM, tem como princípio de funcionamento, a detecção por fotometria de dispersão de luz, cuja gama de detecção de material particulado varia de 0,001 mg/m³ a 400 mg/m³ e exatidão de $\pm 5\%$. A taxa de amostragem escolhida durante os ensaios foi de 1 min. O sistema de entrada do equipamento é uma cabeça de amostragem com diâmetro aerodinâmico equivalente de corte de 2,5 μm . O sistema também foi calibrado antes de cada ensaio. Os dados foram retirados utilizando o *software* pDR-COM.

O espectrômetro TSI-3330 integra uma pequena bomba de vácuo que possibilita a entrada de ar no equipamento, através de um tubo de silicone $\frac{1}{4}$ de polegada (TSI, 2011). O fluxo é controlado, sendo de 1 L/min $\pm 5\%$. Assim que o material particulado entra, todas as partículas passam através de um feixe de luz emitido por um laser e imediatamente são contabilizadas. O equipamento foi programado para coletar 1440 amostras de 1 min nos dois ensaios, o equivalente a 24 h. Os dados foram extraídos do equipamento por meio de uma memória USB Flash Drive. Na Figura 27 é possível visualizar os monitores de gás utilizados.

Como os dados armazenados no TSI-3330 durante a amostragem é em número total de partículas contabilizadas, é necessário realizar uma transformação para concentração total de massa de partículas em microgramas por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Consideram-se todas as partículas pequenas esferas e a partir daí é calculado o volume médio de uma partícula no intervalo i (m^3). De seguida, é calculada a massa de uma

partícula de diâmetro médio no intervalo i (μg), considerando a densidade unitária. Por fim, calcula-se a concentração total $\text{PM}_{2,5}$ e PM_{10} em $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



Figura 27 – Instrumentos de "referência" utilizados na amostragem de partículas.
Fonte: Adaptado de TSI (2019) e EQUIPCO (2019).

Foram realizadas duas amostragens, a primeira com duração de 18 h e a segunda com duração de 24 h. Em ambas houve a participação de 3 pessoas. O primeiro ensaio contou apenas com uma sessão de *narguilé* de 1 h 30 min, com o mínimo de perturbações e com a fumaça sempre direcionada para o sistema de amostragem dos equipamentos.

O segundo ensaio, contou com duas sessões de *narguilé*. A primeira com duração de 1 h 40 min, usando ventilação do local, com abertura e fecho de porta a cada 10 min. A segunda sessão teve uma duração de 1 h 25 min. Foi utilizada uma ventoinha de 40 cm de diâmetro e 40 W de potência. Durante este ensaio a porta manteve-se sempre aberta. A fumaça em ambos ensaios foi direcionada ao chão. O resumo dos ensaios pode ser visto na Tabela 9.

Tabela 9 – Características dos ensaios de material particulado.

Ensaio	Tempo de análise (h)	Número de ocupantes	Número de sessões	Perturbações	Direção da fumaça
1	18	3	1	Não	Sistema de entrada dos equipamentos
2	24	3	2	Sim	Chão

Posteriormente, efetuou-se a análise dos dados, grande parte de natureza estatística, com recurso aos *softwares* Microsoft Office 2016 e OriginPro 2018. Sendo assim, foi possível realizar comparações entre os sensores de baixo custo do protótipo com os equipamentos de referência usados e cuja resposta se julga mais correta.

A análise utilizada foi a regressão linear para obtenção do coeficiente de determinação (R^2) e equação da reta. Posteriormente, o modelo foi validado pela análise de variância (ANOVA) e coeficiente de correlação de Pearson, Tabela 10. A partir das equações geradas, foi possível ajustar a resposta dos sensores no próprio código, fazendo com que a aquisição dos dados seja mais fiável e precisa

Tabela 10 – Parâmetros estatísticos utilizados para avaliar os dados obtidos pelo sistema construído.

Parâmetro	Equação	Valor ideal
Coeficiente de determinação (R^2)	$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sigma_x - \sigma_y}}$	1
Análise de variância (F de verificação)	$k - 1; SQF = \sum_{i=1}^n n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2; QMF = \frac{SQF}{k-1}; f_{calc} = \frac{QMF}{QMRE}$ $n - k; SQRE = \sum_{i=1}^n (n_i - 1) s_i^2 \quad QMRE = \frac{SQRE}{n-k}$ $n - 1; SQT = (n - 1) s_y^2$	$p < 0,05$
Coeficiente de correlação de Pearson (ρ)	$r_{XY} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$	1

Fonte: Goos & Meintrup (2015).

Relativamente aos dados obtidos pelos equipamentos de ‘referência’: x são os dados obtidos, x_i refere-se aos dados obtidos no instante i e o σ_x é o desvio padrão. Em relação ao protótipo, y são os dados obtidos, y_i refere-se aos dados obtidos no instante i e o σ_y é o desvio padrão.

Na análise de variância: k significa o número de parâmetros do modelo; SQF é a soma dos quadrados relacionados com o fator, portanto mede a variabilidade entre as médias amostrais de cada nível; n_i são as n observações independentes do protótipo; QMF é o quadrado médio do fator, $SQRE$ é a soma dos quadrados dos resíduos e mede a variabilidade nos k níveis; s_i é a variância amostral das n_i observações do protótipo no i -ésimo nível do fator; SQT é a soma quadrática total e mede a variabilidade total das n observações do protótipo; por fim, o p -valor, que significa a probabilidade do modelo linear se ajustar adequadamente a sua regressão linear.

4.3. DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Após a validação e calibração dos sensores em laboratório, o dispositivo ainda na fase de encapsulamento preliminar, foi usado em instalações agropecuárias brasileiras,

Figura 28, com o intuito de verificar a fiabilidade do sistema construído e de caracterizar a qualidade do ar interior em instalações pecuárias. Os ensaios ocorreram entre a primeira e segunda semana de Agosto de 2019.

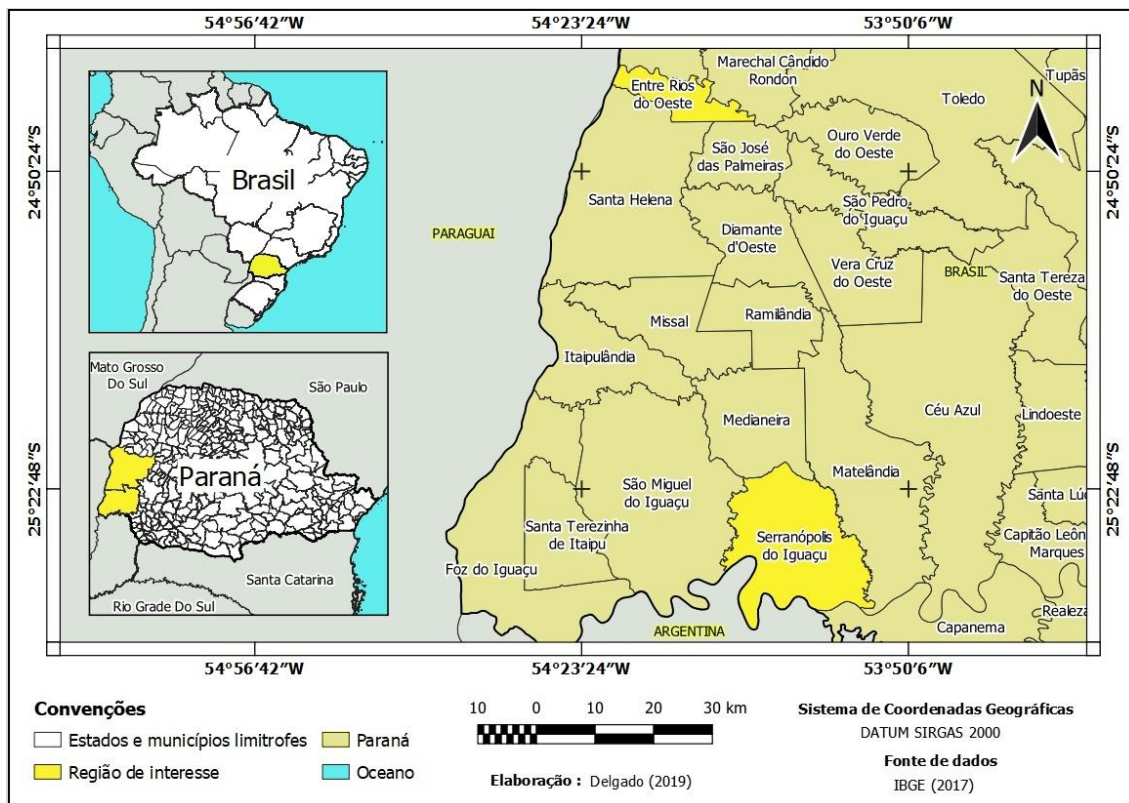


Figura 28 – Mapa de localização das cidades de Serranópolis do Iguaçu e Entre Rios do Oeste.

Foram realizadas duas visitas a locais distintos, sendo a primeira uma instalação avícola de frangos para corte, localizada na cidade de Serranópolis do Iguaçu, e a segunda, uma instalação suínola, localizada na cidade de Entre Rios do Oeste, ambas pertencentes à Mesorregião do Oeste Paranaense, no Estado do Paraná, região Sul do Brasil.

O aviário no qual foi realizada a amostragem, é um grande galpão, que apresenta como dimensões 126 m de comprimento, 14 m de largura e 2,8 m de altura. As paredes laterais são constituídas por uma cortina de tecido sintético amarelo, resistente a intempéries e de fácil limpeza.

A exaustão dos gases e partículas é feita por pressão negativa, ou seja, o ar entra transversalmente através de grandes painéis evaporativos instalados no início da extremidade lateral do aviário (parecido com o favo das colmeias). Estes painéis auxiliam no controle da humidificação e da temperatura do ambiente. Em seguida, o ar que entra

na estrutura é forçado por 6 exaustores com uma vazão volumétrica total de 6 m³/s a sair pela outra extremidade da instalação, Figura 29.

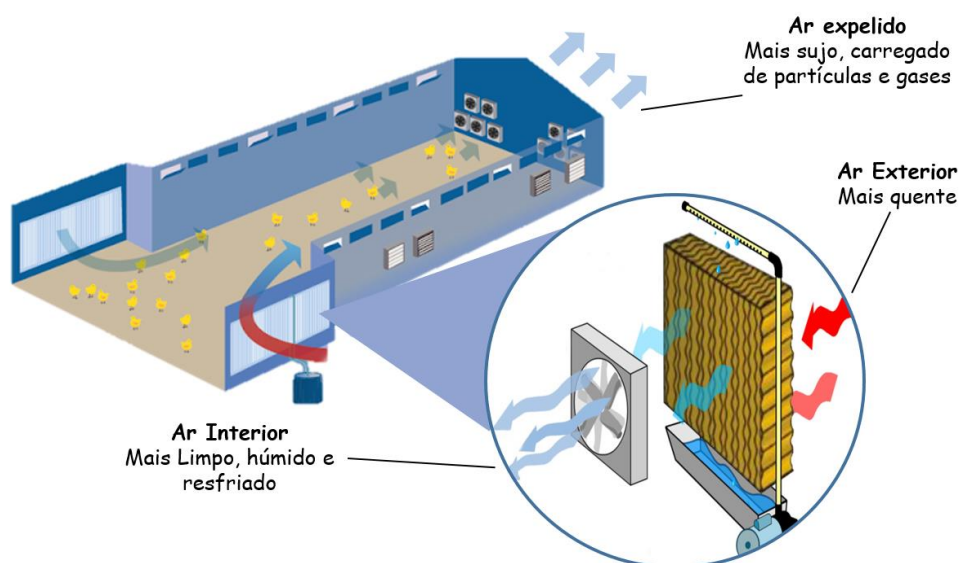


Figura 29 – Sistema de exaustão e humidificação do aviário.
Fonte: Adaptado de Mitre y el Campo (2019) e AviSite (2013).

A capacidade da instalação é para 20.000 aves. No entanto, durante a análise havia um lote com cerca de 18.800 aves. A higienização da cama do aviário é realizada a cada 13 lotes de aves, com a retirada de 30 % dos dejetos. Posteriormente, a cada 5 lotes é retirado mais 30 %. O material utilizado são raspas de madeira, denominado também de “maravalha”. A Figura 30, mostra a vista interior, da entrada para o fundo do aviário e a vista traseira da estrutura.

As medições foram feitas em 5 pontos diferentes ao longo do aviário, num período de aproximadamente 8h00, sendo que, para cada troca de ponto, foi necessário cerca de 10 min. A primeira medição foi feita a 13 m da entrada, a segunda a 30 m, a 3^a e 4^a a 60 m e a última a 100 m. Todos os ensaios foram realizados ao nível da cama do aviário, exceto a quarta amostragem que foi feita a 1,5 m de altura em relação à superfície da cama.



Figura 30 – Visão Interior da entrada para o fundo e visão traseira do aviário.

A suinicultura na qual foi realizada a segunda amostragem, é um grande galpão que abriga, aproximadamente, 800 suínos de até 90 dias de idade e apresenta as seguintes dimensões: 135 m de comprimento, 8 m de largura e 4,5 m de altura.

As paredes laterais do edifício são constituídas por uma cortina automática de material sintético azul, que fica a maior parte do tempo aberta, para que assim ocorra uma maior ventilação do local, sendo fechada somente em momentos de muito frio ou precipitação. A ventilação é natural, portanto a rede lateral permite a entrada de ar, que circula lateralmente ao longo da instalação dos suínos e a limpeza das pocilgas é feita diariamente, Figura 31.



Figura 31 – Suinicultura na qual foi realizada as amostragens.

As medições foram realizadas em 5 pontos equidistantes ao longo da suinicultura, o equivalente a 27 m de distância entre pontos. A análise total foi de aproximadamente 4h00 e o tempo estimado para mudar de um ponto para o outro, foi de 5 min. O sistema de medição foi instalado a 50 cm de altura em relação ao piso do local.

Os dados obtidos foram processados no *software* Excel 2016 e os gráficos foram construídos no Origin 2018.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No decorrer deste capítulo, serão apresetados os resultados obtidos desde a construção, validação, calibração e aplicação do dispositivo construído. É realizada uma avaliação dos custos do sistema. Também é explicado o comportamento dos poluentes ao longo do aviário e da suinicultura. A interpretação e justificativas apropriadas dos resultados são elucidadas se baseando na literatura.

5.1. AVALIAÇÃO DOS CUSTOS DO SISTEMA

A Tabela 11, mostra o valor gasto na aquisição dos componentes que integram o dispositivo apresentado neste trabalho foi de 461,25 €, bem como o tempo dispendido no desenvolvimento e construção do sistema, que foi de aproximadamente 54 dias.

Todos os sensores selecionados respeitam a Diretiva 2015/863/EU do Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia, muito conhecida como RoHS 3, que trata da restrição do uso de determinadas substâncias perigosas, como chumbo, mercúrio, cádmio, entre outros, para a fabricação de componentes elétricos.

Tabela 11 – Custos envolvidos e tempo gasto na construção do sistema de QAI de instalações pecuárias.

Sensores e componentes	Preço adquirido (€)	Menor preço disponível (€)	Tempo gasto (dias)
DGS-H ₂ S	63,55	63,55	4
K30	74,70	74,70	3
EC4-NH ₃ -100	90,00	90,00	6
SDS011	43,10	13,89	3
Si7021	9,95	1,22	2
Módulo SIM800L	34,42	22,87	30
Módulo micro SD	4,80	0,38	2
Ecrã LCD 16x2	10,45	1,26	1
Arduino Mega 2560	29,75	8,70	0
Outros componentes ^[a]	100,53	97,50	3
Total	461,25	374,07	54

[a] fios de conexão, resistores, capacitores, conversor de nível lógico (BOB-12009) e o adaptador *Easyboard* do sensor de amônia.

Mais se acrescenta que minimizar os custos de um dispositivo nem sempre é uma tarefa fácil. Muitas vezes os sensores e componentes de baixo custo não possuem as características desejadas para a construção, pelo que é necessário selecionar e adquirir sensores, com um custo superior, mas que garantam as características adequadas à aplicação.

Em relação ao preço dos equipamentos disponibilizados no mercado nos dias atuais, assentes em métodos de referência, seria necessário um investimento superior a 25.000 – 30.000 €, não contabilizada a mão de obra especializada, para a medição dos parâmetros que o dispositivo construído integra. Além disso, acresce o elevado custo associado à manutenção e calibração destes instrumentos e a áreas muito superiores para a sua instalação.

Com o mesmo dinheiro que seria investido nestes equipamentos de referência, seria possível obter aproximadamente 65 dispositivos de baixo custo e montar uma grande rede de sensorização dentro da instalação pecuária, controlando as emissões de gases em diferentes pontos. A manutenção é muito simples, basta abrir o dispositivo, retirar o sensor danificado e colocar outro, a calibração é fiável e não é necessária de mão de obra especializada para operar os dispositivos. Além disso, a aplicação permite a centralização dos dados recolhidos pela rede de sensores e mapear os valores medidos segundo a sua distribuição espacial, fornecendo informação útil em tempo real.

5.2. VALIDAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO SISTEMA

Ao projetar um dispositivo, é de suma importância que as leituras do mesmo sejam fiáveis e precisas. Na última década, formou-se um consenso geral sobre o facto de as calibrações realizadas em laboratório produzirem dados mais representativos analiticamente do que os obtidos em condições de campo (WMO, 2018).

Desta maneira, foi feita a validação e calibração do dispositivo de baixo custo utilizando diferentes equipamentos de disponíveis no mercado, alguns dos quais se enquadram nos designados métodos de referência. As medições apresentadas no gráfico da Figura 32, representam as séries temporais para um período de 8h, para o NH₃, CO₂, T e HR, utilizando o protótipo, Gasera One Pulse e a Sonda DirectSense® IQ-610 da Graywolf.

