

**MONIQUE DE OLIVEIRA VILELA**

**MODELAGEM CFD PARA AVALIAÇÃO DA AMBIÊNCIA EM AVIÁRIOS PARA  
FRANGOS DE CORTE COM VENTILAÇÃO TIPO TÚNEL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Richard Stephen Gates

Coorientadores: Cecília de Fátima Souza  
Márcio Arêdes Martins  
Ilda de Fátima Ferreira Tinôco

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2020**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa

T

V699m Vilela, Monique de Oliveira, 1990-  
2020 Modelagem CFD para avaliação da ambiência em aviários  
para frangos de corte com ventilação tipo túnel / Monique de  
Oliveira Vilela. – Viçosa, MG, 2020.  
186 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexo.

Orientador: Richard Stephen Gates.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Aviários - Aquecimento e ventilação. 2. Fluidodinâmica  
computacional. 3. Amônia -Emissão. 4. Frango de corte -  
Criação. 5. Adubos e fertilizantes orgânicos - Qualidade.

I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia  
Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.

II. Título.

CDD 22. ed. 636.50831

MONIQUE DE OLIVEIRA VILELA

MODELAGEM CFD PARA AVALIAÇÃO DA AMBIÊNCIA EM AVIÁRIOS PARA  
FRANGOS DE CORTE COM VENTILAÇÃO TIPO TÚNEL

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 31 de julho de 2020.

Assentimento:

  
\_\_\_\_\_  
Monique de Oliveira Vilela  
(Autora)

  
\_\_\_\_\_  
Richard Stephen Gates  
(Orientador)

*A todos os produtores e  
trabalhadores atuantes no  
setor avícola.*

*OFEREÇO*

*Aos meus pais, irmãos e avós.*

*DEDICO*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, todo o meu agradecimento a Deus. Pela proteção, pela saúde, pela oportunidade de chegar aqui. Por me guiar e cada dia mostrar que os planos d'Ele são muito maiores que os meus.

Aos meus pais, Washington e Lucenyr, que foram meus primeiros educadores, que me ensinaram sobre educação, amor, respeito e que a vida não é fácil, mas não devemos desistir. Obrigada por fazerem de tudo por mim, pelo meu bem e pela minha felicidade. Por nunca deixarem me faltar nada. Por me apoiarem em tudo que eu quis fazer. O amor que sinto por vocês é tão grande que nem sei explicar.

Aos meus irmãos Monisa, Mariana, Giovana e João Henrique, minhas jóias preciosas. Eu não consigo imaginar minha vida sem vocês. Obrigada pelo amor, carinho, amizade, conselhos, e por nunca me deixar sozinha, mesmo à distância. Obrigada Mariana, por participar da coleta de dados no período que estive em Viçosa. Obrigada meu cunhado, Luiz Gustavo, que também é um irmão para mim. Obrigada por todas as vezes que me apoiou e me animou quando eu estava desencorajada.

Aos meus avós Antenor (in memoriam), Alenir, Jadiro e Lindalva, sou eternamente grata por tudo que fizeram e fazem por mim. Muito obrigada pelos cuidados, pela preocupação por estar tão longe, pelas ligações, pela acolhida em Rondonópolis. Espero ser sempre motivo de orgulho para vocês.

Ao Robson, que está comigo praticamente desde o início da jornada da pós-graduação, compartilhando momentos bons e ruins. Obrigada pelo amor, amizade e companheirismo. Agradeço também a família Bonoto, por todo o carinho, pelos momentos de confraternização e por me acolher como uma integrante.

Ao meu orientador, Professor Richard Gates, por todos os ensinamentos, pela amizade, pela paciência, pela confiança, pelos almoços e jantares descontraídos nas visitas a Viçosa. Considero-me uma estudante de muita sorte por ter sido orientada por ele durante o mestrado e o doutorado.

Agradeço, em especial, à minha co-orientadora, Professora Cecília, por ter aberto minha mente para sair da minha zona de conforto e encarar novos desafios nesse doutorado. Obrigada por ter abraçado comigo todas as etapas deste projeto. Sem dúvidas, sua contribuição neste trabalho foi fundamental. Obrigada pela disponibilidade todas as vezes que precisei, não só na área acadêmica, mas também na vida pessoal. Quantas histórias, conselhos valiosos e até

mesmo lágrimas rolaram nas visitas ao seu gabinete! Obrigada, principalmente, pela amizade que construímos ao longo desses anos!

Ao meu co-orientador, Professor Arêdes, por me apresentar a fluidodinâmica computacional, por estar sempre pronto a me ajudar, por ter construído comigo, passo a passo, cada etapa das simulações desenvolvidas neste trabalho. Obrigada por todas as reuniões de última hora, pela paciência, pelo conhecimento transmitido, pelos ensinamentos e pela valiosa contribuição na minha formação.

À minha co-orientadora, Professora Ilda, pela oportunidade concretizar o sonho de ser pós graduanda da UFV e integrante do Ambiagro. Obrigada por estar sempre à disposição quando precisei.

Aos professores Baêta, Jadir, Marcos, Francisco, Evandro, Rita Márcia, Valmir, Luiz Fernando Albino, e todos os outros professores pelo conhecimento a mim transmitido e por toda a contribuição durante o doutorado. Em especial ao Professor Alisson Borges e Simão, por permitir o uso do laboratório e pela ajuda nas análises. A todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

Aos Professores Jofran, Rafael e Flávio, por aceitarem compor a banca. Muito obrigada pela colaboração não só no doutorado, mas em toda a minha caminhada acadêmica.

A todos os meus professores, que contribuíram significativamente na minha formação e na minha vida, desde o início, na primeira série, até o final da graduação. Meus professores e amigos da Escola Curumins, Escola São Mateus, Escola Pindorama e da Universidade Federal de Mato Grosso.

À toda a minha família, tios e primos, que me amam e torcem pelo meu sucesso! E vamos lá porque a lista é grande: Tio Vando, Tio Wellington, Tia Nélia, Tio Watson, Tio Guto, Tia Tânia, Tia Lina, Tio Vilela, Tio Jandiro (in memoriam), Tio Jandimar, Tia Luciana, Tia Jane, Tia Jacira, Jaque, Tauana, Rodrigo, Gabriella, Amanda, Fabiano, Yanaína, Yasmin, Izadora, Wallisson, Weverson, Guilherme, Samira, Brenda, Bárbara, Davi, Beatriz, Maria Eloísa, João Victor e Ana Carolina. Fica aqui meu agradecimento pela amizade e por Deus me permitir ter vocês como minha família.

Ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEA-UFV) e todos os seus funcionários, em especial ao Geraldo Márcio, pela amizade e companheirismo no dia a dia. À todos os colegas do AMBIAGRO e do DEA, especialmente aqueles que se desdobraram para acompanhar e me socorrer nos longos meses de coleta de dados e no desenvolvimento das simulações: Willian, Karen Pereira, Guilherme Laud, Natália (Colômbia), Fernanda Sousa, Amanda Gomes, Eloiny,

Ailyn, Jamille, Luis Gustavo, Rafaella. Agradeço também aos mais novos, Matheus, Charles, Germán e Carlos Eduardo, pelos cafezinhos e bate-papo no AMBIAGRO antes da pandemia.

Ao Carlos Gutemberg, meu irmão desde a graduação, há 11 anos caminhando comigo diariamente. Carlos, muito obrigada por tudo, sempre! Não poderia ter tido um companheiro melhor para essa empreitada! Obrigada pela amizade, que levarei comigo para sempre!

Ao Hiago Zanetoni, outro irmão conterrâneo que veio cruzar meu caminho em Viçosa. Meus sinceros agradecimentos por todo o esforço e ajuda diária no experimento, antes, durante e depois. Não foi fácil, mas com certeza com sua companhia e sua amizade, o processo tornou-se mais leve e divertido.

À todos os meus amigos, em especial às de infância: Quizzi, Adrielle, Laysa, Viviane, Nathaly, juntamente com Bê e Lipe, por terem sido um grande apoio para mim em toda minha vida, principalmente agora, mesmo com a distancia. E aos amigos viçosenses, em especial: Melina, Liz, Maria Helena e Josi. Obrigada pelas conversas, por ouvir meus desabafos e por me ajudar sempre que precisei! Obrigada Lúcia, Laci e José Costa, pelo incentivo de sempre, e por se alegrarem com as minhas conquistas. Amo todos vocês.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de fazer o curso.

À empresa PIF PAF Alimentos, pela oportunidade de parceria na realização desta pesquisa, em especial ao Sr. Jairo, Sr. João Roberto de Lima, João Marcos e Romário e toda a família. Obrigada por acolher nossa equipe e por estarem sempre prontos e dispostos a ajudar no que fosse preciso. Além, é claro, dos presentes (cafés e cachaças).

Ao CNPq, CAPES e FAPEMIG pela concessão da bolsa de estudos e pelo apoio financeiro. O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil; e da CAPES – Código de Financiamento 001.

À todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desta pesquisa.

## **BIOGRAFIA**

MONIQUE DE OLIVEIRA VILELA, filha de Washington Vilela de Freitas e Lucenyrr Pereira de Oliveira, nasceu em Rondonópolis - Mato Grosso, em 25 de agosto de 1990.

Em março de 2009 ingressou no curso de graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental na Universidade Federal de Mato Grosso. Em fevereiro de 2014, defendeu sua monografia sob a orientação do Professor Jofran Luiz de Oliveira, na área de Construções Rurais e Ambiência.

Em agosto de 2014 iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, na área de Construções Rurais e Ambiência, sob a orientação do Professor Richard S. Gates. Submeteu-se à defesa da dissertação intitulada “Comportamento e desempenho produtivo de codornas japonesas submetidas a diferentes regimes de calor e umidade, combinados com diferentes níveis de velocidade do ar” em julho de 2016.

Em janeiro de 2018 concluiu o curso de Pós-Graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC Minas.

Em agosto de 2016 ingressou no Programa de Pós-Graduação de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, em nível de doutorado, concentrando seus estudos na área de Construções Rurais e Ambiência, orientada pelo Professor Richard S. Gates.

## RESUMO

VILELA, Monique de Oliveira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2020. **Modelagem CFD para avaliação da ambiência em aviários para frangos de corte com ventilação tipo túnel.** Orientador: Richard Stephen Gates. Coorientadores: Cecília de Fátima Souza, Márcio Arêdes Martins e Ilda de Fátima Ferreira Tinôco.

A ambiência e a qualidade do ar são aspectos cruciais para o sucesso da avicultura. A amônia é um dos principais gases gerados em aviários e, quando presente em elevadas concentrações, é altamente tóxico, tanto aos animais quanto aos trabalhadores. Diante da relevância econômica da produção de frangos de corte para o Brasil e da necessidade de maior conhecimento acerca do comportamento espacial e sazonal de variáveis ambientais em aviários, o presente estudo foi elaborado com o objetivo de contribuir com pesquisas que relacionam a ventilação e o microclima interno, bem como a geração, concentração e emissão de amônia, tendo em vista a otimização do sistema como um todo, para melhoria do bem estar animal e sustentabilidade da atividade. O primeiro capítulo consiste em uma revisão de literatura, que buscou apresentar as etapas de geração de amônia em aviários, desde sua origem até a emissão do gás, abordando também aspectos relacionados a porcentagens e formas de retenção no organismo das aves, bem como a deposição do nitrogênio por frangos na cama. No segundo capítulo foi apresentado um levantamento sobre os principais tipos de ventilação praticados na avicultura, seus componentes e sua importância na criação e produção animal. No terceiro capítulo foi apresentado um diagnóstico da qualidade do ar em aviários de corte comerciais, em função da sazonalidade e de diferentes tipos de resfriamento evaporativo. Os dois aviários em estudo eram equipados com ventilação por pressão negativa, sendo um com sistema de resfriamento por painéis evaporativos, e o outro, resfriamento por nebulização. O diagnóstico foi realizado a partir da análise de características da cama, como umidade, pH e nitrogênio total, além da temperatura e umidade relativa do ar, concentração de amônia e fluxo de emissão pela cama e pelo aviário. Os resultados relacionados à geração e emissão de amônia apresentaram-se mais acentuados no inverno, em comparação ao verão. Valores máximos de concentração de amônia estiveram acima do limite de tolerância especificado pelas normas de segurança. No quarto capítulo foram abordados, por meio de revisão de literatura, os fundamentos da fluidodinâmica computacional (CFD), apresentando conceitos das etapas de desenvolvimento das simulações, além da sua importância em estudos relativos à ventilação e ambiência em instalações para aves. No quinto capítulo, o objetivo foi desenvolver e validar dois modelos tridimensionais de aviários típicos da Zona da Mata Mineira, utilizando CFD, para avaliar o sistema de ventilação em termos

distribuição do fluxo de ar e concentração de amônia. Os modelos desenvolvidos indicaram boa concordância entre os dados medidos a campo e os resultados simulados, o que significa que ambos os modelos podem ser usados na simulação de novos projetos e arranjos do sistema de ventilação, visando melhor distribuição de ar fresco e qualidade do ar interior.

**Palavras-chave:** Avicultura. Emissão de amônia. Fluidodinâmica Computacional.

## ABSTRACT

VILELA, Monique de Oliveira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2020. **CFD modeling for evaluation of the environment in broiler houses with tunnel ventilation.** Adviser: Richard Stephen Gates. Co-advisers: Cecília de Fátima Souza, Márcio Arêdes Martins and Ilda de Fátima Ferreira Tinôco.

Environment and air quality are crucial to the poultry farming success. Ammonia is one of the main gases generated in aviaries and, when present in high concentrations, it is highly toxic, to both animals and workers. In view of the economic relevance of the poultry sector to Brazil and the need for greater knowledge about the spatial and seasonal behavior of environmental variables in broiler production, this research was prepared with the aim to contribute to research relating ventilation and internal microclimate, as well as such as the generation, concentration and emission of ammonia in order to optimize the system as a whole, to improve animal welfare and the sustainability of the activity. The first chapter consists of a literature review, which presents the stages of ammonia generation in poultry, from its origin to its emission, addressing aspects related to percentages and forms of nitrogen retention in birds and deposition to litter. In the second chapter, a survey is presented on the main types of ventilation practiced in poultry production, their components and their importance. In the third chapter, a diagnosis of air quality in commercial broiler houses is presented, depending on seasonality and different types of evaporative cooling. The two studied aviaries were equipped with negative pressure tunnel ventilation, one with an evaporative pad cooling system, and the other, by misting. Analyses were made on litter characteristics, such as moisture content, pH, and total nitrogen, in addition to building temperature and relative humidity, ammonia concentration and emission from the litter and the broiler house. The results related to the generation and emission of ammonia were more pronounced in winter when compared to summer. Maximum values of ammonia concentration were above the tolerance limit specified by the safety standards. In the fourth chapter, the fundamentals of computational fluid dynamics (CFD) were addressed, through a literature review, presenting concepts of the simulations development stages, in addition to their importance in studies related to ventilation and ambience in installations for poultry. In the fifth chapter, the objective was to develop and validate two three-dimensional models of typical aviaries in the Zona da Mata Mineira, using CFD, to evaluate the ventilation system in terms of airflow distribution and ammonia concentration. The developed models indicated good agreement between the data measured in the field and the simulated results, suggesting that

both models can be used in the simulation of new designs and arrangements of the ventilation system, aiming at better fresh air distribution and interior air quality.

**Keywords:** Ammonia emission. Computational Fluid Dynamics. Poultry farming.

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	14
<b>CAPÍTULO I: Nitrogen transformation stages into ammonia in broiler production: Sources, deposition, transformation, and emission into the environment</b> .....	20
1.1. Introduction.....	22
1.2. The nitrogen cycle .....	23
1.3. Nitrogen from broiler diet.....	24
1.4. Nitrogen retention forms in broiler chickens .....	25
1.5. Nitrogen disposition by broilers .....	26
1.6. Steps involved in the transformation of nitrogen to ammonia.....	28
1.7. Final Considerations .....	33
1.8. References.....	34
<b>CAPÍTULO II: Sistemas de ventilação na avicultura brasileira: estado da arte</b> .....	41
2.1. Introdução .....	43
2.2. Fatores determinantes para manutenção do conforto térmico em projetos arquitetônicos de aviários .....	45
2.3. Tipos de ventilação adotados em instalações animais .....	46
2.4. Componentes do sistema de ventilação .....	53
2.5. Estudos atuais sobre ventilação na avicultura.....	56
2.6. Considerações Finais .....	62
2.7. Referências Bibliográficas .....	63
<b>CAPÍTULO III: Ambiente térmico e qualidade do ar em aviários comerciais com diferentes sistemas de resfriamento evaporativo</b> .....	69
3.1. Introdução .....	71
3.2. Material e Métodos .....	74
3.2.1. Considerações gerais.....	74
3.2.2. Caracterização do ambiente térmico.....	78
3.2.3. Avaliação da qualidade do ar.....	82
3.2.4. Análise estatística .....	86
3.3. Resultados e Discussão .....	88
3.3.1. Caracterização do ambiente térmico.....	88
3.3.2. Caracterização físico-química da cama de frango.....	94
3.3.3. Emissão de amônia pela cama a partir do método SMDAE .....	107
3.3.4. Concentração de amônia .....	110
3.3.5. Estimativa da taxa de emissão de amônia para a atmosfera .....	113

3.4. Conclusões .....	117
3.5. Referências Bibliográficas .....	119
<b>CAPÍTULO IV: Utilização de fluidodinâmica computacional (CFD) no estudo de sistemas de ventilação e ambiência de instalações avícolas .....</b>	<b>128</b>
4.1 Introdução .....	130
4.2 Pré-processamento .....	131
4.3 Solução Numérica - Solver .....	132
4.4 Pós-processamento.....	133
4.5 Aplicação da fluidodinâmica computacional (CFD) em estudos de instalações avícolas 134	
4.6 Considerações Finais .....	142
4.7 Referências Bibliográficas .....	143
<b>CAPÍTULO V: Validação de modelos CFD para simulações do fluxo de ar e concentração de amônia em aviários para frangos de corte com ventilação tipo túnel.....</b>	<b>146</b>
5.1. Introdução .....	148
5.2. Material e Métodos .....	150
5.2.1. <i>Considerações gerais</i> .....	150
5.2.2. <i>Características dos aviários</i> .....	151
5.2.3. <i>Instrumentação e coleta de dados</i> .....	152
5.2.4. <i>Modelagem computacional</i> .....	154
5.2.5. <i>Teste de independência de malha</i> .....	161
5.2.6. <i>Validação dos modelos</i> .....	161
5.3. Resultados e Discussão .....	162
5.3.1. <i>Teste de independência de malha</i> .....	162
5.3.2. <i>Validação dos modelos</i> .....	167
5.3.3. <i>Resultados das simulações</i> .....	172
5.4. Conclusões .....	180
5.5. Referências Bibliográficas .....	181
<b>ANEXO A.....</b>	<b>186</b>

## INTRODUÇÃO GERAL

Diante da crescente demanda por alimento em vista do sucessivo aumento da população mundial, a avicultura brasileira tem ocupado, ano após ano, posição de destaque nos *rankings* mundiais. Atualmente, o Brasil é o segundo maior produtor mundial de carne de frango, atingindo, em 2019, a marca de 13,24 milhões de toneladas, sendo superado apenas pelos Estados Unidos, que produziu cerca de 19,94 milhões de toneladas. De acordo com este balanço, realizado pela Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA, 2020), o Brasil é o maior exportador de carne de frango, representando um total de 4,214 milhões de toneladas em 2019.

Para alcançar tais resultados, foi indispensável o surgimento de sistemas de criação em alta densidade fortemente tecnificados que, em conjunto com os avanços em genética e nutrição, resultaram na redução de custos e tornaram a atividade mais rentável (TINÔCO et al., 2014). Perante a expansão do sistema intensivo de criação de frangos de corte, houve a necessidade de reduzir cada vez mais os efeitos negativos impostos pelas flutuações térmicas do ambiente (TINÔCO, 2001), proporcionando melhores condições térmicas e higiênicas, além de bem-estar aos animais. Com isso, a atividade levou a um aumento significativo na geração de vários tipos de resíduos, como efluentes, cama e aves mortas, que contém altas concentrações de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), traços de minerais e alta carga de bactérias (OVIEDO-RONDÓN, 2009). Consequentemente, maiores concentrações de amônia (NH<sub>3</sub>), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) são observadas nesses sistemas de criação. Concomitantemente aos gases citados, a poeira em suspensão no ambiente de criação das aves também deve ser monitorada, já que, acima dos níveis toleráveis, todos esses componentes presentes no ar de um aviário podem acometer a saúde dos animais e dos trabalhadores (ZHAO et al., 2015).

O incremento na produção de dejetos trouxe, como resultado, o aumento da contribuição da emissão de amônia por parte dos aviários, o que torna este gás um dos principais poluentes gerados na atividade. A exposição a altos níveis de amônia pode ocasionar transtornos como redução de apetite, conjuntivites e susceptibilidade à doenças, prejudicando substancialmente a produtividade dos animais (ZHAO et al., 2015) e afetando a saúde dos trabalhadores.

De forma geral, inúmeros fatores influenciam na concentração de amônia no interior de aviários, como por exemplo a densidade de criação, nutrição, manejo de dejetos, ventilação, temperatura do ar e umidade do ar e do piso (NIMMERMARK et al., 2009). Dentre estes, a ventilação é um dos recursos de maior importância, uma vez que, além de reduzir os efeitos do

clima no ambiente, se faz necessária para eliminação do excesso de umidade do ar e da cama, gerada devido à respiração das aves à água presente nas excretas, e conseqüentemente, possibilita a renovação o ar, eliminando os gases tóxicos gerados no galpão (ABREU & ABREU, 2005).

É evidente que o ambiente de criação das aves é um fator determinante ao sucesso da produção, tendo em vista as condições climáticas e a qualidade do ar. Por isso, torna-se imprescindível o planejamento para a concepção e adequação de aviários conforme o contexto climático de cada região, assegurando condições de conforto às aves e, portanto, proporcionando altos níveis de produtividade de forma que a relação custo-benefício seja a melhor possível.

Atualmente, para o estudo e simulação de fluxos de fluidos reais em um sistema, a fluidodinâmica computacional (CFD) é uma importante ferramenta, mostrando-se em crescente ascensão, visto que é muito utilizada por pesquisadores em todo o mundo. A modelagem CFD na área de construções rurais e ambiência possibilita a solução de problemas envolvendo trocas de ar e auxilia na previsão de um ambiente que proporcione conforto térmico, bem-estar animal e qualidade do ar no interior da instalação. Neste contexto, diversos artigos foram publicados sobre a utilização do método em aviários, com ênfase no sistema de ventilação ( MISTRITIS et al., 1997; BJERG et al., 2002; BARTZANAS et al., 2007; BLANES-VIDAL et al., 2008; LEE e SHORT, 2000; SARAZ, 2010; SARAZ et al., 2012; BUSTAMANTE et al., 2013; SARAZ et al., 2017). O principal diferencial dos modelos baseados em CFD na avicultura é a otimização do projeto, com possibilidade de redução do número de experimentos e repetições, além de prever o comportamento e a distribuição de variáveis climáticas e gases tóxicos no interior das instalações, e assim, simular diversas condições que auxiliem na tomada de decisão para solução de problemas práticos sem a necessidade de muitos experimentos.

Sabe-se que o uso apropriado de tecnologias e equipamentos para o condicionamento térmico das instalações pode promover maior produtividade dos animais, aumentando a lucratividade do sistema produtivo (MARCHETO et al., 2002). Contudo, o sub ou superdimensionamento deve ser evitado, sob pena de, além de não proporcionar os níveis de conforto exigidos pelos animais, acarretar em dispêndio excessivo de energia e prejuízo financeiro ao produtor. Ainda hoje, é possível verificar certa carência de estudos que visem avaliar novos arranjos e manejos dos sistemas de ventilação em aviários brasileiros.

É comum observar, ao longo de toda a extensão territorial do país, instalações com características construtivas e tecnologias reproduzidas de aviários de países de clima temperado, onde as especificidades das condições climáticas são extremamente diferentes da

realidade constatada no Brasil. Muitas vezes, podem surgir problemas relacionados ao bem estar dos animais, agravo da qualidade do ar e desperdício energético e econômico. Neste contexto, esta pesquisa foi elaborada com o objetivo de contribuir com estudos sobre o sistema de ventilação em aviários e sua influência no comportamento do fluxo do ar, taxas de emissão de amônia e, conseqüentemente, melhoria do ambiente térmico e aéreo do ambiente de criação das aves. Com isso, auxiliar os produtores em tomadas de decisão, em busca de estratégias de aprimoramento do sistema para melhoria do bem estar animal, sustentabilidade e rentabilidade da atividade avícola.

Com base no exposto, objetivou-se avaliar a influência do manejo do sistema de ventilação sobre o comportamento do fluxo de ar, ambiente térmico, taxa de emissão de amônia em aviários com ventilação por pressão negativa tipo túnel, durante todo o ciclo produtivo, em duas estações: inverno e verão. Os objetivos específicos foram:

- I. Abordar, por meio de revisão de literatura, os aspectos relacionados à origem, porcentagens e formas de retenção no organismo das aves, bem como a deposição de nitrogênio por frangos de corte. Além disso, expor as etapas da transformação de amônia no microambiente, desde o material de origem à geração do gás.
- II. Apresentar um levantamento dos principais sistemas de ventilação, bem como de sua aplicabilidade na avicultura brasileira, além de reportar o estado da arte nesse tema.
- III. Analisar a qualidade do ar de aviários industriais com diferentes tipos de resfriamento evaporativo localizados na Zona da Mata, em Minas Gerais - Brasil, com base em variáveis do ambiente térmico, características físico-químicas da cama e taxa de emissão de amônia.
- IV. Abordar as etapas da simulação por meio de CFD, bem como destacar sua importância em estudos para o aprimoramento dos sistemas de ventilação, visando conforto térmico e qualidade do ar de instalações avícolas comerciais.
- V. Desenvolver e validar modelos CFD capazes de prever a distribuição do fluxo de ar e concentração de amônia em aviários comerciais com ventilação por pressão negativa tipo túnel, baseados em galpões industriais para produção de frangos de corte situados na Zona da Mata Mineira.

A fim de reportar os resultados da presente pesquisa, a tese é apresentada em cinco capítulos, intitulados:

- Capítulo I – Nitrogen transformation stages into ammonia in broiler production: sources, deposition, transformation and emission to environment;
- Capítulo II – Sistemas de ventilação na avicultura brasileira: estado da arte;

- Capítulo III – Ambiente térmico e qualidade do ar em aviários comerciais com diferentes sistemas de resfriamento evaporativo;
- Capítulo IV – Utilização de fluidodinâmica computacional (CFD) no estudo de sistemas de ventilação e ambiência de instalações avícolas;
- Capítulo V – Validação de modelos CFD para simulações do fluxo de ar e concentração de amônia em aviários para frangos de corte com ventilação tipo túnel.

## REFERÊNCIAS

ABPA. Relatório Anual 2019. Relatório Anual, 160 p., 2020.

ABREU, P. G.; ABREU, V. M. N. Maximização dos sistemas de ventilação na avicultura. Concórdia: [s.n.].

BARTZANAS, T.; KITTAS, C.; SAPOUNAS, A. A.; NIKITA-MARTZOPOULOU, Ch. Analysis of airflow through experimental rural buildings: Sensitivity to turbulence models. *Biosystems Engineering*, v. 97, n. 2, p. 229–239, 2007.

BJERG, B.; SVIDT, K.; ZHANG, G.; MORSING, S.; JOHNSEN, J. O. Modeling of air inlets in CFD prediction of airflow in ventilated animal houses. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 34, n. 1–3, p. 223–235, 2002.

BLANES-VIDAL, V.; GUIJARRO, E.; BALASCH, S.; TORRES, A. G. Application of computational fluid dynamics to the prediction of airflow in a mechanically ventilated commercial poultry building. *Biosystems Engineering*, v. 100, n. 1, p. 105–116, 2008.

BUSTAMANTE, E.; GARCÍA-DIEGO, F. J.; CALVET, S.; ESTELLÉS, F.; BELTRÁN, P.; HOSPITALER, A.; TORRES, A. G. Exploring ventilation efficiency in poultry buildings: The validation of computational fluid dynamics (CFD) in a cross-mechanically ventilated broiler farm. *Energies*, v. 6, n. 5, p. 2605–2623, 2013.

LEE, I. B.; SHORT, T. H. Two-dimensional numerical simulation of natural ventilation in a multi-span greenhouse. *Transactions of the ASAE*, v. 43, n. 3, p. 745–753, 2000.

MARCHETO, F. G.; NÄÄS, I. A.; SALGADO, D. D.; SOUZA, S. R. L. Efeito das temperaturas de bulbo seco e de globo negro e do índice de temperatura e umidade, em vacas em produção alojadas em sistema de free-stall. *Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science*, v. 39, n. 6, p. 320–323, 2002.

MISTRITIS, A.; JONG, T.; WAGEMANS, M. J. M.; BOT, G. P. A. Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool for the analysis of ventilation indoor microclimate in agricultural buildings. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, v. 45, p. 81–96, 1997.

NIMMERMARK, S.; LUND, V.; GUSTAFSSON, G.; EDUARD, W. Ammonia, dust and

bacteria in welfare-oriented systems for laying hens. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, v. 16, n. 1, p. 103–113, 2009.

OVIEDO-RONDÓN, E. O. Technologies to mitigate the environmental impact of broiler production. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 37, n. spe, p. 239–252, 2009.

SARAZ, J. A. O. Measurement and CFD modeling of ammonia concentration, fluz and thermal environment variables in open side broiler housing. Tese (doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa Minas Gerais, p.1-115, 2010.

SARAZ, J. A. O.; TINOCO, I. F. F.; GATES, R. S.; PAULA, M. O.; MENDES, L. B. Evaluation of different methods for determining ammonia emissions in poultry buildings and their applicability to open facilities. *DYNA (Colombia)*, v. 80, n. 178, p. 51–60, 2012.

SARAZ, J. A. O.; ROCHA, K. S. O.; DAMASCENO, F. A.; TINOCO, I. F. F.; OSÓRIO, R.; TOBÓN, J. C.A. A CFD approach to assess the effects of different opening combinations in poultry houses. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 21, n. 12, p. 852–857, 2017.

TINOCO, I. F. F. Avicultura Industrial: Novos Conceitos de Materiais, Concepções E Técnicas Construtivas Disponíveis Para Galpões Avícolas Brasileiros. *Revista Brasileira de Ciência Avícola*, v. 3, n. 1, p. 01–26, 2001.

TINOCO, I. F. F.; SOUZA, C. F.; BAÊTA, F. C.; COELHO, D. J. R.; MENDES, M. A. S. A. Ambiência e Instalações na Avicultura de Postura Brasileira – Avanços e Perspectivas. *Animal Business Brasil*, v. 4, n. 14, p. 6–9, 2014.

ZHAO, Y.; SHEPHERD, T. A.; LI, H.; XIN, H. Environmental assessment of three egg production systems- Part I: Monitoring system and indoor air quality. *Poultry Science*, v. 94, n. 3, p. 518–533, 2015.

## CAPÍTULO I

### **Nitrogen transformation stages into ammonia in broiler production: Sources, deposition, transformation, and emission into the environment**

Artigo publicado em DYNA - Journal of the Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia – Campus Medellín. ISSN 2346-2183.

*Artigo formatado de acordo com as normas de submissão do periódico Dyna*

## **Nitrogen transformation stages into ammonia in broiler production: Sources, deposition, transformation, and emission into the environment**

Etapas de transformación de nitrógeno en amoníaco en producción de pollos de engorde: fuentes, deposición, transformación y emisión al medio ambiente

Monique de Oliveira Vilela <sup>a</sup>, Richard S. Gates <sup>b</sup>, Cecília F. Souza <sup>a</sup>, Carlos G. S. Teles Junior<sup>a</sup> & Fernanda C. Sousa <sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Department of Agricultural Engineering of Federal University of Viçosa, Viçosa, Brazil, monique.vilela@ufv.br, cfsouza@ufv.br, carlos.teles@ufv.br, fernanda.sousa@ufv.br*

<sup>b</sup> *Departments of Agricultural and Biosystems Engineering, and Animal Science, Egg Industry Center, Iowa State University, Ames, USA. rsgates@iastate.edu*

Received: November 2<sup>nd</sup>, 2019. Received in revised version: July 3<sup>rd</sup>, 2020. Accepted: July 16<sup>th</sup>, 2020.

### **Abstract**

Air quality is a major factor in intensive livestock management because air is the main vehicle for the dissemination of physical, chemical, and biological agents that affect the health and welfare of animals and humans. Ammonia is the main gaseous pollutant generated in poultry production. In this study, a literature review was conducted to highlight each nitrogen transformation stage during poultry production, while explaining the conversion mechanisms from the ingestion of crude protein to nitrogen volatilization into the atmosphere as ammonia gas. In summary, the steps for the synthesis of uric acid and the excretion of poultry, mineralization of nitrogen present in excreta, and volatilization of ammonia from litter are presented. Based on this review, the importance of understanding the sources and processes involved in ammonia generation and emission in poultry production is clear, thereby allowing the adoption of assertive measures that could minimize negative effects caused by ammonia emission.

*Keywords:* air pollution; air quality; nitrate; nitrite; poultry farming.

### **Resumen**

La calidad del aire es un factor importante en la ganadería intensiva, ya que el aire es el principal vehículo para la difusión de agentes físicos, químicos y biológicos que afectan la salud y el bienestar de los animales y los humanos. El amoníaco es el principal gas contaminante generado en la producción avícola. En este estudio, se realizó una revisión de la literatura con el fin de resaltar cada etapa de transformación de nitrógeno en la producción avícola, explicando los mecanismos de conversión desde la ingestión de proteína cruda hasta la volatilización en la atmósfera como gas de amoníaco. En resumen, estos pasos son: síntesis de ácido úrico y excreción por las aves de corral; mineralización de nitrógeno presente en excretas; volatilización de amoníaco de la basura. De esta revisión, queda claro la importancia de conocer las fuentes y los procesos involucrados en la generación y emisión de amoníaco en las aves de corral y, por lo tanto, adoptar medidas asertivas que puedan minimizar los impactos negativos causados por la emisión de amoníaco.

*Palabras clave:* avicultura; calidad del aire; nitrato; nitrito; polución del aire.

## 1.1. INTRODUCTION

Brazil is currently the second-largest producer of chicken meat worldwide, reaching 13.24 million tons in 2019 and being surpassed only by the United States, which produced approximately 19.94 million tons [1]. According to previous research [1], 68% of Brazilian chicken meat production was destined for the domestic market, reflecting a per capita consumption of 42.84 kg habitant<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> in 2019.

The production of broiler chickens generates, directly or indirectly, a large amount of pollutants at all stages in the production chain, from the cultivation of grain for animal feed to the generation of residues, such as manure, litter, dead animals, and slaughterhouse effluents [2]. Such residues contain significant amounts of nutrients, such as nitrogen, phosphorus, potassium, copper, and zinc, as well as a high bacterial count [3] that affects the degradation of these elements, generating environmentally harmful compounds. In the broiler productive cycle, ammonia is the main gas generated, being present at higher concentrations compared to that of other gases. Therefore, it is of concern among producers and researchers. In addition to ammonia being a toxic gas to humans and animals when at high concentrations, it also causes negative impacts on the environment [4] by acting as a greenhouse gas [5].

The main source of ammonia production in broiler houses is the nitrogen found in urea, uric acid, and protein. These proteins are present in the undigested portion of excreta and are derived from amino acid-rich diets that ensure that the nutritional needs of the birds are met [6, 7]. In general, many factors influence the concentration of ammonia inside poultry houses, such as housing density, nutrition, waste management, ventilation, temperature, and relative humidity of the air and near the floor [8, 9]. Ventilation is one of the most important actions in the control of the ammonia concentration in these facilities. In addition to reducing climatic effects, ventilation is required to remove excess moisture from the air and litter. Consequently, it allows the air to be renewed by removing the toxic gases generated in the facility [10].

The poultry farming environment is a determining factor in the success of the production, given the climatic conditions and air quality. Therefore, it is essential to study the origin and trajectory of nitrogen during broiler rearing. By understanding the entire production system, it could be possible to develop mitigating measures to minimize ammonia emission and its impacts on the environment. Thus, it would be possible to ensure that productivity levels, animal welfare, and sustainability of activity are maintained.

The objective of this literature review was to address aspects related to the origin, percentages, retention forms, and disposition of nitrogen in broiler houses. Overall, the objective was to determine

the stages of ammonia transformation in the microenvironment, from the source material to gas generation.

## 1.2. THE NITROGEN CYCLE

Nitrogen is one of the most important elements on earth because it is essential in amino acid and protein composition, which act in enzyme formation, tissue building, antibody formation, and hormone production, among other processes. It represents 78% of the volume of the earth's atmosphere. Its name is derived from the Greek "nitrogenium," and it is also known as "azoto," which in Greek means "lifeless" because of its inertia [11, 12]. However, despite its abundance in the atmosphere, the amount of nitrogen in the earth's crust is relatively low, being approximately 19 ppm [12]. Only 0.02% is available for use by vegetables [13].

Because of its low reactivity, most life is unable to utilize molecular nitrogen ( $N_2$ ). A large amount of energy is required to break its triple bond. Therefore, molecular nitrogen must be converted to a more reactive compound, such as ammonia, ammonium, or nitrate. This conversion is accomplished through the fixation of atmospheric nitrogen, which is the process by which atmospheric nitrogen gas is aggregated with nitrogenous organic compounds and is thereby included in the nitrogen cycle [13].

- Nitrification, denitrification, nitric oxide formation, nitrate leaching, and ammonia volatilization ( $NH_3$ ) processes are possible transformation routes for nitrogen molecules [7]. According to one study [14], the nitrogen cycle involves several stages, which, overall, can include:
  - Fixation: The process by which atmospheric inert nitrogen becomes available to living organisms (plants and animals) by becoming fixed in tissues of other living or dead organisms. Leguminous plants and some bacteria can fix nitrogen directly from the air. Bacteria are responsible for this process, resulting in the reaction of nitrogen and hydrogen to form ammonia.
  - Ammonification: Part of the ammonia present in the soil is derived from fixation. The other part comes from the process of decomposition of proteins and other nitrogen residues contained in dead organic matter and excreta. Bacteria and fungi present in the medium perform ammonification (or decomposition).
  - Nitrification: This consists of a series of reactions in which some species of microorganisms oxidize the ammonium ion ( $NH_4^+$ ) to nitrite ( $NO_2^-$ ) or nitrite to nitrate ( $NO_3^-$ ). It is called autotrophic when initiated by ammonia ( $NH_3$ ) and performed by autotrophic organisms.
  - Denitrification: At this stage, denitrifying bacteria, such as *Pseudomonas denitrificans* can convert nitrates into molecular nitrogen, which returns to the atmosphere; thus, completing its cycle.

Modern man has altered the nitrogen cycle by introducing large amounts of reactive nitrogen into the environment, mainly because it is an essential nutrient in agriculture [13]. Livestock breeding, especially in intensive systems, is one of the processes that incorporate high amounts of nitrogen into the environment. Particularly in the poultry industry, birds are primarily fed protein-rich diets with nitrogen content beyond what is necessary to meet their nutritional needs. Animals do not metabolize much of the ingested nitrogen. This is because of their food conversion, which is often inefficient. Thus, nitrogen is excreted and exposed to microbial activity, which generates gases with potentially harmful effects when present at high concentrations in the environment, such as ammonia from the decomposition of poultry manure [15].

### **1.3. NITROGEN FROM BROILER DIET**

Broiler performance is directly influenced by the feed quality. Recommendations for feed composition are defined to aid the attainment of certain body mass values according to the age of the bird and to achieve maximum conversion efficiency [7]. For this, it is necessary to offer diets with high energy levels and high crude protein content. As an example, the recommendation of feed formulation, according to the different phases of the broiler rearing cycle, suggested by Cobb-Vantress for Cobb500<sup>®</sup> broilers, states that according to the age of the birds, different nutritional recommendations are proposed to meet the needs of the animal [7]. Crude protein levels in the diet decrease with increasing age, while the energy level increases. This may be explained by the higher feed conversion rate of birds with increasing age, which implies higher feed intake to maintain the body mass gain of older birds compared to that of younger birds [7].

The utilization of dietary protein begins with protein digestion in the poultry proventriculum and ends in the transport of amino acids and peptides through the basolateral membrane of the small intestine. During passage through the crop, acidogenic bacteria partially denature the proteins. However, protein digestion is only achieved when it reaches the stomach. The stomach of the birds is divided into two parts: gizzard and proventriculum. The presence of food intake in the proventriculum promotes the production of hydrochloric acid and pepsinogen. The gizzard acts as a mechanical organ, without excretion or absorption, but is very important in mixing food intake with water, saliva, hydrochloric acid, and pepsin [16, 17].

After absorption, amino acids are transported to the liver, and some are used in the synthesis of liver tissue proteins or blood proteins. Most amino acids cross the liver in the form of free proteins. They are later made available to other body tissues (especially muscle tissue) for protein synthesis

[17]. Additionally, another purpose of amino acids is catabolic degradation for the release of energy to be used in biomolecule synthesis [7].

Among the structural functions of proteins, is the action on the composition of the bone matrix, connective tissue, and muscle tissue, among others. All different protein types are polymers of only 20 amino acids joined by peptide bonds [16, 18].

Protein is the most expensive nutrient in a feed and a key element for the good performance of animals. Protein utilization depends on the amount, composition, and digestibility of its amino acids. Unlike carbohydrates and lipids, proteins do not have an amino acid reserve mechanism, and all excess amino acids supplied in the diet are catabolized. Metabolism of excess amino acids generates higher energy expenditure for excretion, causing an unnecessary caloric increase, thereby compromising the performance of the animals [16, 19]. For a long time, poultry feed formulations were based on the crude protein concept, culminating in diets with high amino acid levels, exceeding the values required by the animals. Thus, once metabolized, the derivatives of these proteins became the precursors for uric acid formation, which, when excreted, is easily converted into ammonia [16].

From the industrial production of amino acids came the concept of an ideal protein, based on which rations were formulated, with a protein level closer to ideal levels. An ideal protein is one that achieves the exact balance of amino acids, without excess or scarcity, to meet the needs for maintenance and good protein utilization, reducing the use of amino acids as a source of energy and minimizing nitrogen excretion [17, 20].

#### **1.4. NITROGEN RETENTION FORMS IN BROILER CHICKENS**

The performance of birds is directly related to the feed offered to them [7]. The purpose of poultry feed formulation is to adjust the amount of nutrients to that required by each strain according to the desired production level [17, 21], to minimize excretion losses. Amino acid deficiency in the early phase prevents maximum protein deposition in tissues. On the contrary, excess nitrogen at the end of the production cycle is excreted as uric acid, generating nutrient waste, and additional caloric expenditure for the excretion process [22].

Nitrogen is a fundamental part of amino acid composition, and amino acids are used for protein synthesis. Except for water, proteins are the most important and abundant molecules in the body, because they perform numerous vital functions, being the main constituents of cell structure. They are used as nucleic acid precursors, coenzymes, hormones, and antibodies, among others. They are the basic elements for the formation of blood cells and are mainly used in the formation of organs and muscle tissue [18].

Of all nitrogen present in broiler feed, the percentage of carcass deposition can be influenced by animal characteristics, environmental conditions, and nutritional factors, as well as the age and gender of the birds [23]. In general, young birds have accelerated growth and during this period there is an intense deposition of muscle protein; thus, there is higher nitrogen retention in the carcass. Higher nitrogen retention is common in chicks. Because they are growing, they use the nutrient for deposition of proteins in tissues [24]. Similarly, it was observed higher nitrogen retention in younger broilers, with gradual deposition increase until 28 days of age. After this, nitrogen retention tends to decrease, indicating that growing animals require higher nitrogen levels because of the high nutrient deposition in protein tissues [25].

Lysine is the most abundant amino acid in broiler muscle, constituting an amino acid of great importance for the construction of skeletal muscle tissue [26]. Protein deposition in animals increases with increasing digestible lysine in the diet [27, 28]. While determining the lysine utilization efficiency for the two genders of Ross<sup>®</sup> broiler chickens, it was observed a variation from 49.6 (1 to 7 d) to 56.1% (36 to 42 d) in the efficiency for males and a variation in lysine utilization efficiency ranging from 55.0 (1 to 7 d) to 57.4% (36 to 42 d) for females [29]. When assessing the different levels of lysine in the broiler diet of both genders of broiler chickens during the entire productive cycle, it was observed that higher protein deposition in carcasses of males in the final phase of production [29]. The presence of approximately 45.9% protein was estimated in broiler carcass [30], whereas other authors observed 51.8% [31].

## **1.5. NITROGEN DISPOSITION BY BROILERS**

The main means of nitrogen entry into the broiler rearing system is feeding. For a long time, the formulation of poultry feed was based on the concept of crude protein, according to which the amount of protein in the feed was defined by the feed nitrogen content multiplied by 6.25 [32]. As a result, diets had higher amino acid levels than required by the animals and excess nitrogen was eliminated through excreta [33, 34]. Currently, it is possible to maintain poultry performance by decreasing protein in the feed formulation based on the concept of ideal protein [32].

Nitrogen not used for digestion is passed to the liver and converted to uric acid for excretion [18]. According to these authors, the amino acids and proteins ingested by animals are sent to cells and are assigned to two different functions: synthesis of other amino acids and proteins for deposition in various tissues, especially muscle and catabolic degradation for energy release and use of that energy in biomolecule synthesis. Nitrogen found in bird fecal waste is excreted

as uric acid (approximately 50%) [32], as well as undigested protein. Microbial degradation of uric acid in excreta is the main source of ammonia formation in a poultry facility. *Bacillus pasteurii* bacteria, which conduct the decomposition process, require a pH of approximately 8.5 for optimal growth. Additionally, the process involves enzymes, such as uricase and urease. Uricase converts uric acid to allantoin, which is later converted to glyoxylate and urea. Urease, in the presence of water, breaks down urea into ammonia ( $\text{NH}_3$ ) and carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ), and the formation of  $\text{NH}_3$  is followed by decomposition of waste under aerobic and anaerobic conditions. Because it has no ionic charge, ammonia in gaseous species is easily released into the atmosphere [35].

In addition to excreta, animal mortality also represents an important source of nitrogen loss in the system and can reach expressive values, especially in high-density rearing systems. Mortality is dependent on factors, such as housing density, thermal conditioning, and bird age, among others [36]. Therefore, the mortality rate should be accounted for in the nitrogen balance calculations in poultry houses [7].

Nitrogen loss in a broiler rearing system can be estimated using the concept of mass balance [7, 37]. In this method, the nitrogen inputs and outputs of the poultry house are quantified and based on the algebraic difference between the amount of nitrogen present in the feed, litter, and poultry, its loss is calculated. However, it has a disadvantage in that this method does not specify losses of N in the form of  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2$ , or  $\text{NO}_x$  [7].

Nitrogen is easily found as nitrate and ammonia in poultry houses. According to [38], undigested poultry protein is converted to ammoniacal nitrogen through bacterial activity, resulting in ammonia ( $\text{NH}_3$ ) and ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) formation. Through nitrification,  $\text{NH}_4^+$  is transformed into nitrate, which, because it is water-soluble [39], is the main form of groundwater contamination. Excess nitrogen and other nutrients lead to soil acidification and eutrophication of water bodies [2, 40, 41].

In the study of performance of broilers fed low-protein diets, which were raised at different temperatures, it was observed that low-protein diets impaired performance and nitrogen retention efficiency of broilers raised under heat stress. However, low-protein diets may be offered to broilers raised in environments with air temperatures between 20 and 25 °C, because no changes in performance or carcass quality were observed, in addition to the minimization of nitrogen excretion [42]. The authors pointed out that, under thermoneutral conditions, animal fed diets formulated with 15% crude protein excreted only 11.3% and 23.8% of the ingested nitrogen when housed in environments with air temperature maintained at 20 °C and 25 °C,

respectively. However, poultry subjected to heat stress (32 °C) excreted approximately 63% of the nitrogen from the diet [42].

Waste accumulation time influences N concentration. Fresh excreta have higher N content that, over time, can be mineralized and volatilized in the form of ammonia [43, 44].

## **1.6. STEPS INVOLVED IN THE TRANSFORMATION OF NITROGEN TO AMMONIA**

Because most poultry diets have high-protein levels, excess nitrogen, which is unused by the body, is eliminated with the feces and is later degraded, releasing ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ). This, in turn, is converted to ammonia gas ( $\text{NH}_3$ ), which is highly volatile, resulting in nitrogen losses to the atmosphere [38]. Birds excrete nitrogen in solid substances, more precisely in the uric acid form. It is possible to verify, in poultry excrement, a larger and darker lower plate (feces), and a smaller white upper plate, which is uric acid. Thus, bird excreta is composed of feces and “urine,” and therefore, they are richer in nitrogen when compared to swine and/or cattle feces [45].

In production systems where animals are kept in confinement, the air quality inside the facilities becomes a limiting factor in production. High-ammonia concentrations can substantially affect poultry performance [46], and therefore, is a major concern from both an economic and environmental standpoint.  $\text{NH}_3$  volatilization from animal waste is the second-largest source of ammonia emission into the atmosphere (approximately 32 Tg N year<sup>-1</sup>), only behind that of wet deposition (approximately 46 Tg N year<sup>-1</sup>) [47].

Ammonia is the product of the microbial decomposition of uric acid excreted by poultry. There are numerous biological, physical, and chemical processes involved in ammonia generation and emission [46]. Considering the broiler litter layer as a control volume, these processes, briefly, include ammonia generation, the division between the adsorbed phase and the aqueous phase of ammonium ions, balance between ammonium ions and free ammonia in the aqueous solution, division between the solid/aqueous phase and the ammonia gas phase, and convective mass transfer of ammonia from the surface to the atmosphere [46].

Nitrogen excreted by broilers is mineralized by bacteria, releasing ammonium ions ( $\text{NH}_4^+$ ) from the litter.  $\text{NH}_4^+$ , in the presence of moisture and oxygen, results in the formation of ammonia, which is a highly volatile substance that is easily released into the air [15]. Under favorable environmental conditions and excreta deposition on the litter, the bacteriological degradation

process begins, resulting in the formation of simpler compounds. This process occurs as long as the raw material is available and the final inorganic substances are volatilized or assimilated by other living things, such as vegetables if they are used as fertilizer [7]. The main process that constitutes the N biogeochemical cycle in a poultry facility is mineralization, which is defined as a complex set of chemical reactions, governed mainly by biological means, where an organic substrate is converted into living biomass and mineral waste [48].

Ammonium ions in broiler litter are divided into the adsorbed and dissolved phase. Ammonia dissolved in the liquid portion of the litter surface may exist in the ammonium ion form and as free ammonia. This relationship is expressed by the dissociation constant (Kd). For the prediction of the equilibrium ammonia gas concentration over manure slurries and litter [49], it was determined a disassociation constant of ammoniacal-N [50], and it was developed Henry's Law constant [51]. Henry's constant (Kh) describes the equilibrium between free ammonia in the aqueous and gas phase [45]. This constant characterizes the ratio between a population of molecules of a given compound in two phases, determining the relative compatibility of the compound for each medium to the equilibrium between the vapor and solution phase [52]. To determine the concentration of ammonia in the air, which is in equilibrium with free ammonia in the liquid film on the free surface of water and air, Henry's law is used (Eq. 1) [49]. According to these authors, Henry's Law constant is also affected by temperature (Eq. 2). With the convective mass transfer, part of the gaseous ammonia from the broiler litter surface is transferred to the facility atmosphere [45].

$$H = \frac{[NH_3]_{liq}}{[NH_3]_{gas,surf}} \quad (1)$$

Where:

[NH<sub>3</sub>]<sub>liq</sub>: concentration of free ammonia nitrogen in liquid (kg m<sup>-3</sup>); [NH<sub>3</sub>]<sub>gas,surf</sub>: concentration of free ammonia in the gas at the liquid film at the water-air free surface (kg m<sup>-3</sup>); H: Henry's constant (dimensionless).

$$H = 1,384 * 1.053^{(293-T)} \quad (2)$$

The litter ammonia emission process involves the transportation of the aqueous phase or solid phase of ammonia to the gaseous phase in the atmosphere. The poultry litter ammonia volatilization rate is directly linked to NH<sub>3</sub> dissolved in the solution that surrounds the litter

particles. In contrast, the availability of ammonia in the broiler litter solution is influenced by factors, such as pH, humidity, temperature, and  $\text{NH}_4^+$  concentration. Under these circumstances,  $\text{NH}_4^+$  (which has low volatilization) is converted to  $\text{NH}_3$  (which is a highly volatile compound) [7].

Ammonia from broiler litter is volatilizable into the air circulating in the environment. Before being emitted into the atmosphere, ammonia is enveloped at equilibrium in the liquid (l) and gaseous (g) phases (Reactions 1-3) [53].



The balance between ammonia and ammonium ions is influenced by temperature (T) and pH. At pH values below 7.0, almost all ammonia is bound to ammonium and is not subject to volatilization. The manure pH value is decisive because it establishes the ammonia concentration in the aqueous or gaseous phase, influencing its release. Ammonia emission begins when pH is close to 7 and increases significantly when pH is greater than 8 [46]. At pH lower than 7, the  $\text{H}^+$  ions in the litter increase the ammonium: ammonia ratio, which means that more ammonia will be converted into nonvolatile ammonium ions [54].

Air temperature influences the coefficient of convective mass transfer and litter temperature may interfere with Henry's constant, the dissociation constant, and also the diffusion and generation of ammonia in the litter [45]. Elevated temperatures favor ammonia concentrations because it influences the dissociation constant  $K_d$ . The volatilization equilibrium of gaseous ammonia follows Henry's Law for dilute systems.



The partial pressure of gaseous ammonia,  $\text{NH}_3 (\text{g})$ , is proportional to the concentration of liquid ammonia,  $\text{NH}_3 (\text{l})$ . Ammonia volatilization from litter to air is defined as mass flow. This mass flow can be defined as the product of the difference in the partial pressure between the two media and a mass transfer coefficient. A higher partial pressure difference increases flow. Mass transfer coefficients increase as air velocity increases [53].

For the interphase transport system, there are many proposed theories, notably the Two Film Theory by Welty and Boundary Layer Theory by Olesen and Sommer, which gave rise to a general equation for the transfer flow of mass [7,45].

a) Two Film Theory. This theory assumes that [7]:

1. The transfer rate between films is governed by the diffusion rate through each interface;
2. There is no other resistance during the transfer of liquid or gaseous  $\text{NH}_3$  through the interfaces.

The  $\text{NH}_3$  transfer process is comprised of three steps, namely [55]:

1. Diffusion of  $\text{NH}_3$  from the interior of excreta and litter to the surface;
2.  $\text{NH}_3(\text{l})$  transfer through the surface liquid layer;
3. Convective transfer of  $\text{NH}_3$  (g) between a thin air film and then to air.

A process-based model was proposed to describe the turnover of organic matter and gas emissions, called the Manure-DNDC. In this model, the authors applied the Two Film Theory to the prediction of ammonia emission from the liquid surface of excreta into the air [56]. Ultrasonication was used to reduce ammonia levels in livestock waste, thereby improving anaerobic digestion efficiency [57]. To model the mass transfer, the Two Film Theory was applied, and from this, they estimated the ammonia mass transfer rate [57].

b) Boundary Layer Theory: This theory suggests that  $\text{NH}_3$  volatilization occurs in two stages [7]:

1. Diffusion through the liquid layer surrounding the litter particles or excreta;
2. Convective transfer of the liquid surface through the boundary layer and, soon after, to the environment.

Furthermore, Fick's Law (Eq. 3) was used [55] to mathematically represent the ammonia transfer from the liquid surface surrounding the litter particles [7].

$$j = D_g \left( \frac{C_{g,0} - C_g}{\delta_g} \right) = K_g (C_{g,0} - C_g) \quad (3)$$

Where:

$j$  ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ): is the  $\text{NH}_3$  mass flow;  $D_g$ :  $\text{NH}_3$  diffusion coefficient in the air;  $C_g$ :  $\text{NH}_3$  concentration ( $\text{kg m}^{-3}$ ) above the boundary layer;  $C_{g,0}$ :  $\text{NH}_3$  concentration in the boundary layer underlying the surface of the liquid layer surrounding the manure particles or litter;  $\delta_g$ : laminar

boundary layer thickness (m);  $K_g$ : convective coefficient of  $\text{NH}_3$  transfer in the air above the boundary layer ( $\text{m s}^{-1}$ ).

The boundary layer theory refers to the resistance that limits ammonia transfer from excreta to free airflow. It is most commonly used to estimate the gas phase mass transfer coefficient in controlled environments [58]. They evaluated the effect of different wind tunnel geometry on boundary layers and their effect on ammonia emission. It was observed that as the boundary layer thickness increased with the wind tunnel size, a higher boundary layer thickness increased the resistance of the mass transfer process from the emission surface, corroborating the boundary layer theory.

The main variables that affect  $\text{NH}_3$  volatilization are pH, relative humidity, and litter temperature. As the availability of poultry excreta in litter increases, so does the microbial population that acts on organic matter mineralization and uric acid transformation in the litter, with consequent increases in its  $\text{NH}_4^+$  content [7]. There are still other factors that present a major influence on the ammonia emission rate to be considered, such as litter material, nitrogen content in poultry feed, animal gender, breeding density, rearing time, age of birds, litter thickness, presence of aerobic and anaerobic microorganisms, urease enzyme, renewal rate, air velocity, and reuse of litter [45].

Producers must be aware of all these factors to ensure good air quality and, when necessary, take appropriate measures to maintain an appropriate indoor environment for good poultry performance. The breeding environment must provide conditions in which the animal spends the least energy to adapt to the environment, as well as promote better welfare for both poultry and workers.

## 1.7. FINAL CONSIDERATIONS

From this review, it is clear that broiler production results, directly or indirectly, in a large amount of pollutants at all stages of the production chain, and ammonia is the main gas produced. Thus, it is important to understand all the processes involved in its generation and how it affects the health and welfare of animals and humans present in these environments.

Furthermore, the nitrogen present in urea, uric acid, and proteins undigested by poultry is the main source of ammonia generation in the production system. Once excreted, it is decomposed and releases, as products, ammonium or ammonia gas. Another major nitrogen exit pathway in the system is mortality. Temperature, humidity, and pH are crucial in ammonia production in poultry houses. In addition to these, many other factors greatly influence the processes of ammonia generation, transformation, and volatilization, such as rearing density, age of the animals, litter thickness, and presence of microorganisms, among others.

The path taken by nitrogen in the broiler production system involves several stages, the most important of which are the synthesis of uric acid and excretion by poultry; mineralization of nitrogen present in excreta; volatilization of ammonia present in the litter.

Therefore, producers need to be able to identify the variables and understand the processes that cause the highest generation and emission of ammonia, so that appropriate management techniques can be adopted to maintain good air quality in the microenvironment of production units.

## 1.8. REFERENCES

- [1] ABPA. Annual Report of the Brazilian Association of Animal Protein. Brazil, 2019, 160 p. Available from: [https://abpa-br.org/wp-content/uploads/2020/05/abpa\\_relatorio\\_anual\\_2020\\_portugues\\_web.pdf](https://abpa-br.org/wp-content/uploads/2020/05/abpa_relatorio_anual_2020_portugues_web.pdf).
- [2] Oviedo-Rondón, E.O. Technologies to mitigate the environmental impact of broiler production. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 37(spe), pp. 239-252, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-35982008001300028>
- [3] Terzich, M., Pope, M.J., Cherry, T.E. and Hollinger, J. Survey of pathogens in poultry litter in the United States. *Journal of Applied Poultry Science*, 9(3), pp. 287-29, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1093/japr/9.3.287>
- [4] Angnes, G., Oliveira, P.A.V., Robin, P., Haussona, M. and Romanelli, T. Emissão de amônia durante a produção de frangos de corte em aviário tipo Dark House no Sul do Brasil. In: Paula, M.O., Tinôco I.F.F, Souza, C.F., Baêta, F.C. *Ambiência e engenharia na produção animal sustentável: condições de climas quente e temperado*, 1a ed., Viçosa, Suprema, 2016, pp. 14-18.
- [5] Sousa, F.C., Tinôco, I.F.F., Silva, J.N., Baptista, F.J.F., Souza, C.F., Silva, A.L. Gas emission in the poultry production. *Journal of Animal Behaviour and Biometeorology*, 5, 49-55, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.26667/2318-1265jabb.v5n2p49-55>
- [6] Sousa, F.C., Tinôco, I.F.F., Paula, M.O., Silva, A.L., Souza, C.F., Batista, F.J.F. and Barbari, M. Medidas para minimizar a emissão de amônia na produção de frangos de corte: revisão. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, 10(1), pp. 51-61, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2016v10n1p51-61>
- [7] Mendes, L.B., Tinôco, I.F.F., Souza, C.F. and Saraz, J.A.O. O ciclo do nitrogênio na criação de frangos de corte e suas perdas na forma de amônia volátil: uma revisão. *PUBVET*, 6(20), pp. 1381-1386, 2012.
- [8] Nimmermark, S. and Gustafsson, G. Influence of temperature, humidity and ventilation rate on the release of odour and ammonia in a floor housing system for laying hens. *International Commission of Agricultural Engineering (CIGR)* [online]. 7, 2005. Available from: <https://ecommons.cornell.edu/bitstream/handle/1813/10423/BC%2004%20008%20Gustafsson>

n%20final%20Oct2005.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[9] Nimmermark, S., Lund, V., Gustafsson, G, and Eduard, W. Ammonia, dust and bacteria in welfare-oriented systems for laying hens. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine*, 16(1), pp. 103–113, 2009.

[10] Abreu, P.G. and Abreu, V.M.N. Maximização dos sistemas de ventilação na avicultura. *Nordeste Rural*, Concórdia, 2005.

[11] Pedrolo, C. Nitrogênio. 2014. Centro Universitário Franciscano. Available from: <https://www.infoescola.com/elementos-quimicos/nitrogenio/>

[12] Fogaça, J.R.V. Nitrogênio. 2015. Available from: <https://alunosonline.uol.com.br/quimica/nitrogenio.html>

[13] Rocha, J.C., Rosa, A.H. and Cardoso, A. A. Introdução à química ambiental, 2 ed, Porto Alegre, Artmed, Bookman, 2009, 256 P.

[14] Barreto, A. Ciclo do nitrogênio. 2013. Available from: <https://dicasdeciencias.com/2013/09/14/resumao-ciclo-do-nitrogenio/>.

[15] Gay, S.W. and Knowlton, K.F. Ammonia emissions and animal agriculture. *Virginia Cooperative Extension*, 442(110), pp. 1-5. 2005.

[16] Maia, R.C. Aminoácidos de cadeia ramificada e suas relações com lisina digestível para frangos de corte. Thesis (Master's degree in zootechnics), Department of Zootechnics, Federal University of Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brazil, 2013.

[17] Albino, L.F.T., Barros, V.R.S.M., Maia, R.C., Tavernari, F.C. and Silva, D.L. Produção e nutrição de frangos de corte, 1 ed, Viçosa, Editora UFV, 2017, 360 P.

[18] Nelson, D.L., Lehninger, A.L. and Cox, M.M. *Lehninger principles of biochemistry*, 5 ed, New York, WH Freeman and Company, 2011.

[19] Dionízio, M.A., Rostagno, H.S., Paez, L.E., Buteri, C.B. and Albino, L.F. *Nutrição vs. Poluição ambiental*, 2005. Available from: <https://polinutri.com.br/upload/artigo/167.pdf>

[20] Mitchell, H. *Comparative nutrition of man and domestic animals*. 1 ed, Illinois, Academic Press Inc, 1962, 701 P.

- [21] Duarte, K.F. and Junqueira, O.M. Aminoácidos sintéticos e enzimas: ferramentas importantes na redução dos custos de produção de frangos de corte. *Revista Produção Animal - Avicultura*, 73, 2013. Available from: [https://www.avisite.com.br/revista/materias/aminoacidos\\_sinteticos\\_enzimas.html](https://www.avisite.com.br/revista/materias/aminoacidos_sinteticos_enzimas.html)
- [22] Buteri, C.B. Efeitos de diferentes planos nutricionais sobre a composição e o desempenho produtivo e econômico de frangos de corte. Thesis (Doctor's degree in zootechnics), Department of Zootechnics, Federal University of Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brazil, 2003.
- [23] Silva, C.R. Performance and deposition of nutrients of broilers chickens fed with different lysine levels. Thesis (Doctor's degree in zootechnics), Department of Zootechnics, Federal University of Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brazil, 2012.
- [24] Nery, L.R., Albino, L.F.T., Rostagno, H.S., Campos, A.M.A and Silva, C.R. Valores de energia metabolizável de alimentos determinados com frangos de corte. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 36(5), pp. 1354-1358, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982007000600018>
- [25] Lopez, G. and Leeson, S. Relevance of Nitrogen Correction for Assessment of Metabolizable Energy with Broilers to Forty-Nine Days of Age. *Poultry Science*, 86(8), pp. 1696-1704, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1093/ps/86.8.1696>
- [26] Maruno, M. Avaliação da essencialidade da metionina e lisina em frangos de corte pelo turnover de isótopos estáveis de carbono. Thesis (Master's degree in zootechnics), Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, São Paulo, Brazil, 2013.
- [27] Eits, R.M., Kwakkel, R.P., Verstegen, M.W.A., Stoutjesdijk, P. and Greef, K.H. Protein and lipid deposition rates in male broiler chickens: Separate responses to amino acids and protein-free energy. *Poultry Science*, 81(4), pp. 472-480, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1093/ps/81.4.472>
- [28] Trindade Neto, M.A., Takeara, P., Toledo, A.L., Kobashigawa, E., Albuquerque, R. and Araújo, L.F. Digestible lysine levels for male broilers in the period from 37 to 49 days of age. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 38(3), pp. 508-514, 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-35982009000300016>
- [29] Brito, C.O. Avaliação de dietas formuladas com aminoácidos totais e digestíveis e

estimativas do crescimento. Thesis (Doctor's degree in zootechnics), Department of Zootechnics, Federal University of Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brazil, 2007.

[30] Summers, J.D., Spratt, D. and Atkinson, J.L. Broiler weight gain and carcass composition when fed diets varying in amino acid balance, dietary energy, and protein level. *Poultry Science*, 71(2), pp. 263–273, 1992. DOI: <https://doi.org/10.3382/ps.0710263>

[31] Malone, G.W., Saylor, W.W., Ariza, M.G., Lomax, K.M. and Kaifer, C.R. Acid preservation and utilization of poultry carcasses resulting from mortality losses. *Progress through Research and Extension*, Newark, 1987, 4 p.

[32] Silva, Y.L., Rodrigues, P.B., Freitas, R.T.F., Bertechini, A.G., Fialho, E.T., Fassani, E.J. and Pereira, C.R. 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), pp. 840–848, 2006. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-35982006000300029>

[33] Cauwenberghe, S.V. and Burnham, D. New developments in amino acid and protein nutrition of poultry, as related to optimal performance and reduced nitrogen excretion. In: *European Symposium of Poultry Nutrition*. European Symposium of Poultry Nutrition, Blankenberg, Belgium, 2001.

[34] Pavan, A.C., Móri, C., Garcia, E.A., Scherer, M.R. and Pizzolante, C.C. Níveis de proteína bruta e de aminoácidos sulfurados totais sobre o desempenho, a qualidade dos ovos e a excreção de nitrogênio de poedeiras de ovos marrons. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 34(2), pp. 568–574, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982005000200026>

[35] Ritz, C.W., Fairchild, B.D. and Lacy, M.P. Implications of ammonia production and emissions from commercial poultry facilities: A review. *Journal of Applied Poultry Research*, 13(4), 684–692, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1093/japr/13.4.684>

[36] Heier, B.T., Hogåsen, H.R. and Jarp, J. Factors associated with mortality in Norwegian broiler flocks. *Preventive Veterinary Medicine*, 53(1–2), 147–158, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-5877\(01\)00266-5](https://doi.org/10.1016/S0167-5877(01)00266-5)

[37] Keener, H.M. and Zhao, L. A modified mass balance method for predicting NH<sub>3</sub> emissions from manure N for livestock and storage facilities. *Biosystems Engineering*, 99(1), 81–87, 2008.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.09.006>

[38] Gates, R.S. Poultry diet manipulation to reduce output. In: Simpósio sobre Resíduos da Produção Avícola. Concórdia, 2000, pp. 63–75.

[39] Kelleher, B.P., Leahy, J.J., Henihan, A.M., O'dwyer, T.F., Sutton, D. and Leahy, M.J. Failure and Fracture Analysis of Bolt Assembled on the Fan Used in the Internal Combustion Engine. *Bioresource Technology*, 83, 27–36, 2001.

[40] Sims, J.T. and Wolf, D.C. Poultry Waste Management: Agricultural and Environmental Issues. *Advances in Agronomy*, 52, 1–83, 1994. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60621-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60621-5)

[41] Marín, O.L.Z. Caracterização e avaliação do potencial fertilizante e poluente de distintas camadas de frango submetidas a reusos sequenciais na Zona da Mata do Estado de Minas Gerais. Thesis (Master's degree in Agricultural Engineering), Department of Agricultural Engineering, Federal University of Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brazil, 2011.

[42] Faria Filho, D.E., Rosa, P.S., Figueiredo, D.F., Dahlke F., Macari, M. and Furlan, R.L. Dietas de baixa proteína no desempenho de frangos criados em diferentes temperaturas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41(1), 101–106, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000100014>

[43] Melo, C., Alvarenga, R.R., Santos, L.M., Oliveira, D.M., Lago, A.A., Oliveira, E.C., Rodrigues, P.B. and Zangeronimo, M.G. Influência de diferentes intervalos de coleta de excretas sobre o valor energético e de nutrientes metabolizáveis de alimentos para aves. *Acta Tecnológica*, 9(2), 27–32, 2014.

[44] Mendes, M.A.S.A., Tinôco, I.F.F., Vieira, M.F.A., Coelho, D.J.R., Souza, T.D., Oliveira, K.P. and Dalólio, F.S. Caracterização dos resíduos produzidos por aves poedeiras criadas em sistemas verticais. In: Paula, M.O., Tinôco I.F.F, Souza, C.F., Baêta, F.C. *Ambiência e engenharia na produção animal sustentável: condições de climas quente e temperado*, 1a ed., Viçosa, Suprema, 2016, pp. 133–137.

[45] Egute, N.D.S., Abrao, A., Carvalho, F. Estudo do processo da geração de amônia a partir de resíduos avícolas visando a produção de hidrogênio. *Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento*, 12(1), pp. 1-6, 2010.

- [46] Liu, Z., Wang, L. and Beasley, D.B. A review of emission models of ammonia released from broiler houses. In: 2006 ASAE Annual Meeting. Portland: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006, paper No. 064101. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.21568>
- [47] Felix, E.P. and Cardoso, A.A. Amônia (NH<sub>3</sub>) atmosférica: Fontes, transformação, sorvedouros e métodos de análise. *Química Nova*, 27(1), 123–130, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422004000100022>
- [48] Manzoni, S. and Porporato, A. Soil carbon and nitrogen mineralization: Theory and models across scales. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(7), 1355–1379, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.02.031>
- [49] Gates, R.S., Taraba, J.L., Ferguson, N.S. and Turner, L.W. A Technique for Determining Ammonia Equilibrium and Volatilization from Broiler Litter. In: 1997 ASAE Annual International Meeting, 1(3), Minneapolis, paper No. 974074, 1997.
- [50] Muck, R.E. and Steenhuis, T.S. Nitrogen losses from manure storages. *Agricultural Wastes*, 4, 41–54, 1982. DOI: [https://doi.org/10.1016/0141-4607\(82\)90053-1](https://doi.org/10.1016/0141-4607(82)90053-1)
- [51] Hashimoto, A.G. and Ludington, D.C. Ammonia desorption from concentrated chicken manure slurries. In: *Proceedings Livestock Waste Management and Pollution Abatement*, St Joseph MI, 1981, pp. 117–121.
- [52] Schwarzenbach, R.P., Gschwend, P.M. and Imboden, D.M. *Environmental Organic Chemistry*. New York: John Wiley & Sons, 1993, 681 p.
- [53] Takai, H., Pedersen, S., Johnsen, J. O., Metz, J.H.M., Koerkamp, P.G., Metz, J.H.M., Uenk, G.H., Phillips, V.R., Holden, M.R., Sneath, R.W., Short, J.L., White, R.P., Hartung, J., Seedorf, J., Schroder, M., Linkert, K.H., Pedersen, S., Takai, H., Johnsen, J.O. and Wathes, C.M. Concentrations and emissions of airborne endotoxins and microorganisms in livestock buildings in Northern Europe. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 70(1), 79–95, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1006/jaer.1997.0280>
- [54] Oliveira, M.C., Almeida, C.V., Andrade, D.O. and Rodrigues, S.M.M. Dry matter content, pH and volatilized ammonia from poultry litter treated or not with different additives. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 32(4), 951–954, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516->

35982003000400022

[55] Ni, J. Mechanistic models of ammonia release from liquid manure: A review. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72(1), 1–17, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0342>

[56] Li, C., Salas, W., Zhang, R., Krauter, C., Rotz, A. and Mitloehner, F. Manure-DNDC: A biogeochemical process model for quantifying greenhouse gas and ammonia emissions from livestock manure systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 93(2), 163–200, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10705-012-9507-z>

[57] Cho, S.K., Lee, M.K., Kim, D.H., Yun, Y.M., Jung, K.W., Shin, H.S. and Oh, S.E. Enhanced anaerobic digestion of livestock waste by ultrasonication: A tool for ammonia removal and solubilization. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 31(4), 619–623, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11814-013-0284-4>

[58] Saha, C.K., Wu, W., Zhang, G. and Bjerg, B. Assessing effect of wind tunnel sizes on air velocity and concentration boundary layers and on ammonia emission estimation using computational fluid dynamics (CFD). *Computers and Electronics in Agriculture*, 78(1), 49–60, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.05.011>

## **CAPÍTULO II**

# **SISTEMAS DE VENTILAÇÃO NA AVICULTURA BRASILEIRA: ESTADO DA ARTE**

Artigo publicado no periódico Brazilian Journal of Biosystems Engineering  
v. 14(2): 152-171, 2020. ISSN 2359-6724

## **SISTEMAS DE VENTILAÇÃO NA AVICULTURA BRASILEIRA: ESTADO DA ARTE**

**Monique O. Vilela<sup>1\*</sup>, Richard S. Gates<sup>2</sup>, Cecília F. Souza<sup>1</sup>, Márcio A. Martins<sup>1</sup>, Ilda F. F. Tinôco<sup>1</sup>, Carlos G. S. Teles Júnior<sup>3</sup>**

*1 Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, Viçosa, Minas Gerais, Brasil*

*2 Iowa State University, Departments of Agricultural and Biosystems Engineering, and Animal Science, Egg Industry Center, Ames, USA*

*3 Universidade Federal Rural da Amazônia, Instituto de Ciências Agrárias- Campus Belém, Pará, Brasil*

### **RESUMO**

O Brasil é um dos principais produtores mundiais de carne de frango e de ovos, e para se manter competitivo no mercado, novas metodologias vem sendo estudadas e implementadas a fim de se obter maior rendimento na produção, enfatizando-se o manejo, dieta, sanidade e ambiência. Neste sentido, o monitoramento e controle de variáveis relacionadas ao ambiente térmico e qualidade do ar são de extrema relevância. Ademais, o perfil do consumidor atual tem se mostrado cada vez mais exigente frente ao bem-estar animal diante da grande visibilidade desse conceito nos últimos anos, segundo o qual a procedência dos produtos consumidos são critérios de escolha no momento da compra. Na produção avícola industrial, um dos pontos cruciais para garantia de um ambiente confortável para as aves e, assim, boas respostas nos índices zootécnicos, consiste na escolha e dimensionamento correto do sistema de ventilação instalado nos galpões de criação. Diante disso, para alcançar melhor distribuição do fluxo de ar em aviários e atender as exigências internacionais de bem-estar e qualidade do ar, de acordo com os padrões de qualidade exigidos, esta revisão de literatura objetivou apresentar um levantamento dos principais sistemas de ventilação, bem como de sua aplicabilidade na avicultura brasileira, além de reportar o estado na arte nesse tema.