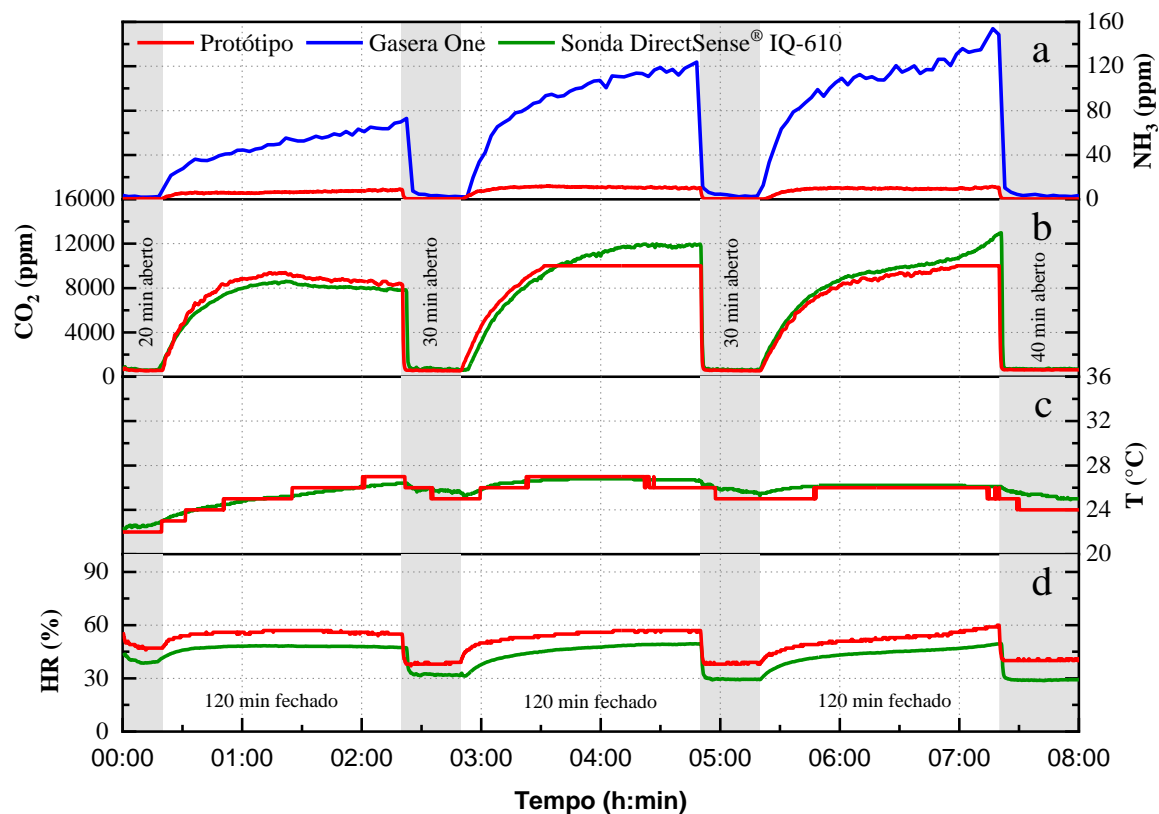


Figura 32 – Série temporal de 8h da (a) NH_3 , (b) CO_2 , (c) T e (d) HR.

Relativamente à amónia, o protótipo registou concentrações máximas deste contaminante de 12 ppm e valores mínimos próximos de zero, muito distintas das registadas pelo analisador multigás, Gasera One Pulse, cujos valores variaram entre 2 e 154 ppm, para as mesmas condições e mesmo período de observação.

Como o ensaio foi realizado no período diurno e houve um aumento da incidência de luz solar durante o passar do dia, esperavam-se valores mais elevados, que de acordo com Cheng (2018) & Horan *et al.* (2018), ocorrem devido a uma maior intensificação das emissões de amónia durante a fase da acidogénese, no processo de digestão anaeróbia.

Este fenómeno da exposição à luz, também pode ser observado para o dióxido de carbono, no qual, as gamas de medição se elevaram nos períodos que a caixa se manteve fechada. No protótipo, alcançou-se o pico máximo de 10.000 ppm e a sonda DirectSense® IQ-610, alcançou níveis de 12.980 ppm.

O sensor de temperatura Si7021 mostrou-se promissor, em comparação com a sonda da Graywolf, pois o parâmetro analisado de ambos os equipamentos, protótipo e sonda, variaram de 22 a 27 °C.

Em contrapartida, a humidade relativa do Si7021, não se mostrou com valores aproximados à sonda IQ-610. Enquanto o sensor de baixo custo detetou gamas entre 38

e 60 %, a sonda apresentou valores que variaram de 29 a 49 %, sendo uma diferença entre 8 a 10 % de humidade relativa, entre a comparação da gama de deteção de ambos.

Posteriormente, foram realizados alguns ajustes tanto no código, quanto no *hardware* do protótipo. Esses ajustes permitiram melhorar o desempenho do sistema e os resultados podem ser visualizados na Figura 33. Este segundo ensaio teve a duração de 4h30min.

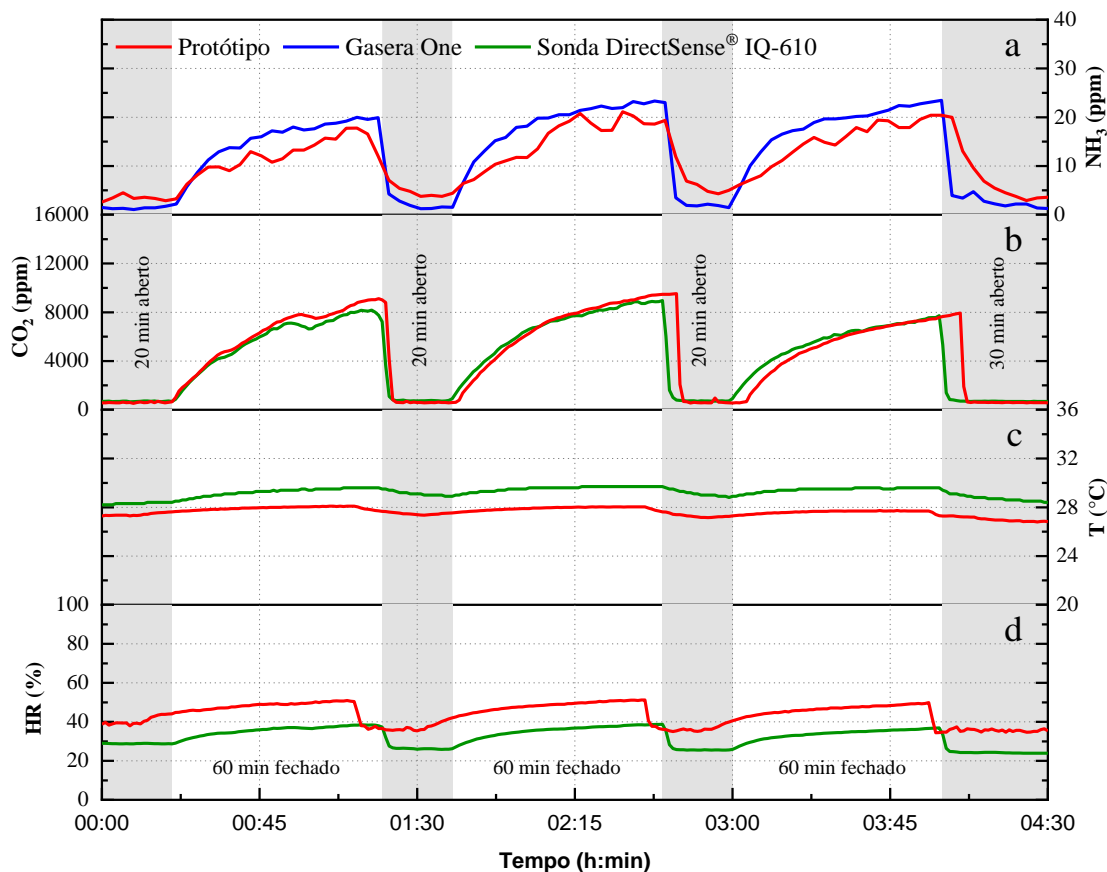


Figura 33 – Série temporal de 4h30min da (a) NH_3 , (b) CO_2 , (c) T e (d) HR.

Para esta segunda análise, o ganho do sensor de NH_3 foi ajustado por um potenciómetro existente na face superior da *Easyboard*. Desta forma, foi possível obter uma resposta na deteção do contaminante muito próxima do equipamento de Gasera One Pulse, com pequenas variações abruptas no sinal. Segundo Sennequier (2017), essas pequenas variações, podem ocorrer devido a diversos fatores que envolvem os sensores eletroquímicos, fazendo com que os sinais monitorados sejam muito lentos, ocasionando ruídos no sinal.

Estes fatores são definidos por Ziaian *et al.* (2015) como: a saturação do contaminante na superfície da linha de entrada do sensor, ocasionando atraso dinâmico

de tempo para a detecção absoluta do composto de interesse; atrasos ocasionados pelo sistema de amostragem; volume da linha capilar que o gás passa antes de reagir com o eletrodo de trabalho, entre outros. Contudo, Sennequier (2017), comenta a importância da utilização de um filtro para reduzir o nível de ruído. No caso, para suavizar o ruído, foi adicionado um filtro digital no algoritmo desenvolvido, no momento em que o sensor foi adicionado ao projeto. Observa-se que os valores de concentração do sensor estudado, acompanham bem a natureza da linha gerada pelo Gasera One Pulse, sendo que o sensor EC4-NH₃-100 variou de 1 a 21 ppm durante a análise, enquanto o Gasera One Pulse de 1 a 23 ppm.

Relativamente ao dióxido de carbono, o sensor K30 manteve-se com um ótimo desempenho em relação ao equipamento de referência, apesar de se verificar um pequeno atraso na detecção de CO₂, fazendo com que em ambos os casos, a concentração do sensor de baixo custo decresça, em termos de detecção das concentrações de CO₂, com atraso de 4 minutos ao abrir a caixa. A concentração de CO₂ no K30 variou de 569 a 9528 ppm, enquanto que na sonda houve uma variação de 661 a 8958 ppm.

Outra questão que se observa nas duas análises realizadas, é que durante o período em que a caixa se encontrou fechada, o sensor K30 de dióxido de carbono, em concentrações mais elevadas que 6.000 ppm, detetou níveis de CO₂ sempre acima da sonda IQ-610. Entretanto, na terceira vez que a caixa foi fechada, os dados coletados pelo sensor de baixo custo e equipamento de “referência” invertem de posição.

Uma possível explicação, seria que o sensor K30 neste ponto da análise se encontra com a temperatura um pouco mais elevada, pelo que o gás que está em torno do sensor é levemente aquecido, tornando-se menos denso, fazendo com que o ar externo seja influenciado. Desta forma, menores concentrações são detetadas pelo sensor de CO₂ de baixo custo durante o terceiro período em que a caixa é fechada.

A melhoria do desempenho do sensor Si7021 observada durante o segundo ensaio, deveu-se a alterações realizadas ao nível do código. Definiram-se as variáveis de T e HR como *float*, o que permitiu incluir a parte decimal e gerar uma curva muito suave, como se observa na Figura 33 (c) e Figura 33 (d).

A temperatura do protótipo no segundo teste variou de 27 a 28 °C e da sonda DirectSense® IQ-610, ficou entre 28 e 30 °C. Esta pequena diferença de 2°C pode ser justificada pelo erro do próprio sensor, não sendo, todavia, significativa.

Contrariamente, a humidade relativa continuou a apresentar um desvio elevado de aproximadamente 11,5 % de HR. Uma possível explicação, conforme Smith & Smith

(2018) é que o sensor Si7021 para HR, não tem um excelente funcionamento entre média e alta umidade relativa (HR entre 60 e 90 %), com o erro variando de 4 a 10 % do parâmetro analisado.

Posteriormente, foram feitas as regressões lineares para os valores de CO₂, HR e NH₃, obtidos pelo protótipo e pelos analisadores utilizados neste processo de intercomparação. Portanto, foi gerado um diagrama de dispersão da análise de 8 h para o dióxido de carbono. Contudo, foram escolhidos os valores da primeira meia hora de ensaio, o que resultou na seguinte linha de tendência, Figura 34.

Os pontos escolhidos geraram uma excelente linha de tendência, cujo coeficiente de determinação é de 0,9852. A faixa de validação do sensor K30 compreende a gama de concentrações entre 500 a 5000 ppm, o que vai de acordo com os valores que influenciaram a escolha do sensor, supracitados no Capítulo 7. Este modelo de ajuste de regressão foi validado a partir da análise de variância realizada, cujo F de significação é de $4,4220 \times 10^{-28}$. O coeficiente de Pearson, também foi um resultado muito satisfatório, sendo $\rho = 0,9926$, o que demonstra uma correlação perfeita entre as concentrações detetadas pelo protótipo e a Sonda DirectSense® IQ-610.

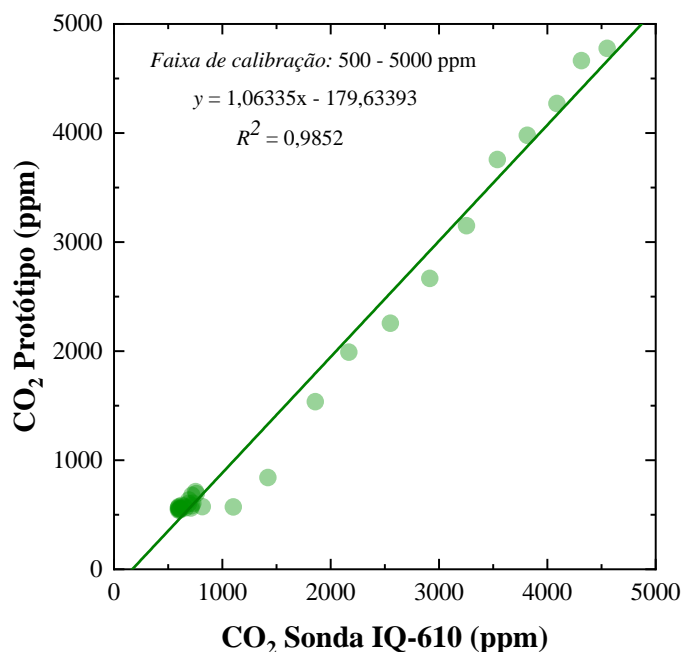


Figura 34 – Diagrama de dispersão e reta de calibração do CO₂, análise de 8h.

Os valores utilizados para gerar a linha de tendência para a umidade relativa, foram escolhidos a partir da amostragem de 4 h e 30 min, entre o período de 15 min e 1 h e 10 min de análise. A escolha foi feita devido aos pontos representarem uma pequena

faixa que é encontrada nas suiniculturas e aviculturas, citados no Capítulo 7. O diagrama de dispersão da HR pode ser visualizado na Figura 35.

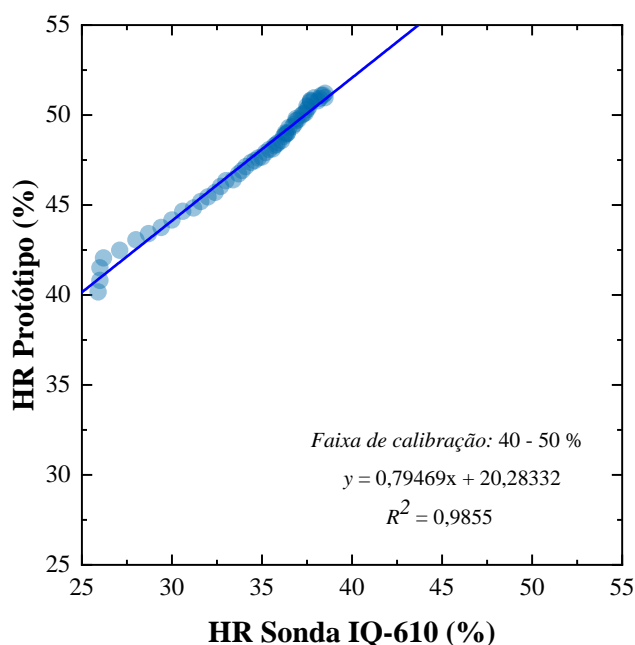


Figura 35 – Diagrama de dispersão e reta de calibração do HR, análise de 4h30.

Os pontos selecionados forneceram uma ótima linha de tendência, sendo o coeficiente de determinação de 0,9855. A faixa de calibração do sensor Si7021, fica entre 40 a 50 % de HR. Não foi possível obter valores de 50 até 95 % de HR, devido ao ambiente criado não propiciar este controle. Entretanto, esta gama de HR também pode ser ajustada com o modelo criado, contudo, quanto maior a umidade, menor será o ajuste.

O modelo de regressão gerado para a umidade relativa, é validado pela análise de variância, no qual, o F de verificação encontrado, por meio dos cálculos, foi de $1,0745 \times 10^{-51}$. Outro parâmetro estatístico utilizado foi o coeficiente de correlação de Pearson, que sugeriu um valor de $\rho = 0,9927$, o que significa que a correlação entre a umidade relativa detetada por ambos dispositivos é muito boa.

Para a amônia, foram selecionados pontos na segunda análise, de 4 h e 30 min, devido ao potenciômetro da *Easyboard* já estar regulado. O conjunto de pontos escolhidos estão nas faixas de 03 min a 1h e 12min, 1h e 24 min até 2h e 33 min, por fim, das 2h e 51 min até 3 h e 57 min, Figura 36.

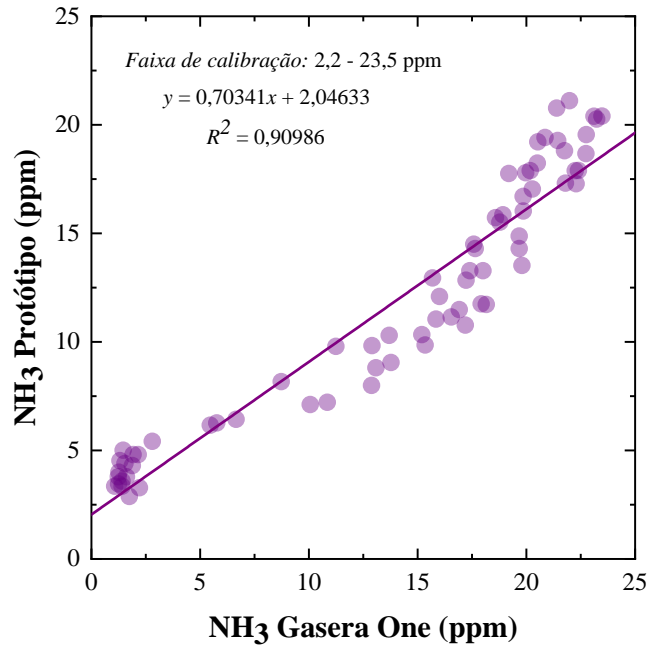


Figura 36 – Diagrama de dispersão e reta de calibração do NH₃, análise de 4h30.