Palavras-chave: Acondicionamento térmico. Aviário. Ventilação híbrida. Ventilação mecânica. Ventilação natural.

### **VENTILATION SYSTEMS IN BRAZILIAN POULTRY: STATE OF THE ART**

#### **ABSTRACT**

Brazil is one of the main world producers of chicken meat and eggs, and in order to remain competitive, new methodologies have been studied and implemented with the purpose of obtaining greater production yield, always emphasizing management, diet, sanitation and environment. In this sense, the monitoring and control of variables related to the indoor thermal environment and air quality are extremely important. Furthermore, the current consumer profile is increasingly demanding a focus on animal welfare and origin of products consumed are fundamental criteria for decision making at the purchase time. In commercial poultry production, one of the crucial needs is to guarantee a comfortable environment for the birds

and, consequently, proper ventilation system design. To achieve the best distribution of air flow in poultry facilities and, thus, to meet international welfare and air quality requirements, according to the required quality standards, this literature review aimed provides a survey of the main ventilation systems and their applicability to Brazilian poultry production.

Keywords: Hybrid ventilation. Mechanical ventilation. Natural ventilation. Poultry house. Thermal conditioning.

## 2.1. INTRODUÇÃO

O ambiente de criação é crucial para o desempenho satisfatório da avicultura, uma vez que, dependendo da duração e intensidade do estresse térmico, a produtividade pode ser comprometida, gerando grandes perdas econômicas (CURTIS, 1983). É fato que os principais elementos climáticos que afetam o conforto térmico das aves no interior das instalações são a temperatura do ar, umidade relativa, radiação e movimentação do ar. Esses fatores externos tendem a influenciar a quantidade de energia trocada entre ave e meio, havendo, muitas vezes, a necessidade de ajustes fisiológicos para a ocorrência do balanço de calor (BAÊTA & SOUZA, 2010).

A ventilação é uma parte essencial do sistema de controle ambiental em todos os tipos de instalações para produção animal e vegetal. A principal função da ventilação é promover a troca de ar do ambiente interno de acordo com as condições ambientais e com as exigências térmicas dos animais alojados. Como a necessidade de ventilação varia em função do clima, época do ano, necessidade da espécie, manejo, entre outros fatores, o projeto de ventilação requer o entendimento das interações complexas entre os fatores físicos e biológicos do sistema (HELLICKSON & WALKER, 1983; ALBRIGHT, 1990; SANTOS et al., 2012). O vento é definido como a movimentação das massas de ar e consiste em um dos agentes de dissipação do calor metabólico do animal através da convecção. Mesmo quando não reduz a temperatura do ar, favorece o mecanismo convectivo, e dentro dos limites recomendados, melhora a sensação térmica dos animais, pois remove o calor produzido pelos mesmos e controla a umidade do ambiente (ABREU & ABREU, 2000; FERREIRA, 2016).

Segundo Souza et al., (2017), as perdas na produção avícola, tanto de carne quanto de ovos, geralmente ocorrem devido às altas temperaturas do ar, típicas em determinadas regiões do país, principalmente onde o clima é quente e úmido. O estresse por calor aumenta conforme a temperatura do ar e a umidade relativa do ambiente se elevam, impossibilitando assim as trocas de calor do animal com o meio. Blakely et al. (2007) afirmam que as variações térmicas do ambiente de criação são fortemente influenciadas pela velocidade do ar, acometendo

significativamente a performance das aves. Altas velocidades do ar diminuem a temperatura efetiva. O conceito de temperatura efetiva advém da condição térmica do ambiente considerando não só a temperatura do ar, mas também as trocas de calor por convecção e radiação, além da influência da umidade relativa. Sendo assim, a presença de correntes de ar é prejudicial em ambientes frios. No entanto, em ambientes quentes, certos valores de velocidade do ar podem amenizar o calor, como observado por Ruzal et al. (2011), que relatam que altas taxas de velocidade ( $3 \text{ m s}^{-1}$ ) afetam positivamente a produção de ovos. Saraz et al. (2013), avaliando a distribuição da temperatura do ar em aviários equipados com ventilação tipo túnel combinada com nebulização, observaram que houve redução da temperatura do ar, permanecendo na faixa entre 23 e 29°C, considerada confortável enquanto os dois sistemas foram usados simultaneamente. Vilela (2016) avaliou os efeitos da temperatura, umidade e velocidade do ar sobre o comportamento e desempenho de codornas japonesas em três ambientes térmicos diferentes, sendo eles conforto térmico, calor úmido e calor seco, combinados com dois níveis de velocidade do ar ( $0,0 \text{ m s}^{-1}$  e  $2,3 \text{ m s}^{-1}$ ) e concluiu que os ambientes mantidos com calor úmido e baixas velocidades do ar resultaram em maiores índices de aves prostradas, maior ingestão de água e, conseqüentemente, menor desempenho produtivo. Similarmente, Santos et al. (2017) avaliaram a influência de diferentes velocidades do ar (0, 1, 2, e  $3 \text{ m s}^{-1}$ ) na zona do comedouro, em associação a diferentes temperaturas ambientais (17, 23, 29 e 35°C) sobre o comportamento de codornas japonesas. Os autores concluíram que as aves sob altas temperaturas (35°C) e condições de ar parado ( $0 \text{ m s}^{-1}$ ) reduziram significativamente a frequência do comportamento ingestivo quando comparadas às aves expostas as velocidades de 1, 2 e  $3 \text{ m s}^{-1}$ .

Ademais, a renovação do ar no interior de aviários é imprescindível para o balanço de umidade e para a eliminação de gases como a amônia e dióxido de carbono, poeira, microrganismos e odores, além de favorecer a redução da transferência de calor pela cobertura, contribuindo com as trocas de calor do animal por convecção e evaporação (YANAGI JÚNIOR, 2006; BAÊTA & SOUZA, 2010; ABREU et al., 2011; BIANCHI et al., 2015; ALBINO et al., 2017). Desse modo, a ventilação representa uma das mais importantes estratégias para a manutenção do conforto térmico e da qualidade do ar em aviários, pois auxilia na redução da produção de calor metabólico e, em condições de estresse, mantém o equilíbrio eletrolítico (NAWAB et al., 2018).

É notória a evolução dos sistemas de produção avícola nas últimas décadas, tanto em termos de tecnificação do sistema e aperfeiçoamento das tipologias construtivas quanto nas áreas de genética e nutrição. Todavia, deve-se ressaltar que o acondicionamento térmico dos

aviários ainda demanda melhorias sucessivas, já que o ambiente de criação é um dos principais fatores que podem levar a grandes perdas econômicas a nível industrial. Além disso, a evolução dos sistemas de acondicionamento térmico deve ter em vista o bem-estar e manejo humanizado dos animais diante de um mercado consumidor cada vez mais exigente (SOUZA et al., 2017).

Nesse contexto, mais pesquisas devem ser realizadas a fim de aperfeiçoar as configurações dos sistemas de ventilação para o melhor fluxo de ar nas instalações animais e, assim, atender as exigências internacionais de bem-estar e questões relacionadas à qualidade do ar, de acordo com os padrões de qualidade exigidos. O conhecimento acerca dos sistemas de ventilação praticados em instalações avícolas é extremamente importante para o bom dimensionamento do projeto e para a definição do tipo de ventilação que melhor se adequa às especificidades da região. Sendo assim, objetivou-se, com a presente revisão de literatura, abordar e elucidar os principais sistemas de ventilação e sua aplicabilidade na avicultura brasileira.

## **2.2. FATORES DETERMINANTES PARA MANUTENÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO EM PROJETOS ARQUITETÔNICOS DE AVIÁRIOS**

Segundo Tinôco (2001), não existe um projeto arquitetônico de padrão universal, visando o conforto ambiental dos animais, que possa ser implementado em todo o mundo, haja vista as distintas condições climáticas observadas nas diferentes regiões. Assim sendo, cada localidade requer tipologias construtivas e arranjos específicos para oferecer as melhores condições de conforto térmico, de acordo com as necessidades de cada espécie. Ferreira (2016) aponta que, por muito tempo, as estruturas adotadas na avicultura brasileira foram importadas de regiões de clima temperado, como países da Europa e os Estados Unidos. Como consequência, por muitas vezes o projeto e os materiais de construção empregados não foram condizentes com o clima do Brasil. O autor afirma que, ainda hoje, constata-se que a inserção de novas tecnologias pode comprometer a eficiência do sistema produtivo em virtude do despreparo de funcionários ao operar o equipamento. A própria concepção arquitetônica inadequada pode acometer o bom funcionamento dos equipamentos e, assim, o desempenho dos animais.

Tinôco (2001) afirma que o projeto de um aviário deve se adequar ao clima da região onde será concebido, em consonância com as necessidades dos seus ocupantes, bem como amenizar sensações de desconforto em caso de calor, frio ou vento em excesso. Nesse aspecto, o entendimento dos aspectos fisiológicos, padrões comportamentais e a relação das aves com o

ambiente em que vivem torna-se indispensável. Além do mais, é crucial a compreensão sobre os processos construtivos da instalação e conceitos básicos de ambiência e bem-estar animal.

O projeto arquitetônico para a produção avícola deve atender não só parâmetros funcionais, estruturais, econômicos e estéticos, mas também deve possibilitar a maior eficiência energética dos sistemas de aquecimento e resfriamento, além de favorecer o conforto térmico durante a maior parte do tempo. Caso o aviário venha a apresentar algum defeito em sua estrutura, de modo a prejudicar a adequada ventilação, a renovação do ar e a manutenção da temperatura dentro da faixa de conforto, os animais tornam-se propensos ao desenvolvimento de problemas de saúde, baixo desempenho e altas taxas de mortalidade (PAULA et al., 2012).

No Brasil, é predominante o sistema de integração na produção de frangos de corte e, por isso, há a exigência, por parte da empresa integradora, de que os projetos sejam padronizados. Para manter a competitividade, os aviários contemporâneos apresentam características industriais, altamente tecnificados e com grandes dimensões. São dimensionados, em média, com 12 m de largura e 125 m de comprimento, podendo atingir a extensão de até 160 m (TINÔCO, 2001).

Em adição a todas as características construtivas, como dimensões, orientação, material de construção e cobertura, forro, pintura e paisagismo circundante, a ventilação é um elemento que deve ser bem conhecido e explorado pelo avicultor, já que é primordial para o melhor acondicionamento térmico.

### **2.3. TIPOS DE VENTILAÇÃO ADOTADOS EM INSTALAÇÕES ANIMAIS**

De acordo com Hellickson & Walker (1983), Albright (1990) e Baêta & Souza (2010), existem duas formas de se ventilar uma edificação: a ventilação natural e mecânica (ou artificial).

A ventilação natural pode ocorrer em função das diferenças de pressão devido à ação dinâmica do vento (chamada de ventilação dinâmica) ou em função de gradientes de temperatura entre dois meios considerados (denominada ventilação térmica). Abreu & Abreu (2000) reportaram que o vento ocorre em função da diferença de pressão atmosférica ao nível do solo que, por sua vez, decorre em consequência da variação de temperatura. Ainda, segundo os autores, o ar sempre flui de um ponto de alta pressão para baixa pressão, ou seja, a velocidade do ar em um galpão é sempre maior nas aberturas onde o vento incide do que ao lado oposto, por onde o vento deixa a instalação. A ação dos ventos, mesmo intermitente, promove o escalonamento das pressões no sentido horizontal.

Existem dois mecanismos relativos à pressão na ventilação natural que devem ser compreendidos para que o sistema seja efetivamente eficiente (HELLICKSON & WALKER, 1983; ALBRIGHT, 1990; JONES & WEST, 2001). O primeiro mecanismo diz respeito a própria pressão induzida pela ação do vento, onde dois efeitos importantes podem ocorrer: o efeito Bernoulli e o efeito Venturi. O efeito Bernoulli resulta no desenvolvimento de zonas de fluxo de ar acelerado e desacelerado, acarretando em pressão positiva a barlavento e negativa a sotavento. Já o efeito Venturi causa aceleração quando o fluxo de ar laminar é ligeiramente contraído por uma abertura, resultando em pressão negativa na região da constricção. Este é um efeito profícuo em projetos de torres eólicas, como saída por exaustão (JONES & WEST, 2001).

O segundo mecanismo decorrente é o efeito de tiragem ou termossifão, que ocorre quando o ar interior é mais aquecido que o ar exterior e, portanto, por ser menos denso, tende a subir para a parte superior da edificação. Também denominado como ventilação térmica, o processo é derivado das diferenças de temperatura no ambiente, criando gradientes de pressão provocados graças às variações de densidade do ar no interior dos aviários, resultando no efeito supracitado. A diferença de pressão se dá em função da diferença de temperatura do ar entre o interior e o exterior do galpão; do tamanho das aberturas de entrada e saída do ar pelo lanternim; e da diferença de nível entre essas aberturas. Hellickson et al. (1983) nomeou esse efeito como “efeito chaminé”. Quando uma instalação apresenta aberturas próximas ao piso e à cobertura, em condições onde o ar interior está em uma temperatura maior que do ar exterior, o ar mais quente, por ser menos denso, tende a sair pelas aberturas superiores. Simultaneamente, o ar mais frio e mais denso adentra pelas aberturas inferiores, promovendo o fluxo de ar no interior da edificação (BAÊTA & SOUZA, 2010). O primeiro fator a ser considerado para alcançar taxas corretas de ventilação é o projeto das aberturas de ar (WILSON et al., 1983).

Abreu & Abreu (2000) afirmam que o dimensionamento e localização das aberturas devem ser considerados para o controle da corrente de ar. Segundo os autores, as aberturas de entrada devem ser posicionadas na direção onde incidem os ventos dominantes. A inclinação do telhado também tem sua importância, visto que, quanto maior tal inclinação, maior a velocidade do ar na cumeeira, gerando uma pressão negativa mais acentuada e, conseqüentemente, incrementando a sucção de ar interno para o exterior do galpão. Portanto, o uso do lanternim é essencial para uma ventilação natural eficiente. Recomenda-se que o mesmo seja em duas águas, ao longo de toda a extensão da cumeeira, permitindo abertura mínima de 10% da largura do aviário, com telhados sobrepostos distanciados no mínimo 40 cm (ABREU & ABREU, 2000; BAÊTA & SOUZA, 2010).

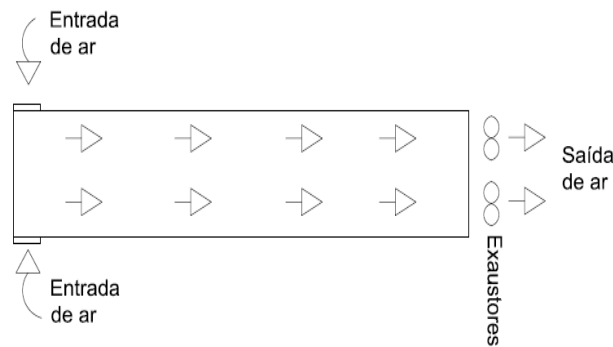
Para Ferreira (2016), a velocidade de deslocamento das massas de ar no “efeito chaminé” depende da diferença de altura entre as aberturas. Portanto, é indicado que o manejo das cortinas seja realizado corretamente para que a ventilação seja eficiente, de modo que haja aberturas de baixo para cima até dois terços de altura da parede lateral, a fim de favorecer a dissipação do calor corporal das aves e umidade da cama; e de cima para baixo até alcançar o mesmo ponto, para promover a saída de ar quente acumulado na área superior do aviário. Além das dimensões e da localização das aberturas de entrada e saída de ar, a produção e perda de calor pela instalação e pelos animais, a umidade relativa do ambiente interno e o isolamento térmico do aviário podem influenciar a taxa mínima demandada para a ventilação térmica (BAÊTA & SOUZA, 2010).

Segundo Tinôco et al. (2014), em regiões nas quais a temperatura do ar é mais elevada, é inevitável a realização de modificações nas instalações, como, por exemplo, o uso de ventilação mecânica, muitas vezes associados a sistemas de resfriamento evaporativo. A ventilação mecânica, também designada ventilação artificial ou forçada, é realizada por meio de equipamentos que demandam energia, principalmente elétrica, para que sejam acionados, como é o caso de ventiladores e exaustores. É muito importante que a ventilação mecânica seja empregada sempre que a ventilação natural não for suficiente para prover a renovação do ar e redução da temperatura ambiental no interior de um galpão. A principal vantagem desse sistema é a possibilidade do controle da taxa de ventilação de acordo com a necessidade e, quando bem planejado, favorece a melhor distribuição da ventilação no local (BAÊTA & SOUZA, 2010).

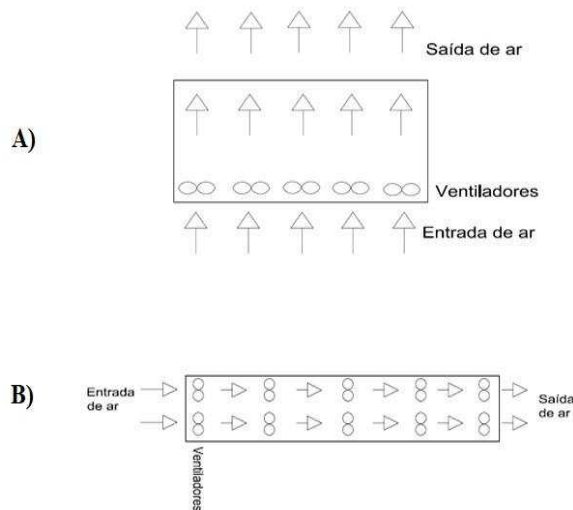
A ventilação mecânica pode ser realizada de duas formas:

- 1) por pressão negativa ou exaustão (Figura 2.1);
- 2) por pressão positiva ou pressurização que, por sua vez, pode ser do tipo transversal ou longitudinal; (Figuras 2.2 A e B, respectivamente).

No sistema por pressão negativa, exaustores puxam o ar interno para fora da instalação, criando um vácuo parcial que força a entrada de ar fresco e este, por sua vez, percorre todo o galpão. A manutenção da pressão negativa dentro do aviário é o que garante a entrada de ar na direção e velocidades adequadas para que se misture com o ar já existente (OBERREUTER & HOFF, 2000; FRAME & ANDERSON, 2002). Quando as cortinas permanecem fechadas, o sistema é chamado de ventilação tipo túnel e sua eficiência depende de uma boa vedação do aviário. Já o sistema por pressão positiva consiste em ventiladores que insuflam o ar externo para o interior do aviário, obrigando a saída do ar interno (BAÊTA & SOUZA, 2010; FERREIRA, 2016).



**Figura 2.1.** Sistema de ventilação por pressão negativa ou exaustão.  
Fonte: Os autores.



**Figura 2.2.** Sistema de ventilação por pressão positiva, onde A) ventilação por pressão positiva lateral; B) ventilação por pressão positiva tipo túnel.  
Fonte: Os autores.

O emprego de ventilação por pressão negativa tem sido uma das estratégias mais utilizadas pelos avicultores para proporcionar as condições ambientais o mais próximo possível ao requerimento dos animais (SILVA et al., 2013). As principais vantagens desse sistema, segundo Yohannes & Tekle (2018), são temperaturas do ar e umidade relativa mantidas dentro de faixas desejadas, bem como níveis de amônia dentro de limites especificados pelas normas. Além disso, esse tipo de sistema permite maior controle e uniformidade do fluxo de ar no interior do galpão, minimizando zonas mortas de ar.

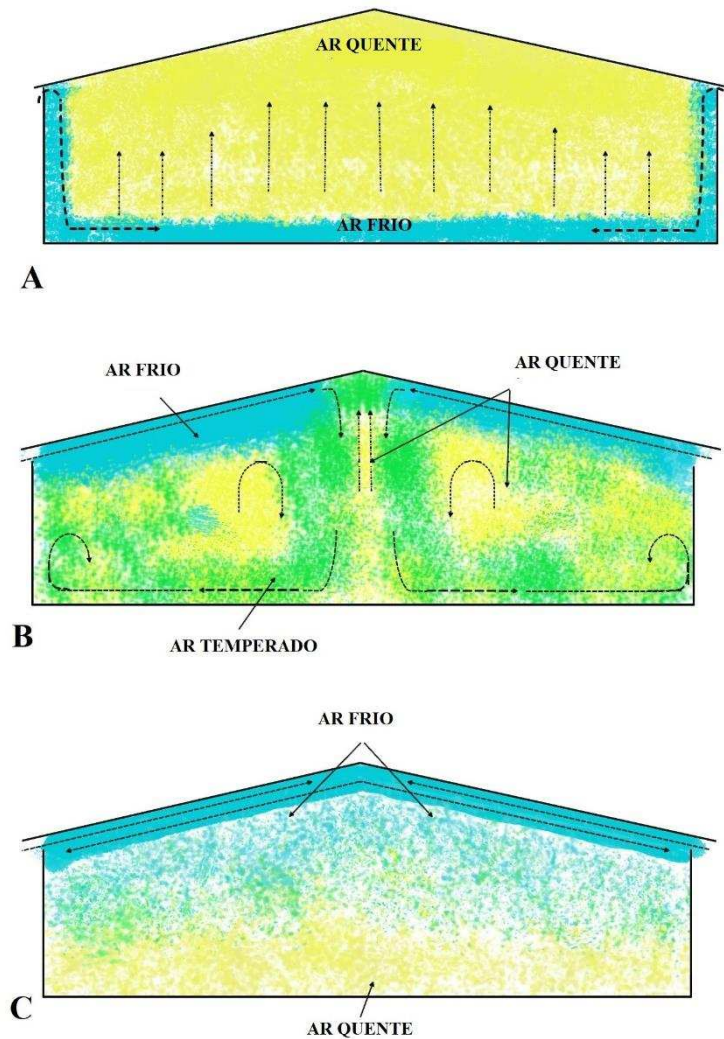
Tanto o sistema por pressão negativa quando por pressão positiva apresentam desempenho eficiente quando são propriamente dimensionados, com número e tamanho de ventiladores adequados e o manejo correto das aberturas para entrada de ar. Contudo, observa-se que os sistemas de ventilação por pressão positiva vem caindo em desuso por ser mais difícil

o gerenciamento e controle do fluxo de ar. Segundo Mesa et al. (2017), a ventilação por pressão negativa proporciona maior efetividade e uniformidade na mistura de ar no interior do aviário, quando comparada ao sistema de ventilação por pressão positiva. O mesmo foi observado por Osório et al. (2016b), ao avaliar o microambiente de criação de frangos submetidos à ventilação por pressão negativa e positiva. Ao confrontar os dois tipos de ventilação mecânica, os autores constataram que a ventilação por pressão negativa resulta em comportamento mais estável e uniforme na distribuição espacial de temperatura e umidade do ar. Conseqüentemente, maior distribuição do calor e melhores condições de conforto térmico são alcançadas. Para que o fluxo do ar na ventilação por pressão positiva seja mais uniforme, dutos para o direcionamento de ar fresco nas regiões necessárias são uma exigência. Além disso, o sistema é susceptível à influência de ventos fortes que sopram nas saídas, o que, de fato, é de difícil controle.

Outra vantagem do sistema de ventilação por pressão negativa consiste no fato de que, mesmo se a construção possuir problemas de vedação, como fissuras, frestas de vãos das portas ou qualquer outro tipo de vazamento de ar, o sistema permanecerá apresentando um bom desempenho, desde que as entradas de ar sejam dimensionadas e manejadas corretamente.

Em ambas as técnicas de ventilação mecânica, a pressão é determinante para o sucesso do sistema. Abreu & Abreu (2000) declaram que a pressão está relacionada diretamente com a vazão e não com a velocidade e, por isso, é fundamental saber a quantidade de ar demandada. A pressão estática refere-se à leve diferença de pressão entre o interior e o exterior do aviário durante o funcionamento dos exaustores, que faz com que o ar interior seja empurrado para fora (CURTIS, 1983; ALBRIGHT, 1990; FRAME & ANDERSON, 2002). De acordo com Albright (1990), quando a pressão estática é muito baixa, o ar não é bem misturado devido ao momento do jato de ar diminuto e/ou à insuficiente velocidade do ar fresco recebido, ocorrendo assim, a estagnação de ar quente e ar frio na instalação (Figura 2.3-A). Além disso, o controle da largura da abertura da entrada é crucial para manter uma boa distribuição de ar dentro de uma edificação, uma vez que, pela equação da continuidade, influencia diretamente a velocidade do ar de entrada. Caso a velocidade seja muito menor que os valores projetados, o momento de jato não é capaz de possibilitar a mistura, criando regiões de zonas mortas de ar (ALBRIGHT, 1989; GATES et al., 1991). A pressão estática em níveis adequados propicia a entrada de ar fresco e a homogeneização do mesmo, permitindo um ligeiro aquecimento antes de alcançar o nível das aves (Figura 2.3-B). Quando a pressão estática se encontra demasiadamente alta, o ar fresco pode ser impulsionado ao longo do teto e, assim, a mistura com o ar presente no aviário é prejudicada. Conseqüentemente, o equilíbrio da temperatura entre o ar fresco e o ar interior

também é afetado (Figura 2.3-C) (ALBRIGHT, 1989; GATES et al., 1991; FRAME & ANDERSON, 2002).



**Figura 2.3.** Distribuição de ar em diferentes níveis de pressão estática em aviários, onde A) Pressão estática insuficiente; B) Pressão estática adequada; C) Pressão estática excessiva. Fonte: Adaptado de Frame & Anderson (2002).

É importante que o ar fresco que adentra o galpão se misture com o ar interno presente no ambiente antes mesmo de atingir o nível das aves, evitando que o ar frio incida diretamente sobre as mesmas. Em períodos frios, a diferença de temperatura do ar que entra e o ar interior pode ser bastante elevada, e essa situação pode caracterizar uma condição crítica principalmente às aves mais jovens, que são mais vulneráveis ao estresse por frio (ALBRIGHT, 1990).

Para o melhor entendimento da Figura 2.3, é preciso conhecer o conceito de jato de ar e momento do jato. Segundo Albright (1990), jato de ar é definido como uma região do ar que se

move em velocidade diferente da velocidade do ar circundante. Ao infiltrar-se em uma instalação através de uma entrada de ar, o ar fresco possui uma velocidade significativa, ao passo que o ar interno se mantém praticamente parado. Se o jato de ar é direcionado para longe das extremidades da instalação, é denominado jato livre. Se o fluxo for conduzido ao longo de uma parede ou do teto, é chamado jato de parede. Quando passa por uma entrada de ar em uma construção, o ar forma um jato e possui momento. Segundo Albright (1990), acredita-se que o momento não é perdido no ar circundante, apenas propaga-se no ar parado por arrastamento. O jato aumenta por arrastamento e diminui conforme o momento é distribuído por uma maior massa de ar. Como mencionado por Strøm et al. (2002), estudos sobre características do fluxo de ar em ambientes dotados de sistemas de ventilação demonstrados por Kaul et al. (1975) revelam que o momento do jato de entrada pode caracterizar esses padrões de fluxo de ar. Albright (1989) afirma que o momento de jato foi estabelecido como um critério para indicar se um jato constituirá padrões estáveis de mistura de ar em uma instalação ventilada isotérmica. De acordo com Timmons et al. (1986), Albright (1989) e Strøm et al. (2002), Barber et al. (1982) propuseram um número de momento de jato adimensional, definido como:

$$J = \frac{Q \cdot v}{g \cdot V} \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde Q é a taxa total de ventilação ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ); v é a velocidade do jato de entrada ( $\text{m s}^{-1}$ ); g, a constante gravitacional ( $\text{m s}^{-2}$ ); e V, o volume da instalação ( $\text{m}^3$ ).

Segundo Strøm et al. (2002), para padrões estáveis de fluxo de ar é necessário número de momento de jato maior que  $7,5 \cdot 10^{-4}$ . A velocidade do jato de entrada é dado pela Equação 2:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde  $\Delta p$  é a diferença de pressão através da entrada e  $\rho$  é a densidade do ar.

Em tese, a ventilação mecânica, tanto por pressão positiva quanto negativa, deve prover ar fresco para o interior da instalação, distribuído uniformemente em todas as partes do galpão, com ausência de correntes de ar (BAÊTA & SOUZA, 2010; YOHANNES & TEKLE, 2018), além do maior controle da renovação de ar e controle da direção e da velocidade do vento

(OLOYO & OJERINDE, 2019). Todavia, em um aviário é possível observar regiões de baixa movimentação de ar. Um dos principais motivos que causam essa desuniformidade de distribuição é o mau dimensionamento e posicionamento dos equipamentos de ventilação e das aberturas para entrada de ar para sistema com pressão negativa (ABREU & ABREU, 2000). De acordo com Baêta & Souza (2010), os cálculos para estimar a taxa de ventilação mecânica em um ambiente consistem basicamente no balanço de calor, no dimensionamento dos equipamentos que compõe o sistema e na potência do motor do ventilador, que é definido pela velocidade do ar requerida na instalação.

#### **2.4. COMPONENTES DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO**

O ventilador/exaustor consiste em um dispositivo mecânico que, por meio de energia mecânica de rotação, promove diferenças de pressão entre o interior e o exterior do aviário, desenvolvendo a movimentação de ar (BAÊTA & SOUZA, 2010; ABREU & ABREU, 2012). O motor elétrico do ventilador é o responsável pela energia mecânica gerada e, por isso, deve ser dimensionado de forma que a potência e rotação forneça a vazão necessária. Via de regra, a capacidade do ventilador é correspondente à sua rotação; a pressão, ao quadrado da sua rotação; e a potência, ao cubo de sua rotação (BAÊTA & SOUZA, 2010). De acordo com os autores, para o dimensionamento do sistema de ventilação, é importante atentar-se a algumas características dos ventiladores, como por exemplo a vazão; a velocidade de saída; a pressão devido à velocidade de saída (correspondente à velocidade do ar na saída); pressão total (referente à diferença de pressão total do ar na saída do ventilador e a pressão total do ar na entrada); pressão estática (diferença entre a pressão total e a pressão devido à velocidade).

Dentre os tipos de ventiladores encontrados no mercado, os mais comuns são do tipo axial e centrífugo. Os ventiladores axiais, normalmente empregados em aviários, são compostos por hélices e, algumas vezes, carcaça; enquanto os centrífugos apresentam carcaça, rotor de réguas curvas, mancais, eixos, entradas e saída de ar (ABREU & ABREU, 2012).

Baêta & Souza (2010) recomendam que, a nível de projeto, a escolha do ventilador leve em conta as tabelas fornecidas pelos fabricantes, onde constam informações sobre características importantes como rotação, potência e eficiência energética, de modo a atender o fluxo requerido. Existe, ainda, a disponibilidade de acesso às publicações *on-line* de testes independentes de desempenho e eficiência de ventiladores agrícolas, realizados em laboratórios por universidades renomadas, como, por exemplo, o Bess Lab da Universidade de Illinois. Esses testes fornecem dados imparciais sobre a performance de ventiladores comerciais e, assim, possibilita que o projetista compare diferentes fabricantes e modelos. Ventilação

ineficiente em termos de qualidade e desempenho dos ventiladores pode onerar o custo da produção, tanto em virtude dos gastos com energia elétrica quanto à baixa qualidade do ar, que pode influenciar no bem-estar das aves (ABREU & ABREU, 2012).

O controle do sistema de ventilação pode ser realizado com o auxílio de diversos equipamentos que, em conjunto, atuam para manter as condições ambientais internas dentro dos limites ideais para o conforto e maior produtividade dos animais. Segundo Pratt et al. (1983), Guarino et al. (2008) e Oliveira et al. (2018), existem diversas técnicas disponíveis no mercado para o controle do ambiente térmico na criação animal. Dentre esses equipamentos de controle, basicamente pode-se citar:

- **Termostatos:** são os mais usuais no controle do sistema de ventilação em instalações agroindustriais, efetuando o controle da temperatura do ar. Consiste em um disjuntor sensível à temperatura e normalmente são constituídos por um elemento sensor e um interruptor elétrico.
- **Umidostatos:** São semelhantes aos termostatos, exceto pelo fato de que o elemento de potência detecta a umidade ao invés da temperatura. Os elementos de potência mais comuns em umidostatos apresentam uma seção com um material sensível à umidade, que altera o seu comprimento de acordo com a umidade relativa do ar, análogo ao fio de cabelo humano.
- **Timers:** Permitem marcar os intervalos de tempo de funcionamento do sistema. Os mais comuns para sistema de ventilação são os *timers* temporizadores de intervalo ou ciclo e o cronômetro de 24 horas, que consistem basicamente em interruptores elétricos on-off, acionados por um pequeno motor síncrono ou de relógio.

Além desses equipamentos elementares, é importante o uso de uma conexão paralela entre termostato e *timer*; e manóstato, que aciona os ventiladores em função da pressão, e assim, evita que os mesmos operem de maneira forçada.

- **Controladores:** Conjunto de sensores e dispositivos de acionamento dos sistemas de climatização. A princípio, os controladores primitivos apresentavam baixo número de acionamentos, o que tornava o sistema instável e de baixa efetividade. O constante aperfeiçoamento e investimento nas tecnologias utilizadas nos controladores possibilitou o monitoramento de diversas variáveis simultaneamente, tais como a temperatura do ar, a umidade relativa e pressão estática do ar (CÓRDOVA, 2013; TIGGEMAN, 2015). Atualmente, sistemas automáticos de controle do ambiente para instalações de produção animal são facilmente encontrados no mercado, e amplamente utilizado pelos produtores. Esses sistemas,

que são compostos por controladores e sensores, atuam tanto no controle do ambiente térmico (sistemas de resfriamento e aquecimento) como nos sistemas de ar condicionado, detecção automática de doenças e avaliação comportamental em tempo real por meio de processamento e análise de imagens digitais (GUARINO et al., 2008; OLIVEIRA et al., 2018).

O acionamento dos sistemas de resfriamento e aquecimento é executado a partir de *setpoints* programados nesses controladores, de acordo com a fase de criação. Com isso, é possível que todo o sistema de condicionamento térmico entre em funcionamento ou desligue automaticamente, de acordo com as condições psicrométricas do ar verificadas naquele instante. Esse tipo de equipamento, quando utilizado, facilita o trabalho de monitoramento das condições térmicas do ambiente e viabiliza o melhor uso de energia elétrica (ABREU & ABREU, 2000), sendo indispensável para a estabilidade do microclima interno da instalação (BUSTAMANTE et al., 2013). Apesar de ser uma tecnologia bastante difundida entre os produtores, muitos ainda não investem em controladores sofisticados e acabam realizando o controle do sistema de ventilação de forma manual ou com controladores básicos (DETSCH et al., 2018).

Aviários modernos contam com controle ambiental mais sofisticado mediante a utilização de microprocessadores. Segundo Pratt et al. (1983) e Diniz (2017), microprocessadores permitem que a lógica e a tomada de decisão sejam acionadas às funções fornecidas pelo sistema de controle. Dessa forma, são responsáveis por receber a informação do sensor, comparar com os valores de referência programados no sistema, interpretá-los e tomar decisão (como, por exemplo, ligar ou desligar o equipamento).

Além disso, pesquisadores em todo o mundo vem desenvolvendo estudos para melhorar a eficiência do sistema e facilitar o trabalho dos produtores. Nesse sentido, observa-se a expansão do uso de dispositivos sem fio e armazenamento de informações em banco de dados remoto para fins de gerenciamento, além da possibilidade de acesso por aplicativos (SILVA, 2018).

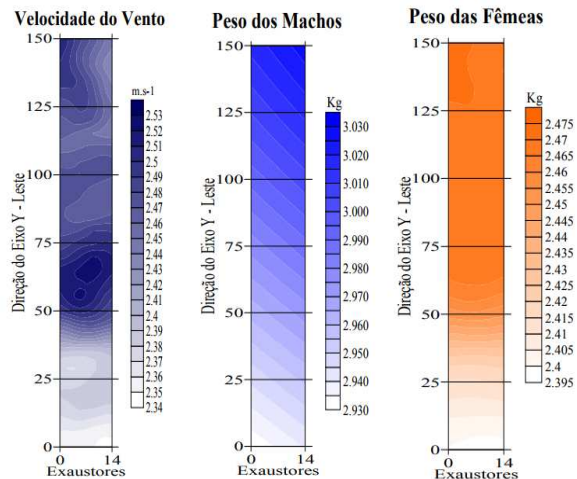
- **Backup:** É fundamental que as instalações que possuem sistemas de controle do ambiente térmico também incluam a adoção de sistemas de *backup* para atingir os resultados esperados e evitar perdas devido a qualquer tipo de falha que possa ocorrer nos controladores. Gates et al. (1992) afirmam que, por muitas vezes, as falhas nos controladores podem ser causadas pelo *backup* mecânico inadequado e à falha dos sistemas de alarme paralelo. Portanto, é extremamente importante a implementação de um sistema de *backup* consistente que atue em associação ao controlador eletrônico.

Alarmes sinalizadores são essenciais para notificar problemas como temperatura, energia, ativação de bomba de água, entre outros. Alarmes instalados nas entradas dos controladores acionados por pressão estática são muito úteis pois são independentes do controlador principal. Por isso, sistemas de *backup* devem ser o mais independentes possível, para que não estejam propensos à falha do sistema como um todo, caso o controlador principal venha a falhar (DONALD, 2009).