A partir dos pontos, foi gerado um coeficiente de determinação relativamente bom de 0,9099. Contudo, o modelo é validado pela ANOVA com um F de verificação de $8,2681 \times 10^{-37}$, o que mostra que o sensor, para a faixa de validação de 2,2 até 23,5 ppm, fornece excelentes ajustes. O coeficiente de correlação de Pearson foi de 0,9539, significando uma correlação positiva boa entre as duas gamas escolhidas. Concentrações, acima de 25 ppm não podem ser ajustadas a partir deste modelo, pois podem ser atribuídas a erros de ajustes.

Devido ao ambiente criado não facilitar a uniformização do material particulado, mesmo sendo muito bem controlado durante os períodos de grande concentração de fumaça na sala, não foi possível obter linhas de concentração excelentes, a partir dos equipamentos, para a calibração das PM₁₀. Contudo, para as PM_{2,5}, pode aproveitar-se uma pequena faixa de amostragem de 50 min, no qual foi possível gerar a Figura 37.

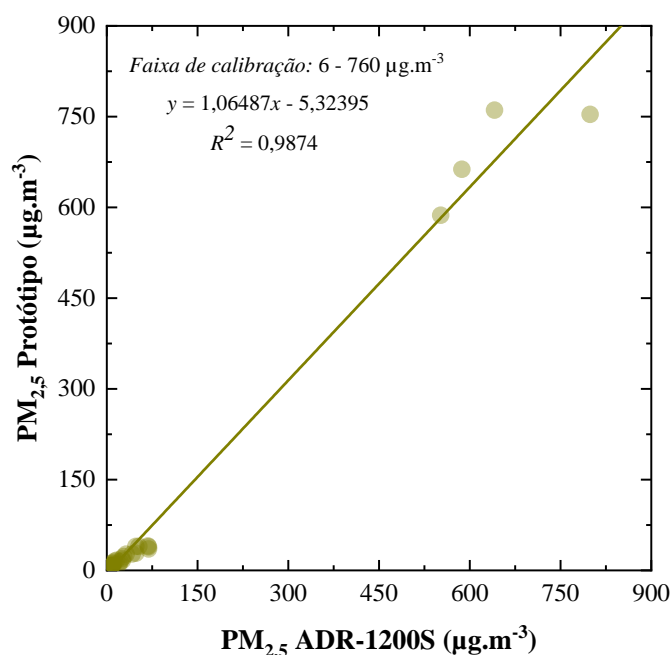


Figura 37 – Diagrama de dispersão e reta de calibração das PM_{2,5}, análise de 24h.

Sendo assim, foi gerado um coeficiente de determinação para os pontos selecionados de 0,9874. O modelo foi validado a partir da análise de variância, tendo um p-valor menor que 0,05, sendo de $1,38 \times 10^{-40}$, logo, a faixa de calibração é muito boa, sendo ela de 6 a $760 \mu\text{g.m}^{-3}$. E o coeficiente de correlação de Pearson é de 0,9937, portanto, existe uma ótima correlação linear entre as variáveis comparadas.

A Tabela 12 sumaria os parâmetros estatísticos obtidos nos testes para os poluentes amônia, dióxido de carbono, PM_{2,5} e o parâmetro ambiental humidade relativa,.

Tabela 12 – Resumo dos parâmetros estatísticos obtidos no processo de validação/calibração dos sensores.

Composto /Parâmetro Ambiental	R ²	F de verificação	ρ
CO ₂	0,9852	$4,4220 \times 10^{-28}$	0,9926
HR	0,9855	$1,0745 \times 10^{-51}$	0,9927
NH ₃	0,9099	$8,2681 \times 10^{-37}$	0,9539
PM _{2,5}	0,9874	$1,38 \times 10^{-40}$	0,9937

5.3. ESTUDO DE CASO

Neste ponto, apresentam-se os principais resultados obtidos na produção de aves e suínos, com destaque para a avaliação do comportamento dos gases e partículas ao longo

de toda extensão das instalações estudadas. Todos os poluentes e parâmetros ambientais integrados no protótipo foram avaliados nesta etapa, tais como a amónia, sulfureto de hidrogénio, dióxido de carbono, material particulado, temperatura e humidade relativa..

5.3.1. Níveis de gases e partículas em produção avícola

Na Figura 38, apresentam-se as concentrações de amónia, dióxido de carbono, PM_{2,5} e também a humidade relativa. A análise mostra que na avicultura, devido à circulação de ar promovida pelos extratores colocados numa extremidade do aviário, os gases tendem a acumular-se à medida que nos deslocamos da entrada do aviário para a extremidade onde se localizam os extratores.

A concentração média de amónia a 13 m da entrada é de 3 ppm, enquanto que mais ao centro do aviário o gás já se encontra com valores 7 vezes superiores. Junto à saída e mais próximo ao sistema de extração de ar, a cerca de 100 m da entrada e à altura do solo, os valores ultrapassam as 10 vezes a mais de amónia, atingindo um valor médio de 31 ppm.

A 60 metros da entrada foi realizada uma medição a sensivelmente 1,5 m de altura, a qual demonstra a existência de um perfil vertical expectável, ou seja, uma redução dos níveis à medida que nos afastamos do ponto de emissão (a cama das aves). Portanto, os animais que ali vivem e que são mais sensíveis do que os humanos, ficam mais expostos a estas maiores concentrações de amónia.

Em ensaios realizados por Xing *et al.* (2016), nos quais 400 frangos foram expostos a diferentes concentrações de amónia, dentro de 4 câmaras de metabolismo de respiração, mostraram que os frangos de corte expostos a níveis entre 15 a 45 ppm de NH₃, podem ter uma perda significativa de peso, sendo que níveis acima de 15 ppm indicaram causaram efeitos na saúde dos frangos estudados. Segundo a NFACC (2016) concentrações abaixo de 10 ppm de NH₃ são necessárias para assegurarem o bem-estar das aves por serem mais sensíveis do que outros animais.

Com base nos resultados obtidos, é possível dizer que os frangos localizados próximos a entrada do aviário, estão mais protegidos em termos de saúde, devido estarem expostos a níveis médios de amónia (aprox. 3 ppm) bem inferiores aos limiares de segurança (10 ppm). Por outro lado, a partir dos 30 metros da entrada do aviário, os frangos já se encontram expostos a níveis mais elevados, podendo estar susceptíveis a doenças respiratórias e a perdas de peso, devido às concentrações mais elevadas de NH₃.

De acordo com o Ministério do Trabalho e Emprego (2018) no Brasil, a concentração de amônia sugerida para um tempo de exposição médio ponderado de 8 h de trabalho, é de 20 ppm. Sendo assim, os níveis de NH_3 não se encontram elevados na amostragem realizada a 1,5 m da cama do aviário a 60 m da entrada do galpão para os humanos, sendo encontrado uma concentração média de 10 ppm, não prejudicando a saúde do trabalhador agrícola neste local.

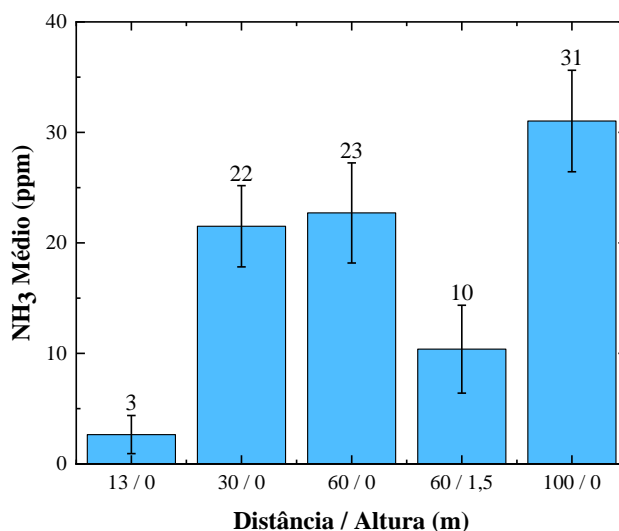


Figura 38 – Concentração da amônia em diferentes pontos do aviário.

Para o dióxido de carbono, a concentração apresenta uma variação espacial semelhante à amônia, ou seja, existe uma tendência para se observar um ligeiro aumento com o afastamento da entrada do edifício. Junto à entrada a concentração observada foi, em termos médios, de 800 ppm, enquanto que mais próximo da saída o valor médio observado foi de cerca de 1300 ppm.

Conforme estudos realizadas pela Universidade da Georgia (2012), elevadas concentrações podem levar a redução de peso e a um estado morbido, no qual as funções vitais são atenuadas, em concentrações acima de 5000 ppm, sendo o valor ideal abaixo de 3500 ppm de CO_2 . Sendo assim, as concentrações encontradas no aviário de estudo, são de aproximadamente de 3 a 4 vezes menores, portanto estão de acordo com os valores indicados.

Mais uma vez, a medição realizada a uma altura de 1,5 m do solo apresentou uma concentração de 1065 ppm de CO_2 . Logo, este valor se apresenta menor que o observado junto ao solo, Figura 39. Em comparação com o que é indicado no Anexo 11 do Ministério

do Trabalho e Emprego do Brasil (2018), os valores encontram-se abaixo de 3900 ppm, também estando favoráveis durante o período de análise para os trabalhadores agrícolas.

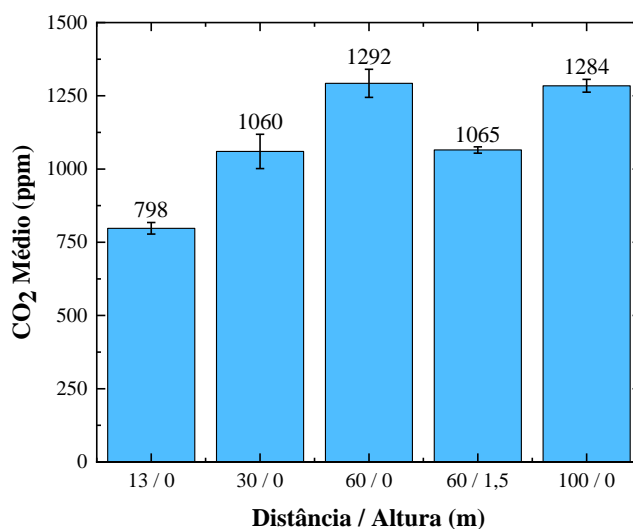


Figura 39 – Concentração do dióxido de carbono em diferentes pontos do aviário.

O sulfureto de hidrogénio obtido no primeiro ponto (13 m) foi de 27 ppb, sendo o local com a menor concentração detetada. Contudo, ocorreram elevadas variações durante a deteção do gás neste ponto. Isso pode ocorrer devido o sensor não estar aquecido o suficiente para começar a realizar as medições com maior fiabilidade. A 30 m da entrada a concentração é de 28 ppb e já com variações baixas, assim como os outros gases, quanto mais ao final do galpão, próximo aos extratores de ar, maior a concentração do gás, chegando a 100 m com uma concentração de 37 ppb. Tudo isso pode ser observado na Figura 40.

No geral, existem muito poucos estudos que detalham a toxicidade do H₂S para determinar um limiar de segurança para a saúde e bem-estar das aves de capoeira. No entanto, Saksrithai e King (2018) apontam que a exposição combinada de sulfureto de hidrogénio com outros gases no aviário, por exemplo amónia, pode gerar efeitos nefastos para os animais que ali se encontram.

Em termos de segurança para o trabalhador, a análise realizada a 1,5 m de altura e até mesmo todas realizadas ao nível do solo, apresentaram concentrações muito abaixo dos limites de tolerância estipulado pelo MTE do Brasil, sendo o valor encontrado neste ponto de 30 ppb e o valor estipulado pela norma regulamentadora de 9 ppm.

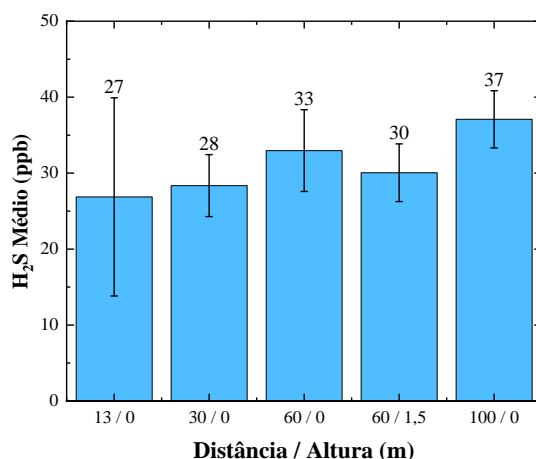


Figura 40 – Concentração do sulfureto de hidrogénio em diferentes pontos do aviário.

A temperatura média encontrada durante o período de análise, aponta para o bem-estar dos frangos, variando de 21 a 27 °C do ponto 1 ao ponto 5, Figura 41. De acordo com Cassuce *et al.* (2013) a aclimatização das aves de cortes no Brasil, para um ganho efetivo de peso, é entre 21,8 a 25,5 °C, entre a segunda e terceira semana de vida.

A baixa temperatura no início do aviário, ocorre devido ao ar exterior que passa pelos painéis evaporativos. Durante essa passagem, o ar além de humidificado, tem sua temperatura regulada, promovendo uma ambiência e conforto térmico mais adequado para a sobrevivência dos frangos.

Com isso, a humidade relativa encontrada no início da instalação é maior, devido ao processo de humificação promovido pelos painéis. Logo, no ponto 1 observa-se uma HR média de 77 %. À medida que a recolha dos dados se distanciaram da entrada, a HR tendeu a diminuir, sendo que no último ponto amostrado, o aviário se encontra com a humidade relativa cerca de 10 % abaixo da registada na entrada.

Alguns autores reportam que a faixa de humidade relativa ideal para a criação de aves varia entre 40 e 70 % (Hyline, 1982; Oloyo e Ojerinde, 2019). Para estas condições a humidade relativa no primeiro e segundo ponto se encontram elevadas, nos demais pontos se encontram de acordo com a faixa desejada.

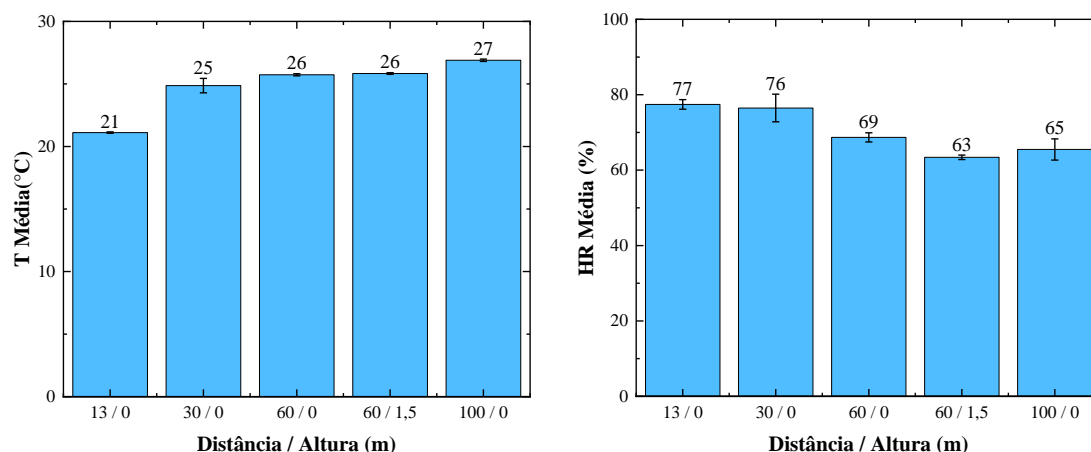


Figura 41 – Temperatura e Humidade Relativa média encontrado em diferentes pontos do aviário.

À semelhança do observado com os gases, que se acumularam mais na extremidade, próximo aos extractores da instalação avícola, para as partículas o cenário não é diferente, Figura 42. O material particulado tende a aumentar nas zonas mais próximas das saídas de ar e junto ao solo, sendo que, próximo da entrada, a concentração de $PM_{2,5}$ registada foi, em média, de $22 \mu g.m^{-3}$ e o ponto mais distante, com quase o dobro, foi de $40 \mu g.m^{-3}$.

No que se refere ao material particulado com diâmetro aerodinâmico de $10 \mu m$, a concentração registada foi superior, verificando-se no primeiro ponto de amostragem um valor médio de $151 \mu g.m^{-3}$ e no ponto mais distante de $370 \mu g.m^{-3}$. Os valores elevados de material particulado observados apontam para a possibilidade de ocorrência de problemas nos trabalhadores e frangos expostos.

De acordo com Winkel (2016), elevados níveis de material particulado podem conter endotoxinas (composto pró-inflamatórios da membrana externa de bactérias gram-negativas) e microrganismos, podendo trazer sérios riscos à saúde dos trabalhadores que ficam diariamente expostos e também à saúde dos animais.

Devido a não haver estudos que relatam um limite de exposição ideal para os animais e trabalhadores em instalações pecuárias, principalmente avicultura, e também no que se diz respeito à qualidade do ar interior, não é possível verificar se as concentrações detetadas estão de acordo com um nível de segurança, para a saúde e bem-estar de ambos. Entretanto, vale lembrar que a avicultura, em relação a outros tipos de produção animal, é o que gera maiores quantidades de material particulado durante o nascimento e a produção das aves (Hinz *et al.* 2002). Dessa maneira, microrganismos patogénicos oportunistas que acompanham essas partículas, podem causar sérias doenças infecciosas e alérgicas nos animais nas instalações avícolas (Hartung e Schulz, 2007).

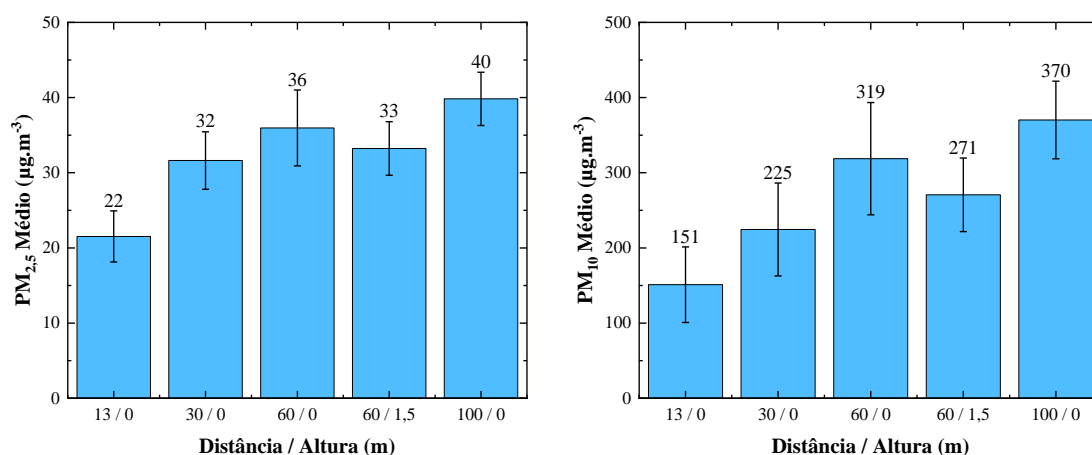


Figura 42 – Material Particulado PM_{2,5} e PM₁₀ médio, encontrado em diferentes pontos dentro do aviário.