## **2.5. ESTUDOS ATUAIS SOBRE VENTILAÇÃO NA AVICULTURA**

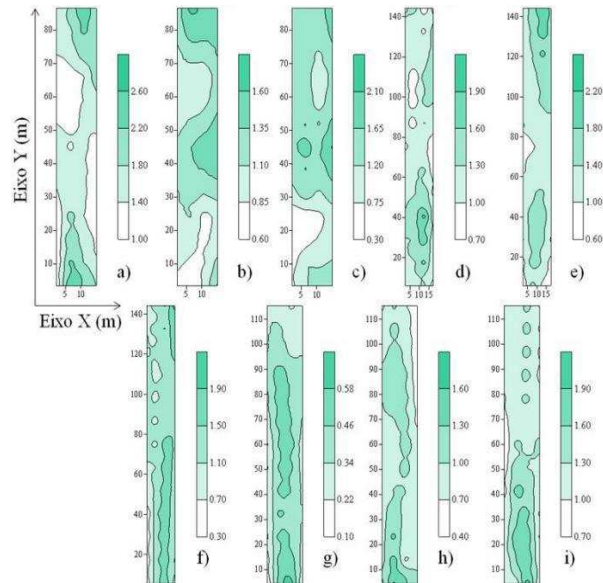
Para o sucesso do sistema produtivo, é fundamental entender e avaliar a variabilidade espacial dos fatores térmicos do ambiente, principalmente da distribuição do ar, no sentido de auxiliar em tomadas de decisão para o adequado manejo da ventilação (CURI et al., 2014; QUEIROZ et al., 2017). Sabe-se que a variação dos elementos climáticos no interior de uma instalação gera efeito semelhante na produtividade e bem estar dos animais, e assim, surgem regiões do galpão onde o desempenho das aves fica prejudicado (SILVA et al., 2013). Diversas pesquisas sobre a distribuição da velocidade do ar em aviários vem sendo publicadas nos últimos anos e mostram, a partir de diferentes técnicas, a variabilidade espacial dessa variável no interior das edificações (MOSTAFA et al., 2012; SANTOS et al., 2012; SILVA et al., 2013; CURI et al., 2014; WANG et al., 2014; QUEIROZ et al., 2017).

Silva et al. (2013), em seu estudo, objetivaram estudar a variabilidade espacial das características ambientais e do peso de frangos de corte criados em galpão com ventilação negativa e observaram que a desuniformidade dos fatores climáticos, incluindo a velocidade do ar, influenciaram diretamente no peso vivo de frangos de corte, como pode ser visto na Figura 2.4. Tal irregularidade nas condições ambientais ao longo de todo o galpão evidencia a necessidade de modificações construtivas e adoção de estratégias que favoreçam a melhor distribuição do ar e, assim, homogeneidade das variáveis climáticas no ambiente de criação das aves.



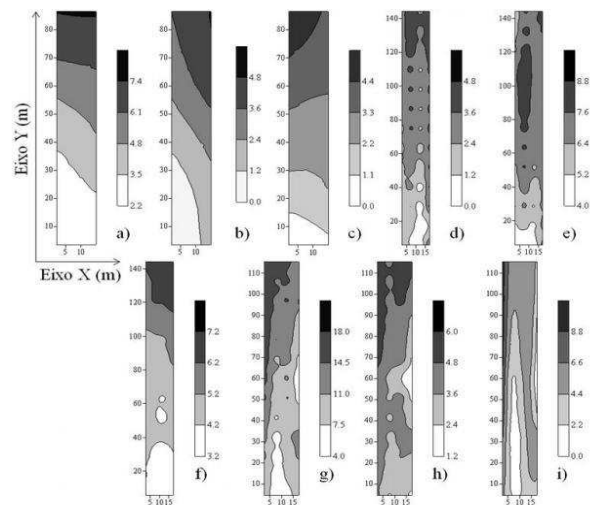
**Figura 2.4.** Distribuição espacial da velocidade do ar ( $\text{m s}^{-1}$ ) e os pesos dos machos e das fêmeas em galpão de frangos de corte equipados com sistema de ventilação por pressão negativa.  
Fonte: Silva et al., 2013.

No mesmo contexto, Curi et al. (2014) avaliaram, por meio da geoestatística, o efeito da ventilação e diferentes tipologias construtivas em relação ao ambiente térmico e aéreo em aviários de frangos de corte na fase final de criação. Os aviários eram providos de sistema de ventilação mecânica por pressão negativa e as tipologias avaliadas foram: *Blue House* (BH) com nebulizadores na entrada de ar e vedação de cortinas; *Dark House* (DH) com painel evaporativo (tijolo cerâmico) e vedação de cortinas; e *Solid Wall* (SW) com painel evaporativo de celulose e vedação de alvenaria. O comportamento do ar e sua distribuição, nos diferentes tratamentos e idades das aves, pode ser visto na Figura 2.5. Os autores observaram que o sistema de ventilação com resfriamento evaporativo auxilia no arrefecimento do ar no centro do aviário, entretanto nas proximidades das paredes laterais foram observadas temperaturas elevadas. Ainda, valores elevados de amônia foram verificados na região próxima aos exaustores, devido as características do sistema de ventilação tipo túnel, que encaminha o ar no sentido longitudinal do aviário (Figura 2.6).



**Figura 2.5.** Mapas de krigagem para a velocidade do ar no aviário BH, aos 28 (a), 35(b) e 42(c) dias de idade das aves, DH aos 28 (d), 35(e) e 42(f) dias de idade das aves, e SW aos 28 (g), 35(h) e 42(i) dias de idade das aves, no período do verão.

Fonte: Curi et al., 2014.

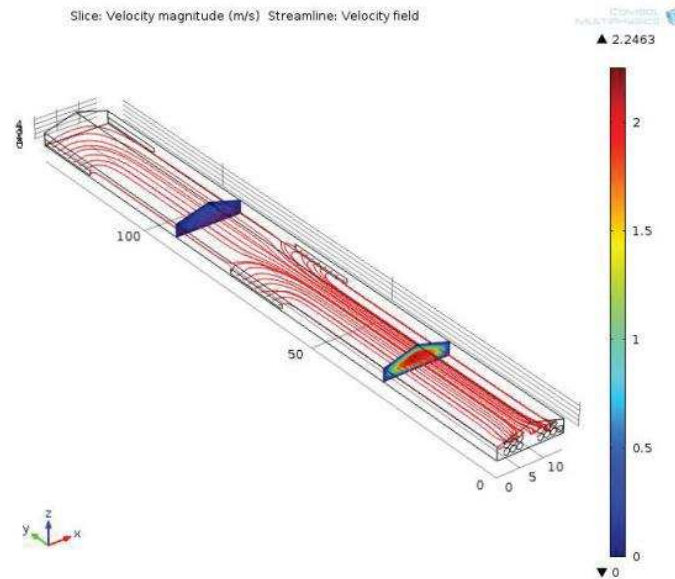


**Figura 2.6.** Mapas de krigagem para a concentração de amônia no aviário BH, aos 28 (a), 35(b) e 42(c) dias de idade das aves, DH aos 28 (d), 35(e) e 42(f) dias de idade das aves, e SW aos 28 (g), 35(h) e 42(i) dias de idade das aves, no período do verão.

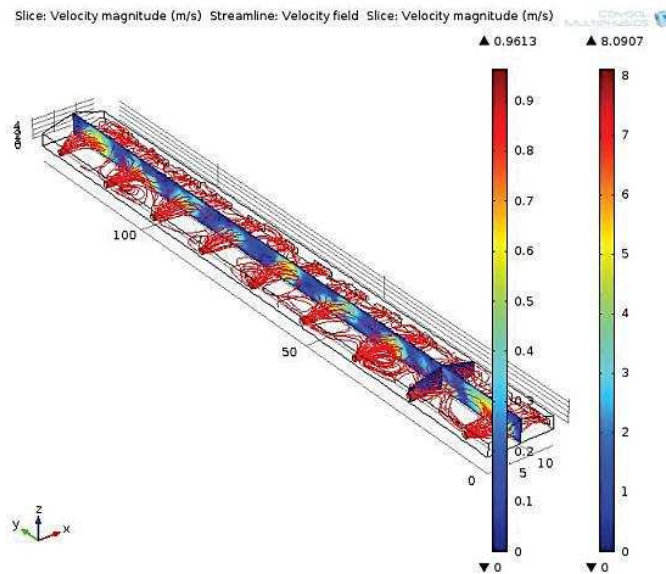
Fonte: Curi et al., 2014.

A fluidodinâmica computacional tem demonstrado ser uma ferramenta vantajosa em estudos relativos a sistemas de ventilação em criação animal. Bianchi et al. (2015) compararam a eficiência dos sistemas de ventilação longitudinal e transversal, através da análise do comportamento de variáveis como temperatura, umidade relativa e concentração de dióxido de carbono por meio de simulações em CFD. Os autores concluíram que o sistema de ventilação

longitudinal apresentou as maiores concentrações de  $\text{CO}_2$  no corredor central do galpão, ou seja, o sistema não permitiu um fluxo de ar uniforme e eficaz ao longo das paredes laterais do galpão (Figura 2.7). A simulação para o sistema de ventilação transversal mostrou uma maior uniformidade da troca de ar e, conseqüentemente, melhor distribuição da concentração de  $\text{CO}_2$  (Figura 2.8).



**Figura 2.7.** Simulação do campo de escoamento do fluido na instalação comercial em estudo.  
Fonte: Bianchi et al., 2015.



**Figura 2.8.** Simulação do campo de escoamento no caso de ventilação cruzada na instalação comercial em estudo. Fonte: Bianchi et al., 2015.

A implementação de sistemas de ventilação por dutos tem sido utilizada para proporcionar maior uniformidade na distribuição de temperatura do ar e para evitar que a entrada de ar frio atinja diretamente os animais. Mostafa et al. (2012) desenvolveram diferentes sistemas de ventilação por duto, a fim de estabelecer o modelo mais adequado para utilização durante o inverno. Os autores também utilizaram simulações em CFD para testar estes diferentes sistemas. Quatro diferentes novos modelos de ventilação foram comparados com o sistema de ventilação em modo túnel (sistema padrão do galpão em estudo), sendo eles configurados como: entrada e saída diretamente conectados com o trocador de calor sem o uso de dutos; saída de ar conectada diretamente com o trocador de calor na parede lateral e dutos de entrada de ar localizados no centro do galpão; dutos de entrada e saída de ar localizados no centro do galpão; e dutos de entrada e saída de ar e localizados em cada lado do galpão. Para todos os modelos, os autores observaram maior uniformidade em cerca de 60 a 70% quando comparados ao sistema padrão (ventilação em modo túnel).

Em adição aos sistemas de ventilação já consolidados, existe também a implementação dos sistemas híbridos de ventilação, onde o aviário deve integrar os sistemas de ventilação natural e mecânica por meio do manejo das cortinas laterais. Segundo Coelho (2018) e Teles Júnior (2019), esse tipo de ventilação consiste no desligamento dos ventiladores/exaustores e abertura das cortinas para utilização da ventilação natural enquanto as condições de temperaturas externas estiverem mais amenas. Neste caso, a ventilação natural deve ser suficiente para manter a temperatura de conforto dentro dos alojamentos. Do mesmo modo,

quando a ventilação natural não supre as exigências climáticas para o conforto térmico dos animais, as cortinas laterais podem ser manejadas de modo a fechar todo o aviário e, então, o sistema de ventilação mecânica deve ser acionado.

Dentre as vantagens destacam-se a manutenção da qualidade do ar no interior dos aviários e a economia de energia na fase final de criação, já que os equipamentos de arrefecimento térmico não são necessários nesses períodos. Todavia, é importante atentar-se ao ambiente de criação dos pintinhos em fase inicial, visto que os mesmos devem estar protegidos de baixas temperaturas e correntes de ar intensas durante o inverno ou em noites frias (OSÓRIO et al., 2016a). Neste caso, os autores ressaltam a importância do bom isolamento térmico e sistema de aquecimento eficiente.

O controle do fluxo e provimento de melhor distribuição de ar em sistema híbrido de ventilação é uma tarefa muito complexa devido à instabilidade da intensidade e direção da ventilação natural. Portanto, a orientação e localização do aviário são imprescindíveis para o sucesso da estratégia. Ainda, para que o sistema híbrido seja eficiente, há a necessidade de automatização do manejo de cortinas em função da temperatura, umidade e velocidade do ar exterior. Assim, a abertura parcial automatizada das cortinas laterais por meio de sensores e controladores pré-programados pode favorecer a homogeneidade do fluxo de ar no interior do galpão.

## 2.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ambiente térmico engloba um complexo de fatores que interagem entre si e refletem na temperatura ambiental efetiva, ou seja, uma única variável que abrange o efeito combinado da temperatura, umidade, radiação e vento. Com isso, o sistema de ventilação praticado em aviários representa grande parte do sucesso da atividade, já que é sabido que a ventilação em níveis apropriados favorece não só a diminuição da temperatura do ar, mas também facilita as trocas térmicas por mecanismos sensíveis ou latentes, promove a diluição de gases e contaminantes e efetua a renovação do ar.

A orientação do galpão e sua localização são fatores determinantes para o melhor aproveitamento do fluxo de ar quando o sistema de ventilação natural é empregado, visto que, se não houver diferenças de temperatura e pressão, a mesma não ocorre. Para a escolha do melhor sistema de ventilação, deve-se levar em consideração diversos fatores, como a região onde será implementado, condições climáticas da região, tipificação construtiva da instalação e disponibilidade de energia elétrica. Além disso, é muito importante orientar adequadamente as aberturas conforme a direção dos ventos dominantes. Como exemplo, galpões alocados em regiões tropicais podem interceptar maiores intensidades de ventilação natural e melhor circulação de ar quando possuem pé-direito alto. No caso de galpões com ventilação por pressão negativa, além dos cuidados já citados, é muito importante a atenção a detalhes, como a adequada vedação do galpão e o dimensionamento correto do sistema de ventilação, para maior eficiência do sistema.

Assim, é indiscutível que o projeto do sistema de ventilação deva ser realizado de modo a garantir a uniformidade do ambiente térmico e boa qualidade do ar. Como consequência, melhores serão os resultados quanto ao bem-estar, produtividade dos animais e retorno econômico.

## 2.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, P.G.; ABREU, V.M.N. **Ventilação na avicultura de corte.** Embrapa Suínos e Aves, Documentos, 63, Concórdia, 50p, 2000.

ABREU, V.M.N.; ABREU, P.G.; COLDEBELLA, A.; JAENISCH, F.R.F.; SILVA, V.S. **Evaluation of litter material and ventilation systems in poultry production: I. overall performance.** Revista Brasileira de Zootecnia, v. 40(6), 1364–1371, 2011.

ABREU, P.G.; ABREU, V.M.N. **Ventiladores na produção de aves.** Engormix (artigos técnicos de avicultura), 2012.

ALBINO, L.F.T.; BARROS, V.R.S.M.; MAIA, R.C.; TAVERNARI, F.C.; SILVA, D.L. **Produção e nutrição de frangos de corte.** 2a. ed. Viçosa: Editora UFV, 360p, 2017.

ALBRIGHT, L. D. **Slotted inlet baffle control based on inlet jet momentum numbers.** Transactions of the ASAE, 32(5), 1764-1768, 1989.

ALBRIGHT, L. D. **Environment Control for Animals and Plants.** St. Joseph: ASAE, 354p, 1990.

BAÊTA, F. C.; SOUZA, C. F. **Ambiência em Edificações Rurais.** 2a. ed. Viçosa: Editora UFV, 269p., 2010.

BARBER, E.M.; SOKHANSANJ, S.; LAMPMAN, W.P.; OGILVIE, J.R. **Stability of airflow patterns in ventilated airspaces.** American Society of Agricultural Engineers paper no. 82-4551, 10, 1982.

BIANCHI, B.; CATALANO, P.; GENTILE, A.; GIAMETTA, F.; LA FIANZA, G. **Microclimate measuring and fluid-dynamic simulation in an industrial broiler house: testing of an experimental ventilation system.** Veterinaria Italiana, v.51, 85–92, 2015.

BLAKELY, J. R.; SIMPSON, G.; DONALD, J.; CAMPBELL, J.; MACKLIN, K. **The Economic Importance of House and Ventilation Management.** The Poultry Engineering, Economics and Management, Auburn University, n. 49, 1-4, 2007.

BUSTAMANTE, E.; GARCÍA-DIEGO, F. J.; CALVET, S.; ESTELLÉS, F.; BELTRÁN, P.; HOSPITALER, A.; TORRES, A. G. **Exploring ventilation efficiency in poultry**

**buildings: The validation of computational fluid dynamics (CFD) in a cross-mechanically ventilated broiler farm.** *Energies*, 6(5), 2605-2623, 2013.

COELHO, D.J.R. **Ambiente térmico e aéreo de aviários sólidos de frangos de corte acondicionados artificialmente para condições climáticas do Brasil e Portugal.** 164 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2018.

CÓRDOVA, P. D. S. **A evolução dos sistemas de equipamentos para criação de frangos de corte com foco na inovação.** Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Administração). Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Criciúma, 2013.

CURI, T. M. R. C.; VERCELLINO, R. D. A.; MASSARI, J. M.; SOUZA, Z. M.; MOURA, D. J. **Geoestatística para avaliação do controle ambiental do sistema de ventilação em instalações comerciais para frangos de corte.** *Engenharia Agrícola*, 34(6), 2014.

CURTIS, S. E. **Environmental Management in Animal Agriculture.** Iowa State University Press, 409p, 1983.

DETSCH, D. T.; CONTI, D.; DINIZ-EHRHARDT, M.A.; MARTÍNEZ, J. M. **On the controlling of temperature: A proposal for a real-time controller in broiler houses.** *Scientia Agricola*, 75(6), 445-451, 2018.

DINIZ, A.M. **Sistema automatizado de aquisição, em tempo real, de umidade e temperatura do solo na irrigação.** Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), 76p., 2017.

DONALD, J. O. **Manejo del ambiente en el galpón de pollo de engorde.** 44p., 2009.  
Disponível em:  
[http://pt.aviagen.com/assets/Tech\\_Center/BB\\_Foreign\\_Language\\_Docs/Spanish\\_TechDocs/Aviagen-Manejo-Ambiente-Galpn-Pollo-Engorde-2009.pdf](http://pt.aviagen.com/assets/Tech_Center/BB_Foreign_Language_Docs/Spanish_TechDocs/Aviagen-Manejo-Ambiente-Galpn-Pollo-Engorde-2009.pdf)

FERREIRA, R. A. **Maior produção com melhor ambiente - para aves, suínos e bovinos.** 3a edição, Aprenda Fácil, 528p, 2016.

FRAME, D. D., ANDERSON, G. L. **Understanding Static Pressure.** Electronic Publishing - Utah State University, 3, 1, 2002.

GATES, R.S.; OVERHULTS, D.G.; WALCOTT, B.L.; SHEARER, S.A. **Constant velocity air inlet controller.** Computers and electronics in agriculture, 6(2), 175-190, 1991.

GATES, R. S.; OVERHULTS, D. G.; TURNER, L. W. **Mechanical backup systems for electronic environmental controllers.** Applied Engineering in Agriculture, 8(4), 491-497, 1992.

GUARINO, M.; JANS, P.; COSTA, A.; AERTS, J. M.; BERCKMANS, D. **Field test of algorithm for automatic cough detection in pig houses.** Computers and electronics in agriculture, 62(1), 22-28, 2008.

HELLICKSON, M.A.; WALKER, J.N. **Ventilation of Agricultural Structures.** American Society of Agricultural Engineers (ASAE). 372p, 1983.

HELLICKSON, M.A.; HINKLE, C.N.; JEDELE, D.G. **Natural Ventilation.** In: HELLICKSON, M.A.; WALKER, J.N. Ventilation of Agricultural Structures. [S.l.]: American Society of Agricultural Engineers (ASAE), 81-100, 1983.

JONES, J.; WEST, A.W. **Natural ventilation and collaborative design.** ASHRAE journal, v. 43(11), 46, 2001.

KAUL, P.; MALTRY, W.; MULLER, H.J.; WINTER, V. **Scientific-technical principles for the control of the environment in livestock houses and stores.** Translation 430. Brit. Soc. Res. Agric. Eng., NIAE, Silsoe, England, 1975.

MESA, D.; MUNIZ, E.; SOUZA, A.; GEFFROY, B. **Broiler-Housing Conditions Affect the Performance.** Brazilian Journal of Poultry Science, 19(2), 263-272, 2017.

MOSTAFA, E.; LEE, I. B.; SONG, S. H.; KWON, K. S.; SEO, I. H.; HONG, S. W.; HWANG, H.S.; BITOG, J.P.; HAN, H. T. **Computational fluid dynamics simulation of air temperature distribution inside broiler building fitted with duct ventilation system.** Biosystems Engineering, 112(4), 293-303, 2012.

NAWAB, A.; IBTISHAM, F.; LI, G.; KIESER, B.; WU, J.; LIU, W.; ZHAO, Y.; NAWAB, Y.; LI, K.; XIAO, M.; NA, L. **Heat stress in poultry production: Mitigation strategies to overcome the future challenges facing the global poultry industry.** Journal of thermal biology, 78, 131-139, 2018.

OBERREUTER, M.E.; HOFF, S.J. **Quantifying factors affecting sidewall air inlet performance.** Transactions of the ASAE, 43(3), 707, 2000.

OLIVEIRA, M.E.; OLIVEIRA, R.L.Z.; SOUZA, M. F.L.Z.; HARADA, E.S.; TECH, A.R.B. **Desenvolvimento de sensores para monitoramento de ambiente aviário com ênfase em controle térmico.** Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas, 12(3), 234-240, 2018.

OLOYO, A.; OJERINDE, A. **Poultry Housing and Management.** In: Poultry. IntechOpen, 2019.

OSÓRIO, R.; TINÔCO, I. F.F.; SARAZ, J.A.; SOUZA, C.F.; COELHO, D.J.R.; SOUSA, F.C. **Air quality in a poultry house with natural ventilation during phase chicks/Calidad del aire en galpón avícola con ventilación natural durante la fase de pollitos.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 20(7), 660-666, 2016a.

OSÓRIO, R.H.; TINÔCO, I.F.F.; OSORIO, J.A.; MENDES, L.B.; ROCHA, K.S.; GUERRA, L.M. **Thermal environment in two broiler barns during the first three weeks of age.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 20(3), 256-262, 2016b.

PAULA, M.O.; CAETANO, S.; MOREIRA, G.R.; AMORIM, M.M.; DURAN, M. **Identificação da tipologia construtiva de galpões avícolas no estado do Espírito Santo.** Enciclopédia Bioesfera, Goiânia, v. 8 (14), 641-653, 2012.

PRATT, G.L.; MENTZER, J.E.; ALBRIGHT, L.D.; BUNDY, D.S. **Ventilation equipment and controls.** In: HELLICKSON, M.A.; WALKER, J.N. Ventilation of Agricultural Structures. [S.l.]: American Society of Agricultural Engineers (ASAE), 47-77, 1983.

QUEIROZ, M.L.V.; BARBOSA FILHO, A.D.; LIMA SALES, F.A.; LIMA, L. R.; DUARTE, L. M. **Variabilidade espacial do ambiente em galpões de frango de corte com sistema de nebulização.** Revista Ciência Agronômica, 48(4), 586, 2017.

RUZAL, M.; SHINDER, D.; MALKA, I.; YAHAV, S. **Ventilation plays an important role in hens' egg production at high ambient temperature.** Poultry science, v. 90 (4), 856–862, 2011.

SANTOS, M. J. B.; RABELLO, C. B.; PANDORFI, H.; TORRES, T. R.; SANTOS, P. A.; CAMELO, L. C. L. **Fatores que interferem no estresse térmico em frangos de corte.** Revista Eletrônica Nutritime, 1779 – 1786, 2012.

SANTOS, T.C.; GATES, R.S.; TINÔCO, I.F.F.; ZOLNIER, S.; BAÊTA, F.C. **Behavior of Japanese quail in different air velocities and air temperatures.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 52 (5), 344-354, 2017.

SARAZ, J.A.O.; TINÔCO, I.F.F.; GATES, R.S.; PAULA, M.O.; MENDES, L.B. **Evaluation of different methods for determining ammonia emissions in poultry buildings and their applicability to open facilities.** Dyna, v. 80(178), 51-60, 2013.

SILVA, E.G.D.; SANTOS, A.C.D.; FERREIRA, C.L.S.; SOUSA, J.P.L.D.; ROCHA, J.M.L.D.; SILVEIRA JÚNIOR, O. **Spatial variability of the environmental characteristics and weight of broilers in shed negative ventilation.** Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal, 14(1), 132-141, 2013.

SILVA, V.V. **Cyber Physical System applied in poultry production.** i-ETC: ISEL Academic Journal of Electronics, Telecommunications and Computers, 4(1), 1-7, 2018.

SOUZA, C.F; BAÊTA, F.C.; TINOCO, I.F.F.; FREITAS, L.C.S.R.; CÂNDIDO, M.G.L. **Características ambientais dos aviários adotados atualmente no Brasil e respostas no desempenho produtivo.** Animal Business Brasil, 2017.

STRØM, J.S.; ZHANG, G.; MORSING, S. **Predicting near-floor air velocities for a slot-inlet ventilated building by jet velocity decay principles.** Transactions of the ASAE, 45(2), 407, 2002.

TIGGEMANN, F. **Sistema de controle e monitoramento de ambiência para aviários do tipo pressão negativa.** 129p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Controle e Automação) – Centro Universitário UNIVATES, 2015.

TIMMONS, M.B.; IRISH, W.W.; TOLEMAN, W.J. **Temperature variations within caged-layer housing as affected by inlet flow characteristics.** Applied engineering in agriculture, 2(2), 153-157, 1986.

TINÔCO, I. **Avicultura Industrial: Novos Conceitos de Materiais, Concepções e Técnicas Construtivas Disponíveis para Galpões Avícolas Brasileiros.** Revista Brasileira de Ciência Avícola, v. 3 (1), 01–26, 2001.

TINÔCO, I.F.F.; SOUZA, C.F.; BAÊTA, F.C.; COELHO, D.J.R.; MENDES, M.A.S.A. **Ambiência e Instalações na Avicultura de Postura Brasileira – Avanços e Perspectivas.** Animal Business Brasil, v.4 (14), 6-9, 2014.

VILELA, M.O. **Comportamento e desempenho produtivo de codornas japonesas submetidas a diferentes regimes de calor e umidade, combinados com diferentes níveis de velocidade do ar.** 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2016.

WANG, Z.; GAO, T.; JIANG, Z.; MIN, Y.; MO, J.; GAO, Y. **Effect of ventilation on distributions, concentrations, and emissions of air pollutants in a manure-belt layer house.** Journal of Applied Poultry Research, 23(4), 763-772, 2014.

WILSON, J.D.; ALBRIGHT, L.D.; WALKER, J.N. **Ventilation air distribution.** In: HELICKSON, M.A.; WALKER, J.N. Ventilation of Agricultural Structures. [S.l.]: American Society of Agricultural Engineers (ASAE), 25-43, 1983.

YANAGI JUNIOR, T. **Inovações tecnológicas na bioclimatologia animal visando aumento da produção animal: relação bem-estar animal x clima.** Infobibos: Informações Tecnológicas, 2006.

YOHANNES, G.; TEKLE, Y. **Review on Health Care Management Practices in Poultry.** Kenkyu Journal of Pharmacy Practice & Health Care 4, 42-55, 2018.

### **CAPÍTULO III**

## **AMBIENTE TÉRMICO E QUALIDADE DO AR EM AVIÁRIOS COMERCIAIS COM DIFERENTES SISTEMAS DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO**

## **Ambiente térmico e qualidade do ar em aviários comerciais com diferentes sistemas de resfriamento evaporativo**

### **RESUMO**

O principal gás poluente gerado na produção de frangos de corte é a amônia ( $\text{NH}_3$ ), que em concentrações elevadas torna-se tóxica ao homem e às aves, além de causar impactos negativos quando lançada ao meio ambiente. O objetivo do presente trabalho foi apresentar um diagnóstico da qualidade do ar em aviários comerciais modernos para frangos de corte com diferentes tipos de resfriamento evaporativo. Para isso, foram determinadas as características físico-químicas (umidade, pH e nitrogênio total) das camas de frango de primeiro uso, constituídas de casca de café. Além disso, foram registrados dados de concentração de amônia e fluxo de amônia da cama ao longo dos galpões e, em adição, foi feita a estimativa de emissão de amônia ao ambiente externo. Foram avaliados dois aviários com sistema de ventilação por pressão negativa tipo túnel, sendo um deles equipado com sistema de resfriamento evaporativo com placas evaporativas de celulose (APNPE), e o outro, provido de sistema de nebulização (APNN). Os dados e as amostras de cama foram coletados ao longo de todo o ciclo produtivo, duas vezes por semana, durante a estação de clima frio (inverno) e clima quente (verão). A partir dos resultados, pôde-se concluir que o tipo de resfriamento evaporativo não interferiu na qualidade da cama e na emissão de amônia, bem como a presença de bebedouros e comedouros não influenciou nas características físico-químicas da cama. No entanto, os dados médios de umidade, pH e nitrogênio total, além do fluxo, concentração e emissão de amônia foram mais pronunciados no inverno do que no verão. Apesar da média de concentração de amônia permanecer dentro dos limites recomendados, valores máximos de concentração de amônia estiveram acima do limite de tolerância estabelecido pelas normas, caracterizando ambiente potencialmente prejudicial em termos de longos períodos de exposição.

**Palavras-chave:** Avicultura de corte; emissão de amônia; poluição atmosférica; qualidade da cama de frango.

## ABSTRACT

The main pollutant gas generated in broiler production is ammonia ( $\text{NH}_3$ ), which in high concentrations becomes toxic to man and birds, in addition to causing negative impacts when released to the environment. The objective of this research was to evaluate air quality in two modern commercial broiler houses with different types of evaporative cooling. For this, the physical-chemical characteristics (moisture content, pH and total nitrogen) of new coffee husk litter in the first flock of use were determined. In addition, data on ammonia concentration and ammonia flux from the litter along the poultry houses were recorded, in addition to the estimated ammonia emission to the outside environment. Two poultry houses with negative pressure tunnel ventilation system were evaluated, one of which is equipped with a cellulose evaporative pad cooling system (APNPE), while the other is equipped with a misting system (APNN). The data and the litter samples were collected throughout the growout cycle, twice a week, during cold weather (winter) and hot weather (summer). From the results, it can be concluded that the type of evaporative cooling did not affect the litter quality and the ammonia emissions; also, drinkers and feeders did not influence the litter physical-chemical characteristics. However, the average data on moisture content, pH and total nitrogen, as well as ammonia flow, ammonia concentration and ammonia emissions were more pronounced in winter than in summer. Although the average ammonia concentration remained within the recommended limits, maximum ammonia concentration values were above the tolerance limit established by the standards, characterizing a potentially harmful environment in terms of long periods of exposure.

**Keywords:** Ammonia emission; atmospheric pollution; broiler litter quality; broiler houses.

### 3.1. INTRODUÇÃO

Associada ao ambiente térmico, a qualidade do ar é um dos fatores mais importantes na criação intensiva de animais de produção, visto que o ar é um meio de disseminação de agentes físicos, químicos e biológicos capazes de acometer a saúde e bem estar dos animais e dos trabalhadores. O ar de má qualidade pode provocar diversas doenças nas aves (Sousa et al., 2018), resultando em prejuízos econômicos ao produtor em virtude dos gastos com medicamentos, além de afetar a performance dos animais e até mesmo levar ao aumento da taxa de mortalidade.

O sistema de produção intensivo de frangos de corte favorece o maior potencial de

emissão de gases. Monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e amônia (NH<sub>3</sub>) são frequentemente detectados em aviários. Este último é considerado o principal gás poluente gerado na atividade, pois pode ser facilmente encontrado em concentrações mais elevadas, impactando nas aves, nos granjeiros e na atmosfera (LIMA et al., 2004). Por isso, a emissão de amônia tem sido objeto de estudo no meio científico, por ser tóxica ao homem e aos animais quando em altas concentrações, e ainda provocar impactos negativos no ambiente (ANGNES et al., 2016).

A emissão de amônia no setor agropecuário representa uma das principais fontes de material particulado fino na atmosfera, uma vez que a amônia gasosa neutraliza os compostos ácidos, como H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub> e HCl. Assim, estes compostos são transformados em sais de amônio, como sulfato de amônio – (NH<sub>4</sub>) SO<sub>4</sub>; bissulfato de amônio (NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>); nitrato de amônio (NH<sub>3</sub>NO<sub>3</sub>); e cloreto de amônio (NH<sub>4</sub>Cl). Estes sais compõem parte do material particulado fino (MP<sub>2,5</sub>) presente na atmosfera, que causa efeitos negativos à vegetação e contaminam água e solo (SILVA, 2015), além da degradação da visibilidade pela formação de neblina (BEHERA & SHARMA, 2012). Na vegetação, os principais impactos são lesões foliares na vegetação próxima às fontes de emissão, o comprometimento do crescimento, da produtividade, da tolerância à secas e geadas, além de interferir nas respostas a pragas e doenças, dentre outros (KRUPA, 2003). Ademais, a amônia é altamente tóxica em sistemas aquáticos (RANDAL & TSUI, 2002). O nitrato, por ser solúvel em água (KELLEHER et al., 2002), é a principal forma de contaminação do lençol freático e o excesso de nitrogênio, fósforo e outros nutrientes levam a acidificação do solos e eutrofização da água (SIMS & WOLF, 1994; OVIEDO-RONDÓN, 2008; MARÍN, 2011), além de contribuir com a formação de chuva ácida.

A grande quantidade de amônia volatilizada a partir das excretas de aves de produção, principalmente em virtude da modernização e expansão do setor, tem aumentado as preocupações acerca de questões ambientais relacionadas ao impacto causado por este gás. Asman et al. (1998) afirmam que a produção global de amônia pelo setor da avicultura, na década de 90, variou em torno de 1,9 milhões de toneladas métricas anuais. Beusen et al. (2008) estimaram cerca de 32 Tg ano<sup>-1</sup> para sistemas agrícolas, onde a contribuição da produção pecuária variou entre 16 a 27 Tg ano<sup>-1</sup>, representando de 59 a 71% desse total. De 31 a 55% da emissão proveniente da pecuária é referente a instalações animais (aves e suínos) e sistemas de armazenamento; de 17 a 37% é oriunda de criações a pasto e 23 a 38% é propagado a partir do estrume animal.

Dentre os efeitos causados nas aves em função das altas concentrações de amônia no

ambiente de criação, destacam-se a ocorrência de conjuntivites, queda do apetite, redução do crescimento e da produtividade, além da predisposição à doenças respiratórias (ZHAO et al., 2015). De acordo com Curtis (1983) e Maliselo e Nkonde (2015), somados aos efeitos adversos provocados no sistema imune e respiratório, a amônia provoca irritação da mucosa dos olhos e das vias respiratórias e, ao alcançar a corrente sanguínea, interfere no metabolismo fisiológico, reduzindo a ingestão da ração e conseqüentemente, o ganho de peso e conversão alimentar. Oliveira et al. (2003) afirmam que, quando a quantidade de amônia inalada é maior que 60 ppm, as aves tendem a contrair doenças respiratórias, aumentando os riscos de infecções secundárias às vacinações. Se a concentração no ambiente atinge 100 ppm, ocorre a diminuição da taxa e profundidade da respiração, acometendo os processos fisiológicos de trocas gasosas (SILVA et al., 2006; REGAÇO, 2006).

De acordo com Ávila et al. (1992) e Cassuce et al. (2013), o máximo potencial produtivo das aves só é obtido em um meio com condições favoráveis. O ambiente no qual os frangos estão inseridos é descrito pela interação de diversas variáveis interdependentes, alusivas às condições externas, características construtivas e materiais utilizados na construção, qualidade do ar, temperatura do ar, umidade relativa, ventilação, características da cama de frango e densidade de criação, bem como manejo e modificações causadas pelos equipamentos que constituem o sistema produtivo e o sistema de acondicionamento térmico do ambiente. Dentre eles, a cama aviária pode ser considerada um dos aspectos mais relevantes no que se refere a emissão de amônia, já que diversos fatores podem alterar a composição e qualidade da mesma, como o tipo ou constituição da ração, natureza e quantidade do material de cobertura do piso do galpão, período de permanência das aves sobre o material, condições e período de estocagem, temperatura ambiente, utilização de equipamentos de resfriamento (nebulizadores e ventiladores) e densidade de criação (HERNANDES et al., 2002). Todos esses elementos contribuem com a alteração das principais variáveis relativas a volatilização da amônia, que são o pH, a umidade e a temperatura da cama (MENDES et al, 2012).

Atualmente, em termos de climatização do ambiente, a indústria avícola brasileira é altamente tecnificada, com o predomínio de instalações providas de sistemas automáticos de ventilação, aquecimento e resfriamento evaporativo, dentre outras tecnologias, a fim de proporcionar condições ambientais dentro da faixa de conforto para os animais, independente do ambiente externo (TELES JÚNIOR, 2019). No entanto, por muitas vezes o sistema implementado se apresenta ineficiente devido à falta de planejamento para a concepção dos aviários conforme o contexto climático da região onde foram construídos, resultando em prejuízos financeiros ao produtor. Neste caso, o diagnóstico das condições ambientais internas

dos aviários constitui um recurso para o auxílio de produtores em tomadas de decisão, em busca de estratégias de manejo para melhoria do bem estar animal, retorno econômico e sustentabilidade da atividade avícola, atendendo padrões de qualidade exigidos pelo mercado consumidor. Além disso, a quantificação e o entendimento acerca das emissões de amônia na avicultura são importantes instrumentos para orientação de órgãos nacionais e internacionais na concepção de normas e exigências para o controle ambiental, haja vista as emissões de poluentes atmosféricos (SOUSA, 2018).

Com base nesses fatos, objetivou-se analisar a qualidade do ar de aviários industriais com diferentes tipos de resfriamento evaporativo localizados na Zona da Mata, em Minas Gerais - Brasil, com base em variáveis do ambiente térmico, características físico-químicas da cama e taxa de emissão de amônia.

## **3.2. MATERIAL E MÉTODOS**

### ***3.2.1. Considerações gerais***

A presente pesquisa foi realizada em uma parceria entre o Núcleo de Pesquisa em Ambiência e Engenharia de Sistemas Agroindustriais – AMBIAGRO, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), e a empresa PIF PAF Alimentos. Todos os procedimentos adotados para a coleta de dados no presente experimento foram aprovados pela Comissão Ética no Uso de Animais (CEUA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), com protocolo de registro nº 71/2017 (cópia do certificado na página 186 – Anexo A).

O experimento foi conduzido em uma granja comercial de frangos de corte de um integrado da empresa, localizada no município de Ervália – Minas Gerais, situado na Zona da Mata mineira, na microrregião de Viçosa, apresentando altitude média de 730 metros e clima Tropical de altitude Cwa, pela classificação de Köppen. Os dados foram coletados durante dois ciclos experimentais, sendo um no inverno e outro no verão, correspondendo ao período mais frio e mais quente do ano, respectivamente.