No geral, a ventilação é um fator importante dentro de uma instalação avícola. É a partir dela que o excesso de humidade no ambiente e na cama serão removidos. Também é a ventilação que promove a regulação da temperatura e a concentração de poluentes no interior, provenientes dos processos de digestão e respiração das aves, permitindo a renovação do ar e regulando o nível necessário de oxigénio (Abreu & Abreu, 2000).

5.3.2. Níveis de gases e partículas em produção suinícola

As concentrações de NH₃ encontram-se na Figura 43, onde se mostra que variaram entre 4 e 12 ppm. Segundo Sampaio *et al.* (2005), a qualidade do ar interior de instalações suinícolas está diretamente relacionada com o metabolismo dos suínos, a digestão de dejetos e a alimentação que globalmente determinam a abundância relativa de determinados compostos químicos e biológicos do ar interior. Apesar de poder ser expectável níveis mais elevados de NH₃, as características das instalações e a ventilação lateral contribuiu para que os valores tenham sido bastante baixos.

Estudos realizados por Colina *et al.* (2000) apontam para limiares de proteção da saúde humana e dos animais não superiores a 10 ppm, pelo que os valores detetados não parecem motivar preocupação para a saúde dos trabalhadores e dos animais.

Da análise dos ensaios realizados na suinicultura foi possível verificar que o dióxido de carbono varia muito pouco ao longo da instalação, observando-se uma concentração média de 653 ppm no primeiro ponto de medida e de 833 ppm no último ponto. Este valor é muito baixo, considerando a quantidade de animais existentes no local, cerca de 800 animais e que através da sua respiração libertam CO₂ para a atmosfera. Uma

explicação para os valores registados é a ventilação natural do local, facilitada pela rede lateral que permite a circulação de ar.

Não existem estudos que detalham a gama de concentração de dióxido de carbono ideal para os suínos. Portanto, considerando os valores indicados para as aves, como valores de segurança para animais criados em confinamento em geral, as concentrações encontram-se, aproximadamente, de 4 a 6 vezes menores que os valores apontados pela Universidade de Georgia de 3500 ppm.

Devido o dióxido de carbono estar bem diluído no ar e as concentrações serem desejadas, as gamas encontradas não interferem na atividade humana durante o seu período de trabalho nestes ambientes, como é possível verificar nos valores indicados pelos órgãos de saúde e segurança ocupacional (5000 ppm de CO₂) e pelo próprio Ministério do Trabalho e Emprego do Brasil (3900 ppm de CO₂).

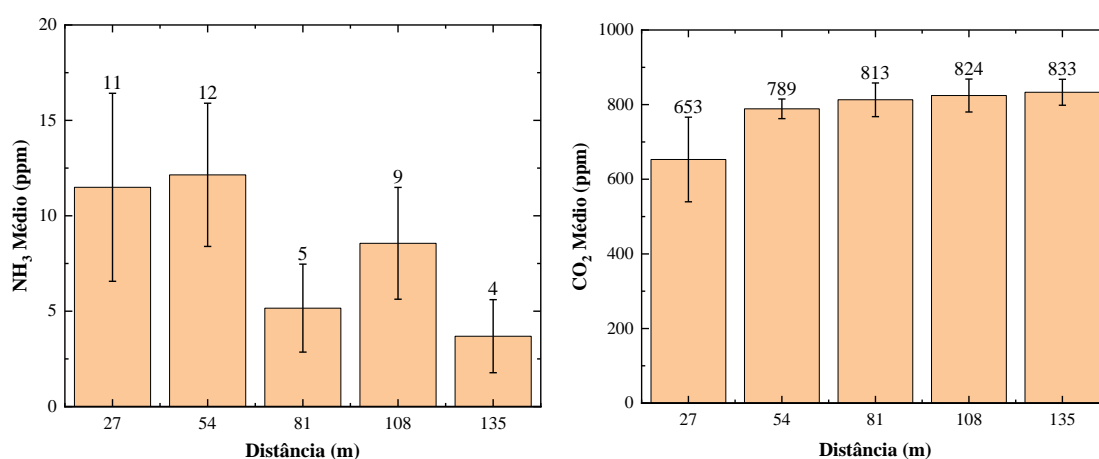


Figura 43 – Concentração de amónia e dióxido de carbono encontrado na suinicultura.

Segundo Ni *et al.* (2018), o sulfureto de hidrogénio é um dos principais gases formados na suinicultura moderna e que pode ser muito tóxico para seres humanos e animais acima de 200 ppm. Na amostragem, foram detetados concentrações que variaram de 466 a 529 ppb entre todos os pontos, Figura 44. Estes baixos níveis de H₂S devem-se também à ventilação natural do local e, portanto, a renovação do ar contribuiu para a diluição das concentrações atmosféricas.

Níveis ideais de exposição dos suínos ao H₂S não são disponibilizados na literatura, apesar de haver estudos que relatam os efeitos da exposição a determinadas concentrações do poluente. Por outro lado, órgãos de saúde e segurança ocupacional distribuídos por todo o mundo, adotam diferentes limiares de exposição ao sulfureto de hidrogénio, para os seres humanos, como mostrado anteriormente no Capítulo 5.

Portanto, este valor ideal pode variar de 1 a 20 ppm de H₂S. Sendo assim, como este gás é tóxico e nocivo para a saúde dos suínos e humanos, foi adotado para níveis de comparação o valor de 1 ppm, indicado pela ACGIH e CCOHS. Contudo, as concentrações detetadas encontram-se abaixo do valor indicado por estes órgãos, não sendo, por essa razão, críticas para a saúde dos porcos e também dos trabalhadores.

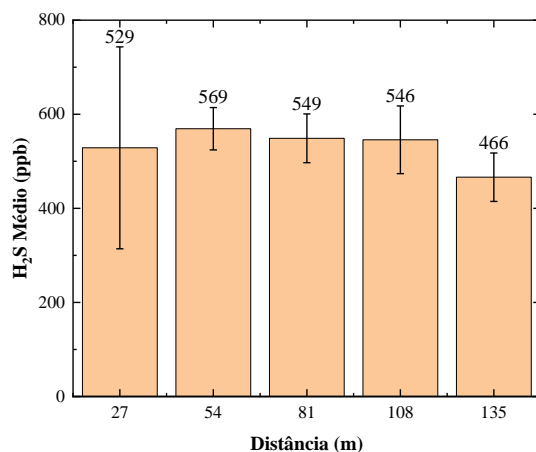


Figura 44 – Concentração do sulfureto de hidrogénio em diferentes pontos da suinicultura.

Conforme Lammers *et al.* (2007), a temperatura ideal pode variar de 13 a 38 °C, de acordo com os diferentes tempos de vida dos suínos (porcos amamentando, porcos em crescimento, porcas gestantes, etc.), seus diferentes pesos e o tipo de pavimento utilizado na suinicultura. No ensaio realizado na instalação suinícola, T variou de 28 a 33 °C. Como o chão é de betão e os suínos estão em fase de crescimento, a temperatura ideal fica na faixa de 25 a 32 °C, Figura 45, os valores registados encontram-se na gama favorável para o bem-estar dos suínos.

Em relação à humidade relativa, valores abaixo de 70 % são indicados para a criação dos animais na suinicultura (Campos *et al.* 2009). Conforme a amostragem realizada, a HR variou de 35 a 46 %, sendo assim, os valores encontram-se conforme com o que é indicado. É importante ressaltar, que para se estabelecer condições de conforto térmico para o animal, diversos fatores ser considerados em conjunto, principalmente a T, HR e a ventilação da instalação, para que assim, o *stress* térmico seja evitado.

Uma vez que a ventilação da instalação é natural, foi possível verificar que a suinicultura apresenta como característica, a humidade relativa e a temperatura, nestes casos, se aproximarem das temperaturas exteriores, devido à constante ventilação do ambiente.

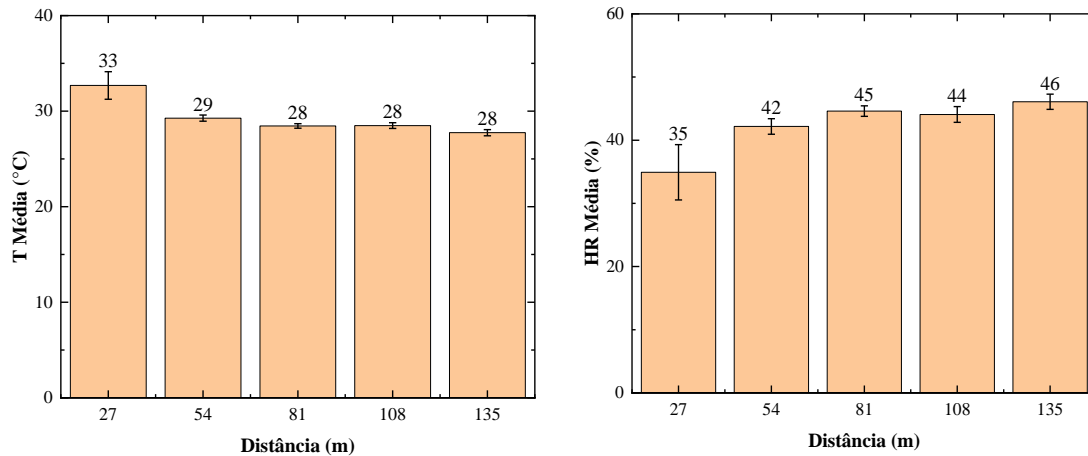


Figura 45 – Temperatura e Humidade Relativa encontrado em diferentes pontos da suinicultura.

As concentrações médias de material particulado na suinicultura foram muito baixas, sendo que as $PM_{2,5}$ variaram de 22 a 25 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ e as PM_{10} variaram de 24 a 27 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, Figura 46. Este valor é cerca de 6 a 12 vezes menor do que o material particulado com diâmetro aerodinâmico equivalente de 10 μm , encontrado em instalações avícolas. Mais uma vez, a ventilação natural da suinicultura mostrou ser eficiente para a remoção não somente dos gases, mas sim do material particulado em toda a extensão da instalação.

Seguindo o mesmo caso das aves, os suínos também não apresentam estudos que tratam de um limiar adequado para o bem-estar dos mesmos. Não obstante, ao comparar os níveis de concentração de material particulado em relação ao registado na avicultura, verifica-se que na suinicultura, as PM_{10} são de 6 a 14 vezes inferiores aos que se registaram na avicultura.

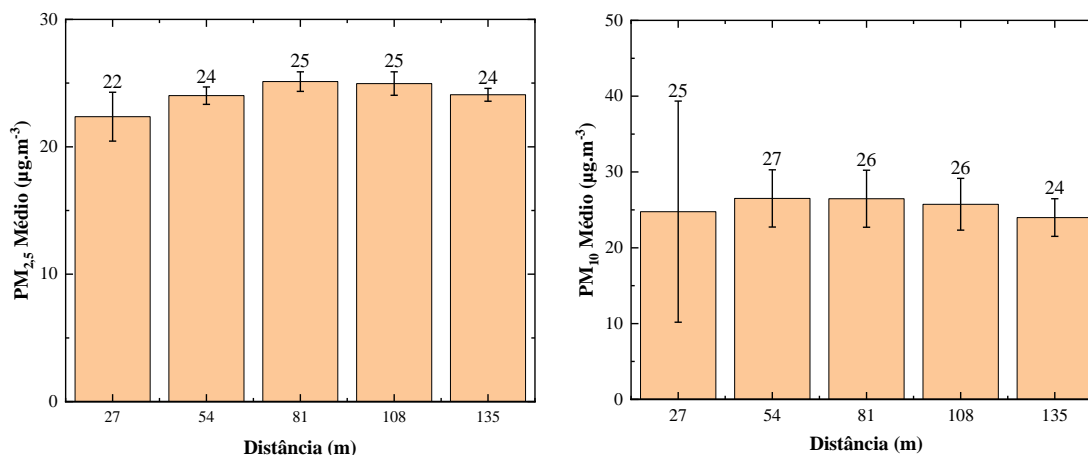


Figura 46 – Material Particulado $PM_{2,5}$ e PM_{10} médio, encontrado em diferentes pontos dentro da suinicultura.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os avanços tecnológicos das últimas décadas e a miniaturização de dispositivos eletrônicos, a criação de sistemas de baixo custo tornou-se uma realidade, que facilita o nosso dia-a-dia com os seus diversos benefícios. Neste contexto, perante as condições de qualidade do ar interior em instalações suínolas e avícolas, que podem fazer perigar a saúde dos animais e dos trabalhadores, pretendeu-se com este estudo desenvolver, calibrar e aplicar um sistema de baixo custo, com a capacidade de monitorizar gases, partículas e parâmetros ambientais dentro de instalações pecuárias.

Os sensores e componentes eletrônicos utilizados mostraram-se robustos e adequados para a obtenção de um dispositivo capaz de assegurar uma monitorização fidedigna de vários parâmetros de qualidade do ar interior em ambiente agroindustriais, como se pôde constatar pelos resultados da validação e aplicação do equipamento em agroindustrias brasileiras.

Os sensores K30 de dióxido de carbono e Si7021 para a temperatura, tiveram um bom desempenho para as gamas que foram avaliadas, sendo gamas que integram os níveis prevalentes em ambientes interiores das instalações de produção de suínos e aves de capoeira. Os restantes também tiveram respostas manifestamente positivas, ainda são necessários estudos de calibração e de intercomparação adicionais, porém ainda requerem estudos que abranjam gamas de medição mais alargadas para alguns dos sensores, entre os quais, a HR do Si7021 e o EC4-NH₃-100.

Relativamente ao custo do dispositivo, o valor estimativo (aprox. €450) é muito encorajador para ser implementado em diferentes instalações de produção animal (ou outras como medição de fuga de gases em biodigestores ou lagoas de tratamento de efluentes líquidos) em número suficiente para avaliar com rigor as heterogeneidades espaciais que porventura possam existir nesses espaços.

A partir dos estudos dirigidos na suinicultura e avicultura, foi possível verificar o comportamento de acumulação dos gases e partículas e analisar a importância da ventilação na qualidade do ar destes ambientes interiores. Sendo que na avicultura estudada, os gases e partículas tendem a concentrar-se principalmente ao fundo do aviário e próximo a cama, o que traz mais riscos de saúde dos animais que ali vivem e para os trabalhadores. Assim como na suinicultura estudada a ventilação se estende ao longo de toda extensão da instalação, a diluição de poluentes é eficaz, prevalecendo atmosferas interiores menos prejudiciais para os suínos e trabalhadores.

No geral, o dispositivo apresentou um bom desempenho e constitui-se como uma alternativa barata, simples e de fácil manutenção. Deste modo, é um dispositivo que poderá ser facilmente integrado em redes de monitorização e ser uma excelente opção no controlo e monitorização da qualidade do ar interior de instalações pecuárias ou outras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abraham, S., & Li, X. (2016). Design of A Low-Cost Wireless Indoor Air Quality Sensor Network System. *International Journal of Wireless Information Networks*, 23(1), 57–65. doi: 10.1007/s10776-016-0299-y

Abreu, P. G. Abreu, V. M. N. (2000). Ventilação na avicultura de corte. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves. Documento 63. Retrieved from <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/58306/1/doc63.pdf>

Albuquerque, M. C. (1987). Economia Brasileira: um nó de contradições. *Lua Nova: Revista de Cultura e Política*. 3(4), 96-102. Disponível em: doi.org/10.1590/S0102-64451987000200015

Alves, S. P. (2007). *Uso da zootecnia de precisão na avaliação do bem-estar bioclimático de aves poedeiras em diferentes sistemas de criação* (Unpublished master's thesis). Piracicaba/ Universidade de São Paulo. Disponível em: doi:10.11606/T.11.2007.tde-04042007-141113

Anandhakrishnan, S., Deepesh, N., Rakesh, K., Sampath, K., & Gayathri, S. N. (2013). IOT Based Smart Gas Monitoring System. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 4(2), 82–87. doi: 10.9790/1676-042

APA. (2009). *Qualidade do Ar em Espaços Interiores: Um Guia Técnico*. Agência Portuguesa do Ambiente. Retrieved from http://apambiente.pt/_zdata/Divulgacao/Publicacoes/GuiaManuals/manualQArInt_standard.pdf

Arduino. (2019a, March 2). Serial. Retrieved February 12, 2019, <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/communication/serial/>

Arduino. (2019b). Arduino Mega 2560 REV3. Retrieved from <https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3>

Arrieta, E. M., & González, A. D. (2019). Energy and carbon footprints of chicken and pork from intensive production systems in Argentina. *Science of The Total Environment*, 673, 20-28. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.002

ABPA (2018). Relatório Anual 2018. Retrieved from <http://abpa-br.com.br/storage/files/relatorio-anual-2018.pdf>

Atherton, W. A. (1984). Miniaturization of Electronics. *From Compass to Computer*, 237–267. doi: 10.1007/978-1-349-17365-5_10

Atmel. (2015). Arduino Mega 2560. Retrieved from <http://www.mantech.co.za/datasheets/products/A000047.pdf>

Attene-Ramos, M. S., Wagner, E. D., Gaskins, H. R., & Plewa, M. J. (2007). Hydrogen Sulfide Induces Direct Radical-Associated DNA Damage. *Molecular Cancer Research*, 5(5), 455–459. doi: 10.1158/1541-7786.mcr-06-0439

Aziz, T; & Barnes, J. (2010). Harmful effects of ammonia on birds. Rollins Animal Disease Diagnostic Laboratory, North Carolina Department of Agriculture and Consumer Services and College of Veterinary Medicine, NC, USA. Retrieved from <https://www.poultryworld.net/Breeders/Health/2010/10/Harmful-effects-of-ammonia-on-birds-WP008071W/>

Banhazi, T., Aland, A., & Hartung Jörg. (2018). *Air quality and livestock farming*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.