A granja é composta por dois aviários, onde cada um possui capacidade para o alojamento de 30.000 aves por ciclo. O fornecimento de ração e água é realizado de forma automática. Os aviários apresentam características construtivas semelhantes, com orientação leste-oeste; dimensões individuais de 12 metros de largura por 145 metros de comprimento e 2,5 metros de pé-direito; cobertura com telha de fibrocimento e forro de poliuretano; muretas

de 30 cm de altura nas laterais do galpão, e fechamento lateral com telas e cortinas de poliuretano; fechamento de alvenaria nas cabeceiras.

A estrutura dos aviários e do sistema de ventilação são simétricos no sentido longitudinal da instalação. O sistema de ventilação praticado na granja é a ventilação mecânica por pressão negativa em modo túnel, composto por oito exaustores de 1,27m de diâmetro (50 in) (Plasson<sup>®</sup>, Ma'agan Michael, IL), modelo com cone direcionador de ar, instalados na cabeceira oeste do aviário, divididos em quatro grupos de dois exaustores (Figura 3.1). A taxa de ventilação nominal, segundo o fabricante, a uma pressão de 30 Pa, é de 34.069 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> e 41.265 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> para os modelos com potência de 1,0 cv e 1,5 cv, respectivamente. Cada grupo é acionado em função das condições térmicas internas da instalação e da idade dos animais alojados. Os aviários também são equipados com sistema de resfriamento evaporativo, contudo, em um dos galpões, esse processo é realizado por meio de placas evaporativas de celulose e, no outro, por nebulizadores distribuídos ao longo do aviário.

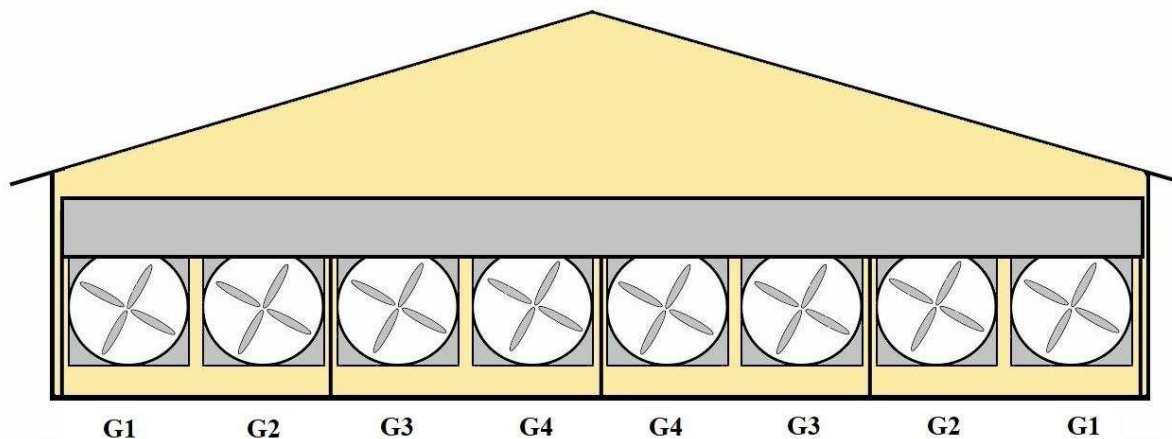


Figura 3.1: Distribuição dos grupos de acionamento dos exaustores nos aviários estudados.

O manejo adotado para o controle do ambiente térmico é dividido em duas etapas: fase de aquecimento (durante aproximadamente os primeiros 15 dias de vida das aves); e fase de pós-aquecimento, que compreende o período entre o fim da fase de aquecimento e o fim do ciclo, por volta do 42º dia de vida das aves. O manejo do sistema de climatização é realizado por meio de controlador automático modelo AC-2000 PRO (Plasson<sup>®</sup>, Ma'agan Michael, IL).

Um dos aviários selecionados para o presente estudo é o aviário com ventilação por pressão negativa com painel evaporativo (APNPE), dotado de oito exaustores de 1,27m de diâmetro (50 in) (Plasson<sup>®</sup>, Ma'agan Michael, IL), modelo com cone direcionador de ar e motor com potência de 1,5 cv. Este aviário é equipado com sistema de aquecimento, constituído de uma fornalha com alimentação automática, instalada em área externa anexa ao galpão. Nesse

sistema, o combustível são aparas de madeira e o ar quente é conduzido ao interior do aviário por meio de dutos perfurados de metal e poliuretano. O sistema de aquecimento é acionado principalmente na fase inicial de criação, durante os 15 primeiros dias de vida das aves. Os exaustores são acionados por grupos de dois, totalizando quatro grupos de exaustores, como já ilustrado na Figura 3.1. Além disso, o APNPE conta com pequenas janelas de abertura no teto para a ventilação mínima, denominada pela indústria de equipamentos para avicultura como *inlets* de teto. As *inlets* de janela dupla são fabricadas em chapa galvanizada, com aproximadamente 1 m de comprimento e abertura de 7 cm, localizadas no teto, na região central do aviário. O objetivo das *inlets* é melhorar a uniformidade na distribuição do ar na região de criação dos pintinhos, sem reduzir bruscamente a temperatura no ambiente, já que é utilizado o ar pré-aquecido presente entre o forro e o telhado. Com isso, é possível melhorar a qualidade do ar para as aves, eliminando o excesso de gases, odores e umidade, sem prejudicar o conforto térmico na fase inicial de criação. A operação das *inlets* de teto ocorre por meio de um sistema de motorreductor, controlado automaticamente de acordo com o manejo de ventilação mínima adotado, de forma que o acionamento dos exaustores e da abertura das *inlets* ocorram simultaneamente. Por fim, o sistema de resfriamento evaporativo é executado por painéis evaporativos com placas de celulose, com dimensões de 12 x 1,9 m e área de 22,8 m<sup>2</sup> cada um, fixados na extremidade lateral oposta à face onde os exaustores estão instalados.

O segundo aviário abordado nesta pesquisa também é provido de sistema de ventilação por pressão negativa em modo túnel e sistema de nebulização (APNN), com oito exaustores de 50 polegadas e cone direcionador de ar. No entanto, a potência do motor desses exaustores é um pouco menor em comparação ao primeiro aviário, agora de 1,0 cv. Similarmente ao APNPE, os exaustores do APNN são acionados em grupos de dois, totalizando quatro grupos (Figura 3.1). O sistema de aquecimento é constituído por uma fornalha à lenha, abastecida de forma manual, localizada na área anexa ao galpão e distribuição do ar quente de forma análoga ao APNPE. Já o dispositivo de resfriamento evaporativo praticado no APNN é a nebulização, composto por 16 linhas com oito nebulizadores de média pressão (Plasson Industries Ltd, Ma'agan Michael, Israel) em cada uma, totalizando 128 bicos, distribuídos uniformemente ao longo de toda a instalação. Segundo o fabricante, cada bico nebulizador opera em 1379 kPa e a vazão é de 0,083 L min<sup>-1</sup>.

Em ambos os aviários, o acionamento de cada grupo de exaustores é realizado por meio do controlador automático, por meio da leitura de dois sensores instalados no sentido longitudinal do aviário, de acordo com o *status* operacional de ventilação estabelecido pela empresa, como é mostrado nas Tabelas 3.1 a 3.4. O ar fresco que entra no aviário é

impulsionado pela diferença de pressão estática entre o exterior e o interior da instalação, gerada pelo processo de exaustão criado pelo sistema de ventilação adotado.

Tabela 3.1 – *Setpoint* (temperaturas do ambiente interno, em °C) de acionamento da fornalha de aquecimento em função da idade das aves

Idade (dias)	Liga	Histerese	Desliga
1 – 3	32°C	1°C	33°C
4 – 7	30°C	1°C	31°C
8 – 11	28°C	1°C	29°C
12 – 15	27°C	1°C	28°C
16 – 19	26°C	1°C	27°C

Tabela 3.2 – *Setpoint* (temperaturas do ambiente interno, em °C) para acionamento dos grupos de exaustores, ao longo do período de produção das aves

Idade das aves	1° Grupo de exaustores		2° Grupo de exaustores		3° Grupo de exaustores		4° Grupo de exaustores	
	Liga	Desliga	Liga	Desliga	Liga	Desliga	Liga	Desliga
1 – 3	32	31,5	33	32,5	34	33,5	35	34,5
4 – 7	30	29,5	31	30,5	32	31,5	33	32,5
8 – 11	29	28,5	30	29,5	31	30,5	32	31,5
12 – 15	28	27,5	29	28,5	30	29,5	31	30,5
16 – 19	27	26,5	28	27,5	29	28,5	30	29,5
20 – 23	M	M	27	26,5	28	27,5	29	28,5
24 – 27	M	M	26	25,5	27	26,5	28	27,5
28 – 31	M	M	M	M	26	25,5	27	26,5
32 – 35	M	M	M	M	25	24,5	26	25,5
36 – 39	M	M	M	M	M	M	25	24,5
40 – 43	M	M	M	M	M	M	23	22,5
44 – abate	M	M	M	M	M	M	21	20,5

M – Modo Manual: Indica que os exaustores desses grupos devem estar continuamente ligados.

Tabela 3.3 – Manejo da ventilação mínima (Tempo ligado/desligado durante o dia, e quantidade de exaustores) para condições específicas da cama, ao longo do ciclo de produção das aves

<b>Cama nova</b>			
Idade das aves (dias)	Quantidade exaustores	Tempo ligado (s)	Tempo desligado (s)
1 – 3	2	60	240
4 – 7	2	75	225
8 – 11	2	90	210
12 – 15	2	105	195
12 – 19	2	120	180
<b>Reuso de cama</b>			
1 – 3	2	60	180
4 – 7	2	75	165
8 – 11	2	90	150
12 – 15	2	105	135
12 – 19	2	120	120

Tabela 3.4 – *Setpoint* (temperaturas do ambiente interno, em °C e valor máximo de umidade relativa, em %) para acionamento do sistema de resfriamento evaporativo, ao longo do período de produção das aves

Idade das aves (dias)	Liga	Desliga	Umidade Relativa*
1 – 3	36	35,5	80
4 – 7	34	33,5	80
8 – 11	33	32,5	80
12 – 15	32	31,5	80
16 – 19	32	30,5	80
20 – 23	30	29,5	80
24 – 27	29	28,5	80
28 – 31	28	27,5	80
32 – 35	27	26,5	80
36 – 39	26	25,5	80
40 – 43	25	24,5	80
44 – abate	24	23,5	80

\* Se a Umidade Relativa no interior do galpão estiver acima de 80% o sistema não é ligado.

### 3.2.2. Caracterização do ambiente térmico

O ambiente térmico no exterior e no interior de cada aviário em estudo foi caracterizado com base nos valores médios de temperatura do ar, umidade relativa e Índice de Temperatura e Umidade (ITU), nos períodos diurno e noturno. O ITU foi calculado por meio da Equação 1, proposta por Thom (1959):

$$ITU = T_{ar} + 0,36T_{po} + 41,5 \quad (1)$$

Onde: ITU: Índice de Temperatura e Umidade;  $T_{ar}$ : Temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_{po}$ : Temperatura de ponto de orvalho ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Dados de temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) e umidade relativa (%) foram registrados diariamente, em intervalos de um minuto, por meio de sensores de temperatura do ar e umidade relativa previamente calibrados, distribuídos uniformemente a 0,4 m de altura acima do nível do piso (altura das aves) e a 1,5 m de altura, no sentido longitudinal, sendo seis em cada seção transversal (Figuras 4.3 e 4.4), totalizando 66 medições de temperatura do ar e 30 medições de umidade relativa. Foram utilizados 10 módulos constituídos de placa microcontroladora Arduíno Mega 2560, conectada a sensores de temperatura e temperatura/umidade relativa. Foram utilizados o total de 24 sensores de temperatura e umidade DHT22 (acurácia de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  para a temperatura e  $\pm 2\%$  para umidade relativa, e resolução de  $0,1^{\circ}\text{C}$  para temperatura e  $0,1\%$  para umidade relativa) e 36 sensores de temperatura DS18B20 (digital, com precisão de  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  e resolução ajustável, cuja comunicação com o sistema de aquisição de dados foi feita por meio do protocolo de comunicação One-Wire). A placa microcontroladora Arduino Mega foi também conectada a um Shield Ethernet Wiznet W5100, com entrada SD para cartão de memória para o armazenamento dos dados coletados durante o experimento. Além disso, foram instalados três sensores/registradores HOBO<sup>®</sup>, Modelo U14-001 a 1,5 m de altura: o primeiro na região de entrada de ar; o segundo, no centro do aviário; e o terceiro, na região próxima aos exaustores, como pode ser visto na Figura 3.3.

Durante o período de aquecimento, as variáveis do ambiente térmico utilizadas para as análises foram coletadas em diversos pontos, conforme a zona de ocupação dos animais, a 0,4 m e a 1,5 m de altura. A vista superior do esquema de distribuição dos pontos amostrados durante as três primeiras semanas do ciclo está apresentada na Figura 3.2.

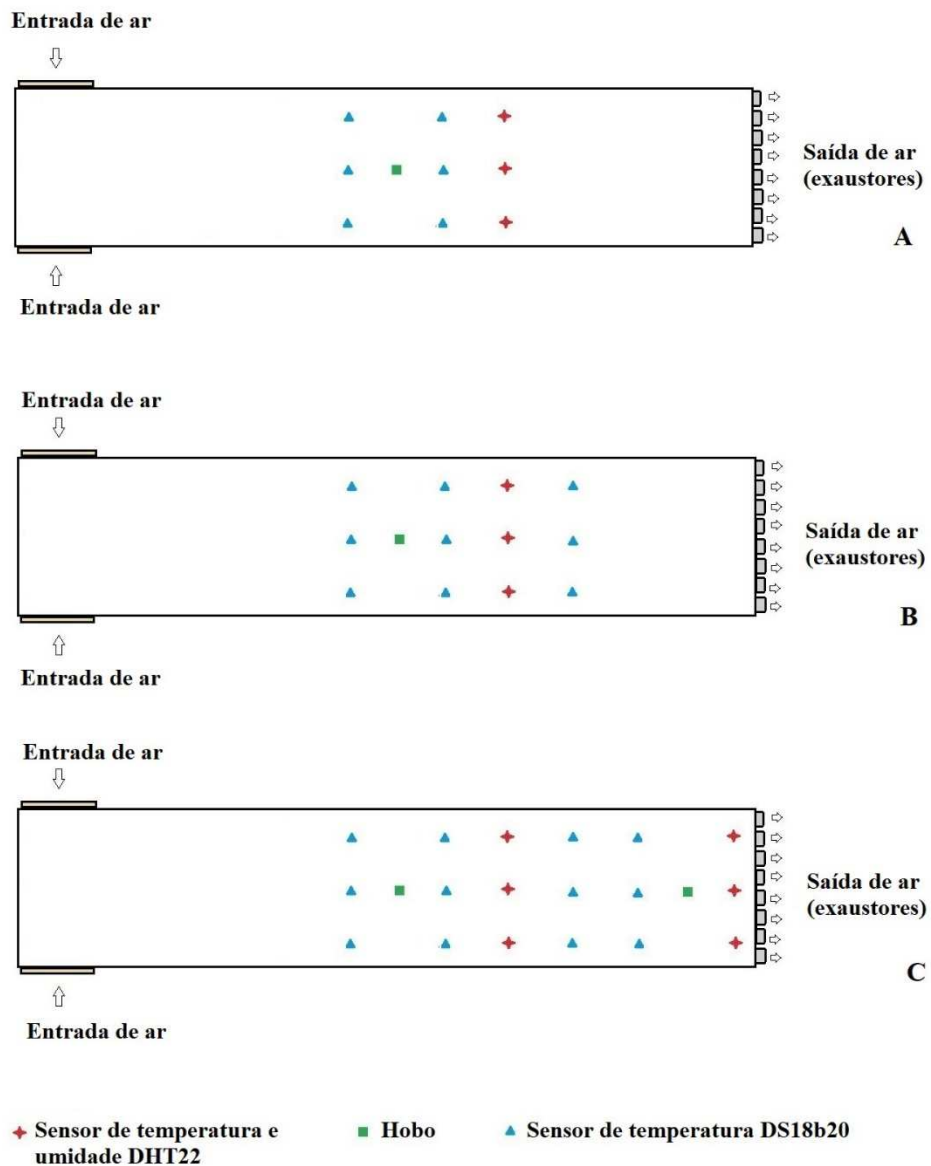


Figura 3.2: Disposição dos sensores de temperatura e temperatura/umidade relativa na zona de ocupação das aves, durante a fase de aquecimento, onde: A) Semana 1; B) Semana 2; e C) Semana 3.

Já no período pós-aquecimento, os valores de temperatura e umidade relativa do ar foram registrados em diversas localidades ao longo do aviário, também situados a 0,4 m e a 1,5 m de altura. A representação da localização dos pontos de coleta de dados ao longo de todo o aviário está apresentada nas Figuras 3.3 e 3.4.

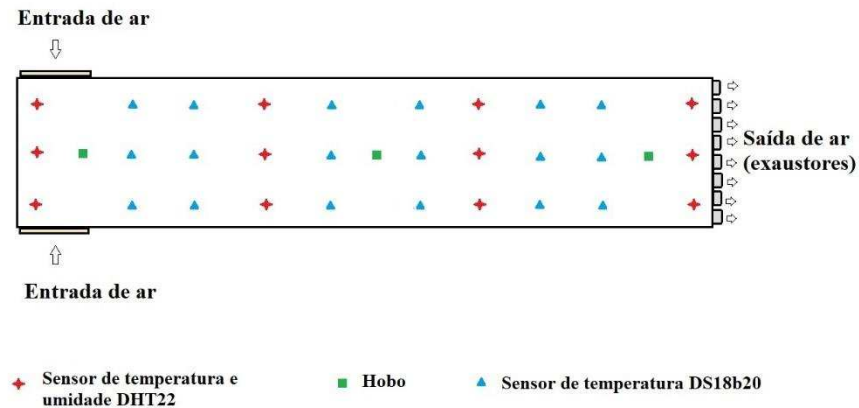


Figura 3.3: Vista superior da disposição dos sensores de temperatura e temperatura/umidade relativa, durante a fase de pós-aquecimento ao longo de todo o aviário.

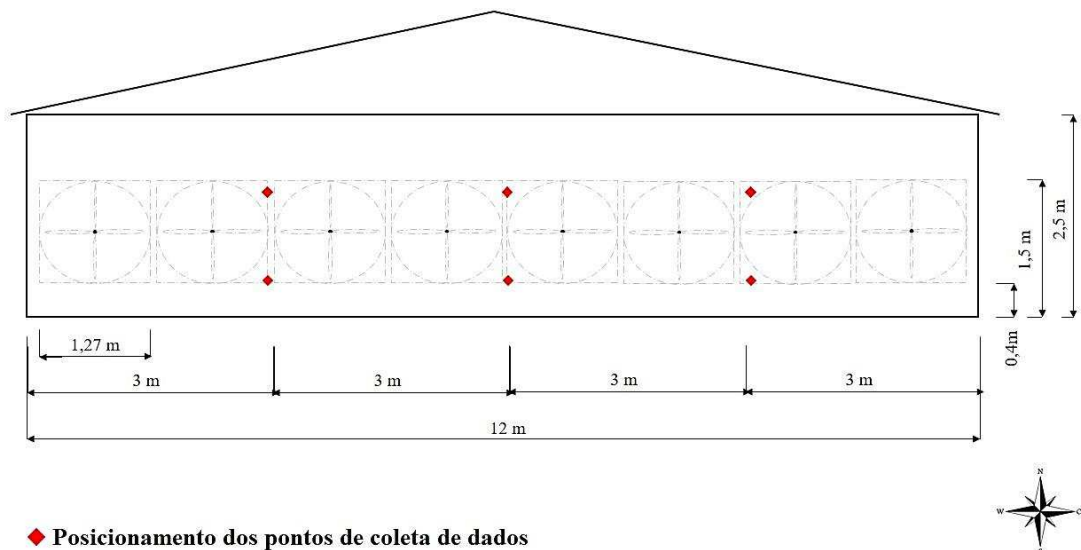


Figura 3.4: Vista frontal da disposição dos sensores de temperatura e temperatura/umidade relativa ao longo de todo o aviário.

Além dos dados referentes às condições térmicas do ambiente interno dos aviários estudados, para cada ciclo experimental, foram coletados dados de temperatura e umidade relativa do ar do ambiente externo aos galpões, com o auxílio de um sensor/registrador (*datalogger*) de temperatura do ar e umidade relativa (Hobo<sup>®</sup> modelo U14-001, com precisão de  $\pm 0,21$  °C). O sensor/registrador foi instalado em um abrigo meteorológico posicionado na área externa próxima aos aviários, protegido da radiação solar direta. Esses dados foram utilizados para a caracterização climática da região onde os aviários estão situados.

### 3.2.3. Avaliação da qualidade do ar

- **Concentração de amônia**

Os registros de concentração de amônia nos aviários foram obtidos por meio do sensor Gas Alert Extreme NH<sub>3</sub> Detector (BW Technologies®, Oxfordshire, UK) com capacidade de detecção de 0-100 ppm, temperatura de operação de -4 e 40 °C, e precisão de 2% (a 25 °C e umidade relativa de 15 a 90%), previamente calibrados. Os dados foram tomados manualmente a altura de 0,4 m e 1,5 m, totalizando 24 pontos ao longo do galpão, distribuídos conforme apresentado na Figura 3.5. A coleta foi realizada duas vezes por semana, em intervalo de três horas. Os pontos foram agrupados de acordo com as seguintes regiões abordadas nas avaliações: entrada de ar, região central e saída de ar. Os números junto aos pontos identificam a posição de cada ponto individualmente.

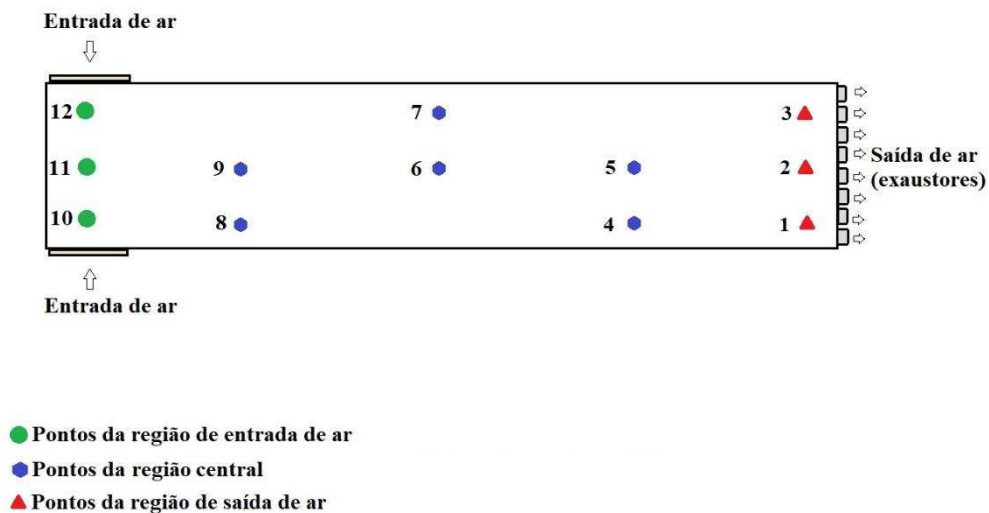


Figura 3.5: Esquemática da distribuição dos pontos de medição de concentração de amônia, coleta de amostra da cama e localização dos dispositivos de captura de amônia por difusão passiva.

- **Características da cama**

Amostras da cama foram coletadas nos pontos pré-determinados em ambos os aviários (Figura 3.5), de forma equidistante (a cada 3 m no sentido transversal e 27,5 m no sentido longitudinal). Para a análise laboratorial de umidade e potencial hidrogeniônico (pH) da cama, as amostras foram obtidas duas vezes por semana. Já para nitrogênio total, foram coletadas no início da fase inicial, início da fase final e no final do ciclo produtivo.

As análises laboratoriais para determinação da umidade da cama, pH e nitrogênio total foram realizadas conforme as metodologias abaixo:

**Umidade da cama (%):** Para determinar a umidade da cama, foi utilizado o método indicado pela Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária (EMBRAPA, 1997). As amostras de cama foram levadas à estufa em temperatura de 105-110°C, pelo período de 24 horas. Finalizado o processo de secagem, as amostras foram colocadas em dessecadores e logo após o resfriamento, foi realizada a pesagem final das mesmas por meio da balança analítica Shimadzu AY220 (Shimadzu Corporation®, Quioto, Japão). A partir destes resultados, foram determinados os conteúdos de água em base úmida utilizando-se a Equação 2:

$$U_{(b.u)} = \frac{(M_u - M_s)}{(M_u - M_r)} \times 100 \quad (2)$$

Onde:  $U_{b.u}$ : Conteúdo d'água base úmida (dag.kg<sup>-1</sup> ou %);  $M_r$ : Massa do recipiente (g);  $M_u$ : Massa do material úmido +  $M_r$  (g);  $M_s$ : Massa da amostra seca +  $M_r$  (g).

**Potencial hidrogeniônico - pH:** A determinação do pH das camas foi realizada por meio do método potenciométrico (ALVAREZ, 1992). Amostras da cama foram dissolvidas em água destilada e permaneceram em repouso por uma hora. Em seguida, foi realizada a leitura em potenciômetro de bancada, previamente calibrado em solução tampão-padrão de pH 4,0 e pH 7,0.

**Nitrogênio Total Kjeldahl - TKN:** O nitrogênio total presente na cama de frango foi determinado pelo método Kjeldahl (AOAC, 2005). Inicialmente, foram adicionados mistura digestora e ácido sulfúrico concentrado à amostra de cama. Em seguida, procedeu-se a digestão sulfúrica e, posterior a este processo, as amostras foram destiladas e tituladas. Além disso, os mesmos procedimentos foram efetuados em uma prova em branco, seguindo-se as mesmas etapas.

Por fim, a concentração de nitrogênio total foi calculada por meio da Equação 3:

$$TKN(mg.kg^{-1}) = \frac{(Vg_A - Vg_{BR}) \times 14 \times N \times F \times 1000}{m} \times (1 + U_{bs}) \quad (3)$$

Onde: TKN: Nitrogênio total ( $\text{mg kg}^{-1}$ , ppm);  $V_{gA}$ : Volume  $\text{H}_2\text{SO}_4$  utilizado na titulação da amostra (mL);  $V_{gBR}$ : Volume  $\text{H}_2\text{SO}_4$  utilizado na titulação do branco (mL); N: Concentração da solução ácida ( $\text{mol L}^{-1}$ );  $U_{bs}$ : Conteúdo de água na amostra, base seca (centesimal); F: Fator de correção da padronização da solução ácida utilizada na titulação; m: Massa da amostra (g).

- ***Determinação da emissão de amônia pelo Método SMDAE***

O dispositivo de captura de amônia (Figura 3.6) proposto por Saraz et al. (2014) consiste em um tubo de PVC, de 20 cm de diâmetro e 30 cm de altura, onde são colocadas duas esponjas de poliuretano (material absorvente) de 20 cm de diâmetro e 2 cm de espessura, a 10 cm (Esponja 1) e 30 cm (Esponja 2) a partir da base do coletor de PVC. Os dispositivos foram posicionados uniformemente ao longo dos dois aviários, por um período de 4 horas, nos mesmos pontos apresentados na Figura 3.5, abrangendo as regiões próximas às entradas e saídas de ar, comedouros e bebedouros. A coleta de dados foi realizada três vezes durante o ciclo produtivo: uma no início da fase inicial (primeira semana de vida das aves); uma no início da fase final (terceira semana de vida das aves) e outra no final do ciclo (sexta semana de vida dos animais).

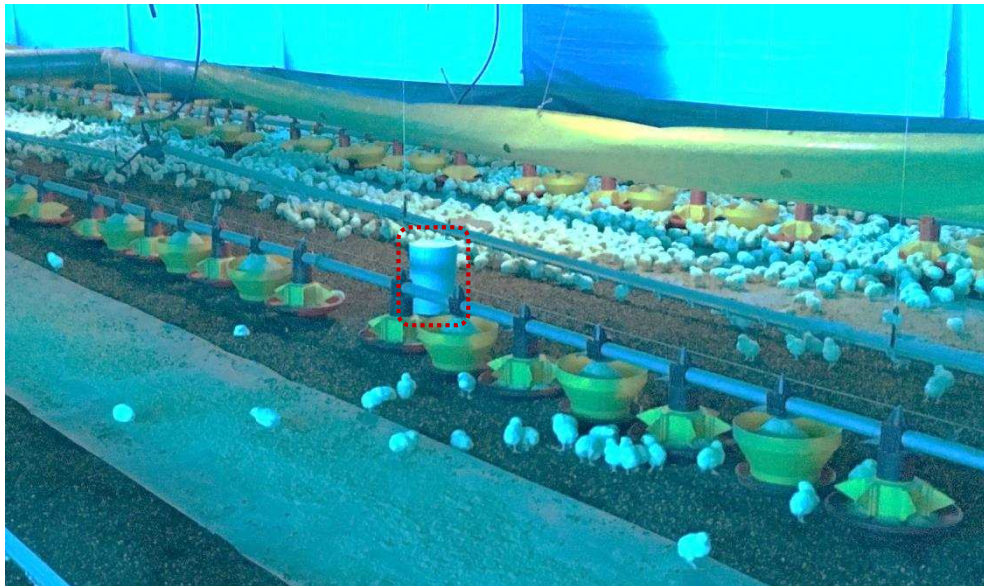


Figura 3.6: Dispositivo para captura de amônia emitida pela cama de frango posicionado na região dos comedouros, proposto por Osório Saraz et al. (2014).

A concentração de  $\text{NH}_3$  ( $\text{g NH}_3$ ) (Equação 4) capturada pela esponja é obtida a partir do volume da solução de diluição (mL), a concentração da solução usada na titulação ( $\text{mol L}^{-1}$ ) e o número de moles de  $\text{NH}_3$ .

$$NH_3(mg.kg^{-1}) = \frac{V \times N \times F \times 17 \times 1000}{A} \quad (4)$$

Onde: V: Volume de ácido clorídrico gasto na titulação da amostra (mL); N: Concentração da solução ácida (mol L<sup>-1</sup>); F: Fator de correção da padronização da solução ácida utilizada na titulação; A: Volume da alíquota da amostra (L).

O fluxo de massa SMDAE foi obtido por meio da Equação 5.

$$SMDAE = \frac{NH_3}{A_{ma} t} \quad (5)$$

Onde: SMDAE: Fluxo de NH<sub>3</sub> (g NH<sub>3</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>); NH<sub>3</sub>: Massa de NH<sub>3</sub> (g NH<sub>3</sub>); A<sub>ma</sub>: Área do material absorvente (m<sup>2</sup>); t: Período de exposição (s).

- ***Estimativa da emissão de amônia pelo aviário para a atmosfera***

Para estimar a quantidade de amônia eliminada do galpão na fase final do ciclo produtivo, foram coletados dados de concentração de amônia na entrada e na saída de ar, bem como o fluxo do ar imediatamente na saída de ar de cada exaustor. Os dados foram registrados *in situ*, com o auxílio do sensor Gas Alert Extreme NH<sub>3</sub> Detector (BW Technologies®, Oxfordshire, UK) e anemômetro de ventoinha portátil AM-4201 (Lutron Electronics, Inc., Coopersburg, PA).

A pressão estática foi obtida a partir de um manômetro digital modelo ITMP 120 (Instrutemp Instrumentos de Medição Ltda, São Paulo, BR), com duas mangueiras conectadas ao equipamento, sendo uma no interior do aviário, nas proximidades dos exaustores; e a outra no exterior do aviário.

Os registros foram feitos com base em um conjunto de pontos imaginários igualmente distribuídos, onde a área de eliminação do gás foi subdividida em 16 partes, constituindo os pontos amostrais, conforme apresentado na Figura 3.7. Os dados foram obtidos duas vezes na semana, com duas medições em cada dia de coleta, sendo uma no período da manhã e outra à tarde, totalizando quatro medições por semana. Os dados de concentração de amônia na entrada de ar foram obtidos em três pontos (pontos 10, 11 e 12) na região de entrada de ar, como já mostrado na Figura 3.5.

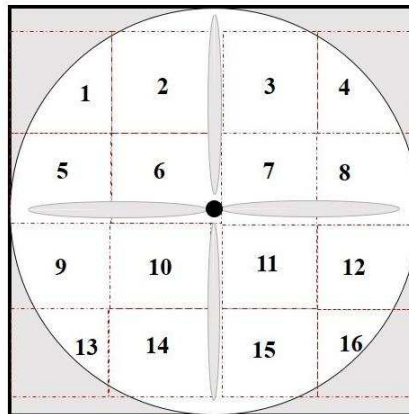


Figura 3.7: Subdivisão e localização dos pontos amostrais para coleta de dados de velocidade do ar ( $\text{m s}^{-1}$ ) e concentração de amônia (ppm) imediatamente na saída do fluxo de ar.

De posse dos dados, a estimativa do total de amônia em cada aviário foi obtida a partir do somatório da taxa de emissão calculada para cada exaustor. A taxa de emissão de amônia calculada neste estudo para cada exaustor é referente à quantidade de amônia emitida através do mesmo para a atmosfera, calculado pela Equação 6, de acordo com Liang et al. (2003).

$$E = (C_e - C_i) \cdot Q \quad (6)$$

Onde:

E: Emissão de amônia ( $\text{mg h}^{-1} \text{ ave}^{-1}$ );  $C_e$ : Concentração de amônia na área de exaustão ( $\text{mg m}^{-3}$ );  $C_i$ : Concentração de amônia na entrada de ar ( $\text{mg m}^{-3}$ ); Q: taxa de ventilação da instalação ( $\text{m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ ave}^{-1}$ ).

A taxa de ventilação por ave ( $\text{m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ ave}^{-1}$ ), por sua vez, foi estimada a partir da área ( $A_{ex}$ ) do exaustor ( $\text{m}^2$ ) e da velocidade média do ar ( $\text{m h}^{-1}$ ) no exaustor, divididas pelo número de aves presentes no galpão, conforme a Equação 7.

$$Q = \frac{\bar{V}_{ar} \cdot A_{ex}}{n_{aves}} \quad (7)$$

#### 3.2.4. Análise estatística

Todas as análises estatísticas apresentadas neste estudo foram realizadas utilizando-se o software estatístico SIGMAPLOT® 12.0 (Systat Software, Inc., San Jose, CA, USA).

Inicialmente, para a caracterização do ambiente térmico no interior dos aviários e no ambiente externo, utilizou-se a estatística descritiva das amostras para obtenção de médias e desvio padrão dos dados de temperatura do ar, umidade relativa e ITU em dois turnos diários.

Para analisar de forma geral os valores de umidade da cama, pH e nitrogênio total em função das diferentes regiões do galpão (entrada de ar, centro e saída de ar), os dados foram submetidos à análise de variância pelos testes *One Way* Anova para dados paramétricos; e Kruskal-Wallis para dados não paramétricos. As diferentes regiões do galpão constituíram os tratamentos; e os pontos amostrais, as repetições. Para identificar os grupos com diferenças significativas, foi aplicado o teste de comparações múltiplas de Dunn para comparação das médias.

Para a verificação do comportamento das variáveis físico-químicas da cama no decorrer das semanas a partir dos resultados obtidos nas diferentes regiões dos aviários, foram utilizados os testes *One Way Repeated Measures* (RM) Anova e Friedman RM Anova para dados com distribuição normal e não-normal, respectivamente. Os testes Tukey e Holm-Sidak foram aplicados para testar contrastes, em caso de diferença estatística significativa.

A fim de verificar se houve diferença entre dados de umidade e pH da cama coletados próximos aos bebedouros e próximos aos comedouros, o teste t foi empregado para análise dos dados com distribuição normal. Já para dados não-normais, o teste de Mann-Whitney foi utilizado. Para avaliar se o tipo de resfriamento evaporativo interfere nas características físico-químicas da cama, os valores de umidade da cama, pH e nitrogênio total foram comparados estatisticamente por meio do teste de Mann-Whitney.

Quanto à emissão de amônia, a fim de detectar possíveis diferenças estatísticas no fluxo de amônia entre os dois aviários, para uma mesma estação, foi utilizado o teste de Mann-Whitney. Os tratamentos foram representados pelos tipos de sistema de resfriamento evaporativo (painéis evaporativos ou nebulizadores), e os pontos amostrais constituíram as repetições. Para avaliar se a proximidade a bebedouros ou comedouros interferiu no fluxo de amônia emitido pela cama, os dados também foram comparados por meio do teste de Mann-Whitney. Neste caso, os tratamentos foram constituídos pelo local (proximidade a bebedouros ou proximidade a comedouros); e as repetições consistiram nos pontos amostrais. Já a concentração de amônia no ambiente interno foi analisada com base em estatística descritiva, a partir de médias, desvio padrão e concentrações máximas e mínimas em cada condição abordada neste estudo.

Por fim, para avaliar possíveis diferenças na estimativa do fluxo de emissão de amônia para a atmosfera entre os dois aviários em uma mesma estação, foi aplicado o teste t, onde o

tratamento foi o tipo de sistema de resfriamento evaporativo (painéis evaporativos ou nebulizadores) e os pontos amostrais foram considerados como repetição. Já para a comparação da estimativa do fluxo de amônia de cada aviário em diferentes estações do ano, utilizou-se o teste t, onde as diferentes estações (inverno/verão) foram consideradas como tratamento, e os pontos amostrais constituíram as repetições.

### 3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.3.1. Caracterização do ambiente térmico

A caracterização climática da região foi baseada em dados de temperatura do ar e umidade relativa obtidos a partir de um abrigo meteorológico instalado na área externa, nas proximidades dos aviários. Os valores máximos, mínimos e médios encontrados para as duas variáveis climáticas estão apresentados nas Figuras 3.8 e 3.9.

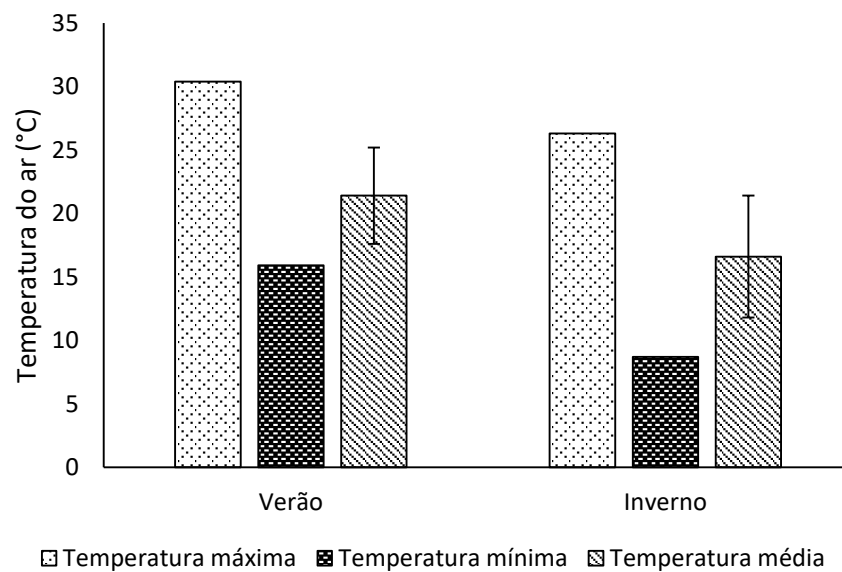


Figura 3.8: Temperatura do ar (°C) máxima, mínima e média do ambiente externo aos galpões, observadas no verão e no inverno.

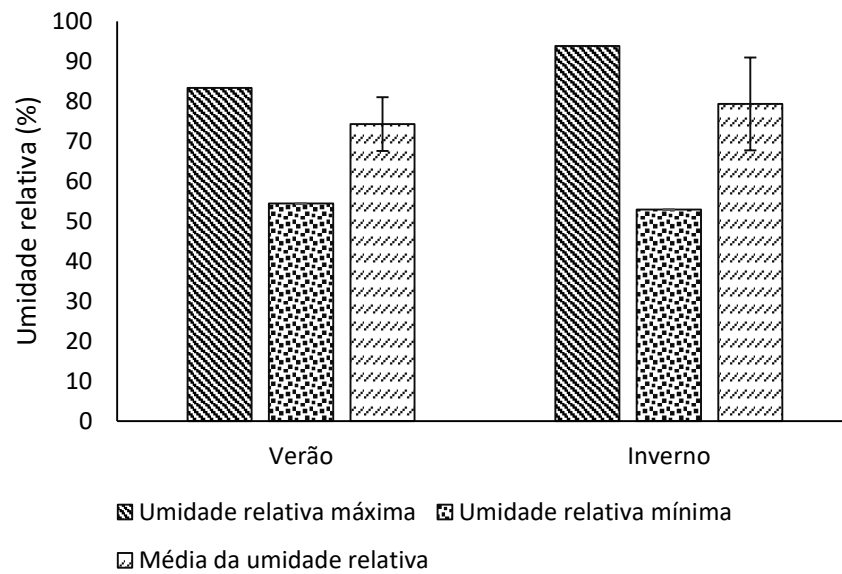


Figura 3.9: Umidade relativa (%) máxima, mínima e média do ambiente externo aos galpões, observadas no verão e no inverno.

Observa-se, pelas Figuras 3.8 e 3.9, que a menor temperatura do ar computada durante a coleta de dados foi registrada no inverno ( $8,7^{\circ}\text{C}$ ). Da mesma forma, a maior média horária obtida foi de  $30,4^{\circ}\text{C}$  durante o período de verão, o que caracteriza o clima da região (tropical de altitude, pela classificação de Köppen), com verões mais amenos pelo fato de ser uma região montanhosa. Nota-se ainda que a umidade relativa local esteve prevalentemente acima de 70%, representando condições de clima úmido durante todo o período experimental.

A caracterização do ambiente térmico externo e interno aos aviários avaliados foi realizada por meio da temperatura do ar, umidade relativa e pelo índice ITU. É possível verificar, na Tabela 3.5, as médias gerais destas variáveis agrupadas em dois turnos; e nas Figuras 3.10 a 3.13, o resumo dos valores de ITU no interior do aviário, de acordo com as semanas do ciclo. O período diurno compreende os dados obtidos entre 6 e 18 horas, enquanto o período noturno é referente ao intervalo entre as 18 e 6 horas do dia seguinte.

Tabela 3.5 – Média e desvio padrão da temperatura do ar, umidade relativa e Índice de temperatura e umidade (ITU) em cada aviário avaliado, durante o inverno e o verão, ao longo do período de produção dos frangos de corte

		Temperatura do ar (°C)		Umidade relativa (%)		ITU	
		<i>Período diurno</i>	<i>Período noturno</i>	<i>Período diurno</i>	<i>Período noturno</i>	<i>Período diurno</i>	<i>Período noturno</i>
Inverno	APNPE*	25,5±3,1	23,1±4,3	68,7±9,4	77,9±13,3	74,3±4,4	71,4±6,6
	APNN#	24,0±2,6	20,6±4,0	65,7±10,5	76,3±14,0	71,8±3,7	67,4±5,8
Verão	APNPE	26,7±2,8	23,8±3,0	66,3±10,4	75,2±11,3	75,6±3,2	72,1±3,72
	APNN	26,4±2,4	23,8±2,3	70,9±6,3	78,7±3,7	75,8±3,1	72,7±3,4

\*: Aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos; #: Aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores. Os valores médios incluem todos os pontos distribuídos em cada galpão, em ambas as alturas (0,4 m e 1,5 m), durante todo o período de cada ciclo produtivo.

A partir da Tabela 3.5, observa-se que de forma geral, no período diurno as médias de temperatura do ar, umidade relativa e ITU encontraram-se em níveis dentro dos limites confortáveis aos animais. No entanto, no período noturno foram observados valores médios de temperatura abaixo da faixa de conforto para a espécie, especialmente no inverno, caracterizando um ambiente com estresse por frio. Além disso, as médias de umidade relativa durante o período noturno em ambas as estações e galpões se mantiveram acima da faixa de conforto preconizada pela literatura. É importante destacar que os valores médios apresentados na Tabela 3.5 englobam dados de todo o período de criação, desde o primeiro até o último dia do ciclo produtivo. Contudo, é evidente que as exigências térmicas da espécie variam de acordo com sua idade, e portanto, existem intervalos de temperatura do ar, umidade relativa e ITU ideais para cada fase de criação das aves.

Segundo Cassuce et al. (2013), frangos de corte apresentam melhores índices produtivos quando a temperatura do ar permanece por volta de 31°C na primeira semana do ciclo, 27°C na segunda semana e 23°C na terceira semana. Em contrapartida, Schiassi et al. (2015) consideraram valores um pouco mais elevados, como 33° e 30°C como temperaturas confortáveis para frangos na primeira e segunda semana do ciclo, respectivamente. Arcila et al. (2018) afirmam que frangos de corte em fase de pós-aquecimento (a partir da quarta semana do ciclo) alojados sob temperatura do ar entre 25° e 28°C podem apresentar ótimos resultados quanto ao desempenho produtivo. Para Tinôco (2001), o ambiente ideal para conforto térmico das aves em fase final de produção é caracterizado por temperaturas do ar entre 15° e 27°C.

Quanto à umidade relativa, Tinôco (2001) sugere que o ideal é que seja mantida dentro da faixa de 50 a 70%. Silva et al. (2004) propõem o intervalo de umidade relativa de 60 a 70%

para conforto térmico frangos de corte ao longo do ciclo de produção. Segundo Ferreira (2016), a umidade relativa do ar, em conjunto com a temperatura do ar, exerce grande influência sobre o bem-estar e produtividade das aves. Por isso, é essencial que a umidade relativa seja mantida dentro do intervalo proposto, para que aspectos comportamentais e fisiológicos não sejam modificados, garantindo assim, o bom desempenho e o conforto dos frangos.

Em relação ao ITU para frangos de corte, de acordo com Curtis (1983) e Silva et al. (2004), a zona de conforto térmico é representada por valores entre 72,4 a 80 para a primeira semana do ciclo; 68,4 a 76 para a segunda semana; e 64,5 a 72 para a terceira semana. Já para frangos de corte adultos, a partir da quarta semana do ciclo produtivo, Silva et al. (2004) atestam que o ITU de conforto está englobado na faixa entre 60,5 a 68.

Apesar da congruência observada para os valores médios gerais das variáveis do ambiente térmico apresentados na Tabela 3.5, é importante ressaltar que, dentro do conjunto de dados, foi possível verificar valores de temperatura do ar inferiores aos limites recomendados em alguns horários do dia. Da mesma forma, valores acima da faixa de conforto também foram observados nos períodos mais quentes do dia. Nas Figuras 3.10 a 3.13 estão apresentados os valores de ITU obtidos em cada semana em ambos os aviários, para os dois turnos (dia e noite), tanto no inverno quanto no verão. Os valores médios apresentados nas Figuras 3.10 a 3.13 incluem todos os pontos amostrais ao longo do aviário (Figura 3.2), divididos em dois períodos do dia (diurno e noturno), em cada semana do ciclo produtivo.

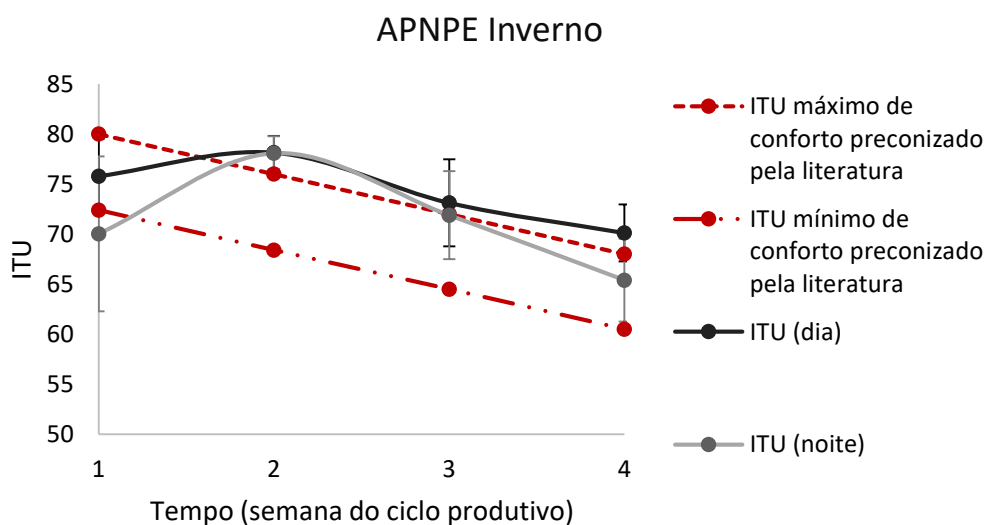


Figura 3.10: Índice de temperatura e umidade (ITU) do aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos (APNPE) em dois turnos do dia (dia e noite), para cada semana do ciclo produtivo de frangos de corte no período de inverno, em comparação à faixa ideal de ITU preconizada pela literatura.

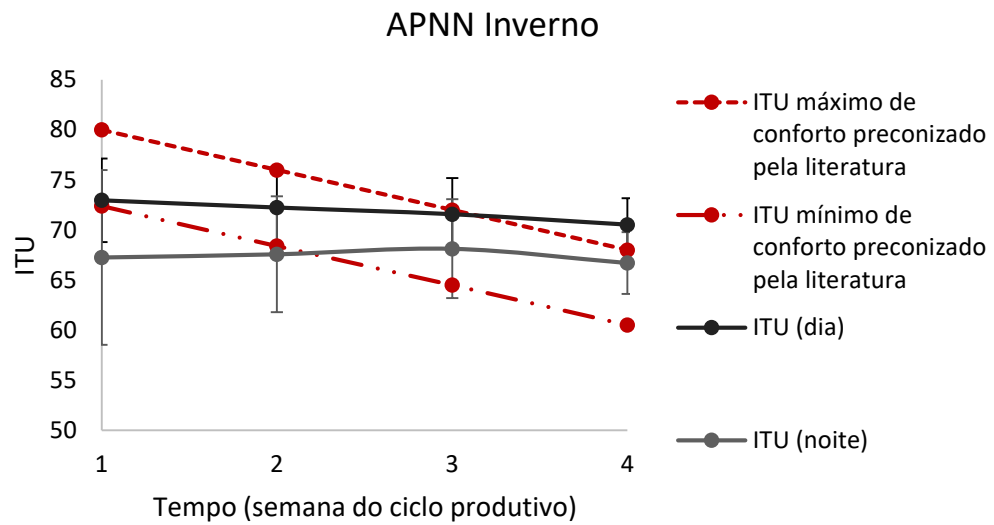


Figura 3.11: Índice de temperatura e umidade (ITU) do aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores (APNN) em dois turnos do dia (dia e noite), para cada semana do ciclo produtivo de frangos de corte no período de inverno, em comparação à faixa ideal de ITU preconizada pela literatura.

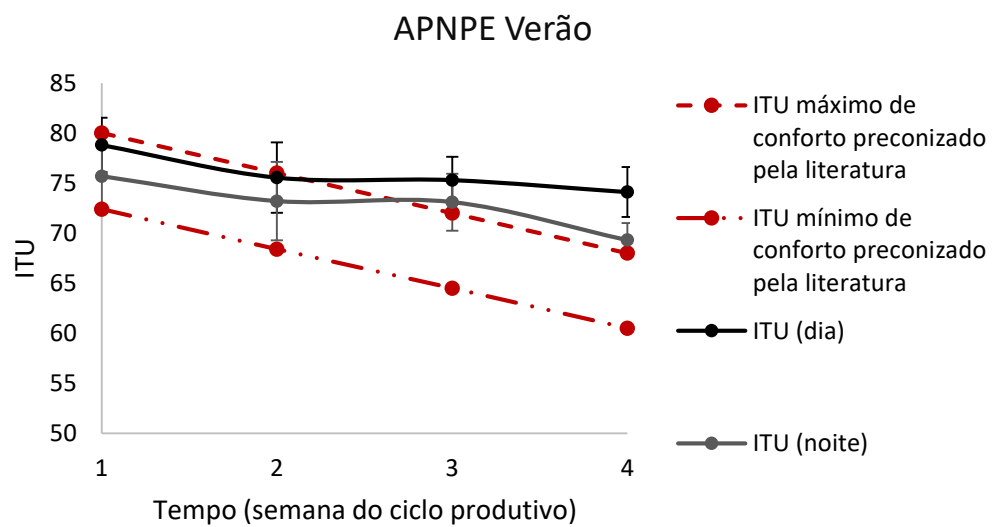


Figura 3.12: Índice de temperatura e umidade (ITU) aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos (APNPE) em dois turnos do dia (dia e noite), para cada semana do ciclo produtivo de frangos de corte no período do verão, em comparação à faixa ideal de ITU preconizada pela literatura.

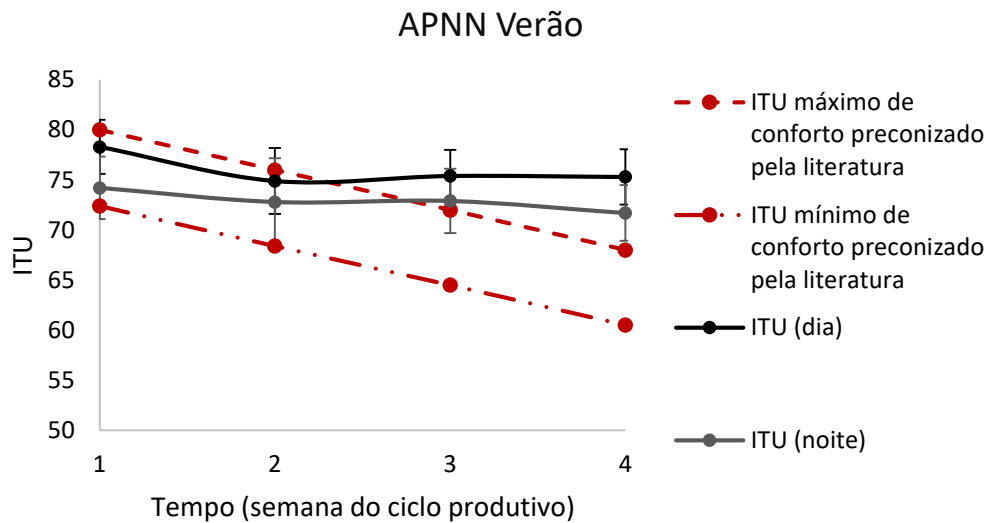


Figura 3.13: Índice de temperatura e umidade (ITU) do aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores (APNN) em dois turnos do dia (dia e noite), para cada semana do ciclo produtivo de frangos de corte no período do verão, em comparação à faixa ideal de ITU preconizada pela literatura.

Pelas Figuras 3.10 e 3.11, é possível observar que no inverno, na primeira semana de criação, o ITU em ambos os aviários no período noturno estava abaixo do limite mínimo já recomendado por Curtis (1983) e Silva et al. (2004), o que caracteriza estresse por frio. Na segunda semana, apenas o APNN apresentou ITU dentro do intervalo de conforto, durante o período diurno. Os resultados de ITU encontrados para o período noturno do APNPE foram superiores ao limite máximo ideal, o que pode ter ocorrido em virtude da instabilidade do sistema de aquecimento neste período. Já o APNN, no período noturno, apresentou ITU um pouco abaixo do limite inferior recomendado, indicando estresse por frio.

Na terceira semana, as condições nos dois turnos, para o APNPE, e para o período diurno do APNN, se mantiveram próximas ao limite superior recomendado para esta fase, com ITU próximos a 72. Já da quarta semana em diante, observou-se uma ligeira extrapolação do ITU experimental em ambos os aviários no período diurno, em relação ao limite superior de ITU preconizado. Coelho et al. (2019), ao analisar o ambiente térmico em aviários com paredes sólidas e ventilação mecânica no período de inverno, constataram ITU na faixa entre 70,2 a 79,1 nas duas primeiras semanas do ciclo, e entre 68,7 a 78,8 na terceira semana.

Nota-se, pelas Figuras 3.12 e 3.13 que, durante as duas primeiras semanas do verão, os aviários avaliados mantiveram o ITU dentro da zona de conforto para as aves. No entanto, a partir da terceira semana de criação, o ambiente interno do APNPE e do APNN foram caracterizados por ITU acima do limite máximo ideal para os animais, principalmente durante o dia, onde foram observados valores elevados para os padrões de termoneutralidade. Silva

(2007), ao determinar o ITU anual em aviários de frangos de corte localizados no Paraná, verificou que na fase de pós-aquecimento, os índices obtidos entre os meses de outubro a abril foram superiores ao nível de conforto para as aves, demonstrando a necessidade de melhorias nos sistemas de controle ambiental, principalmente nos meses mais quentes.

### **3.3.2. *Caracterização físico-química da cama de frango***

Por se tratar de instalações agroindustriais, caracterizadas por projetos de grandes dimensões, a avaliação das variáveis físico-químicas da cama foi realizada a partir de diferentes perspectivas, a fim de melhor retratar o comportamento das mesmas em função do tempo e da localização ao longo do aviário. Na Tabela 3.6 são mostrados os resultados das comparações estatísticas em uma abordagem geral para o APNPE e o APNN, tanto no inverno quanto no verão.

Tabela 3.6: Umidade da cama ( $U_{\text{cama}}$ ) (%), pH e nitrogênio total Kjeldahl (TKN) ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) (média  $\pm$  desvio padrão para dados paramétricos; mediana e intervalo interquartil para dados não-paramétricos; e P) em ambos os aviários avaliados, durante o inverno e o verão, em diferentes regiões dos aviários

		Inverno			
		Entrada de ar	Região central	Saída de ar	P
	$U_{\text{cama}}$ (%)	28,63 (17,8 - 43,06)	31,90 (27,3 - 36,6)	33,40 (23,54 - 40,6)	0,603 <sup>‡</sup>
APNPE	pH	5,50 (4,42 - 7,30) <sup>a</sup>	8,2 (7,02 - 8,52) <sup>b</sup>	8,0 (4,72 - 8,20) <sup>b</sup>	<0,001 <sup>‡</sup>
	TKN ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	22,4 $\pm$ 9,67	23,3 $\pm$ 6,62	24,46 $\pm$ 8,16	0,854 <sup>¤</sup>
	$U_{\text{cama}}$ (%)	31,93 (17,28 - 45,35)	32,73 (26,8 - 36,6)	33,5 (21,75 - 42,86)	0,801 <sup>‡</sup>
APNN	pH	5,38 (4,57 - 7,68) <sup>a</sup>	8,29 (5,60 - 8,50) <sup>b</sup>	7,98 (4,50 - 8,45) <sup>ab</sup>	0,003 <sup>‡</sup>
	TKN ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	21,74 $\pm$ 9,92	25,12 $\pm$ 8,08	23,76 $\pm$ 7,22	0,615 <sup>¤</sup>
		Verão			
		Entrada de ar	Região central	Saída de ar	P
	$U_{\text{cama}}$ (%)	29,04 (23,8 - 34,08)	29,34 (26,4 - 33,6)	28,71 (26,4 - 31,95)	0,87 <sup>‡</sup>
APNPE	pH	7,82 (7,08 - 8,15)	7,67 (6,06 - 8,43)	6,50 (5,01 - 7,93)	0,072 <sup>‡</sup>
	TKN ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	18,33 $\pm$ 4,42	19,2 $\pm$ 4,30	18,4 $\pm$ 6,03	0,881 <sup>¤</sup>
	$U_{\text{cama}}$ (%)	31,06 (28,20 - 34,40)	31,31 (27,07 - 35,43)	33,17 (26,50 - 38,01)	0,962 <sup>‡</sup>
APNN	pH	7,75 (7,13 - 8,0)	8,16 (7,17 - 8,76)	7,72 (6,06 - 8,82)	0,409 <sup>‡</sup>
	TKN ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	21,75 $\pm$ 5,40	20,59 $\pm$ 3,75	19,23 $\pm$ 5,40	0,499 <sup>¤</sup>

<sup>‡</sup> Teste de Kruskal-Wallis; <sup>¤</sup> One Way Anova; APNPE: Aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos; APNN: Aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores.

<sup>a,b</sup> Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de comparação múltipla de Dunn ao nível de significância de 5%.

Analisando-se a Tabela 3.6, nota-se que, tanto para o APNPE quanto APNN, apenas a variável pH, durante o inverno, apresentou diferenças na comparação entre as localidades do

aviário. Em relação ao APNPE, verifica-se que na região de entrada de ar, o pH foi mais baixo ( $P < 0,001$ ) em comparação às outras duas regiões. Quanto ao APNN, o pH na região de entrada foi menor do que o pH na região central ( $P = 0,003$ ), contudo, em relação à região da saída de ar não apresentou diferenças. Esse comportamento era esperado, uma vez que a região central do aviário corresponde à área do pinteiro, onde as aves são alojadas desde o primeiro dia do ciclo. Portanto, nessa região houve maior acúmulo de excretas desde os primeiros dias e, conseqüentemente, maiores são os níveis de pH.

Segundo Sousa (2018), a casca de café em sua forma pura, antes da utilização como cama, apresenta o pH em torno de 5,0, corroborando com nossos achados, onde a média foi de  $4,3 \pm 0,2$ . Em geral, o pH dos excrementos de frangos de corte situa-se entre 7,5 e 8,5 (FIGUEROA, ESCOSTEGUY e WIETHÖLTER, 2009; CARVALHO et al., 2011; MATOS, 2014), e portanto, com a deposição de excretas, maiores valores de pH serão observados. O pH da cama está intimamente ligado à formação de amônia, uma vez que, em condições de pH menores que 7,0, a produção do gás é ínfima (CARVALHO et al., 2011). Segundo Oviedo-Rondón (2008), o pH e umidade elevados favorecem a conversão do íon amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), que é a forma dominante de nitrogênio no esterco de aves, em amônia ( $\text{NH}_3^+$ ). Em pH entre 8,0 e 10,0, a degradação do ácido úrico das excretas é otimizada (GAY & KNOWLTON, 2009). Nääs et al. (2007), ao avaliar o pH de camas de frango no inverno e no verão, encontraram valores de mediana do pH menores na época do frio quando comparado ao período mais quente do ano, e por isso, argumentam que esse resultado pode se dar pela influência da alta temperatura do ar sobre o metabolismo dos microrganismos presentes na cama de frango.

Assim como a grande extensão dos aviários reflete na heterogeneidade das variáveis em função das condições ambientais intrínsecas de um determinado local, a qualidade da cama de frango se altera com o transcorrer do tempo. É evidente que, ao longo das semanas, as características da cama podem sofrer modificações em função de diversos fatores, como por exemplo, tipo de ração segundo a fase de criação, período de permanência das aves sobre o material, volume e acúmulo de excretas, temperatura ambiente, utilização de equipamentos de resfriamento como nebulizadores e ventiladores, entre outros. Para verificar, de forma mais detalhada, contrastes entre as diferentes localidades de cada galpão ao longo dos ciclos, foi realizada uma avaliação para comparar a umidade da cama, pH e nitrogênio total (TKN) nos diferentes setores dos aviários em função do tempo. O resultado da análise de variância para a umidade da cama está apresentado na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Umidade da cama ( $U_{\text{cama}}$ , %) (média  $\pm$  desvio padrão para dados paramétricos; mediana e intervalo interquartil para dados não-paramétricos; e P) em diferentes regiões dos aviários (E: entrada; C: centro; S: saída), ao longo das semanas do ciclo produtivo durante o inverno e o verão

APNPE inverno							
Semana do ciclo							
	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	P
E	21,12 $\pm$ 1,8 <sup>a</sup>	24,05 $\pm$ 4,98 <sup>a</sup>	38,96 $\pm$ 8,23 <sup>bc</sup>	40,86 $\pm$ 8,23 <sup>b</sup>	36,43 $\pm$ 7,05 <sup>bc</sup>	31,80 $\pm$ 6,10 <sup>c</sup>	<0,001 <sup>†</sup>
C	18,16 $\pm$ 3,88 <sup>a</sup>	33,74 $\pm$ 6,94 <sup>b</sup>	40,02 $\pm$ 6,5 <sup>c</sup>	32,95 $\pm$ 4,12 <sup>bd</sup>	32,80 $\pm$ 3,26 <sup>bd</sup>	31,2 $\pm$ 3,07 <sup>bd</sup>	<0,001 <sup>†</sup>
S	18,0 (17,5-18,8) <sup>ab</sup>	16,8 (15,8-17,4) <sup>a</sup>	22,33 (17,9-41,8) <sup>ab</sup>	37,8 (27,5 - 49,3) <sup>b</sup>	43,5 (31,3 - 59,4) <sup>b</sup>	41,5 (32,9 - 45,1) <sup>b</sup>	<0,001 <sup>♦</sup>
APNN inverno							
Semana do ciclo							
	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	P
E	17,76 $\pm$ 4,21 <sup>a</sup>	21,85 $\pm$ 7,05 <sup>a</sup>	40,2 $\pm$ 8,43 <sup>b</sup>	36,09 $\pm$ 6,05 <sup>b</sup>	41,3 $\pm$ 7,67 <sup>b</sup>	41,5 $\pm$ 13,4 <sup>b</sup>	<0,001 <sup>†</sup>
C	18,2 (15,3-22,5) <sup>a</sup>	35,06 (29,9-36,6) <sup>bc</sup>	39,2 (34,1-44,8) <sup>b</sup>	31,7 (27,8-34,7) <sup>ac</sup>	33,3(31,5-36,4) <sup>bc</sup>	35,4 (31,8-36,5) <sup>bc</sup>	<0,001 <sup>♦</sup>
S	15,9 $\pm$ 1,43 <sup>a</sup>	17,15 $\pm$ 1,43 <sup>a</sup>	26,2 $\pm$ 12,16 <sup>a</sup>	41,22 $\pm$ 10,23 <sup>b</sup>	42,4 $\pm$ 10,65 <sup>b</sup>	45,98 $\pm$ 7,70 <sup>b</sup>	<0,001 <sup>†</sup>
APNPE verão							
Semana do ciclo							
	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	P	
E	16,6 $\pm$ 2,4 <sup>a</sup>	28,15 $\pm$ 3,14 <sup>ab</sup>	29,13 $\pm$ 2,33 <sup>ab</sup>	30,8 $\pm$ 7,22 <sup>b</sup>	30,67 $\pm$ 4,8 <sup>b</sup>	0,034 <sup>†</sup>	
C	31,7 $\pm$ 5,25	27,7 $\pm$ 4,83	33,8 $\pm$ 4,85	30,3 $\pm$ 4,71	31,26 $\pm$ 6,32	0,261 <sup>†</sup>	
S	15,9 $\pm$ 2,12 <sup>a</sup>	20,5 $\pm$ 3,15 <sup>a</sup>	38,9 $\pm$ 4,08 <sup>b</sup>	34,9 $\pm$ 16,4 <sup>ab</sup>	28,17 $\pm$ 6,3 <sup>ab</sup>	0,01 <sup>†</sup>	
APNN verão							
Semana do ciclo							
	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	P	
E	18,7 $\pm$ 0,9	20,8 $\pm$ 2,95	32,96 $\pm$ 5,1	35,9 $\pm$ 12,5	30,6 $\pm$ 6,2	0,139 <sup>†</sup>	
C	29,9 $\pm$ 3,04	30,5 $\pm$ 7,3	29,5 $\pm$ 4,75	34,7 $\pm$ 6,62	32,1 $\pm$ 6,5	0,661 <sup>†</sup>	
S	16,9 $\pm$ 1,6	25,0 $\pm$ 4,75	30,2 $\pm$ 5,1	34,95 $\pm$ 11,6	29,4 $\pm$ 5,3	0,061 <sup>†</sup>	

<sup>†</sup> *One Way Repeated Measures* Anova; <sup>♦</sup> Teste Friedman *Repeated Measures*; E: região de entrada de ar; C: região central do aviário; e S: região de saída de ar, próximo aos exaustores. APNPE: Aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos; APNN: Aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores.

<sup>ab</sup> Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste Holm-Sidak ao nível de significância de 5%; e medianas seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey a 5% de significância.

Pela Tabela 3.7, observa-se que a umidade das camas do APNPE e do APNN apresentaram comportamentos similares para a mesma estação do ano. No inverno, constatou-se que ambos os aviários atingiram altos teores de água na cama já por volta da terceira semana do ciclo, com valores na faixa de 38 a 40%, sugerindo que a ventilação mínima possa ter sido insuficiente. Esse comportamento pode ter ocorrido em função do clima úmido associado a temperaturas mais baixas e conseqüentemente, condensação de vapor de água. Concomitantemente, foi necessária a adequação do manejo da cama e da ventilação neste período, visto que os animais mais jovens são susceptíveis ao estresse por frio e, para realizar o revolvimento e aeração da cama, o sistema de ventilação precisa ser acionado para a manutenção da qualidade do ar e eliminação dos gases liberados e do excesso de umidade. Com isso, para evitar o estresse térmico pelas baixas temperaturas do ar sobre as aves, essas operações de manejo da cama foram realizadas com menor frequência, o que resultou em valores de umidade mais altos a partir da terceira semana. Além disso, a temperatura do ar exerce grande influência sobre a umidade da cama, o que significa que, sob condições de clima frio, a evaporação do excesso de umidade da cama é dificultado. Conforme a temperatura do ar se eleva, menor é a umidade presente na cama. Esse efeito é verificado ao observar-se os resultados do inverno e do verão, em que, no período mais frio, os valores de mediana de umidade da cama foram mais altos que no verão. Diversos autores constataram resultados semelhantes, como Marín et al. (2015) e Sousa (2018), que afirmaram que, em períodos quentes, o processo de evaporação da umidade da cama é otimizado.

No inverno, é possível verificar pela Tabela 3.7 que a umidade da cama na região de entrada e no centro do APNPE foi mais elevada na terceira e na quarta semanas, aproximadamente na metade do ciclo produtivo. Já na saída de ar, a umidade da cama foi maior no fim do período de criação, permanecendo em torno de 43%. Ao mesmo tempo, o APNN apresentou um aumento significativo ( $P < 0,001$ ) nos valores de umidade à partir da terceira semana do ciclo, na região de entrada de ar; e a partir da quarta semana, na região dos exaustores (saída de ar). No entanto, a zona central do APNN apresentou comportamento similar ao APNPE quanto à umidade da cama, visto que os maiores percentuais foram verificados na terceira semana do ciclo. Mesmo assim, a umidade da cama da terceira, quinta e sexta semanas não se diferiram ( $P < 0,001$ ). Almeida (1986) recomenda que a umidade da cama seja mantida entre 20 e 35%. Em níveis mais elevados, ela torna-se úmida e emplastada, o que, de fato, prejudica o ganho de peso, a conversão alimentar e diminui a resistência a doenças (ÁVILA et al., 1992), além de influenciar a incidência e a severidade das lesões na carcaça (QIU e GUO,

2010). Problemas com intoxicações devido às altas concentrações de amônia também são consequências da alta umidade da cama.

Ao analisar os dados do inverno e do verão para ambos os aviários, nota-se ainda que, por volta da segunda semana, em ambas as estações, a região central apresentou maior teor de umidade na cama (com exceção ao APNPE, no verão). Esse incremento de umidade pode ser explicado pelo maior tempo de ocupação da região, uma vez que os pintinhos são inicialmente alojados nesse local, desde o primeiro dia do ciclo produtivo. Já nos demais setores, esse aumento é observado a partir da terceira e quarta semanas, de acordo com a ocupação progressiva dessas áreas. Da terceira semana ao final da produção, a maioria das medições de umidade em ambos os aviários e nas duas estações foi excessiva, sugerindo um volume insuficiente de ar fresco seco do sistema de ventilação. O fluxo de ar máximo foi considerado adequado (aproximadamente  $12 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ ave}^{-1}$ ), portanto, é provável que essa alta umidade seja um indicador de ventilação mínima insuficiente e/ou vazamento excessivo de água dos bebedouros.

O APNPE apresentou um aumento significativo nos resultados de umidade da cama na região de entrada de ar ( $P=0,034$ ) e de saída de ar ( $P=0,01$ ) no decorrer das semanas. Na entrada de ar, a principal diferença foi verificada entre a primeira e as últimas semanas do ciclo. Já o APNN, assim como na zona central, a umidade da cama não diferiu estatisticamente ao longo das semanas de criação, tanto na região de entrada ( $P=0,139$ ) quanto na saída de ar ( $P=0,061$ ).

Seguindo o padrão observado para a umidade da cama, o pH no inverno e no verão também se mostrou crescente ao longo do tempo. O resultado da análise de variância para observar a modificação do pH da cama ao passar do tempo, de acordo com cada área avaliada, está exibido na Tabela 3.8.

Tabela 3.8: Média e desvio padrão do pH da cama em diferentes regiões dos aviários (E: entrada; C: centro; S: saída), ao longo do ciclo produtivo durante o inverno e o verão

APNPE inverno							
	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	P
E	4,27±0,13 <sup>a</sup>	4,45±0,24 <sup>a</sup>	7,81±0,23 <sup>b</sup>	8,18±0,37 <sup>bd</sup>	8,68±0,38 <sup>c</sup>	8,03±0,10 <sup>bd</sup>	<0,001 <sup>†</sup>
C	4,33±0,28 <sup>a</sup>	5,70±1,06 <sup>b</sup>	8,18±0,30 <sup>cd</sup>	8,50±0,13 <sup>cd</sup>	8,62±0,15 <sup>c</sup>	8,05±0,16 <sup>d</sup>	<0,001 <sup>†</sup>
S	4,14±0,17 <sup>a</sup>	4,16±0,22 <sup>a</sup>	4,97±0,60 <sup>ab</sup>	5,97±0,70 <sup>b</sup>	7,34±1,32 <sup>c</sup>	7,42±0,48 <sup>c</sup>	<0,001 <sup>†</sup>
APNN inverno							
	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	P
E	4,08±0,15 <sup>a</sup>	4,06±0,39 <sup>a</sup>	6,66±0,8 <sup>b</sup>	8,3±0,28 <sup>c</sup>	8,72±0,15 <sup>c</sup>	8,20±0,23 <sup>c</sup>	<0,001 <sup>†</sup>
C	4,35±0,18 <sup>a</sup>	4,89±0,7 <sup>a</sup>	8,05±0,34 <sup>b</sup>	8,37±0,4 <sup>bc</sup>	8,63±0,17 <sup>c</sup>	8,25±0,16 <sup>b</sup>	<0,001 <sup>†</sup>
S	4,4±0,11 <sup>ab</sup>	4,07±0,54 <sup>a</sup>	4,99±0,43 <sup>ab</sup>	5,98±0,86 <sup>ab</sup>	8,13±0,92 <sup>c</sup>	7,33±1,06 <sup>c</sup>	<0,001 <sup>†</sup>
APNPE verão							
	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	P	
E	5,4±0,6 <sup>ab</sup>	4,63±0,3 <sup>a</sup>	5,20±0,4 <sup>a</sup>	6,56±0,62 <sup>b</sup>	8,1±0,3 <sup>c</sup>	<0,001 <sup>†</sup>	
C	4,7±0,27 <sup>a</sup>	6,15±1,07 <sup>a</sup>	7,2±1,6 <sup>b</sup>	8,1±0,97 <sup>b</sup>	8,27±0,31 <sup>b</sup>	<0,001 <sup>†</sup>	
S	4,9±0,5 <sup>a</sup>	5,1±0,54 <sup>a</sup>	5,1±1,1 <sup>a</sup>	7,2±0,9 <sup>b</sup>	8,0±0,4 <sup>b</sup>	<0,001 <sup>†</sup>	
APNN verão							
	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	P	
E	4,2±0,09 <sup>a</sup>	5,22±0,37 <sup>a</sup>	6,3±1,22 <sup>ab</sup>	7,9±1,2 <sup>b</sup>	8,4±0,4 <sup>b</sup>	<0,001 <sup>†</sup>	
C	6,2±1,1 <sup>a</sup>	6,7±1,2 <sup>a</sup>	7,55±1,0 <sup>ab</sup>	8,7±0,25 <sup>b</sup>	8,5±0,4 <sup>b</sup>	<0,001 <sup>†</sup>	
S	4,15±0,11 <sup>a</sup>	4,2±0,31 <sup>a</sup>	5,05±0,7 <sup>b</sup>	7,4±0,64 <sup>c</sup>	7,7±0,6 <sup>c</sup>	<0,001 <sup>†</sup>	

† *One Way Repeated Measures* Anova; E: região de entrada de ar; C: região central do aviário; e S: região de saída de ar, próximo aos exaustores. APNPE: Aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos; APNN: Aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores.