Bârsan, N., Huebner, M., & Weimar, U. (2013). Conduction mechanism in semiconducting metal oxide sensing films: impact on transduction. *Semiconductor Gas Sensors*, 35–63. doi: 10.1533/9780857098665.1.35

Barbosa, J. C., Cruz, V. F., Baptista, F. (2007). A ventilação em instalações de bovinos leiteiros. In. *III Jornadas da Bovinocultura*. Retrieved from <https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/3347/1/IAAS%20Ventilacao.pdf>

Barsan, N., Schweizer-Berberich, M., & Göpel†, W. (1999). Fundamental and practical aspects in the design of nanoscaled SnO₂ gas sensors: a status report. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 365(4), 287–304. doi: 10.1007/s002160051490

Batista, P. D. (2009). *Tin and zinc oxides semiconductor devices* (Doctoral Thesis). Retrieved from Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP.

Behera, S. N., Sharma, M., Aneja, V. P., & Balasubramanian, R. (2013). Ammonia in the atmosphere: a review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(11), 8092–8131. doi: 10.1007/s11356-013-2051-9

Berckmans, D. (2014). Precision livestock farming technologies for welfare management in intensive livestock systems. *Revue Scientifique Et Technique De LOIE*, 33(1), 189-196. doi:10.20506/rst.33.1.2273

Brasil. (2018). NR15 - Atividades e Operações Insalubres. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego (MTE). Retrieved from https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos_SST/SST_NR/NR-15.pdf

Burroughs, H. E., & Hansen, S. J. (2011). *Managing indoor air quality* (5th ed.). Boca Raton, FL: The Farimont Press/Taylor & Francis.

Cambra-López, M., Hermosilla, T., Lai, H.T.L., Aarnink, A.J.A., Ogink, N.W.M. (2011). Particulate matter emitted from poultry and pig houses: Source identification and quantification. *Transactions of the ASABE*, 54(2), 629-642. Retrieved from <https://www2.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-79954460060&origin=inward&txGid=6e7e49903f24de5ff22fc6d424427441>

Cambra-López, M., Winkel, A., Mosquera, J., Ogink, N. W., & Aarnink, A. J. (2015). Comparison between light scattering and gravimetric samplers for PM₁₀ mass concentration in poultry and pig houses. *Atmospheric Environment*, 111, 20-27. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.03.051

Campos, J. A.; Tinôco, I. F. F.; Baêta, F. C.; Cecon, P. R.; & Mauri, A. L. (2009). Qualidade do ar, ambiente térmico e desempenho de suínos criados em creches com dimensões diferentes. *Eng. Agrícola Jaboticabal*, 29(3), 339-347. <http://www.scielo.br/pdf/eagri/v29n3/a01v29n3.pdf>

Caro, D. (2019a). Greenhouse Gas, Livestock and Trade. *Encyclopedia of Food Security and Sustainability*, 88-92. Retrieved from: doi:10.1016/b978-0-08-100596-5.21971-9

Caro, D. (2019b). Greenhouse Gas and Livestock Emissions and Climate Change. *Encyclopedia of Food Security and Sustainability*, 228-232. doi:10.1016/b978-0-08-100596-5.22012-x

Caro, D.; Davis, S.J.; Bastianoni, S.; Caldeira, K. (2014). Global and regional trends in greenhouse gas emissions from livestock. *Climatic Change*, 126(1-2), 203-216. doi:10.1007/s10584-014-1197-x

Capone, S., Forleo, A., Francioso, L., Rella, R., Siciliano, P., Spadavecchia, J., ... Taurino, A. M. (2004). Solid State Gas Sensors: State of the Art and Future Activities. *ChemInform*, 35(29). doi: 10.1002/chin.200429283

Cassuce, D. C., Tinôco, I. D. F. F., Baêta, F. C., Zolnier, S., Cecon, P. R., & Vieira, M. D. F. A. (2013). Thermal comfort temperature update for broiler chickens up to 21 days of age. *Engenharia Agrícola*, 33(1), 28–36. doi: 10.1590/s0100-69162013000100004

CCOHS. (2017). Carbon Dioxide. CCOHS: Canadian Centre for Occupational Health and Safety Retrieved from https://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/chem_profiles/carbon_dioxide.html

CCOHS. (2019). Ammonia. CCOHS: Canadian Centre for Occupational Health and Safety Retrieved from https://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/chem_profiles/ammonia.html

CDC. (2011). 1988 OSHA PEL Project Documentation: Index of Chemical Names - Ammonia. CDC: Centers for Disease Control and Prevention. Retrieved from <https://www.cdc.gov/niosh/pel88/7664-41.html>

CDC. (2018). Appendix G: 1989 Air Contaminants Update Project - Exposure Limits NOT in Effect. CDC: Centers for Disease Control and Prevention. Retrieved from <https://www.cdc.gov/niosh/npg/nengapdxg.html>

Chi, Q., Chi, X., Hu, X., Wang, S., Zhang, H., & Li, S. (2018). The effects of atmospheric hydrogen sulfide on peripheral blood lymphocytes of chickens: Perspectives on inflammation, oxidative stress and energy metabolism. *Environmental Research*, 167, 1–6. doi: 10.1016/j.envres.2018.06.051

Chmielowiec-Korzeniowska, A. (2009). The concentration of volatile organic compound (VOCs) in pig farm air. *Ann Agric Environ Med*, 16, 249-256. Retrieved April 28, 2019, from https://www.researchgate.net/publication/40846266_The_concentration_of_volatile_organic_compounds_VOCS_in_pig_farm_air

Cheng, J. (2018). *Biomass to renewable energy processes*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group

Chong, C., & Kumar, S. (2003). Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges. *Proceedings of the IEEE*, 91(8), 1247-1256. doi:10.1109/jproc.2003.814918

Chou, S. J. (2003). *Hydrogen sulfide: human health aspects*. Geneva: World Health Organization. Retrieved from <https://www.who.int/ipcs/publications/cicad/en/cicad53.pdf>

Clements, A. L., Griswold, W. G., Rs, A., Johnston, J. E., Herting, M. M., Thorson, J., Collier-Oxandale, A., Hannigan, M. (2017). Low-Cost Air Quality Monitoring Tools: From Research to Practice (A Workshop Summary). *Sensors*, 17(11), 2478. doi:10.3390/s17112478

CO2meter. (2015). Datasheet: K-30 sensor. Retrieved from https://img.ozdisan.com/ETicaret_Dosya/456729_1584920.PDF

Colina, J.; Lewis, A.; & Miller, P. S. (2000). A review of the ammonia issue and pork production. Nebraska Swine Reports (108). Retrieved from https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1107&context=coopext_swine

Davis, K. F., Yu, K., Herrero, M., Havlik, P., Carr, J. A., & D'Odorico, P. (2015). Historical trade-offs of livestock's environmental impacts. *Environmental Research Letters*, 10(12), 125013. doi:10.1088/1748-9326/10/12/125013

Delgado, L. A., Feliciano, M. J. S., Frare, L. M., & Igrejas, G. P. P. (2019). Construção de um sistema de baixo custo para a medição de gases e partículas no interior de instalações suínolas e avícolas. In *Conferência Internacional de Sustentabilidade na Gestão Ambiental 2019 (SGA'19), Lisboa, Portugal*. Retrieved from <https://conferenciasga2020.wixsite.com/sga19>

Despacho 69/1996, M. da A. do D. R. e das P. Regulamenta o exercício das atividades avícolas de seleção, multiplicação e recria de aves de reprodução ou de postura, criadas ou mantidas em cativoiro ou semicativoiro. Decreto-lei n° 69/1996, de 31 de maio de 1996 (1996). Portugal: Diário da República n.° 127/1996, Série I-A de 31 de maio de 1996. Retrieved from <https://dre.tretas.org/dre/74747/decreto-lei-69-96-de-31-de-maio>

Di Natale, C., Davide, F., D'amico, A. (1995). Pattern recognition in gas sensing: well-stated techniques and advances. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 23(2-3), 111-118. doi:10.1016/0925-4005(94)01279-2

Dixon, J., Li, X., Hellin, J., & Hyman, G. (2009). Forty years of farming systems classification for enhanced food security and poverty reduction. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 4(060). doi:10.1079/pavsnr20094060

- Dräger. (2013). *Monitoring Hydrogen Sulfide (H₂S) to meet new exposure standards*. Dräger. Retrieved from https://www.draeger.com/Library/Content/hydrogen_sulfide_white_paper_81297.pdf
- Ecim-Djuric, O., & Topisirovic, G. (2010). *Energy efficiency optimization of combined ventilation systems in livestock buildings*. *Energy and Buildings*, 42(8), 1165-1171. doi:10.1016/j.enbuild.2009.10.035
- Electrofun. (2019a). Display LCD 16x2 Com Fundo Azul. Retrieved February 21, 2019 from <https://www.electrofun.pt/display/display-lcd-16x2>
- Electrofun. (2019b). Módulo para cartão de memória/leitor micro SD card arduino. Retrieved February 21, 2019 from <https://www.electrofun.pt/comunicacao/modulo-cartao-sd>
- EQUIPCO. (2019). Dust Monitor/DustTrak Rental. Retrieved November 6, 2019, from https://www.equipcoservices.com/rentals/air_monitoring/area_dust_monitors.html.
- European Commission. (2003). Situação da Agricultura em Portugal. Retrieved March 10, 2019, from: https://ec.europa.eu/agriculture/publi/reports/portugal/workdoc_pt.pdf
- European Commission. (2017). *Measuring Air Pollution with Low-Cost Sensors* [Brochure]. European Union, EU: Gerboles, M., Spinelle, L., Borowiak, A. Retrieved May 10, 2019, from <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/brochures-leaflets/measuring-air-pollution-low-cost-sensors>
- European Commission. (2018). Commissions Staff Working Document: country report Portugal 2018. Retrieved March 10, 2019, from: <https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/2018-european-semester-country-report-portugal-en.pdf>
- European Parliament and of the Council of the European Union, Directive 2015/863 / EU - List of substances subject to restriction, Official Journal of the European Communities, Brussels, 31 March 2015.
- FAO. (2009a). *Farmer's Hand Book on Pig Production: for the small holders at village level* (pp. 1 – 86). Nepal: Food and Agriculture Organization of the United Nations Retrieved from http://www.fao.org/ag/againfo/themes/documents/pigs/handbook_on_pig_production_english_layout-vietnam-draft.pdf
- FAO. (2009b). *Global agriculture towards 2050. Global agriculture towards 2050* (pp. 1–4). Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/HLEF2050_Global_Agriculture.pdf
- FAO. (2011). World Livestock 2011 – Livestock in food security. Rome, FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from <http://www.fao.org/docrep/014/i2373e/i2373e.pdf>

FAO. (2015). FAO Statistical Pocketbook: World food and agriculture. Rome, FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i4691e.pdf>

FAO. (2016). Proceedings of FAO International Symposium on the Role of Agricultural Biotechnologies in Sustainable Food Systems and Nutrition. Rome, FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i5922e.pdf>

FAOSTAT. (2019). FAOSTAT statistics database. Rome: FAOSTAT: Retrieved from <http://www.fao.org/faostat/en/#home>

Farahani, H., Wagiran, R., & Hamidon, M. (2014). Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review. *Sensors, 14*(5), 7881–7939. doi: 10.3390/s140507881

Figaro. (2018). Miniaturization and reduced power consumption for sensor platform development. Retrieved from <https://www.figaro.co.jp/en/technicalinfo/miniaturization.html>

Fischer, R.A. & Byerlee, Derek & Edmeades, Gregory. (2014). *Crop yields and global food security: will yield increase continue to feed the world? ACIAR Monograph No. 158*. Australian Centre for International Agricultural Research. Canberra. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/282713287_Crop_yields_and_global_food_security_will_yield_increase_continue_to_feed_the_world_ACIAR_Monograph_No_158_Australian_Centre_for_International_Agricultural_Research

Fraunhofer. (2019). Semi-conductor gas sensors. Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques Retrieved from: <https://www.ipm.fraunhofer.de/content/dam/ipm/en/PDFs/product-information/GP/ISS/semiconductor-gas-sensors.pdf>

Furst, L.C., Igrejas, G. P.P., Feliciano, M. J.S., & Frare, L.M. (2017). *Construção e aplicação de um sistema de baixo custo para a monitoração do gás metano na cidade de Bragança* (Master dissertation, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal) Retrieved from <http://hdl.handle.net/10198/14875>

Gasera. (2019). Gasera One: the ultimate performance gas analyzer. Retrieved November 6, 2019 from <https://www.gasera.fi/product/gaseraone/>

Gay, S. W.; & Knowlton, K. F. (2009). Ammonia Emissions and Animal Agriculture. *Virginia Cooperative Extension, 442*(110), 1-5. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/253089971_Ammonia_Emissions_and_Animal_Agriculture

Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Faluccci, A., Tempio, G. (2013). Tackling climate change through livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Retrieved from <http://www.fao.org/3/i3437e/i3437e.pdf>

Graywolf. (2014). IAQ air quality meter. Retrieved from <http://www.wolfsense.com/pdf/GrayWolf-Indoor-Air-Quality-IAQ-Meter-Brochure-lo.pdf>.

Goos, P., & Meintrup, D. (2015). *Statistics with Jmp: graphs, descriptive statistics and probability*. Chichester, West Sussex: John Wiley et Sons Inc.

Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (2016). *Chemistry of the elements*. Amsterdam: Elsevier-Butterworth Heinemann.

Guimarães, D. D.; Amaral, G. F.; Maia, G. B. da S.; Lemos, M. L. F.; Ito, M.; Custodio, S. (2017). Suinocultura: estrutura da cadeia produtiva, panorama do setor no Brasil e no mundo e o apoio do BNDES. *Banco Nacional d Desenvolvimento Econômico e Social*, 45, 85-136. Retrieved from <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/11794>

Guth, U., Vonau, W., & Zosel, J. (2009). Recent developments in electrochemical sensor application and technology—a review. *Measurement Science and Technology*, 20(4), 042002. doi: 10.1088/0957-0233/20/4/042002

Guo, J., Xing, H., Chen, M., Wang, W., Zhang, H., & Xu, S. (2019). H₂S inhalation-induced energy metabolism disturbance is involved in LPS mediated hepatocyte apoptosis through mitochondrial pathway. *Science of The Total Environment*, 663, 380–386. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.360

Haouzi, P., Chenuel, B., & Sonobe, T. (2014). High-dose hydroxocobalamin administered after H₂S exposure counteracts sulfide-poisoning-induced cardiac depression in sheep. *Clinical Toxicology*, 53(1), 28–36. doi: 10.3109/15563650.2014.990976

Harrison, R. M., Hester, R. E., Querol, X., Vilardell, M. G., Donahue, N., Chow, J., ... Kelly, F. (2016). Airborne Particulate Matter: Sources, Atmospheric Processes and Health. *Environmental Science and Technology Airborne Particulate Matter*, 1, 1–406. doi: 10.1039/9781782626589-fp001

Hartung, J.; Schulz, J. (2007). Risks caused by bio-aerosols in poultry houses. *Proceedings of the 9th International Poultry Conference—poultry in the 21st century—Avian influenza and beyond*, Bangkok, Thailand. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from http://www.fao.org/AG/againfo/home/events/bangkok2007/docs/part2/2_10.pdf

Haus, J. (2010). *Optical sensors: Basics and applications*. Weinheim: Wiley-VCH.

Hertzog, P. E., Swart, A.J. (2015). A customizable energy monitoring system for renewable energy systems. 24th Southern African Universities Power Engineering Conference, Johannesburg, South Africa. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Arthur_Swart/publication/271965695_A_customizable_energy_monitoring_system_for_renewable_energy_systems/links/55e7e52208ae21d099c15a9b/A-customizable-energy-monitoring-system-for-renewable-energy-systems.pdf

- Hess-Kosa, K. (2016). *Indoor Air Quality: the Latest Sampling and Analytical Methods, Second Edition*. CRC Press.
- Heyden, C. V., Demeyer, P., & Volcke, E. I. (2015). Mitigating emissions from pig and poultry housing facilities through air scrubbers and biofilters: State-of-the-art and perspectives. *Biosystems Engineering*, *134*, 74-93. doi:10.1016/j.biosystemseng.2015.04.002
- Hinds, W. (1999). *Aerosol technology: properties, behavior and measurement of airborne particles* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Hinz, T.; Rönnpapel, B.; & Linke, S. (2002). Particulate matter in and from agriculture. *Proceedings of the Conference organized by the Institut für Technologie und Biosystemtechnik, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)*. Braunschweig, Germany. Retrieved from https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/zi026867.pdf
- Hodgkinson, J., & Tatam, R. P. (2013). Optical gas sensing: A review. *Measurement Science and Technology*, *24*(1), 1-59. doi:10.1088/0957-0233/24/1/012004
- Horan, N. J., Yaser, A. Z., & Wid, N. (2018). *Anaerobic digestion processes: Applications and effluent treatment*. Singapore: Springer.
- Hyline. (1982). *Management and Disease Control*. West Des Moines, Iowa, USA. Retrieved from <https://www.hyline.com/asp/redbook/redbook.aspx?s=2&p=29>
- IACUC. (2016). *Guidelines for CO₂ euthanasia of poultry and young swine*. IACUC: Institutional Animal Care and Use Committee. Retrieved from <https://research.illinois.edu/files/upload/co2-euthanasia-of-swine-and-poultry.pdf>
- ILO. (2010). *Meeting of Experts to adopt a Code of Practice on Safety and Health in Agriculture*. (pp. 1–203). Geneva: International Labour Office. Retrieved from https://www.ilo.org/gb/GBSessions/WCMS_151387/lang--en/index.htm
- INE. (2010). *Contas económicas da agricultura: 1980-2009*. Retrieved from https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOE_Spub_boui=101153179&PUBLICACOEStema=55505&PUBLICACOESmodo=2
- INE. (2017). *Anuário Estatístico de Portugal*. Retrieved from https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_publicacoes&PUBLICACOE_Spub_boui=320469310&PUBLICACOEStema=55505&PUBLICACOESmodo=2
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Disponível em: https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf
- Jones, D. D., Friday, W. H., DeForest, S. S. (2015). *Environmental control for confinement livestock housing* (pp. 9-24). Indiana, USA: Historical Documents of the Purdue Cooperative Extension Service. Retrieved from <http://docs.lib.purdue.edu/agext/1083>