<sup>a,b</sup> Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste Holm-Sidak ao nível de significância de 5%.

Com base na Tabela 3.8, percebe-se que, assim como a umidade da cama, os resultados de pH retrataram comportamento crescente com o transcorrer das semanas, em cada área avaliada ( $P < 0,001$ ) no decorrer do ciclo de produção. Do mesmo modo, os valores médios de pH encontrados na região central são maiores que nas outras regiões durante as primeiras semanas do ciclo, uma vez que esta área é a primeira a ser ocupada pelas aves e, portanto, desde os primeiros dias ocorre deposição de excretas, que influencia diretamente na alteração do pH do material. Como nessas regiões ocorre maior concentração de dejetos desde a chegada do ciclo, o pH das excretas torna-se determinante, uma vez que estabelece a concentração de amônia na fase aquosa ou gasosa, influenciando a sua liberação. A emissão de amônia se inicia a partir de pH 7,0 e aumenta significativamente quando o pH é maior que 8,0 (LIU, WANG e BEASLEY, 2006; NASEEM e KING, 2018). Em pH menores que 7,0, os íons  $H^+$  presentes na cama fazem com que a proporção amônio:amônia seja aumentada, o que significa que maior quantidade de amônia será convertida em íon amônio, que não é volátil (OLIVEIRA et al.,

2003). Portanto, o ideal é que o pH seja mantido em níveis abaixo de 7,0, a fim de minimizar a geração de amônia no aviário. Ao avaliar, dentre outros fatores, a influência do pH nas emissões de amônia provenientes de resíduos de galpões, Dewes (1996) também confirma que a emissão do gás aumenta conforme o pH se eleva. Após 14 dias de avaliação, apenas 0,8% do N contido no material inicial foi perdido sob pH 6,0, enquanto que em pH 7,5, essa quantidade aumentou para 6,4% e em pH 9,0 a perda de N foi de aproximadamente 13,6%.

De maneira geral, os maiores valores de pH foram observados nas últimas semanas de cada ciclo, na faixa entre 8,0 e 9,0, com diferenças estatísticas significativas entre as regiões ( $P < 0,001$ ), principalmente em relação às primeiras semanas, quando a cama utilizada era nova. Nääs et al. (2007) encontraram resultados análogos, ao verificar que o pH da cama de maravalha tende a aumentar conforme o passar do tempo, estabelecendo-se em torno de 8,0 no final do ciclo. Similarmente, Marín et al. (2015) e Sousa (2018) obtiveram resultados semelhantes em uma análise sobre o comportamento do pH em vários ciclos de reutilização da cama, observando valores médios de pH entre 8,0 e 9,0 no primeiro ciclo de utilização, corroborando nossos achados.

O uso de aditivos químicos é uma forma eficiente de melhorar a qualidade física, química e microbiológica da cama. Esses aditivos reduzem o pH e, por consequência, diminuem a quantidade de bactérias e a volatilização da amônia, tornando o ambiente confortável às aves e, conseqüentemente, otimizando os índices zootécnicos e sanitários (SANTOS et al., 2012). Souza et al. (2018), ao avaliar diferentes aditivos químicos sobre a qualidade da cama de frango composta por casca de café, observaram que condicionadores como superfosfato, gesso agrícola e cal auxiliam na redução da umidade e do pH da cama, constituindo uma excelente estratégia para a manutenção da sua qualidade.

Na Tabela 3.9 estão expostos os resultados da análise de variância do nitrogênio total em cada região do galpão, no decorrer das semanas do ciclo, para ambos os aviários tanto no inverno quanto no verão. Como esperado, a cama apresentou incremento de nitrogênio total na fase final, além de alta umidade e pH em torno de 8,0, o que tornam oportunas as condições para a geração de amônia.

Tabela 3.9: Média e desvio padrão do Nitrogênio Total Kjeldahl (TKN) da cama de frango ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) em diferentes regiões dos aviários (E: entrada; C: centro; S: saída), ao longo do ciclo produtivo durante o inverno e o verão

<b>APNPE inverno</b>				
	<b>Início ciclo produtivo</b>	<b>Metade ciclo produtivo</b>	<b>Final ciclo produtivo</b>	<b>P</b>
<b>E</b>	14,00±1,65 <sup>a</sup>	29,04±3,33 <sup>b</sup>	30,35±2,36 <sup>b</sup>	<0,001 <sup>†</sup>
<b>C</b>	15,05±2,07 <sup>a</sup>	25,87±2,44 <sup>b</sup>	28,9±3,40 <sup>b</sup>	<0,001 <sup>†</sup>
<b>S</b>	15,35±1,01 <sup>a</sup>	16,96±2,2 <sup>a</sup>	34,9±4,05 <sup>b</sup>	<0,001 <sup>†</sup>
<b>APNN inverno</b>				
	<b>Início ciclo produtivo</b>	<b>Metade ciclo produtivo</b>	<b>Final ciclo produtivo</b>	<b>P</b>
<b>E</b>	15,7±0,72 <sup>a</sup>	23,93±1,24 <sup>b</sup>	31,62±4,09 <sup>c</sup>	<0,005 <sup>†</sup>
<b>C</b>	14,8±1,5 <sup>a</sup>	30,4±4,21 <sup>b</sup>	30,23±3,1 <sup>b</sup>	<0,005 <sup>†</sup>
<b>S</b>	14,43±1,85 <sup>a</sup>	16,4±1,92 <sup>a</sup>	34,4 ±4,9 <sup>b</sup>	0,006 <sup>†</sup>
<b>APNPE verão</b>				
	<b>Início ciclo produtivo</b>	<b>Metade ciclo produtivo</b>	<b>Final ciclo produtivo</b>	<b>P</b>
<b>E</b>	14,0±1,65 <sup>a</sup>	15,1±0,4 <sup>a</sup>	26,2±2,45 <sup>b</sup>	0,001 <sup>†</sup>
<b>C</b>	14,2±1,0 <sup>a</sup>	19,65±2,16 <sup>b</sup>	23,75±1,52 <sup>c</sup>	0,001 <sup>†</sup>
<b>S</b>	12,9±2,5 <sup>a</sup>	20,4±1,1 <sup>b</sup>	21,7±1,5 <sup>b</sup>	0,006 <sup>†</sup>
<b>APNN verão</b>				
	<b>Início ciclo produtivo</b>	<b>Metade ciclo produtivo</b>	<b>Final ciclo produtivo</b>	<b>P</b>
<b>E</b>	15,5±2,4 <sup>a</sup>	17,5±4,25 <sup>ab</sup>	24,75±1,1 <sup>b</sup>	0,032 <sup>†</sup>
<b>C</b>	16,3±1,5 <sup>a</sup>	22,6±2,7 <sup>b</sup>	23,7±2,42 <sup>b</sup>	<0,001 <sup>†</sup>
<b>S</b>	15,6±2,8 <sup>a</sup>	23,7±3,26 <sup>b</sup>	26,97±2,94 <sup>c</sup>	<0,001 <sup>†</sup>

<sup>†</sup> *One Way Repeated Measures* Anova; E: região de entrada de ar; C: região central do aviário; e S: região de saída de ar, próximo aos exaustores. APNPE: Aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos; APNN: Aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores.

<sup>a,b</sup> Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste Holm-Sidak ao nível de significância de 5%.

De maneira geral, é possível notar, pela Tabela 3.9, que o maior teor de nitrogênio total da cama nos dois aviários foram detectados do meio para o final do ciclo, o que pode ser explicado pelo incremento de nitrogênio não volatilizado devido ao acúmulo de excretas sobre a cama no decorrer do ciclo de criação, bem como pela maior excreção de nitrogênio pelas aves à medida em que a idade das mesmas avança. Segundo Liu et al. (2007), Burns et al. (2007) e Gates et al (2008), existe uma relação entre emissão de amônia e idade das aves, sugerindo que após o período de crescimento, a concentração de nitrogênio na cama é mais elevada. De todo o nitrogênio presente na alimentação dos frangos de corte, o percentual de deposição na carcaça das aves pode ser influenciado por fatores característicos do animal, condições ambientais e fatores nutricionais, bem como a idade e o sexo da ave (SILVA, 2012). Em geral, aves jovens

tem crescimento acelerado, e nesse período ocorre intensa deposição de proteína muscular, ou seja, maior retenção de nitrogênio na carcaça. Segundo Nery et al. (2007), é comum a ocorrência de maior retenção de nitrogênio em pintinhos, visto que, por estarem em fase de crescimento, utilizam o nutriente para deposição no tecido proteico. Da mesma forma, Lopez e Leeson (2007) observaram maior retenção de nitrogênio em aves de corte mais novas, com aumento gradativo da deposição até atingir 28 dias de idade. A partir daí, a retenção de nitrogênio apresentou tendência a diminuir, evidenciando que os animais em crescimento exigem maiores níveis de nitrogênio em virtude da elevada deposição do nutriente nos tecidos proteicos.

No presente trabalho, fica demonstrado que os menores teores de nitrogênio total na cama aviária foram observados no verão, quando a temperatura do ar encontrava-se mais alta, o que contribui para a volatilização de amônia e redução de TKN. De fato, sob temperaturas mais altas, o processo de perda de nitrogênio para a atmosfera é facilitado, por meio da volatilização na forma de amônia (FRANÇA et al., 2014), especialmente em condições de pH elevado. Partindo desse pressuposto, por este motivo, no inverno, a cama apresentou maior quantidade de nitrogênio total que não foi volatilizado como amônia.

O potencial de emissão de amônia existe em qualquer ambiente onde dejetos dos animais estejam presentes. Portanto, em aviários para frangos de corte, a cama é a principal fonte de emissão de amônia em virtude da sua função de receber e absorver os excrementos eliminados pelas aves. Além da influência da umidade e pH da cama, temperatura, umidade relativa, ventilação, práticas de manejo, dieta, entre diversos outros fatores, o sistema de bebedouros pode interferir nas características da cama e ser também um motivador da emissão de amônia (MARÍN et al., 2015; NASEEM e KING, 2018). Logo, para verificar se a cama próxima às linhas de bebedouros e comedouros apresentaram alteração na umidade e pH, os dados foram comparados por meio do teste Mann-Whitney. Os resultados podem ser vistos na Tabela 3.10.

Tabela 3.10: Umidade ( $U_{\text{cama}}$ , %) e pH da cama de frango (mediana, intervalo interquartil e P) na região dos bebedouros e comedouros, ao longo do ciclo produtivo durante o inverno e o verão

		Inverno		
		Próximo aos bebedouros	Próximo aos comedouros	P
APNPE	$U_{\text{cama}}$ (%)	29,8 (22,1 - 37,8)	33,90 (25,75 - 38,1)	0,338
	pH	7,74 (5,00 - 8,30)	8,04 (5,37 - 8,42)	0,306
APNN	$U_{\text{cama}}$ (%)	33,50 (23,9 - 38,8)	32, 5 (24,2 - 38,65)	0,947
	pH	7,74 (4,64 - 8,44)	8,00 (4,77 - 8,42)	0,559
		Verão		
		Próximo aos bebedouros	Próximo aos comedouros	P
APNPE	$U_{\text{cama}}$ (%)	28,9 (26,5 - 34,6)	29,4 (26,1 - 33,3)	0,536
	pH	7,45 (6,1 - 8,2)	7,6 (5,8 - 8,4)	0,694
APNN	$U_{\text{cama}}$ (%)	33,3 (27,1 - 35,4)	29,2 (26,9 - 35,1)	0,258
	pH	7,97 (7,2 - 8,8)	8,02 (6,44 - 8,57)	0,529

APNPE: Aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos; APNN: Aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores.

Nota-se, pelos dados dispostos na Tabela 3.10, que não houve diferenças ( $P > 0,05$ ) para as duas variáveis, ou seja, em ambos os aviários, a proximidade com as linhas de bebedouros não influenciou na umidade e pH. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que, especificamente na granja onde foi realizado o experimento, não há a reutilização da cama em ciclos subsequentes. A cada novo ciclo, a cama é completamente substituída por uma nova cama de casca de café.

Segundo Carvalho et al. (2011), a composição e características físicas da cama são distintas entre aviários, granjas e diferentes regiões. Essas variações podem decorrer, dentre outros fatores, do número de lotes produzidos na cama, da quantidade de excretas, do método de limpeza utilizado e do sistema de bebedouros instalado. Nesse sentido, o tipo de bebedouro influencia diretamente na umidade da cama. Sistemas fechados, como é o caso dos bebedouros tipo *nipple*, são mais eficientes que sistemas abertos de fornecimento de água, sob o ponto de vista da qualidade bacteriológica da água, desperdício e qualidade da cama. Consequentemente, possibilitam uma cama mais seca, com menor volatilização de amônia (SOARES et al., 2012).

No entanto, os autores enfatizam a necessidade de atenção quanto ao monitoramento do estado dos tubos, pressão e vazão de água, bem como revisão e manutenção periódica de todo o sistema, a fim de evitar problemas como precipitação e deposição de ferro e minerais e contaminação da água de bebida por bactérias.

Outro aspecto que pode levar à maior umidade e emplastramento da cama ao redor de bebedouros e comedouros é a aeração insuficiente do ambiente, inclusive acerca da ventilação mínima. Maiores taxas de ventilação constituem uma forma eficiente de redução dos níveis de amônia dentro dos galpões, diluindo-a e removendo-a para o exterior da instalação, além de promover a secagem da cama e conseqüentemente, reduzir a emissão do gás, uma vez que as reações dependem do teor de umidade (SOUSA et al., 2016).

Sousa (2018) constatou que a umidade em camas de maravalha e de casca de café tende a diminuir a cada novo ciclo de reutilização. Segundo a autora, essa redução na umidade ocorre devido ao acréscimo de uma camada de substrato no início de cada novo ciclo, uma vez que a umidade da maravalha pura é de aproximadamente 7%; e da casca de café, em torno de 15%. Além da incorporação de material novo à cama reutilizada, é possível reduzir a umidade e o pH a partir do seu tratamento, por meio do uso de condicionadores químicos, que melhoram sua qualidade física, química e microbiológica. Com isso, o desprendimento de gases tóxicos como a amônia é atenuado e, conseqüentemente, os índices zootécnicos e sanitários são otimizados (SANTOS et al., 2012).

Assim como o sistema de fornecimento de água, as técnicas de climatização por meio de resfriamento evaporativo, quando mal manejadas, podem impactar diretamente na umidade da cama no interior de aviários. Diante disso, foi realizada uma análise para comparar as variáveis físico-químicas da cama, a fim de verificar se o tipo de resfriamento evaporativo interferiu na qualidade da mesma. Os dados dos dois galpões avaliados foram comparados por meio do teste t independente e Teste de Mann-Whitney (para dados paramétricos e não-paramétricos, respectivamente). Os resultados gerais, obtidos ao longo de todo o ciclo produtivo, estão apresentados na Tabela 3.11. O resultado da comparação entre os dois sistemas de resfriamento evaporativo no fim do ciclo produtivo (nas duas últimas semanas de criação) está apresentada na Tabela 3.12.

Tabela 3.11: Análise comparativa da umidade da cama ( $U_{\text{cama}}$ , %), pH e nitrogênio total Kjeldahl (TKN) ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) (mediana, intervalo interquartil e P) durante o inverno e o verão, de acordo com o sistema de resfriamento evaporativo implementado

<b>Inverno</b>			
	<b>APNPE</b>	<b>APNN</b>	<b>P</b>
$U_{\text{cama}}$ (%)	31,7 (23,6-37,8)	32,7 (24,0-38,7)	0,760 <sup>■</sup>
pH	7,97 (5,2-8,35)	7,95 (4,76-8,43)	0,987 <sup>■</sup>
TKN ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	25,25 (15,5-29,2)	25,3 (15,5-30,2)	0,817 <sup>■</sup>
<b>Verão</b>			
	<b>APNPE</b>	<b>APNN</b>	<b>P</b>
$U_{\text{cama}}$	29,1 (26,4-33,6)	31,3 (27,2-35,3)	0,137 <sup>■</sup>
pH	7,5 (6,03-8,3) <sup>a</sup>	8,0 (7,05-8,63) <sup>b</sup>	0,016 <sup>■</sup>
TKN ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	19,5 (14,45-23,56)	21,01 (16,4-24,2)	0,151 <sup>■</sup>

■ Teste Mann-Whitney; APNPE: Aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos; APNN: Aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores.

<sup>a,b</sup> Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Mann-Whitney ao nível de significância de 5%.

Tabela 3.12: Análise comparativa da umidade da cama ( $U_{\text{cama}}$ , %), pH e nitrogênio total Kjeldahl (TKN) ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) (média  $\pm$  desvio padrão para dados paramétricos; mediana e intervalo interquartil para dados não-paramétricos; e P) durante as duas últimas semanas do ciclo, no inverno e no verão, de acordo com o sistema de resfriamento evaporativo implementado

<b>Final do ciclo - Inverno</b>			
	<b>APNPE</b>	<b>APNN</b>	<b>P</b>
$U_{\text{cama}}$ (%)	35,2 $\pm$ 7,5	34,9 $\pm$ 8,8	0,873 <sup>□</sup>
pH	8,2 (8,0-8,5)	8,3 (8,0-8,6)	0,677 <sup>■</sup>
TKN ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	23,1 (15,3-27,6)	26,7 (14,8-29,3)	0,573 <sup>■</sup>
<b>Final do ciclo - Verão</b>			
	<b>APNPE</b>	<b>APNN</b>	<b>P</b>
$U_{\text{cama}}$	29,3 (26,3-33,5)	29,7 (26,5-34,8)	0,609 <sup>■</sup>
pH	7,9 (6,6-8,3)	8,0 (7,2-8,6)	0,164 <sup>■</sup>
TKN ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	20,5 $\pm$ 3,6	19,3 $\pm$ 5,13	0,506 <sup>□</sup>

□ Teste t independente; ■ Teste Mann-Whitney; APNPE: Aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos; APNN: Aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores.

De maneira geral, observa-se que, em relação ao tipo de resfriamento evaporativo adotado, as características físico-químicas da cama não apresentaram diferenças expressivas, mesmo na fase considerada mais crítica, nas últimas semanas do ciclo de produção (Tabela 3.12). Verifica-se na Tabela 3.11 que não houve diferença ( $P > 0,05$ ) na umidade da cama, nitrogênio total e pH, exceto o pH das camas dos dois aviários durante o verão ( $P = 0,016$ ). Uma possível explicação é o fato de que, no verão, as condições climáticas impõe uma maior

demanda dos sistemas de resfriamento evaporativo, que nem sempre é adequadamente ajustado. Apesar de não serem observadas diferenças na umidade da cama, acredita-se que o sistema de nebulização não estava corretamente ajustado, o que pode ter levado ao aumento de umidade na superfície da cama. Segundo Rehbecker (2002), o acúmulo de excretas e amônia na cama elevam o pH da mesma. Supostamente, a maior umidade superficial, em conjunto com maior quantidade de excretas potencializaram a formação de amônia na cama, o que possibilitou valores de pH ligeiramente maiores nesse aviário. De acordo com Oliveira et al. (2003), a umidade da cama favorece o aumento do pH uma vez que maiores teores de água beneficiam a atividade microbiana e, assim, elevam a quantidade de amônia na cama.

De acordo com Hernandes et al. (2002), o uso de nebulizadores é um dos diversos fatores que pode alterar a composição e qualidade da cama aviária. É essencial o bom gerenciamento desse tipo de equipamento, com atenção especial quanto à regulagem dos nebulizadores, de modo que as gotículas evaporem antes de alcançar a cama.

### ***3.3.3. Emissão de amônia pela cama a partir do Método SMDAE***

A estimativa do fluxo de amônia emitido pela cama é de grande interesse por parte de pesquisadores e produtores, tendo em vista os efeitos que este gás pode gerar no ambiente. As variações nas taxas de emissão de amônia em um aviário ocorrem, além dos outros aspectos já citados, em função de fatores sazonais, tipologias construtivas e até mesmo de práticas de manejo. Por isso, foi realizada a análise do fluxo de amônia nos dois aviários em estudo, em função da estação (inverno ou verão), ao longo do ciclo de produção. Na Figura 3.14 estão apresentados, de forma genérica, os resultados médios do fluxo de emissão de amônia da cama de frango calculado pelo método SMDAE para o APNPE e o APNN durante o inverno e o verão.

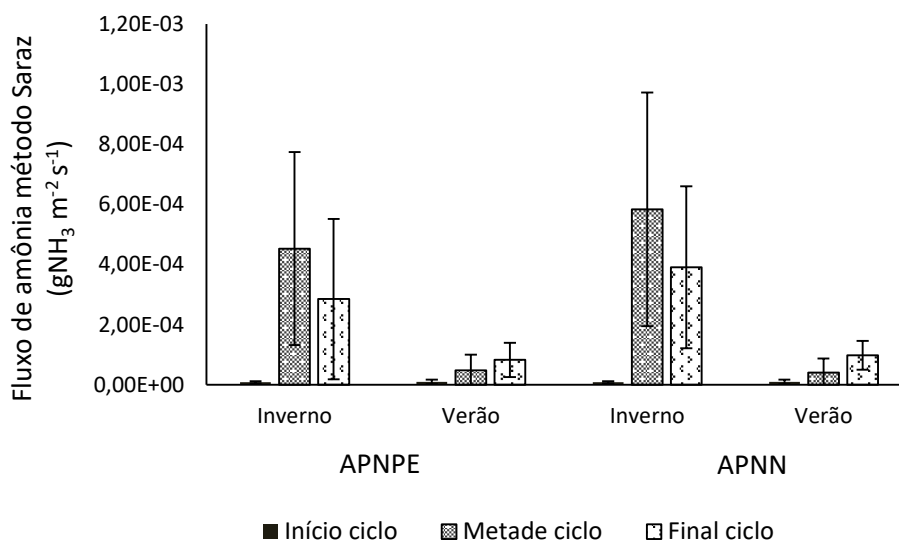


Figura 3.14: Média do fluxo de emissão de amônia da cama de frango pelo método SMDAE ( $\text{gNH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) em diferentes regiões dos aviários avaliados, ao longo do ciclo produtivo, durante o inverno e o verão.

Como esperado, os maiores fluxos de amônia foram verificados no inverno, para ambos os aviários. O inverno representa a situação mais crítica porque existe a necessidade de renovação de ar ao mesmo tempo que o calor ambiente deve ser conservado. Assim, nesse período a ventilação deve ser usada somente para a remoção do excesso de gases e vapor de água (ÁVILA et al., 1992). As maiores taxas foram verificadas particularmente no APNN, no inverno. Uma possível explicação para isso consiste na diferença de potência dos exaustores, uma vez que no APNPE cada exaustor operou com 1,5 cv e no APNN, 1,0 cv. Portanto, com menores fluxos, menor quantidade de vapor de água é removido, favorecendo a conversão do nitrogênio das excretas em amônia volátil.

Para verificar se houve diferença estatística no fluxo de amônia entre os dois aviários para uma mesma estação, os dados foram comparados por meio do teste de Mann-Whitney. Na tabela 3.13 é possível observar os resultados do teste estatístico.

Tabela 3.13: Comparação do fluxo de emissão de amônia da cama de frango pelo método SMDAE ( $\text{gNH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) (mediana, intervalo interquartil e P) no aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos (APNPE) e no aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores (APNN), no inverno e no verão

	APNPE	APNN	P
<b>Fluxo de amônia (inverno)</b>	$1,84 \cdot 10^{-4}$ ( $8,22 \cdot 10^{-5} - 4,65 \cdot 10^{-4}$ )	$2,57 \cdot 10^{-4}$ ( $8,22 \cdot 10^{-5} - 6,19 \cdot 10^{-4}$ )	0,779
<b>Fluxo de amônia (verão)</b>	$4,25 \cdot 10^{-5}$ ( $1,19 \cdot 10^{-5} - 9,49 \cdot 10^{-5}$ )	$4,91 \cdot 10^{-5}$ ( $1,31 \cdot 10^{-5} - 1,19 \cdot 10^{-4}$ )	0,683

Não foram encontradas diferenças nos resultados de fluxo de amônia da cama entre o APNPE e o APNN durante o inverno ( $P=0,779$ ) e durante o verão ( $P=0,683$ ), revelando que, apesar de ser observado maior fluxo no APNN no inverno, as emissões de amônia da cama em ambos os aviários são bastante semelhantes. No entanto, ao comparar valores médios do fluxo de amônia de um mesmo galpão em duas estações distintas (inverno e verão), diferenças ( $P<0,001$ ) foram encontradas, indicando que o fluxo de amônia emitido pela cama no inverno é significativamente maior que no verão.

É sabido que a umidade é um dos principais fatores que potencializam a volatilização de amônia. Para verificar se a proximidade a bebedouros ou comedouros interferiu no fluxo de amônia da cama, foi utilizado o teste de Mann-Whitney para comparar os dados de cada localidade. A relação entre a emissão de amônia a partir da localização das amostras (perto de bebedouros/ perto de comedouros) para ambos os aviários está mostrada na Figura 3.15.

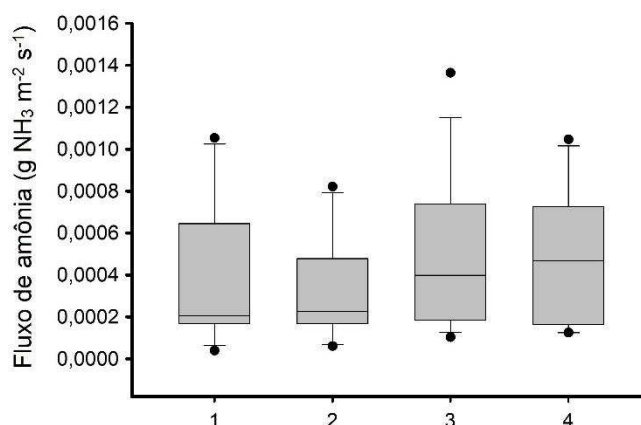


Figura 3.15: Fluxo de amônia ( $\text{gNH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) gerado em cada aviário, na região dos bebedouros e dos comedouros, onde: 1) Aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos (APNPE) na região dos bebedouros; 2) Aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos (APNPE) na região dos comedouros; 3) Aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores (APNN) na região dos bebedouros; 4) Aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores (APNN) na região dos comedouros.

A partir da Figura 3.15, observa-se que os valores do fluxo de massa de amônia foram similares nas amostras localizadas próximas aos bebedouros e nas amostras próximas aos comedouros. Não foi encontrada diferença significativa pelo teste Mann-Whitney para as amostras próximas aos bebedouros e comedouros para o APNPE ( $P=0,725$ ) e para o APNN ( $0,977$ ). Saraz et al. (2014) notaram menor fluxo de amônia na região dos comedouros, onde a umidade é normalmente menor em relação aos bebedouros, em aviários ventilados naturalmente. No entanto, sabe-se que, caso as aves permaneçam por mais tempo próximas aos comedouros, é esperado que haja maior deposição de excretas nesse local, o que consequentemente eleva a umidade da cama no local.

### 3.3.4. Concentração de amônia

A análise da concentração de amônia foi realizada a partir dos dados médios obtidos para cada galpão aos 21 dias e no final do ciclo de produção. Nas Figuras 3.16 e 3.17 estão apresentados os resultados de concentração de amônia no APNPE e APNN para o inverno e o verão, respectivamente.

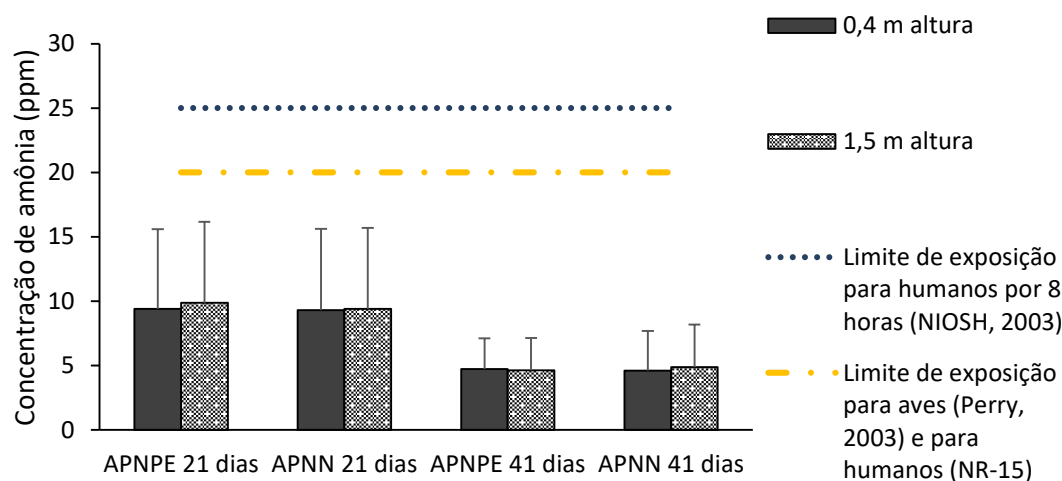


Figura 3.16: Concentração de amônia (média e desvio padrão, ppm) em cada aviário, na metade (21 dias) e no final do ciclo (41 dias) durante o inverno, onde: APNPE: Aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos; APNN: Aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores.

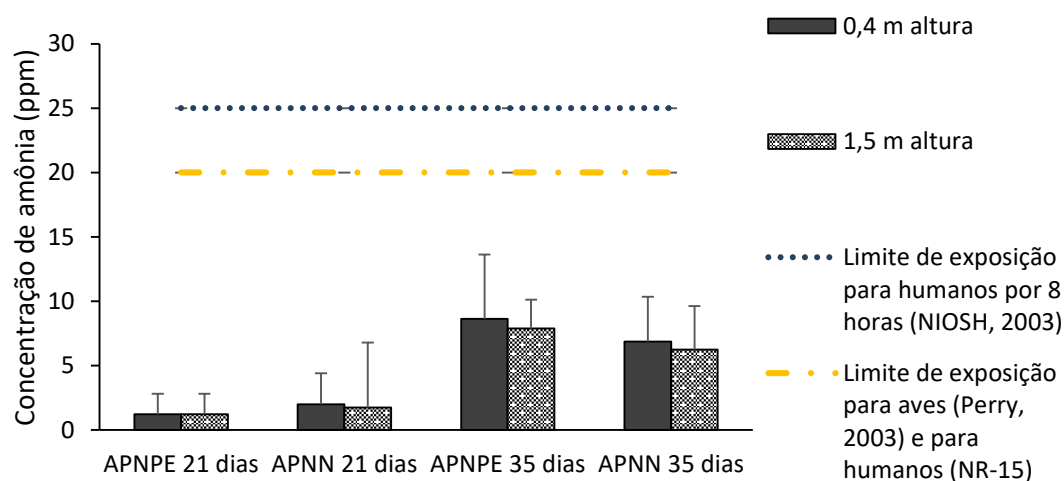


Figura 3.17: Concentração de amônia (média e desvio padrão, ppm) em cada aviário, na metade (21 dias) e no final do ciclo (35 dias) durante o verão, onde: APNPE: Aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos; APNN: Aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores.

Pelas médias apresentadas nas Figuras 3.16 e 3.17, observa-se que, genericamente, os valores médios ao longo do ciclo, considerando toda a extensão do aviário, não ultrapassaram os limites indicados por normas regulamentadoras para a saúde e segurança dos trabalhadores e das aves. De acordo com a NR-15, norma regulamentadora brasileira relacionada às atividades e operações insalubres, o limite de tolerância fixado para trabalhadores expostos à amônia é de 20 ppm. Já para o *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH, 2003), a concentração máxima indicada é de 25 ppm, para exposição laboral de até 8 horas.

Ao serem submetidas aos altos níveis de amônia, as aves podem ter seu sistema imunológico comprometido (SHEIKH et al., 2018). Perry (2003) afirma que a faixa de concentração máxima tolerável para as aves, por longos períodos, é de 20 a 25 ppm. No entanto, Regaço (2006) afirma que, para animais constantemente expostos ao gás, 20 ppm é o bastante para torná-los susceptíveis à doenças. O principal mecanismo de defesa natural das aves contra doenças respiratórias é o sistema mucociliar das vias aéreas superiores, que retém e expelle partículas de poeira e microrganismos juntamente com o muco produzido, de modo a evitar esses corpos estranhos cheguem aos pulmões e sacos aéreos. Todavia, a amônia prejudica a motilidade dos cílios, o que pode facilitar a entrada de patógenos, resultando infecções respiratórias, especialmente por *E. coli* (SHEIKH et al., 2018), redução de apetite e de ganho de peso, além de predisposição a patologias secundárias (CASTRO, 1999). A partir de concentrações de 10 ppm, os cílios do epitélio traqueal das aves começam a ser danificados e

acima de 20 ppm, a susceptibilidade às enfermidades respiratórias se torna maior (GONZÁLES e SALDANHA, 2001).

Apesar dos valores médios serem inferiores aos limites recomendados, foram encontrados valores máximos superiores a 20 ppm, o que pode ser prejudicial à saúde e bem-estar das aves e trabalhadores. Na Tabela 3.14 é possível verificar esse resultado por meio da análise descritiva dos dados de concentração de amônia para cada aviário, em diferentes alturas, aos 21 dias e no final do ciclo.

Tabela 3.14: Análise descritiva dos dados de concentração de amônia (ppm) no aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos (APNPE) e no aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores (APNN), aos 21 dias e no final do ciclo produtivo

Aviário	Estação	Fase	<i>n</i>	Altura (m)	Média (ppm)	Desvio padrão (ppm)	Conc. Máx. (ppm)	Conc. Mín. (ppm)
APNPE	Inverno	21 dias	36	0,4	9,4	6,2	19	0
			36	1,5	9,8	6,3	19	
		Final	24	0,4	4,7	2,4	8	0
			24	1,5	4,6	2,5	8	
	Verão	21 dias	36	0,4	3,8	4,9	15	0
			36	1,5	4,0	5,2	17	
Final		24	0,4	8,6	5,0	14	0	
		24	1,5	7,9	5,0	14		
APNN	Inverno	21 dias	36	0,4	9,3	6,2	22	0
			36	1,5	9,4	6,3	22	
		Final	24	0,4	4,6	3,1	9	0
			24	1,5	4,9	3,3	11	
	Verão	21 dias	36	0,4	4,4	5,1	16	0
			36	1,5	4,3	5,1	16	
		Final	24	0,4	6,9	3,5	12	0
			24	1,5	6,2	3,4	11	

Como pode ser constatado pelos valores máximos na Tabela 3.14 e pelas análises anteriores, apesar de médias mais baixas, foram observados valores máximos de concentração de amônia acima de 20 ppm, especialmente no inverno, na metade do ciclo produtivo. O ápice foi verificado no APNN onde, em algumas regiões do aviário, a concentração do gás alcançou 22 ppm, evidenciando que, em alguns momentos, os limites de tolerância recomendados foram excedidos. De fato, esses níveis podem tornar o microambiente nocivo para os animais, quando expostos por períodos prolongados.

Similarmente, Sousa et al. (2018) encontraram concentrações máximas de amônia em torno de 25 ppm em aviários com cama de casca de café. A concentração média nesses galpões

foi de  $12,44 \pm 6,7$  ppm. Saraz et al. (2016), com base em simulações por meio de modelagem CFD, reportaram valores máximos simulados em torno de 9 ppm em instalações abertas, dotadas de ventilação natural.

No verão, os valores máximos também ocorreram por volta dos 21 dias de vida das aves, com concentrações mais elevadas em torno de 15 a 17 ppm. Contudo, a diferença entre os valores do meio e do final do ciclo não foi tão expressiva como no inverno. Tong et al. (2019) afirmam que maiores concentrações são normalmente observadas em regiões onde a movimentação do ar é mínima, criando zonas de ar estagnado. Os autores reportaram valores médios de concentração de amônia, também obtidos por meio de modelagem CFD, de 8,12 ppm no inverno e 6,49 ppm no verão, em aviários de postura com ventilação mecânica tipo túnel.

### 3.3.5. Estimativa da taxa de emissão de amônia para a atmosfera

Além da análise da emissão e concentração de amônia no ambiente de criação das aves, é importante conhecer e estimar as emissões de amônia do aviário para a atmosfera, a fim de avaliar o impacto da atividade na qualidade do ar local e regional (GATES et al., 2008). O resultado da estimativa da quantidade média de amônia liberada por ciclo para o ambiente externo, em cada galpão analisado, está apresentado na Figura 3.18.

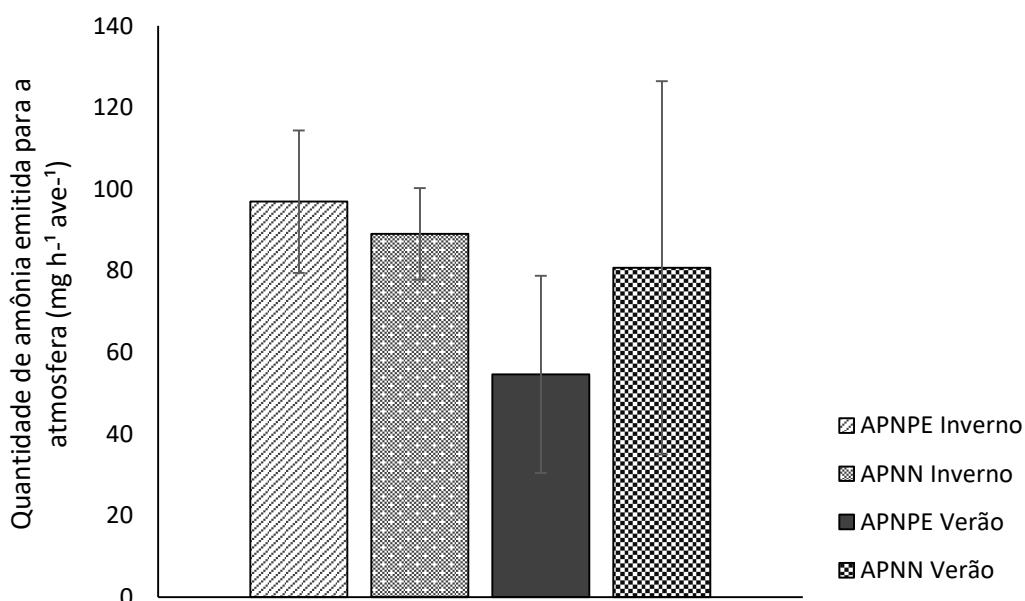


Figura 3.18: Estimativa da emissão amônia média ( $\text{mg h}^{-1} \text{ave}^{-1}$ ) de cada aviário para a atmosfera, durante o ciclo produtivo do inverno e do verão, onde: APNPE: Aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos; APNN: Aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores.