- Kelleher, B., Leahy, J., Henihan, A., Odwyer, T., Sutton, D., & Leahy, M. (2002). Advances in poultry litter disposal technology – a review. *Bioresource Technology*, 83(1), 27–36. doi: 10.1016/s0960-8524(01)00133-x
- Koerkamp, P. G., Metz, J., Uenk, G., Phillips, V., Holden, M., Sneath, R., ... Wathes, C. (1998). Concentrations and Emissions of Ammonia in Livestock Buildings in Northern Europe. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 70(1), 79–95. doi: 10.1006/jaer.1998.0275
- Korotcenkov, G. (2005). Gas response control through structural and chemical modification of metal oxide films: state of the art and approaches. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 107(1), 209–232. doi: 10.1016/j.snb.2004.10.006
- Korotcenkov, G. (2013). Handbook of Gas Sensor Materials. *Integrated Analytical Systems*. doi: 10.1007/978-1-4614-7165-3
- Kularatna, N., & Sudantha, B. H. (2008). An Environmental Air Pollution Monitoring System Based on the IEEE 1451 Standard for Low Cost Requirements. *IEEE Sensors Journal*, 8(4), 415–422. doi: 10.1109/jsen.2008.917477
- Kwon, J., Ahn, G., Kim, G., Kim, J., & Kim, H. (2009). A study on NDIR-based CO₂ sensor to apply remote air quality monitoring system. *2009 ICCAS-SICE*. Fukuoka, Japan, pp. 1683-1687.
- Lammers, P. J.; Stender, D. R.; & Honeyman, M. S. (2007). Environmental needs of the pig. *Environment*, 1-6. Retrieved from <https://www.ipic.iastate.edu/publications/210.EnvironmentalPigNeeds.pdf>
- Leip, A., Billen, G., Garnier, J., Grizzetti, B., Lassaletta, L., Reis, S., ... Westhoek, H. (2015). Impacts of European livestock production: Nitrogen, sulphur, phosphorus and greenhouse gas emissions, land-use, water eutrophication and biodiversity. *Environmental Research Letters*, 10(11), 115004th ser., 1-13. doi:10.1088/1748-9326/10/11/115004
- Lesschen, J., Berg, M. V., Westhoek, H., Witzke, H., & Oenema, O. (2011). Greenhouse gas emission profiles of European livestock sectors. *Animal Feed Science and Technology*, 166-167, 16-28. doi:10.1016/j.anifeedsci.2011.04.058
- Li, Y., Thai, M. T., & Wu, W. (2008). *Wireless sensor networks and applications*. New York: Springer.
- Liao, C-C., Chen, F-R., Kai, J-J. (2006). WO_{3-x} nanowires based electrochromic devices. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(7-8), 1147-1155. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.07.009>
- Lim, E., Mbowe, O., Lee, A. S. W., & Davis, J. (2016). Effect of environmental exposure to hydrogen sulfide on central nervous system and respiratory function: a systematic review of human studies. *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 22(1), 80–90. doi: 10.1080/10773525.2016.1145881

- Liu, Z., Powers, W., & Liu, H. (2013). Greenhouse gas emissions from swine operations: Evaluation of the Intergovernmental Panel on Climate Change approaches through meta-analysis1. *Journal of Animal Science*, 91(8), 4017-4032. doi:10.2527/jas.2012-6147
- Liu, Z., Powers, W., Murphy, J., & Maghirang, R. (2014). Ammonia and hydrogen sulfide emissions from swine production facilities in North America: A meta-analysis1. *Journal of Animal Science*, 92(4), 1656–1665. doi: 10.2527/jas.2013-7160
- Liu, K., Cao, Y., Wang, G., Zhang, W., Chen, W., & Gao, X. (2018). A novel photoacoustic spectroscopy gas sensor using a low cost polyvinylidene fluoride film. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 277, 571-575. doi:10.1016/j.snb.2018.09.037
- Louis, L. (2016). Working principle of Arduino and using it as a tool for study and research. *International Journal of Control, Automation, Communication and Systems*, 1(2), 21–29. doi: 10.5121/ijcacs.2016.1203
- MacLeod, M.; Gerber, P.; Mottet, A.; Tempio, G.; Falcucci, A.; Opio, C.; Vellinga, T.; Henderson, B. & Steinfeld, H. (2013). Greenhouse gas emissions from pig and chicken supply chains: A global life cycle assessment. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome. Retrieved from <http://www.fao.org/3/i3460e/i3460e.pdf>
- Manap, H.; Muda, R.; O’Keeffe, S.; Lewis, E. (2009). Ammonia sensing and cross sensitivity evaluation with atmosphere gases using optical fiber sensor. *Procedia Chemistry*. 1(1) 959-962. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.proche.2009.07.239>
- Marques, G., & Pitarma, R. (2019). Indoor Air Quality Monitoring for Enhanced Healthy Buildings. *Indoor Environmental Quality*, 1–18. doi: 10.5772/intechopen.81478
- Masclaux, F. G., Sakwinska, O., Charrière, N., Semaani, E., & Oppliger, A. (2013). Concentration of Airborne Staphylococcus aureus (MRSA and MSSA), Total Bacteria, and Endotoxins in Pig Farms. *The Annals of Occupational Hygiene*, 57(5), 550–557. doi: 10.1093/annhyg/mes098
- Mead, G. C. (2004). Poultry Meat Processing and Quality. *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition*. <https://doi.org/10.1533/9781855739031.1>
- Melse, R. W., & Hol, J. M. (2012). Measures to reduce fine dust emission from poultry houses: Biofiltration of exhaust air of a manure drying system at a barn for laying hens (in Dutch). Report No. 498. Livestock Research, Wageningen University & Research, Netherlands. Retrieved from: <http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/211579>
- Miele, M; Giroto, A. F. (2005). Análise da situação atual e perspectiva da avicultura de corte. *Revista Ave World*. 3(14), 18-22. Retrieved from https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/analise_situacao_atual_perspectivas_avicultura_de_corte_000fzpf3ufi02wx5ok0cpoo6a551x8he.pdf
- Miranda, V. M.; Pereira, E. S.; Silva, J. F.; Ferreira, K. (2009). A Evolução Econômica no Brasil. *Administradores.com*. Retrieved from

<http://www.administradores.com.br/artigos/economia-e-financas/a-evolucao-economica-no-brasil/34817/>

Mitre y el Campo. (2019). Consejos de ventilación túnel em instalaciones avícolas. Retrieved November 6, 2019 from <https://mitreyelcampo.cienradios.com/consejos-de-ventilacion-tunel-en-instalaciones-avicolas/>

Monk, S. (2013). Programação com Arduino: Começando com Sketches. Bookman: Porto Alegre.

Moreno-Rangel, A., Sharpe, T., Musau, F., & McGill, G. (2018). Field evaluation of a low-cost indoor air quality monitor to quantify exposure to pollutants in residential environments. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 7(1), 373–388. doi: 10.5194/jsss-7-373-2018

MSA Safety Incorporated. (2013). Carbon monoxide cross-sensitivities: Alcohols, VOCs & Hydrogen. Retrieved from http://s7d9.scene7.com/is/content/minesafetyappliances/0800-81-MC_CO_Sensor_Influence_of_Alcohols_VOCs_Hydrogen

Mühlfeld, C., Rothen-Rutishauser, B., Blank, F., Vanhecke, D., Ochs, M., & Gehr, P. (2008). Interactions of nanoparticles with pulmonary structures and cellular responses. *AMJ Lung Cellular and Molecular Physiology*, 294, L817–L829. Retrieved from <https://www.physiology.org/doi/full/10.1152/ajplung.00442.2007>

NCI. (2019). Terms & Properties of Ammonia. Retrieved from https://ncit.nci.nih.gov/ncitbrowser/ConceptReport.jsp?dictionary=NCI_Thesaurus&version=19.08d&ns=ncit&code=C76698&key=923829251&b=1&n=null

NFACC. (2016). *Code of Practice for the Care and Handling of Hatching Eggs, Breeders, Chicken and Turkeys* (1st ed.). Canada: National Farm Animal Care Council. Retrieved from https://www.nfacc.ca/pdfs/codes/poultry_code_EN.pdf

Ni, J.-Q., Heber, A. J., & Lim, T.-T. (2018). Ammonia and hydrogen sulfide in swine production. *Air Quality and Livestock Farming*, 29–47. doi: 10.1201/9781315738338-3

Ni, J.-Q., Liu, S., Diehl, C. A., Lim, T.-T., Bogan, B. W., Chen, L., ... Heber, A. J. (2017). Emission factors and characteristics of ammonia, hydrogen sulfide, carbon dioxide, and particulate matter at two high-rise layer hen houses. *Atmospheric Environment*, 154, 260–273. doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.01.050

Nieuwenhoven, A.-M. N.-V., Knap, P., & Avendaño, S. (2013). The role of sustainable commercial pig and poultry breeding for food security. *Animal Frontiers*, 3(1), 52–57. doi: 10.2527/af.2013-0008

Nova Fitness Co. Ltd. (2015). Laser PM2.5 Sensor specification. Retrieved from <https://pan.baidu.com/s/1skCk8AL>

Ohira, S.-I.; Toda, K.; Ikebe, S.-I.; Dasgupta, P.K. (2002). Hybrid microfabricated device for field measurement of atmospheric sulphur dioxide. *Analytical Chemistry*, 74 (2002), 5890-5896. <https://doi.org/10.1021/ac025940b>

Oloyo, A., & Ojerinde, A. (2019). Poultry Housing and Management. *Poultry [Working Title]*. doi: 10.5772/intechopen.83811

Onuska, J. (2018). Understanding cross sensitivities can help to keep workers safer. Industrial Scientific: The gas detection people. Retrieved from <http://www.indsci.com/the-monitor-blog/understanding-cross-sensitivities/>

OSHA. (2019). OSHA Annotated Table Z-1(a). Retrieved October 1, 2019, from <https://www.osha.gov/dsg/annotated-pels/tablez-1.html>.

Paliwal, A.; Sharma, A.; Tomar, M.; & Gupta, V. (2017). Carbon monoxide (CO) optical gas sensor based on ZnO thin films. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 250, 679-685. Disponível em: doi:10.1016/j.snb.2017.05.064

Parlamento Europeu e Conselho 2008/50/EC relativa à qualidade do ar ambiente e um ar mais limpo na Europa. (2008). *Jornal Oficial da União Europeia*, L152/1, p.44. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A32008L0050>

Pena, R. F. A. (2019). Agropecuária no Brasil: principais produtos. Retrieved from <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/agropecuaria-no-brasil-principais-produtos.htm>

Pewatron. (2016a). Electrochemical 3 Electrode Sensor: EC4-NH3-100 Ammonia. Retrieved from https://www.pewatron.com/fileadmin/products/datasheets/188/EC4-NH3-1_1620-21570-0019-E-0217.pdf

Pewatron. (2016b). Easyboard. Retrieved from https://www.pewatron.com/fileadmin/products/datasheets/188/03-EB_1620-21570-0001-E-0418.pdf

Plümpe, M., Beckers, M., Mecnika, V., Seide, G., Gries, T., & Bunge, C. (2017). Applications of polymer-optical fibres in sensor technology, lighting and further applications. *Polymer Optical Fibres*, 311-335. doi:10.1016/b978-0-08-100039-7.00009-9

Ransbeeck, N. V., Langenhove, H. V., & Demeyer, P. (2013). Indoor concentrations and emissions factors of particulate matter, ammonia and greenhouse gases for pig fattening facilities. *Biosystems Engineering*, 116(4), 518-528. doi:10.1016/j.biosystemseng.2013.10.010

Reck, Â. B. & Schultz, G. (2016). Aplicação da Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão no Relacionamento Interorganizacional na Cadeia da Avicultura de Corte. *Revista de Economia Sociologia Rural*, 54(4), 709-728. doi:10.1590/1234-56781806-94790540407

Ropkins, K., Colville, R. N. (2000). *Critical Review of Air Quality Monitoring Technologies for Urban Traffic Management and Control (UTMC) Systems*. Urban Traffic Management & Control (UK).

Rosa, P. (2013). Granjas Brasil x Estados Unidos. *AviSite*, 77. Retrieved from <https://www.avisite.com.br/revista/materias/granjasbrasilxeua.html>

Saksrithai, K.; & King, A. J. (2018). Controlling hydrogen sulfide emissions during poultry productions. *Journal of Animal Research and Nutrition*, 3(1). doi: 10.21767/2572-5459.100040

Sampaio, C. A. P., Nääs, I. A., & Nader, A. S. (2005). Gases e ruídos em edifícios para suínos: aplicações das normas NR-15, CIGR e ACGIH. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, 25(1), 10–18. Retrieved from <http://www.scielo.br/pdf/eagri/v25n1/24866.pdf>

Santos, F., Oliveira, P., Minafra, C., Duarte, E., Almeida, R., & Silva, J. (2012). Sistemas alternativos de produção para frangos de corte. *Publicações Em Medicina Veterinária e Zootecnia*, 6(6). Retrieved from <http://www.pubvet.com.br/uploads/cacbbd2d68e5c30be585c635958d9cab.pdf>

Schauberger, G., Piringer, M., Mikovits, C., Zollitsch, W., Hörtenhuber, S. J., Baumgartner, J., ... Schönhart, M. (2018). Impact of global warming on the odour and ammonia emissions of livestock buildings used for fattening pigs. *Biosystems Engineering*, 175, 106–114. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2018.09.001

SCOEL. (2007). *Recommendation for Hydrogen Sulfide*. (pp. 1–17). European Union: Scientific Committee on Occupational Exposure Limits. Retrieved from <http://ec.europa.eu/social/BlobServlet?docId=3864&langId=en>

Seedorf, J. H., Hartung, J. O., Schroder, M. H. M., Linkert, K. W. G., Pedersen, S. H., Takai, H. R., ... Wathes, C. (1998). Temperature and Moisture Conditions in Livestock Buildings in Northern Europe. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 70, 49–57. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.471.8107&rep=rep1&type=pdf>

Sennequier, P. (2017). *Signal conditioning for electrochemical sensors* (pp. 1–27). Application Note AN4348. Retrieved from https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/b7/3a/2b/63/6c/10/46/27/DM00093722.pdf/files/DM00093722.pdf/jcr:content/translations/en.DM00093722.pdf

Shen, D., Wu, S., Li, Z., Tang, Q., Dai, P., Li, Y., & Li, C. (2019). Distribution and physicochemical properties of particulate matter in swine confinement barns. *Environmental Pollution*, 250, 746-753. doi:10.1016/j.envpol.2019.04.086

Silicon Labs (2016). I2C Humidity and Temperature Sensor. Retrieved from <https://cdn.sparkfun.com/assets/b/1/b/8/5/Si7021-A20.pdf>

Silva, L. F. (2013). *Influência da ambiência sobre o desempenho zootécnico de frangos de corte* (Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil) Retrieved from: <http://www.agrarias.ufpr.br/portal/zootecnia/wp-content/uploads/sites/13/2016/10/18.pdf>

Silva, Y. L. D., Rodrigues, P. B., Freitas, R. T. F. D., Bertechini, A. G., Fialho, E. T., Fassani, É. J., & Pereira, C. R. (2006). Redução de proteína e fósforo em rações com fitase para frangos de corte no período de 1 a 21 dias de idade: desempenho e teores de minerais na cama. *Revista Brasileira De Zootecnia*, 35(3), 840–848. doi: 10.1590/s1516-35982006000300029

Smith, R., & Smith, K. E. (2018). Wide range of Hygrometers: DHT22, AM2302, AM2320, AM2321, SHT71, HTU21D, Si7021, BME280. Retrieved November 1, 2019, from http://www.kandrsmith.org/RJS/Misc/Hygrometers/calib_many.html.

Sommer, S.G.; Jensen, L.S.; Christensen, M.L.; Schmidt, T. (2013). *Animal manure: recycling treatment, and management*. Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, Inc.

Sparkfun. (2019a). SparkFun Logic Level Converter – Bi-directional. Retrieved from <https://www.sparkfun.com/products/12009>

Sparkfun. (2019b). Si7021 Humidity and Temperature Sensor Hookup Guide. Retrieved from https://learn.sparkfun.com/tutorials/si7021-humidity-and-temperature-sensor-hookup-guide?_ga=2.81197079.1894757308.1550783507-1014105781.1547813013

SPEC Sensors. (2016). SPEC Sensor Operation Overview. Retrieved from <http://www.spec-sensors.com/wp-content/uploads/2016/05/SPEC-Sensor-Operation-Overview.pdf>

SPEC Sensors. (2017). Digital Gas Sensor – Hydrogen Sulfide. Retrieved from <https://www.spec-sensors.com/wp-content/uploads/2017/01/DGS-H2S-968-036.pdf>

Tham, K. W. (2016). Indoor air quality and its effects on humans—A review of challenges and developments in the last 30 years. *Energy and Buildings*, 130, 637–650. doi: 10.1016/j.enbuild.2016.08.071

Thermo Scientific. (2004). Model ADR-1200S ambient particulate monitoring system: Instruction Manual. Massachusetts, USA Retrieved from http://www.equipcoservices.com/pdf/manuals/thermo_adr1200s.pdf

TSI. (2014). Model 3330 optical particle sizer spectrometer: Operation and service manual. Minnesota, USA. Retrieved from https://www.wmo-gaw-wcc-aerosol-physics.org/files/ops_3330.pdf

TSI. (2019). Optical particle sizer 3330. Retrieve November 6, 2019 from <https://tsi.com/products/particle-sizers/particle-size-spectrometers/optical-particle-sizer-3330/>

Tullo, E., Finzi, A., Guarino, M. (2018). Review: Environmental impact of livestock farming and Precision Livestock Farming as a mitigation strategy. *Science of the Total Environment*. 650 (2019), 2751–2760. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.018>

United Nations. (1998). Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Ale-Aust-Aus-Bel-Bul-Can-Cro-Din-Esp-Est-Fin-Fra-Gre-Hol-Hun-

Irl-Ita-Jap-Lat-Lie-Lit-Lux-Mon-Nor-Pol-Por-Rep-Rom-Rus-Sue-Sui-Svk-Slv-Ucr-Ukg.-EUA. December 11, 1997. Retrieved from <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2017). World Population Prospects: The 2017 Revision. Retrieved from <https://population.un.org/wpp/DataQuery/>

United States Department of Agriculture (2018). Livestock and poultry: World markets and trade. United States Department of Agriculture (USDA) Web site. Retrieved March 12, 2019, from https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/livestock_poultry.pdf

United States Environmental Protection Agency. (2008). IAQ building education and assessment model. Retrieved April 20, 2019, from https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-08/documents/text_modules_fundamentals.pdf

Universidade da Georgia. (2012). Poultry Housing Tips. *College of Agricultural and Environmental Sciences*. 24(2), 1-3. Retrieved from <https://www.poultryventilation.com/system/tdf/vol24n2.pdf?file=1&type=node&id=4925&force=>

Vargas-Bernal, R. (2017). Modeling, Design, and Applications of the Gas Sensors Based on Graphene and Carbon Nanotubes. *Handbook of Research on Nanoelectronic Sensor Modeling and Applications Advances in Computer and Electrical Engineering*, 181-207. doi:10.4018/978-1-5225-0736-9.ch007

Veloni, M. L.; Prado, P. L.; Arssuffi, B. M.; Ballesteros, M. C. M.; Oliveira, M. G.; Abreu, P. B.; & Oliveira, L. G. (2015). Applied animal welfare in the creations of swine and their implications for health of livestock. *Revista Científica Eletrônica de Medicina Veterinária*. 21(1), 1-21.

Vries, M. D.; & Boer, I. D. (2010). Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. *Livestock Science*, 128(1-3), 1-11. doi:10.1016/j.livsci.2009.11.007

Wang, Y., Lin, H., Hu, B. (2019). Electrochemical removal of hydrogen sulfide from swine manure. *Chemical Engineering Journal*. 356, 210-218. 10.1016/j.cej.2018.08.171

WHO. (2006). *Development of WHO Guidelines for Indoor Air Quality* (pp. 1-27). Bonn, Germany: World Health Organization. Retrieved from http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0007/78613/AIQIAQ_mtgrep_Bonn_Oct06.pdf?ua=1

WHO. (2013). *Health effects of particulate matter. Health effects of particulate matter* (pp. 1–15). Copenhagen, Denmark: World Health Organization. Retrieved from http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/189051/Health-effects-of-particulate-matter-final-Eng.pdf

Williams, D. E. (1999). Semiconducting oxides as gas-sensitive resistors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 57(1-3), 1–16. doi: 10.1016/s0925-4005(99)00133-1

- Winkel, A. (2016). Particulate matter emission from livestock houses: measurement methods, emission levels and abatement systems (Doctorial dissertation). *Biosystems Engineering*, 150, 104-122. doi:10.1016/j.biosystemseng.2016.07.014
- Winkel, A., Mosquera, J., Aarnink, A. J., Koerkamp, P. W., & Ogink, N. W. (2016). Evaluation of oil spraying systems and air ionisation systems for abatement of particulate matter emission in commercial poultry houses. <https://edepot.wur.nl/390454>
- Wlazło, Ł., Nowakowicz-Dębek, B., Kapica, J., Kwiecień, M., & Pawlak, H. (2016). Removal of ammonia from poultry manure by aluminosilicates. *Journal of Environmental Management*, 183, 722–725. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.09.028
- WMO. (2018). *Low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition: overview of topic and future applications* (pp. 1–68). Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization. Retrieved from https://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/documents/Low_cost_sensors_post_review_final.pdf
- Xing, H., Luan, S., Sun, Y., Sa, R., & Zhang, H. (2016). Effects of ammonia exposure on carcass traits and fatty acid composition of broiler meat. *Animal Nutrition*, 2(4), 282–287. doi: 10.1016/j.aninu.2016.07.006
- Yamazoe, N., & Shimanoe, K. (2013). Fundamentals of semiconductor gas sensors. *Semiconductor Gas Sensors*, 3–34. doi: 10.1533/9780857098665.1.3
- Yunusa, Z.; Hamidon, M. N.; Kaiser, A.; Awang, Z. (2014). Gas sensors: A review. *Sensors & Transducers*, 168(4), 61-75. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/285988329_Gas_Sensors_A_Review
- Zhang, F., Li, M., Zhang, H., & Chen, L. (2018). A method for standardizing the manufacturing process of integrated temperature and humidity sensor based on fiber Bragg grating. *Optical Fiber Technology*, 46, 275–281. doi: 10.1016/j.yofte.2018.11.009
- Zheng, S., Jin, X., Chen, M., Shi, Q., Zhang, H., & Xu, S. (2019). Hydrogen sulfide exposure induces jejunum injury via CYP450s/ROS pathway in broilers. *Chemosphere*, 214(2019), 25-34. doi:10.1016/j.chemosphere.2018.09.002
- Ziaian, D., Rostalski, P., Hengstenberg, A., & Zimmermann, S. (2015). Reducing system response time and noise of electrochemical gas sensors - discussed for Propofol monitoring in breathing gas. In *IARIA*. Paper presented at the 6th International Conference of Sensor Device Technologies and Applications (Germany), Hamburg (pp. 85–90). Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/e127/1ef8b1278552cd6aec4a30339c352eb55cf6.pdf>

ANEXO I

Código desenvolvido para o funcionamento do sistema.

```
/* *****  
*                               Bibliotecas adicionadas                               *  
*****  
/
```

```
#include <SoftwareSerial.h> //Biblioteca para comunicação para múltiplos  
seriais  
#include "SparkFun_Si7021_Breakout_Library.h" //Biblioteca módulo de  
temperatura/humidade Si7021  
#include <Wire.h> //Biblioteca módulo de temperatura/humidade Si7021  
#include <LiquidCrystal.h> //Biblioteca módulo LCD  
#include <SparkFunCCS811.h> //Biblioteca módulo da qualidade do ar (CO2  
e tVOC) CCS811  
#include <SDS011-select-serial.h> //Biblioteca módulo de detecção de  
partículas (SDS011)  
#include <SD.h> //Biblioteca módulo micro SD  
#include <Adafruit_FONA.h> //Biblioteca para o módulo SIM800L
```

```
/* *****  
*                               Definições de Variáveis                               *  
*****  
/
```

```
#define mysensor_serial_no 100118020216  
#define Serial2_RX_BUFFER_SIZE 256  
#define Serial2_TX_BUFFER_SIZE 256  
#define command_delay 500  
#define start_delay 2000  
#define FONA_RST 3  
#define SIM800ss Serial3
```

```
int V0 = 3; //Permite o controle do contraste do LCD  
int RS = 4; //Permite ver as instruções no display do LCD  
int E = 5; //Habilita a tela  
int D4 = 6; //Pino de comunicação do LCD (carregam dados de 8bits que é  
enviado para a tela (no LCD, do D0 ao D7)  
int D5 = 7; //Pino de comunicação do LCD  
int D6 = 8; //Pino de comunicação do LCD  
int D7 = 9; //Pino de comunicação do LCD
```

```

int EC4NH3100 = A0; //Definição da variável da entrada analógica do sensor
EC4-NH3
int NH3 = 0; //Definição da variável para guardar o valor lido em bits do
sensor EC4-NH3
int error; //Definição da variável de erro para o sensor SDS011
int valMultiplier = 1; //Definição do multiplicador padrão 1 do sensor K30
int pinCS = 53; //Definição do pino do micro SD
int net_status; //Verifica o status da internet do módulo SIM800L
int16_t length;

float HR = 0; //Definição da variável para a Humidade
float T = 0; //Definição da variável para a Temperatura em Celsius
float p10,p25; //Definição da variável de material particulado PM10 e PM2,5
float valNH3 = 0; //Definição da variável para converter os valores binários em
tensão (V) e concentração (ppm)

long H2S; //Definição da variável do H2S

String SensorSerialNo; //String do sensor DGS-H2S
String dataString = ""; //dataString sensor DGS-H2S
String responseString = ""; //responseString sensor DGS-H2S
String response2 = ""; //String do módulo SIM800L

boolean dataStringComplete = 0; //dataStringComplete H2S
boolean gprs_on = false;
boolean tcp_on = false;

char inChar; //H2S
char http_cmd[200];
char url_string[] =
"api.thingspeak.com/update?api_key=1T5P8L03KO16SIMK&field1="; //URL da
nuvem ThingSpeak
char buffer[512];
char HR_string[20];
char T_string[20];
char p10_string[20];
char p25_string[20];
char H2S_string[20];
char valNH3_string[20];
char valCO2_string[20];

byte readCO2[] = {0xFE, 0X44, 0X00, 0X08, 0X02, 0X9F, 0X25}; //Pacote de
comandos para leitura do CO2 do módulo K-30

```

```

byte response[] = {0,0,0,0,0,0};           //Criação de uma matriz para
armazenamento da resposta do K-30

uint16_t statuscode;

Weather sensor; //Criar instância do sensor de temperatura e umidade HTU21D
ou SI7021 e MPL3115A2 barrometric sensor
LiquidCrystal lcd (RS, E, D4, D5, D6, D7); //Definição dos pinos do
módulo de LCD
SoftwareSerial K_30_Serial(12,13);        //Definição dos pinos do módulo
K-30 (pin12 para RX e pin13 para DX)

Adafruit_FONA SIM800 = Adafruit_FONA(FONA_RST);
SDS011 my_sds(Serial1); //Definição da porta de comunicação do sensor
SDS011
File amostragem; //Definição da variável amostragem

/* *****
*                               Setup                               *
***** */

void setup(){

while (!Serial);
Serial3.begin(9600);
Serial.begin(9600); // Abre a porta Serial para comunicação com o
computador
Serial1.begin(9600); // Abre uma porta serial que inicializa o SDS
Serial2.begin(9600); // Abre a porta Serial para comunicação com o sensor
de H2S
Serial2.setTimeout(1500); // Normalmente, os dados são retornados dentro de
um segundo

K_30_Serial.begin(9600); // Abre uma porta serial virtual com uma taxa de
transmissão 9600 para o módulo K30

lcd.print("Iniciando..."); // Imprime no display do LCD
delay(500); // Espera 0,5 s até a mensagem no visor sumir

dataString.reserve(80); // Reserva de 80 bytes para o dataString
responseString.reserve(150);

```

```

delay(500);           // Espera pelo sensor DGS-H2S
flush_Serial2();
SPEC_reset();

SPEC_dump_EEPROM(); // EEPROM dump
Serial.println(" ");
sensor.begin();      //Inicializa os sensores I2C e execute ping
lcd.begin(16,2);     //Inicializa o display LCD
analogWrite(V0, 50); //Ajuste do contraste

pinMode(pinCS, OUTPUT);
digitalWrite(pinCS, HIGH);
while (!SD.begin(pinCS)) {
Serial.println("Falha na comunicação ou não existe SD");
}

Serial.println("SD Iniciada.");

amostragem = SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE);

if (amostragem) {
Serial.println("Escrevendo Informação...");
amostragem.println("Escrevendo Informação...");
amostragem.print("Humidade(%) ");
amostragem.print("Temperatura(°C) ");
amostragem.print("CO2(ppm) ");
amostragem.print("H2S(ppb) ");
amostragem.print("PM2.5(ug/m3) ");
amostragem.print("PM10(ug/m3) ");
amostragem.println("NH3(ppm) ");
amostragem.close();}
else {
Serial.println("Erro ao abrir.csv");}

SIM800ss.begin(4800); //Se você está usando o software serial

if (!SIM800.begin(SIM800ss)) {
Serial.println("Não foi possível encontrar SIM800L");
while (1);
}

Serial.println("SIM800L está OK");
delay(1000);

```

```

Serial.println("Esperando para ser registrado na rede...");
net_status = SIM800.getNetworkStatus();
while(net_status != 1){
  net_status = SIM800.getNetworkStatus();
  delay(2000);
}
Serial.println("Registrado na rede doméstica!");
Serial.print("Ligando GPRS... ");
delay(2000);
while(!gprs_on){
  if(!SIM800.enableGPRS(true)){
    Serial.println("Falha ao ativar o GPRS");
    Serial.println("Tentando novamente... ");
    delay(2000);
    gprs_on = false;
  }else{
    Serial.println("O GPRS agora está ligado");
    delay(2000);
    gprs_on = true;
  }
}
}
}

/* *****
*
*                               Código
*
* ***** */

void loop()
{
  delay(2000); //Espera de 2s para começar a informar os valores detectados
              pelos sensores
  SPEC_Data_read(); // Faça uma leitura a cada x segundos
  SPEC_parse_data();
  HR = sensor.getRH(); //Medirá Humidade Relativa do HTU21D ou Si7021
  T = sensor.getTemp(); //Medirá a Temperatura do HTU21D ou Si7021
  sendRequest(readCO2); //Leitura do CO2 no ar (K30)
  unsigned long valCO2 = getValue(response); //Resposta (K30)
  while (valCO2>=10001) {
    sendRequest(readCO2);
    valCO2 = getValue(response);
  }
}

```

```

}
error = my_sds.read(&p25,&p10); // Leitura das partículas no ar (SDS011)
if (! error)
NH3 = 0.8*NH3+0.2*analogRead(EC4NH3100); // Leitura do sensor NH3 (0 -
1023) com um filtro para ruídos
valNH3 = 0.00488*NH3; // conversão dos valores em bits para tensão
(sensor NH3)
valNH3 = 20.84*(valNH3-0.002); // conversão dos valores em tensão para
concentração (sensor NH3)
delay(5000);

/* *****
* Impressão dos resultados no monitor Serial *
***** */

Serial.print("Humidade:");
Serial.print(HR);
Serial.print(" %\t");
Serial.print("Temperatura: ");
Serial.print(T);
Serial.print(" °C\t ");
Serial.print("CO2:");
Serial.print(valCO2);
Serial.print(" ppm\t ");
Serial.print("H2S:");
Serial.print(H2S);
Serial.print(" ppb\t ");
Serial.print("PM(2,5):");
Serial.print(p25);
Serial.print(" ug/m3\t ");
Serial.print("PM(10):");
Serial.print(p10);
Serial.print(" ug/m3\t ");
Serial.print("NH3:");
Serial.print(valNH3);
Serial.println(" ppm");

delay(3000);

```

```
/* *****  
*                               Impressão dos resultados no display LCD                               *  
***** */
```

```
lcd.clear();  
lcd.setCursor(0,0);  
lcd.print("H:");  
lcd.print(HR);  
lcd.print("%");  
lcd.setCursor(0,1);  
lcd.print("T:");  
lcd.print(T);  
lcd.print(char(223));  
lcd.print("C");
```

```
delay(3000);
```

```
lcd.clear();  
lcd.setCursor(0,0);  
lcd.print("CO2:");  
lcd.print(valCO2);  
lcd.print(" ppm");  
lcd.setCursor(0,1);  
lcd.print("H2S:");  
lcd.print(H2S);  
lcd.print(" ppb");
```

```
delay(3000);
```

```
lcd.clear();  
lcd.setCursor(0,0);  
lcd.print("PM25:");  
lcd.print(p25);  
lcd.print(" ug/m3");  
lcd.setCursor(0,1);  
lcd.print("PM10:");  
lcd.print(p10);  
lcd.print(" ug/m3");
```

```
delay(3000);
```

```
lcd.clear();
```

```

lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("NH3:");
lcd.print(valNH3);
lcd.print(" ppm");

/* *****
*                               *
*      Impressão dos resultados no microSD card      *
* ***** */

amostragem = SD.open("datalog.csv", FILE_WRITE);

if (amostragem) {

    amostragem.print(HR);
    amostragem.print(" ");
    amostragem.print(T);
    amostragem.print(" ");
    amostragem.print(valCO2);
    amostragem.print(" ");
    amostragem.print(H2S);
    amostragem.print(" ");
    amostragem.print(p25);
    amostragem.print(" ");
    amostragem.print(p10);
    amostragem.print(" ");
    amostragem.println(valNH3);
    amostragem.close();
}
else {
    delay(1000); }

/* *****
*                               *
*      Envio dos dados para o ThingSpeak      *
* ***** */

dtostrf(HR, 5, 2, HR_string);
dtostrf(T, 5, 2, T_string);
dtostrf(p10, 7, 2, p10_string);
dtostrf(p25, 7, 2, p25_string);

```

```

dtostrf(H2S, 7, 2, H2S_string);
dtostrf(valNH3, 7, 2, valNH3_string);
dtostrf(valCO2, 7, 2, valCO2_string);

sprintf(http_cmd,"%s",url_string);
sprintf(http_cmd + strlen(http_cmd),HR_string);
sprintf(http_cmd + strlen(http_cmd),"&field2=");
sprintf(http_cmd + strlen(http_cmd),T_string);
sprintf(http_cmd + strlen(http_cmd),"&field3=");
sprintf(http_cmd + strlen(http_cmd),p10_string);
sprintf(http_cmd + strlen(http_cmd),"&field4=");
sprintf(http_cmd + strlen(http_cmd),p25_string);
sprintf(http_cmd + strlen(http_cmd),"&field5=");
sprintf(http_cmd + strlen(http_cmd),H2S_string);
sprintf(http_cmd + strlen(http_cmd),"&field6=");
sprintf(http_cmd + strlen(http_cmd),valNH3_string);
sprintf(http_cmd + strlen(http_cmd),"&field7=");
sprintf(http_cmd + strlen(http_cmd),valCO2_string);
delay(2000);

while(!tcp_on){
  if(!SIM800.HTTP_GET_start(http_cmd, &statuscode, (uint16_t*)&length)) {
    Serial.println("Falhou!");
    Serial.println("Tente novamente...");
    tcp_on = false;
  }else{
    tcp_on = true;
    while (length > 0) {
      while (SIM800.available()) {
        char c = SIM800.read();
        response2 += c;
        length--;
      }
    }
    Serial.println(response2);
    if(statuscode == 200){
      Serial.println("Sucesso!");
      tcp_on = false;
    }
    break;
    delay(5000);
  }
  delay(2000);
}

```

```

}
}

/* *****
 * Esta função mantém a solicitação do sensor K30 até receber uma resposta *
***** */

void sendRequest(byte packet[])
{
while(!K_30_Serial.available())
{ K_30_Serial.write(readCO2,7);
delay(50);
}

int timeout=0; //Definição de um contador de tempo
while(K_30_Serial.available() < 7) //Espera para obter uma resposta de 7
bytes
{
timeout++;
if(timeout > 10) //Se demorar muito, provavelmente houve um erro
{
while(K_30_Serial.available()) //Libera tudo que tem
K_30_Serial.read();

break; //Sair e tentar novamente
}
delay(50);
}

for (int i=0; i < 7; i++)
{
response[i] = K_30_Serial.read();
}
}

unsigned long getValue(byte packet[])
{
int high = packet[3]; //Alto byte por valor é o 4º byte no pacote
int low = packet[4]; //Baixo byte por value é o 5º byte no pacote

```

```

    unsigned long val = high*256+low;          //Combina o alto byte e o baixo byte
    com esta fórmula para obter valor
    return val*valMultiplier;
}

```

```

/* *****
 *          Esta função dispara uma medição e recebe os dados do sensor          *
***** */

```

```

void SPEC_Data_read(){
    // Primeiro, é feito alguma inicialização
    dataStringComplete = 0; // dataStringComplete está definido como "falso", pois
    não temos dados válidos recebidos
    dataString = ""; // Limpa os dados da string
    Serial2.print("\r");
    dataString = Serial2.readStringUntil('\n'); // Agora acionamos uma medição e
    esperamos por uma resposta do sensor
    //Serial.println(dataString);
}

```

```

/* *****
 *          Esta função pega a string recebida e atualiza os dados do sensor          *
***** */

```

```

void SPEC_parse_data(){
    // Analisa o dataString recebido
    // Os dados da String são separados por vírgula
    // O formato do output é: SN[XXXXXXXXXXXX], PPB [0 : 999999], TEMP [-99:99],
    RH[0:99]
    // Nós olhamos primeiro para o SN

    int idx1 = dataString.indexOf(',');
    SensorSerialNo = dataString.substring(0, idx1);
    int idx2 = dataString.indexOf(',', idx1 + 1);
    // Dica: depois da vírgula há um espaço - isso deveria ignorado
    String S_gas = dataString.substring(idx1 + 2, idx2);
    H2S = S_gas.toInt();
}

```

```

/* *****
*                                     EEPROM dump                                     *
***** */

void SPEC_dump_EEPROM(){
  Serial2.print("e"); // Primeiro, acionamos uma medição
  dataString = Serial2.readStringUntil('\n');
  for (int i=0; i<20; i++){
    responseString = Serial2.readStringUntil('\n');
    Serial.println(responseString);
  }
}

void SPEC_reset(){
  Serial2.print("r");
  delay(1000);
}

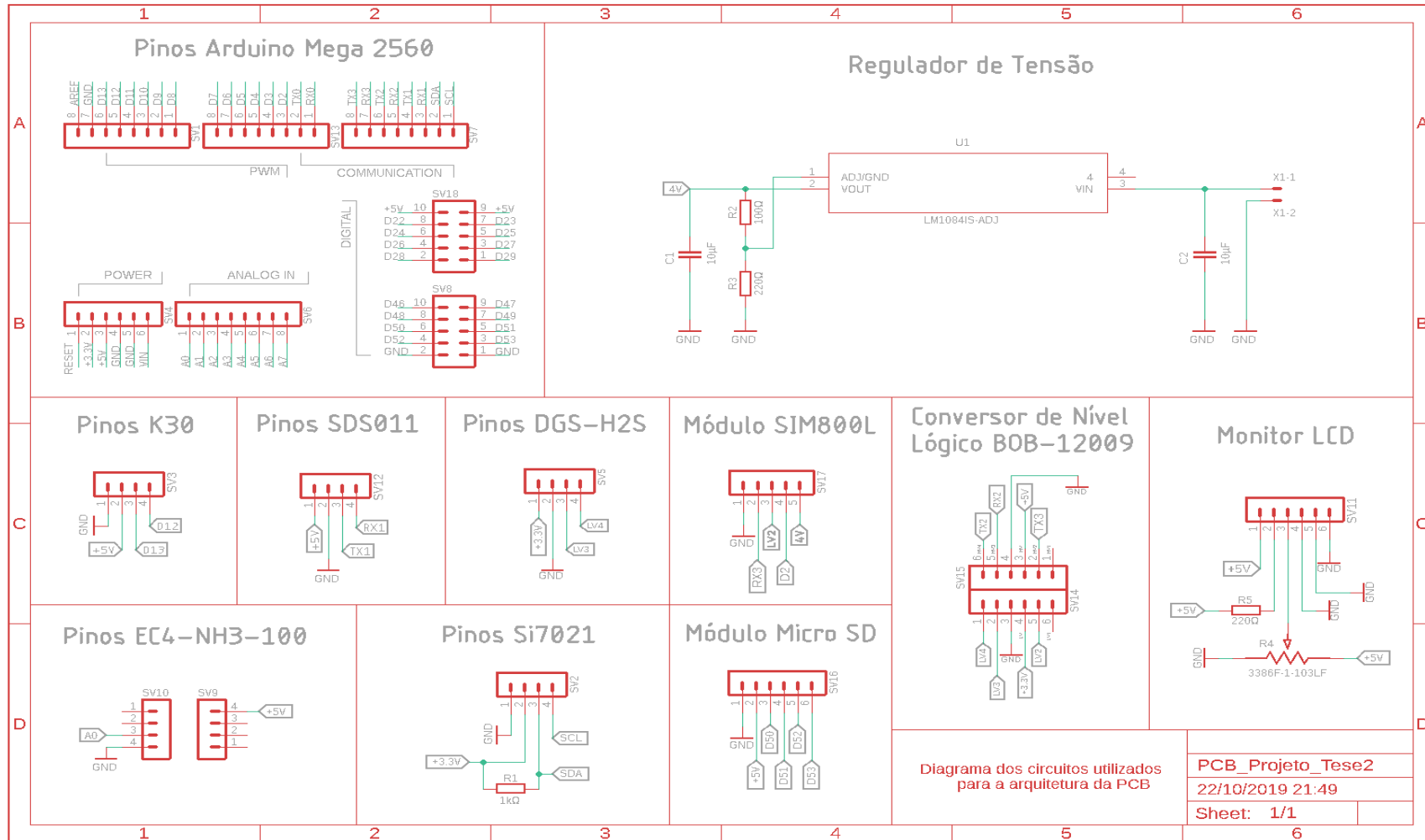
void SPEC_show_firmware(){
  Serial2.print("f");
  responseString = Serial2.readStringUntil('\n');
  Serial.print("Sensor firmware version is ");
  Serial.println(responseString);
  Serial.println("");
  Delay(400);
}

void flush_Serial2(){
  if (Serial2.available() > 0){
    Serial.println ("Flushing serial buffer...");
    while(1){
      inChar = (char)Serial2.read();
      delay(10);
      Serial.print(inChar);
      if (inChar == '\n') break;
    }
    Serial.println (" ");
    Serial.println ("Buffer flushed!");
  }
}

```

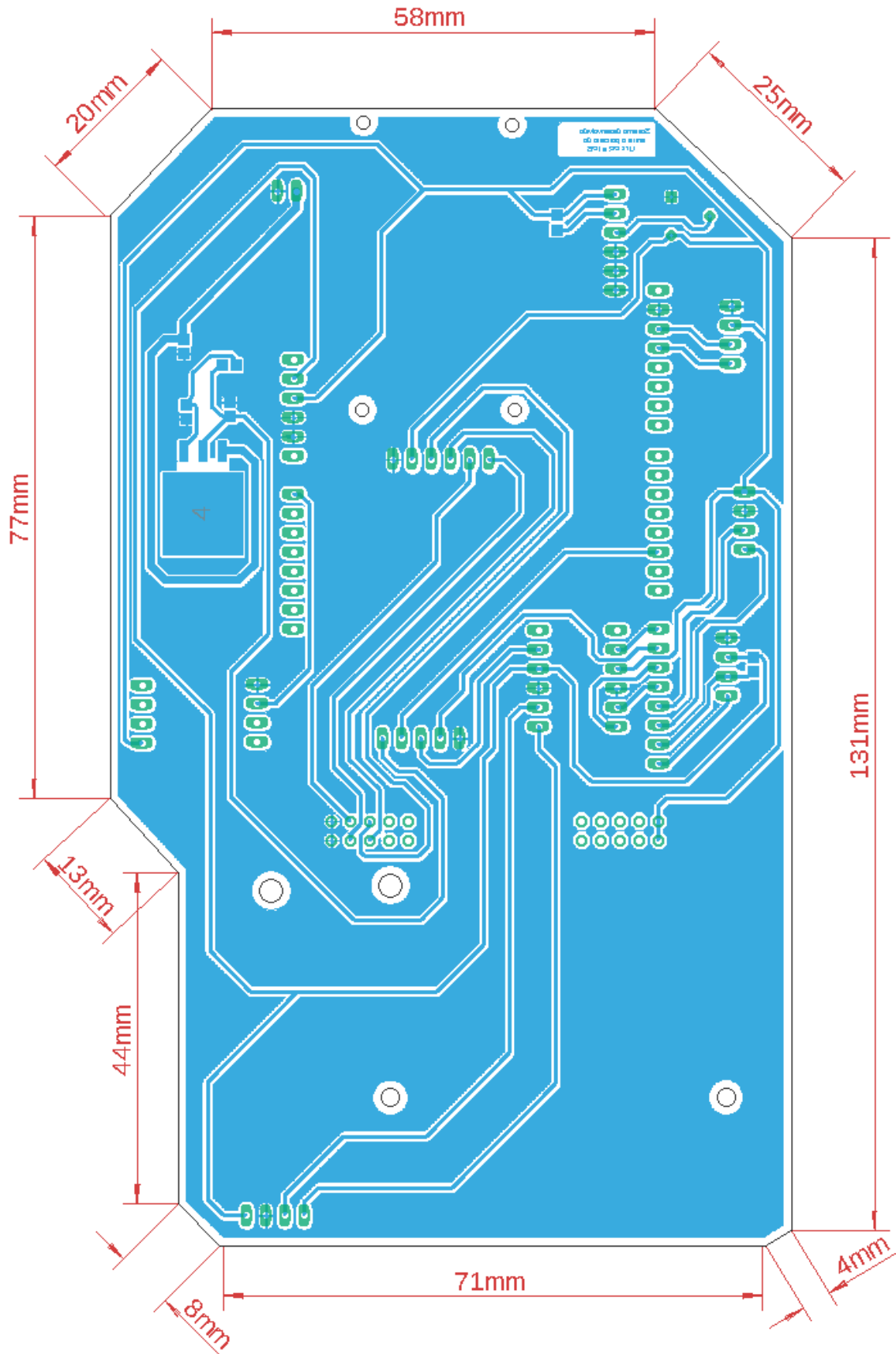
ANEXO II

Esquemático utilizado para arquitetura da placa de circuito impresso.



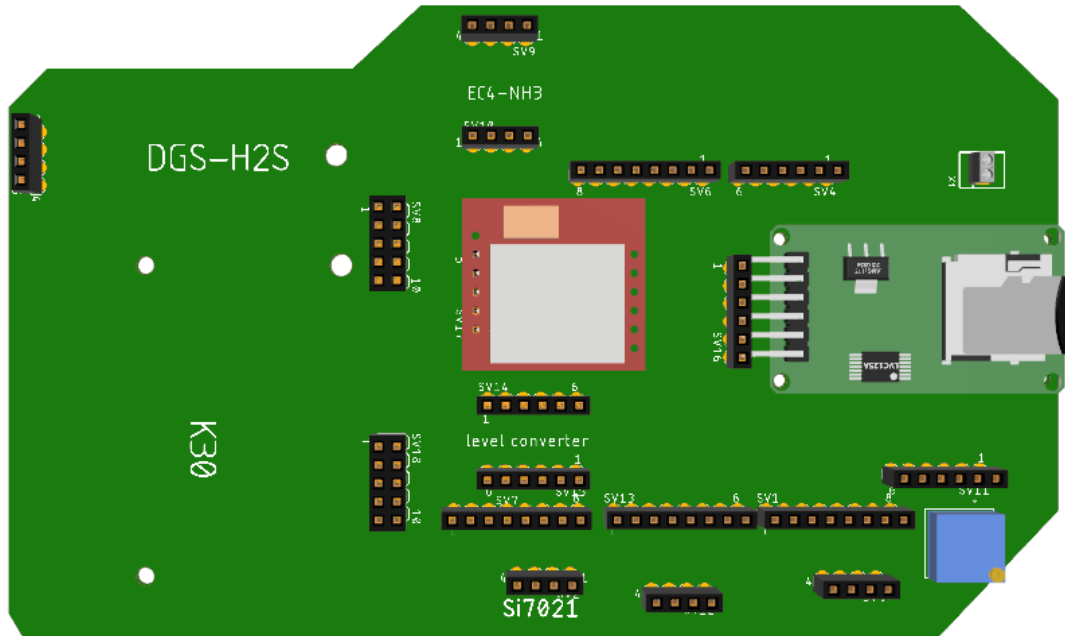
ANEXO III

Design da camada inferior e dimensões da PCB.

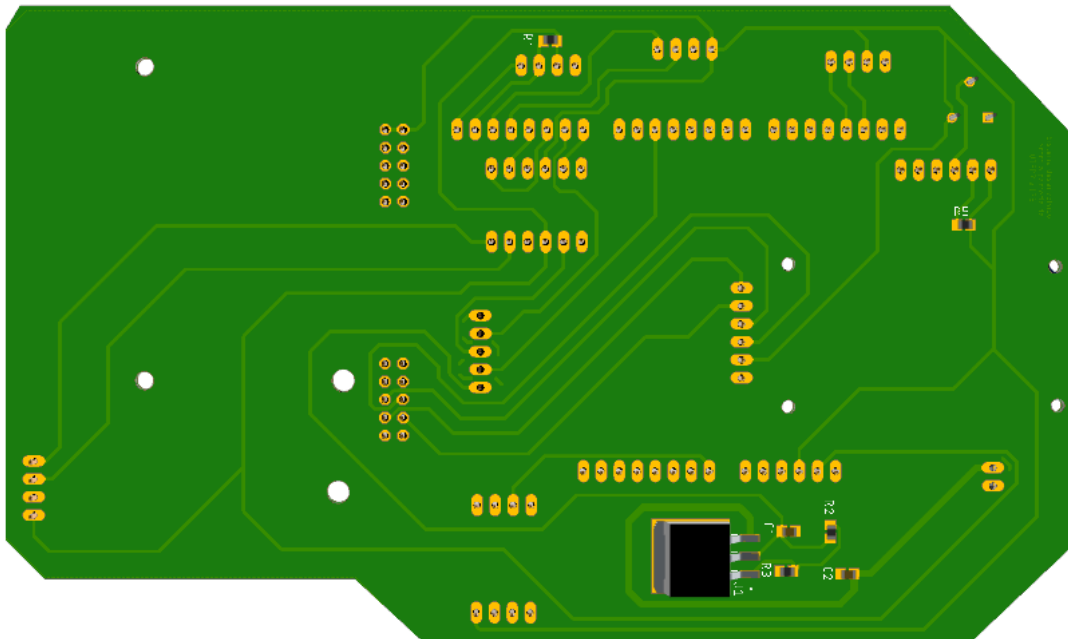


ANEXO IV

Projeções Ortogonais da Placa de Circuito Impresso.



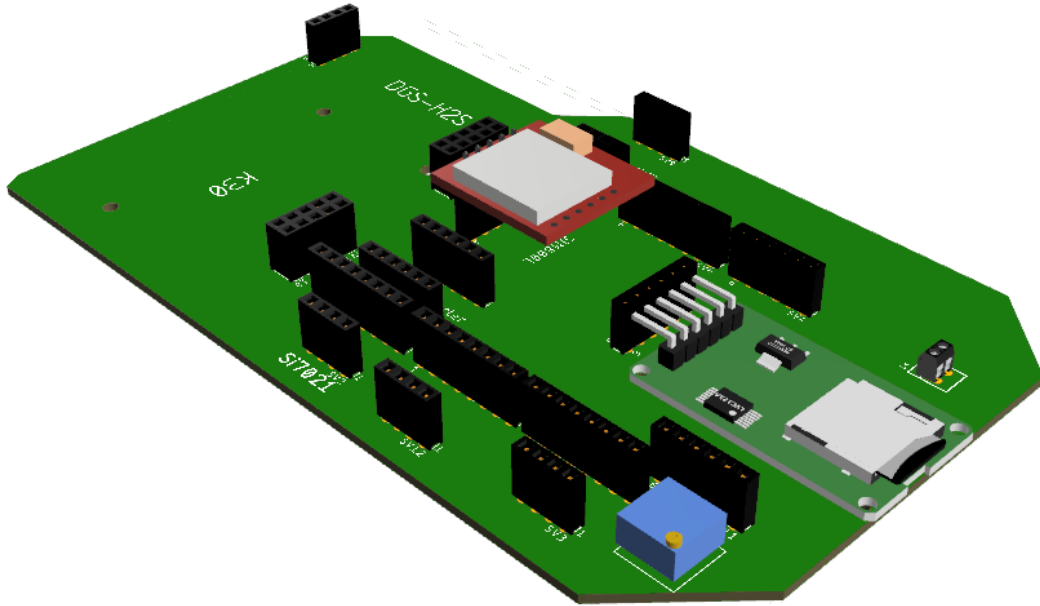
Vista Superior da PCB.



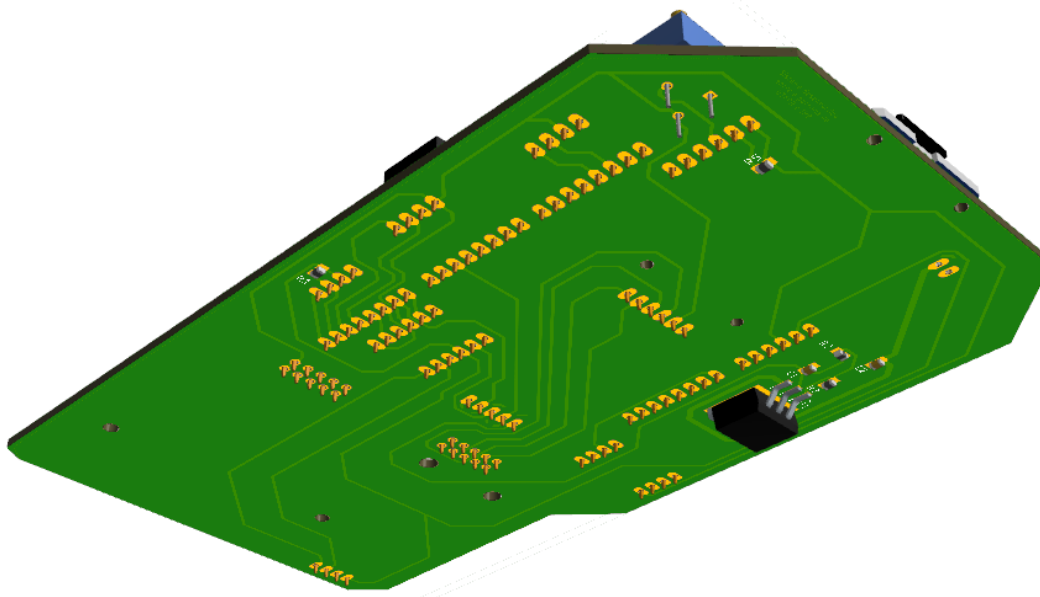
Vista Inferior da PCB.

ANEXO V

Projeções Cilíndricas da Placa de Circuito Impresso.



Vista Oblíqua Superior da PCB



Vista Oblíqua Inferior da PCB