Como esperado, no inverno, a emissão média de amônia para o ambiente externo foi superior ao verão em ambos os aviários, com emissão média de  $96,9 \text{ mg h}^{-1} \text{ ave}^{-1}$  em cada galpão, no inverno; e  $67,65 \text{ mg h}^{-1} \text{ ave}^{-1}$  em cada galpão, durante o ciclo produtivo do verão. Para o APNPE no inverno, a quantidade de amônia liberada para o ambiente externo foi mais acentuada, especialmente nos últimos dias, com média de  $122 \text{ mg h}^{-1} \text{ ave}^{-1}$  lançada para a atmosfera através dos exaustores. Já no verão, o APNN apresentou maiores taxas de amônia lançadas para o exterior durante a maior parte do tempo avaliado, atingindo média de  $80,7 \text{ mg h}^{-1} \text{ ave}^{-1}$ , enquanto no APNPE, a média de emissão foi de  $54,6 \text{ mg h}^{-1} \text{ ave}^{-1}$ .

No decorrer do dia, a temperatura ambiente tende a aumentar e isso favorece a redução da umidade da cama. Em conjunto com o sistema de ventilação adequadamente ajustado, o excesso de umidade é eliminado, contribuindo com a qualidade da cama e consequentemente, menor geração de amônia. No entanto, se a taxa de ventilação não é satisfatória, temperaturas mais elevadas no verão tornam o ambiente potencial para geração de amônia devido à sua influência no coeficiente da transferência convectiva de massa (EGUTE, 2010). Quanto maior a temperatura e a umidade, maior degradação dos compostos nitrogenados e maior a conversão de  $\text{NH}_4^+$  em  $\text{NH}_3$  (SOMMER, OLESEN e CHRISTENSEN, 1991; SOUSA et al., 2016). Por isso, a renovação do ar no interior das instalações avícolas é imprescindível para eliminar o excesso umidade, gases como a amônia e  $\text{CO}_2$ , poeira, microrganismos e odores, além de reduzir a transferência de calor da cobertura, favorecendo as trocas de calor do animal por convecção e evaporação (YANAGI JÚNIOR, 2006; BAÊTA e SOUZA, 2010).

Para avaliar se houve diferença estatística na estimativa de emissão de amônia entre os dois aviários analisados, os dados foram submetidos ao teste t. A comparação da taxa de emissão de amônia entre os aviários em cada estação (inverno/verão) está exibida na Tabela 3.15.

Tabela 3.15: Comparação dos valores da estimativa de fluxo de emissão de amônia entre o APNPE e APNN ( $\text{mg h}^{-1} \text{ ave}^{-1}$ ) (média  $\pm$  desvio padrão e P) para atmosfera, em cada estação avaliada

	APNPE	APNN	P
<b>Inverno</b>	$96,9 \pm 17,5$	$89,02 \pm 11,2$	0,325
<b>Verão</b>	$54,6 \pm 25,5$	$80,7 \pm 48,2$	0,147

APNPE: Aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos; APNN: Aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores.

Os dois aviários não apresentaram diferenças quanto à estimativa da quantidade de amônia emitida para a atmosfera tanto no inverno ( $P=0,325$ ) como no verão ( $P=0,147$ ). Contudo, Marín et al. (2015) afirma que a emissão de amônia pode ser influenciada pelo tipo de sistema de resfriamento evaporativo, além de outros fatores.

Como o microclima interno da instalação varia em diferentes épocas do ano, as estimativas de emissão de amônia de cada aviário foram também comparadas em função das diferentes estações avaliadas, por meio do teste t. Na Tabela 3.16 estão apresentados os resultados da comparação, em cada aviário, das taxas de emissão de amônia no inverno e no verão, a fim de verificar a influência da estação climática na quantidade de amônia emitida.

Tabela 3.16: Comparação da estimativa de emissão de amônia ( $\text{mg h}^{-1} \text{ave}^{-1}$ ) (média  $\pm$  desvio padrão e P) para a atmosfera em cada aviário, no inverno e no verão

	Inverno	Verão	P
<b>APNPE</b>	96,92 $\pm$ 17,5 <sup>a</sup>	54,6 $\pm$ 25,5 <sup>b</sup>	0,001*
<b>APNN</b>	89,02 $\pm$ 11,2	80,7 $\pm$ 48,2	0,664

APNPE: Aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos; APNN: Aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores.

Médias seguidas por letras diferentes, na linha, diferem estatisticamente entre si pelo teste t.

Observa-se, pelos dados mostrados na Tabela 3.16, que a emissão de amônia para a atmosfera é significativamente superior no inverno no APNPE ( $P=0,001$ ). Apesar de os dados não apresentarem diferenças estatísticas para o APNN ao comparar suas emissões em ambas as estações ( $P=0,664$ ), a emissão de amônia no inverno também foi ligeiramente maior em comparação ao verão. No inverno, os dados apresentaram um aumento de aproximadamente 43,4% e 9,34% na taxa de amônia  $\text{hora}^{-1} \text{ave}^{-1}$ , em relação ao verão, no APNPE e APNN, respectivamente. Segundo Fairchild et al. (2009) e Lima et al. (2011), os exaustores são acionados por durante praticamente 96% do período produtivo no verão, e diante disso, Lima et al. (2011) observaram taxas de ventilação mais elevadas durante esta estação, o que contribui para uma cama mais seca, temperaturas mais amenas e renovação de ar eficiente. Wheeler et al. (2006) constataram resultados semelhantes para emissões de amônia em aviários industriais para produção de frangos de corte, nos EUA. Os autores relataram que a sazonalidade influenciou na emissão de amônia no local de lançamento para a atmosfera (saída de ar), sendo que as maiores taxas ocorreram no inverno. Além disso, as maiores taxas de ventilação foram notadas no verão. Todavia, Liang et al. (2003) constataram que, apesar de serem observadas menores concentrações de amônia no interior do aviário de postura durante o verão, as taxas de

emissão foram mais elevadas. Os autores sugerem que esse resultado seja atribuído às maiores taxas de ventilação durante esta estação.

Burns et al. (2007) observaram, para o período de um ano, emissões de 35,4 g NH<sub>3</sub> por ave comercializada, no sudeste dos EUA. Já para Mendes et al. (2014), o valor de emissão de amônia anual estimado foi de 58 g NH<sub>3</sub> ave<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, para cama de primeiro uso.

Os resultados da Tabela 3.16, para o APNPE, representam uma estimativa de fluxo de emissão de amônia 95 g ave<sup>-1</sup> ciclo<sup>-1</sup> e 54 g ave<sup>-1</sup> ciclo<sup>-1</sup> para o inverno e o verão, respectivamente. Ao mesmo tempo, para o APNN, representam fluxo de amônia estimado em 87,6 g ave<sup>-1</sup> ciclo<sup>-1</sup> (inverno) e 79,4 g ave<sup>-1</sup> ciclo<sup>-1</sup> (verão). É importante destacar que, em ambos os aviários, as estimativas foram realizadas para camas novas, de casca de café. No entanto, Gates et al. (2008) reportaram emissões médias variando entre 17 e 62 g NH<sub>3</sub> ave<sup>-1</sup> ciclo<sup>-1</sup>, sendo que o menor valor do intervalo é referente às emissões de camas novas e aves menores, e o maior valor retrata a emissão estimada em aviários com aves maiores e cama reutilizada, evidenciando médias bastante inferiores aos nossos achados. Liang et al. (2003) obtiveram, em seus estudos, valores médios de emissão de amônia de 43 mg h<sup>-1</sup> ave<sup>-1</sup> em aviários de postura do tipo “*high-rise*”. Maghirang & Manbeck (1993) reportaram taxas de emissão de amônia em torno de 66,6 mg h<sup>-1</sup> ave<sup>-1</sup>, em aviários de postura similares àqueles avaliados por Liang et al. (2003). Tais diferenças observadas nas estimativas de emissão de amônia encontradas na literatura podem ocorrer em virtude de diversos fatores, como por exemplo, tipo de instalação, as práticas de manejo adotado por cada produtor, teor de proteína na ração e a taxa de ventilação média (MENDES et al., 2014).

A pecuária intensiva é considerada uma das principais atividades antrópicas que contribuem para a emissão de amônia na atmosfera, causando grandes impactos no meio ambiente (GATES et al., 2008). Diversos estudos mostram que a emissão de amônia tem aumentado e que o amônio causa deposição excessiva de nitrogênio nas regiões próximas as fontes de emissão, resultando em solos ácidos e saturados de N (SCHLESINGER E HARTLEY, 1992). Em águas costeiras, por exemplo, qualquer nutriente em excesso provoca desenvolvimento desordenado de algas e, quando estas morrem, o oxigênio dissolvido na água é consumido na decomposição, causando a depleção deste gás no fundo do mar. Em casos extremos, pode causar a morte de peixes e da fauna bentônica (ASMAN, 2001). É importante conhecer os níveis de emissão de gases e os efeitos acerca dos resíduos oriundos da atividade, a fim de que sejam implementadas as medidas mitigadoras cabíveis para atender as normas quanto à emissão de poluentes atmosféricos (SOUSA, 2018).

### 3.4. CONCLUSÕES

Da forma como foi conduzida esta pesquisa e pelos resultados obtidos, pode-se concluir que, no inverno, principalmente na fase inicial (aquecimento), o ambiente térmico foi mantido dentro da zona de termoneutralidade durante boa parte do tempo. Contudo, o aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos (APNPE) apresentou ITU acima do limite máximo recomendado pela literatura, indicando a necessidade de melhor controle do manejo do sistema de aquecimento. Já no verão, a partir da terceira semana o ambiente térmico de ambos os aviários se mantiveram acima do limite superior da zona de conforto, tanto no período diurno quanto noturno. Maior atenção no controle do ambiente é indispensável nesta fase para evitar o estresse por calor, especialmente durante o dia, quando as temperaturas externas são mais elevadas.

Quanto as características físico-químicas das camas de ambos os aviários, o comportamento da umidade, pH e nitrogênio total é crescente no decorrer do ciclo produtivo. Dentro de um único aviário, as características da cama podem apresentar-se diferentes em localidades distintas em função de sua grande dimensão, além do fato da ocupação da área do aviário ocorrer gradativamente, conforme a necessidade de ajuste da densidade de criação.

No inverno, a umidade da cama foi maior em ambos os aviários quando comparada ao verão. Os maiores valores de pH ao longo do ciclo produtivo ocorreram na última semana do ciclo, nos dois aviários, mantendo-se na faixa entre 8,0 e 9,0. Em relação à extensão dos aviários, o pH no início do ciclo foi mais elevado na zona central, uma vez que esse local é o primeiro a ser ocupado, apresentando assim maior deposição de excretas nas primeiras semanas. Similarmente à umidade e o pH, o teor de nitrogênio total na cama foi crescente ao longo do ciclo. A média de nitrogênio total no final do período de criação foi aproximadamente 23% maior no inverno, em comparação ao verão.

O tipo de resfriamento evaporativo e a proximidade a comedouros e bebedouros não influenciaram na umidade, pH, nitrogênio total, fluxo de emissão e concentração de amônia. No presente estudo, o sistema de resfriamento não interferiu na quantidade de amônia dispersa para o meio externo.

Assim como para as características físico-químicas, o fluxo de amônia da cama, concentração no ambiente e eliminação de amônia ao ambiente externo foi mais acentuado no inverno do que no verão. Apesar de os valores médios de concentração de amônia estarem abaixo dos limites de tolerância, foram constatados valores superiores ao recomendado para saúde e bem-estar de animais e trabalhadores principalmente no inverno. No período de clima

frio, o APNPE eliminou para a atmosfera aproximadamente 50% a mais de amônia, em comparação ao verão. Da mesma forma, o aviário com ventilação por pressão negativa e nebulização (APNN) apresentou um aumento de 35,6% na quantidade de amônia emitida no inverno, em relação ao verão.

Apesar de apresentarem características distintas quanto ao sistema de climatização, ambos os aviários (APNPE e APNN) apresentaram condições bastante similares em relação ao ambiente térmico e a qualidade do ar. Sendo assim, desde que bem projetados, os dois métodos apresentam suas vantagens e desvantagens e, portanto, é preciso levar em consideração alguns critérios para a escolha, como custos de aquisição, instalação e manutenção. Como sugestão para trabalhos futuros, faz-se necessária uma análise da viabilidade técnica e econômica de ambos os sistemas de climatização, para uma indicação mais assertiva de qual deles é mais apropriado para a situação em estudo.

### 3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, M. A. C. Fatores que afetam a umidade da cama. **Avicultura Industrial**, v.76, n.919, p.16-18, 1986.

ALVAREZ, V. H. Caracterização química do solo. UFV. Viçosa, MG; 1992.

ANGNES, G., OLIVEIRA, P. A. V., ROBIN, P., HAUSSONA, M., e ROMANELLI, T. Emissão de amônia durante a produção de frangos de corte em aviário tipo Dark House no Sul do Brasil. **In: Ambiente e engenharia na produção animal sustentável: condições de climas quente e temperado**. Viçosa, MG: UFV. p. 14-18, 2016.

AOAC - Official methods of analysis of the AOAC - Association of Official Analytical Chemists, 18.ed. ed. Gaithersburg, Maryland. 2005.

ARCILA, J. C. P., TINOCO, I. F. F., SARAZ, J. A. O., ROCHA, K.S.O., CANDIDO, M. G. L. Zootechnical and physiological performance of broilers in the final stage of growth subjected to different levels of heat stress. **Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín**, v. 71, n. 2, p. 8469-8476, 2018.

ASMAN, W. A., SUTTON, M. A., SCHJØRRING, J. K. Ammonia: emission, atmospheric transport and deposition. **The New Phytologist**, 139(1), 27-48, 1998.

ASMAN, W. A. H. Modelling the atmospheric transport and deposition of ammonia and ammonium: an overview with special reference to Denmark. **Atmospheric Environment**, 35(2001), p.1969-1983, 2001.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NR-15: Atividades e Operações Insalubres. Portaria Ministério do Trabalho, Brasília, 85 p. 1978.

ÁVILA, V. S., MAZZUCO, H., E FIGUEIREDO, E. A. P. Cama de aviário: materiais, reutilização, uso como alimento e fertilizante. **Embrapa Suínos e Aves-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 1992.

BAÊTA, F. C.; SOUZA, C. F. **Ambiente em Edificações Rurais: conforto animal**. 2a. ed. Viçosa: Editora UFV, 2010. 269 p.

BEHERA, S. N.; SHARMA, M. Transformation of atmospheric ammonia and acid gases into

components of PM 2.5: an environmental chamber study. **Environmental science and pollution research**, v. 19, n. 4, p. 1187-1197, 2012.

BEUSEN, A. H. W., BOUWMAN, A. F., HEUBERGER, P. S. C., VAN DRECHT, G., VAN DER HOEK, K. W. Bottom-up uncertainty estimates of global ammonia emissions from global agricultural production systems. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 24, p. 6067-6077, 2008.

BURNS, R. T., XIN, H., GATES, R., LI, H., OVERHULTS, D., MOODY, L. B., & EARNEST, J. Ammonia emissions from broiler houses in the southeastern United States. In: **International Symposium on Air Quality and Waste Management for Agriculture, 16-19 September 2007, Broomfield, Colorado**. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007. p. 76.

CARVALHO, E. R., REZENDE, P. M. D., ANDRADE, M. J. B. D., PASSOS, A. M. A. D., OLIVEIRA, J. A. Fertilizante mineral e resíduo orgânico sobre características agronômicas da soja e nutrientes no solo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 4, p. 930-939, 2011.

CASSUCE, D. C., TINÔCO, I. D. F., BAÊTA, F. C., ZOLNIER, S., CECON, P. R., VIEIRA, M. D. F. Thermal comfort temperature update for broiler chickens up to 21 days of age. **Engenharia Agrícola**, 33(1), 28-36, 2013.

CASTRO, A. G. M. Sanidade das Aves na Fase Final: Importância do Aparelho Respiratório. **In: Simpósio internacional sobre produção de frangos de corte na fase final**, Campinas. *Anais*. Conferência APINCO '99 de Ciência e Tecnologia Avícolas. Campinas: FACTA, 1999. p. 55-60, 1999.

COELHO, D. J. R., TINÔCO, I. F. F., SOUZA, C. F., BAPTISTA, F. J. F., BARBARI, M., OLIVEIRA, K. P. Thermal environment of masonry-walled poultry house in the initial life stage of broilers. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 23, n. 3, p. 203-208, 2019.

CURTIS, S. E. Environmental management in animal agriculture. Iowa State University Press. 1983.

DEWES, T. Effect of pH, temperature, amount of litter and storage density on ammonia emissions from stable manure. **The Journal of Agricultural Science**, 127(4), 501-509, 1996.

EGUTE, N. D. S., ABRAO, A., e CARVALHO, F. Estudo do processo da geração de amônia a partir de resíduos avícolas visando a produção de hidrogênio. **Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento**. V.12, 1. 2010.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solos. 2a ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos; 1997.

FAIRCHILD, B.D., CZARICK, M., HARPER, L.A., WORLEY, J.W., RITZ, C.W., HALE, B.D., NAEHER, L.P. Ammonia concentrations downstream of broiler operations. **Journal of Applied Poultry Research**, (18):630-639, 2009.

FERREIRA, R. A. **Maior produção com melhor ambiente - para aves, suínos e bovinos**. 3a ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2016. 528 p.

FRANÇA L.G.F., TINOCO I.F.F. Caracterização de fatores que influenciam a emissão de amônia pelos dejetos de galinhas poedeiras e proposição de um score para o potencial máximo de emissão. In: **XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**. Proceedings... Campo Grande: CONBEA 2014, 2014.

FIGUEROA, E. A., ESCOSTEGUY, P. A. V., WIETHOLTER, S. Efeito do esterco de ave poedeira no rendimento de grãos de trigo. **I Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos de Animais Uso dos Resíduos da Produção Animal como Fertilizante**. Florianópolis, 2009.

GATES, R. S., CASEY, K. D., WHEELER, E. F., XIN, H., E PESCATORE, A. J. US broiler housing ammonia emissions inventory. **Atmospheric Environment**, 42(14), 3342-3350, 2008.

GAY, S.W., KNOWLTON, K.F. Ammonia emissions and animal agriculture Virginia Cooperative Extension. **Virginia Cooperative Extension**. Virginia State, Petesburg, 110, 442-445, 2009.

GONZALES, E., SALDANHA, E. S. P. B. Os primeiros dias de vida do frango e a produtividade futura. In **Congresso Brasileiro de Zootecnia** (Vol. 11, pp. 310-327), 2001.

HERNANDES, R., CAZETTA, J. O., MORAES, V. M. B. D. Frações nitrogenadas, glicídicas e amônia liberada pela cama de frangos de corte em diferentes densidades e tempos de confinamento. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 1795-1802, 2002.

KELLEHER, B. P., LEAHY, J. J., HENIHAN, A. M., O'DWYER, T. F., SUTTON, D., LEAHY, M. J. Advances in poultry litter disposal technology—a review. **Bioresource technology**, v. 83, n. 1, p. 27-36, 2002.

KRUPA, S. V. Effects of atmospheric ammonia (NH<sub>3</sub>) on terrestrial vegetation: a review. **Environmental pollution**, v. 124, n. 2, p. 179-221, 2003.

LIANG, Y., XIN, H., TANAKA, A., LEE, S. H., LI, H., WHEELER, E. F., GATES, R.S., ZAJACZKOWSKI, J. S., TOPPER, P., CASEY, K. D. Ammonia emissions from layer houses in Iowa. In: **Proceedings of International Symposium on Gaseous and Odour Emissions from Animal Production Facilities. Horsens, Denmark, June 1-4.** p. 203-212, 2003.

LIMA, A. M. C., NÄÄS, I. A., BARACHO, M. S., MIRAGLIOTTA, M. Y. Ambiente e bem-estar. In: **MENDES, AA; NÄÄS, IA; MACARI, M. Produção de frangos de corte.** Campinas: FACTA, 356 p. 2004.

LIU, Z., WANG, L., BEASLEY, D. B. A review of emission models of ammonia released from broiler houses. In **2006 ASAE Annual Meeting** (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006.

LIU, Z., WANG, L., BEASLEY, D., OVIEDO, E. Effect of moisture content on ammonia emissions from broiler litter: A laboratory study. **Journal of Atmospheric Chemistry**, v. 58, n. 1, p. 41-53, 2007.

LOPEZ, G., LEESON, S. Relevance of nitrogen correction for assessment of metabolizable energy with broilers to forty-nine days of age. **Poultry science**, 86(8), 1696-1704, 2007.

MAGHIRANG, R. G., MANBECK, H. B. Dust, ammonia, and carbon dioxide emissions from a poultry house. In: **American Society of Agricultural Engineers.** Meeting (USA). 1993.

MALISELO, P. S., NKONDE, G. K. Ammonia production in poultry houses and its effect on the growth of gallus Gallus domestica (broiler chickens): A case study of a small scale poultry house in Riverside, Kitwe, Zambia. **International Journal of Scientific and Technology Research**, 4(4), 141-145, 2015.

MARÍN, O. L. Z. Caracterização e avaliação do potencial fertilizante e poluente de distintas camas de frango submetidas a reusos sequenciais na Zona da Mata do Estado de Minas Gerais.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 85 p. 2011.

MARÍN, O. L., FERREIRA TINÔCO, I. D. F., SARAZ, O., ALEXANDER, J., SOUZA, C. F., ARAUJO VIEIRA, M. D. F. Evaluation of the fertilizer and contamination potential of different broiler litter types subjected to various use cycles. **Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín**, 68(2), 7637-7646, 2005.

MATOS, A. T. D. Tratamento e aproveitamento agrícola de resíduos sólidos. Editora UFV, 241 p. 2014.

MENDES, L.B.; TINÔCO, I. F. F.; SOUZA, C. F.; SARAZ, J. A. O. O ciclo do nitrogênio na criação de frangos de corte e suas perdas na forma de amônia volátil: uma revisão. **PUBVET**, 6, 1383, 2012.

MENDES, L. B., TINOCO, I. F., OGINK, N. W., ROCHA, K. S., OSORIO S, J. A., & SANTOS, M. S. Ammonia emissions from a naturally and a mechanically ventilated broiler house in Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 18 (11), 1179-1185, 2014.

NÄÄS, I. A., MIRAGLIOTTA, M. Y., BARACHO, M. S., MOURA, D. J., SALGADO, D. D. Bedding quality on conventional and tunnel ventilation broiler's housing. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 1, n. 2, p. 103-115, 2007.

NASEEM, S., KING, A. J. Ammonia production in poultry houses can affect health of humans, birds, and the environment—techniques for its reduction during poultry production. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 16, p. 15269-15293, 2018.

NERY, L. R., ALBINO, L. F. T., ROSTAGNO, H. S., CAMPOS, A. M. A., e SILVA, C. R. Valores de energia metabolizável de alimentos determinados com frangos de corte. **R. Bras. Zootec**, 35(5), 1354-1358, 2007.

NIOSH – National Institute for occupational safety and health. Versão eletrônica 2003. Disponível em: <http://cdc.gov/niosh/pe188/7664-41.html>. Acesso em: 06.04.2020.

OLIVEIRA, M. D., ALMEIDA, C. V., ANDRADE, D. O., RODRIGUES, S. M. M. Teor de matéria seca, pH e amônia volatilizada da cama de frango tratada ou não com diferentes aditivos. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 32(4), 951-954, 2003.

OVIEDO-RONDÓN, E. O. (2008). Tecnologias para mitigar o impacto ambiental da produção de frangos de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 37, 239-252.

PERRY, G. C. Welfare of the laying hen. **World's Poultry Science Association**. Meeting (Bristol, England). Poultry science symposium. Series 27. 2003.

QIU, G.; GUO, M. Quality of poultry litter-derived granular activated carbon. **Bioresource Technology**, v.101, p.379-386, 2010.

RANDALL, D. J., TSUI, T. K. N. Ammonia toxicity in fish. **Marine pollution bulletin**, v. 45, n. 1-12, p. 17-23, 2002.

REGAÇO, M. P. Sensor de amônia baseado em filmes finos de polianilina para criadouros de frangos de corte. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 79p. 2006.

REHBEGER, T. The importance of litter management in controlling microbiological challenges in turkey and broiler production systems. In: **Proc. 2002 Midwest Poult. Fed. Convention, St. Paul, MN**. 2002.

SARAZ, J. A.O., TINOCO, I.F.F., GATES, R. S., ROCHA, K.S.O., CABALLERO, E. M. C., SOUSA, F. C. Adaptation and validation of a methodology for determining ammonia flux generated by litter in naturally ventilated poultry houses. **Dyna**, v. 81, n. 187, p. 137-143, 2014.

SANTOS, M. J. B.; SAMAY, A. M. A. T.; SILVA, D. A.; REBELLO, C. B. V.; TORRES, T. R.; SANTOS, P. A.; CAMELO, L. C. L. Manejo e tratamento de cama durante a criação de aves. **R Eletron. Nutritime** 9, p.1801-1815, 2012.

SCHIASSI, L., YANAGI JUNIOR, T., FERRAZ, P. F., CAMPOS, A. T., SILVA, G. R., ABREU, L. H. Comportamento de frangos de corte submetidos a diferentes ambientes térmicos. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 3, p. 390-396, 2015.

SCHLESINGER, W. H., HARTLEY, A. E. A global budget for atmospheric NH<sub>3</sub>. **Biogeochemistry**, 15(3), 191-211, 1992.

SHEIKH, I.U., NISSA, S., ZAFFER, B., BULBUL, K.H., AKAND, A.H., AHMED, H., HASIN, D., HUSSAIN, I., HUSSAIN, S. Ammonia production in the poultry houses and its harmful effects. **Int. J. Veterinary Sci. Animal Husbandry**, v. 3, n. 4, p. 30-33, 2018.

SILVA, E. T., LEITE, D. G., YURI, F. M., NERY, F.S.G., REGO, J.C.C., ZANATTA, R.A., SANTOS, S.A., MOURA, V.V. Determinação do índice de temperatura e umidade (ITU) para produção de aves na mesorregião metropolitana de Curitiba-PR. **Revista Acadêmica Ciência Animal**, v. 2, n. 3, p. 47-60, 2004.

SILVA, R. B.; NÄÄS, I. D. A.; SILVEIRA, N.; MOURA, D. J. Insalubridade do trabalhador na produção animal: uma questão de educação e informação. 2006. Acesso em: 28-out-2019. Disponível em: <http://segurancaetrabalho.com.br/download/prod-animal.pdf>

SILVA, E. T. Índice de temperatura e umidade (ITU) na produção de aves para mesorregião do noroeste e norte pioneiro paranaense. **Revista Acadêmica Ciência Animal**, v. 5, n. 4, p. 385-390, 2007.

SILVA, C. R. Performance and deposition of nutrients of broilers chickens fed with different lysine levels. 232 f. Tese (Doutorado em Zootecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

SILVA, S. R. Concentrações de amônia na atmosfera e na cidade de São Paulo e sua relação com a poluição veicular. 109 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

SIMS, J. T., WOLF, D. C. Poultry waste management: Agricultural and environmental issues. **Advances in agronomy**, 52, 1-83, 1994.

SOARES, N. M., TOGASHI, C.K., AMOROSO, L. Ingestão de água pelas aves através do uso de diferentes tipos de bebedouros. In MACARI, M., SOARES, N. M. Água na avicultura, 2 ed. Campinas: FACTA, 359 p. 2012.

SOMMER, S. G., OLESEN, J. E., e CHRISTENSEN, B. T. Effects of temperature, wind speed and air humidity on ammonia volatilization from surface applied cattle slurry. **The Journal of Agricultural Science**, 117(1), 91-100, 1991.

SOUSA, F. C., TINÔCO, I. F. F., PAULA, M. O., SILVA, A. L., SOUZA, C. F., BATISTA, F. J. F., BARBARI, M. Medidas para minimizar a emissão de amônia na produção de frangos de corte: revisão. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 10, n. 1, p. 51-61, 2016.

SOUSA, F.C. Potencial de geração e emissão de amônia pela avicultura de corte do brasil. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 146p. 2018.

SOUSA, F. C., TINÔCO, I. F. F., BARBARI, M., BAPTISTA, F., SOUZA, C. F., SARAZ, J. A. O., COELHO, D. J. R.; SILVA, A. L. Diagnosis of air quality in broilers production facilities in hot climates. **Agronomy Research**, 16(2), 582-592, 2018.

SOUZA, C. F., SANTOS, C. R., INOUE, K.R.A., TINÔCO, I.F.F., FERREIRA, W.P.M. Additives to control the quality of coffee husk poultry litter. **Engenharia na Agricultura**, 26, 197-206, 2018.

TELES JUNIOR, C.G.S. Consumo energético e ambiência de galpões avícolas fechados e potencial de implementação de sistema híbrido de acondicionamento térmico. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 98p. 2019.

THOM, E. C. The discomfort index. **Weatherwise**, v. 12, n. 2, p. 57-61, 1959.

TINÔCO, I.F.F. Avicultura Industrial: Novos Conceitos de Materiais, Concepções e Técnicas Construtivas Disponíveis para Galpões Avícolas Brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência Avícola**, v. 3, n. 1, p. 01–26, 2001.

TONG, X., HONG, S.W., ZHAO, L. CFD modeling of airflow, thermal environment, and ammonia concentration distribution in a commercial manure-belt layer house with mixed ventilation systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 162, p. 281-299, 2019.

WHEELER, E. F., CASEY, K. D., GATES, R. S., XIN, H., ZAJACZKOWSKI, J. L., TOPPER, P. A., LIANG, Y., PESCATORE, A. J. Ammonia emissions from twelve US broiler chicken houses. **Transactions of the ASABE**, v. 49, n. 5, p. 1495-1512, 2006.

YANAGI JUNIOR, T. Inovações tecnológicas na bioclimatologia animal visando aumento da produção animal: relação bem-estar animal x clima. **Infobibos: Informações Tecnológicas**, 2006.

ZHAO, Y.; SHEPHERD, T. A.; LI, H.; XIN, H. Environmental assessment of three-egg production systems—Part I: Monitoring system and indoor air quality. **Poultry science**, v. 94, n. 3, p. 518-533, 2015.

## **CAPÍTULO IV**

### **UTILIZAÇÃO DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) NO ESTUDO DE SISTEMAS DE VENTILAÇÃO E AMBIÊNCIA DE INSTALAÇÕES AVÍCOLAS**

## **Utilização de fluidodinâmica computacional (CFD) no estudo de sistemas de ventilação e ambiência de instalações avícolas**

### **RESUMO**

A manutenção de um ambiente térmico confortável para as aves é preponderante para que elas possam expressar seu real potencial produtivo e, assim, garantir o sucesso da produção. Para isso, é exigido, por parte dos produtores, uma maior atenção voltada ao manejo dos animais, levando em consideração os fatores térmicos ambientais que possam vir a comprometer o seu bem-estar e, conseqüentemente, reduzir a produtividade. A fluidodinâmica computacional (CFD) é uma ferramenta emergente em diversas áreas das ciências e engenharias, sendo muito promissora para estudos relacionados à ambiência animal. Por meio de simulações em CFD, é possível realizar investigações sobre o comportamento de diversas variáveis relacionadas ao microambiente de criação, e assim, auxiliar produtores e engenheiros agrícolas em tomadas de decisão mais rápidas e assertivas, a fim de otimizar o sistema de acondicionamento térmico e reduzir custos de projeto. Diante disso, a presente revisão de literatura buscou abordar sucintamente as etapas da simulação por meio de CFD, bem como destacar sua importância em estudos para o aprimoramento dos sistemas de ventilação, visando conforto térmico e qualidade do ar de instalações avícolas comerciais. A partir desta revisão, fica claro que modelagem CFD consiste em uma ferramenta muito eficiente e viável, que facilita a visualização do comportamento de diversas variáveis ambientais em diferentes circunstâncias, possibilitando a determinação do melhor arranjo para sistemas de ventilação e otimização do ambiente de criação.

**Palavras-chave:** Acondicionamento térmico; aviário; modelagem matemática; velocidade do ar.

### **ABSTRACT**

The maintenance of a comfortable thermal environment for poultry is a major factor so they can express their real productive potential and thus, guarantee the success of production. For this, producers are required to pay greater attention to the management of animals, taking into account environmental thermal factors that may compromise their well-being and, consequently, reduce productivity. Computational fluid dynamics (CFD) is an emerging tool in several areas of science and engineering, being very promising for studies related to the animal environment. Through CFD simulations, it is possible to carry out investigations on the behavior of several variables related to the poultry breeding microenvironment, and thus, assist producers and agricultural engineers in faster and more assertive decision-making, in order to optimize the thermal conditioning system and reduce project costs. Therefore, the present literature review aimed briefly to address the stages of the simulation using CFD, as well as to highlight its importance in studies for the improvement of ventilation systems, aiming at thermal comfort and air quality of commercial poultry facilities. From this review, it is clear that CFD modeling is a very efficient and viable tool, which facilitates to view the behavior of several environmental variables in different circumstances, enabling the determination of the best arrangement for ventilation systems and optimization of poultry breeding environment.

**Keywords:** Air velocity; aviary; mathematical modeling; thermal conditioning.

## 4.1 INTRODUÇÃO

A fluidodinâmica computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) consiste em técnicas computacionais que permitem simulações numéricas para escoamento de fluidos, particularmente os fluidos em movimento, e visualizações sobre como o comportamento do fluxo influencia em processos de transferência de calor (MISTRITIS et al., 1997). Trata-se de uma ciência que, através de códigos computacionais, prevê quantitativamente o comportamento de escoamentos com base nas leis de conservação de massa, momento e energia. Tais previsões são realizadas a partir de condições predefinidas para o fluxo (condições de contorno), gerando valores de suas variáveis como pressão, velocidade do ar e temperatura, dentro de um campo ou domínio, em regimes estacionários ou transientes (CURI, 2014).

A princípio, o CFD surgiu da alta tecnologia nas áreas de engenharia aeronáutica e astronáutica, derivando de disciplinas como a dinâmica dos fluidos, ciência da computação e matemática (TU, YEOH & LIU, 2012). O CFD possui vasta aplicabilidade e visa o entendimento dos eventos físicos que ocorrem no escoamento dos fluidos ao redor e no interior dos objetos em estudo, eventos que estão relacionados à ação e interação de fenômenos como dissipação, difusão, convecção, ondas de choque, superfícies de deslizamento, camadas limite e turbulências, todos eles descritos por meio das equações de Navier-Stokes (ROCHA, 2012). As equações diferenciais parciais de Navier-Stokes referentes ao processo são transformadas em equações algébricas em uma malha que define a geometria e o domínio do fluxo de interesse. As condições de contorno iniciais são aplicadas na malha e, assim, as propriedades como temperatura, concentrações, velocidade, pressão e turbulência, são determinadas iterativamente em cada ponto do espaço e do tempo dentro do domínio. As três etapas principais que compõem uma análise em CFD e devem ser seguidas são pré-processamento, processamento e pós-processamento (XIA & SUN, 2002).

Atualmente, o CFD é considerado uma das ferramentas mais utilizadas para a caracterização do ambiente térmico e aéreo de criação animal, uma vez que esta metodologia é bastante eficiente na predição da distribuição de variáveis climáticas e de gases dentro de um galpão. Diversas configurações de condicionamento térmico animal podem ser prontamente reproduzidas e avaliadas em simulações em CFD, como observado por Osório Saraz (2010), Damasceno et al. (2014) e Rojano et al. (2015), fornecendo ao produtor as informações necessárias para tomadas de decisão imediatas, de modo a reduzir custos com testes experimentais e, conseqüentemente, otimizar o projeto da instalação. Diante disso, o objetivo da presente revisão de literatura foi abordar sucintamente as etapas da simulação por meio de

CFD, bem como destacar sua importância em estudos para o aprimoramento dos sistemas de ventilação, visando a manutenção do conforto térmico e da qualidade do ar de instalações avícolas comerciais.

## 4.2 PRÉ-PROCESSAMENTO

De acordo com Raynal et al. (2016), o pré-processamento envolve etapas de criação de geometria, geração da malha, propriedades do material e condições de contorno. O primeiro passo em qualquer análise em CFD é a definição e criação da geometria da região de escoamento, ou seja, o domínio computacional, para os cálculos.

A segunda etapa do pré-processamento consiste na geração da malha, e este é um dos passos mais importantes do pré-processamento, depois da definição da geometria do domínio. O CFD requer a subdivisão do domínio em vários subdomínios menores e não sobrepostos, a fim de resolver a física do fluxo dentro da geometria do domínio que foi criada. Isso resulta na geração de uma malha de células (elementos ou volumes de controle) sobrepondo toda a geometria do domínio. O escoamento dos fluidos descritos em cada uma dessas células são resolvidos numericamente, de modo que os valores discretos de propriedades do fluxo são determinados. A precisão da solução depende do número de células da malha dentro do domínio computacional. No entanto, a precisão depende fortemente das limitações impostas pelos custos computacionais e tempo de rotação do cálculo (ROCHA, 2012). Segundo o autor, nesta etapa, é importante que o maior nível de refinamento da malha seja na região de maior relevância para o estudo do fenômeno, de modo a captar de forma mais detalhada os perfis de velocidade, campos de pressão, perda de carga etc.

De acordo com Vergel (2013), a malha é composta por elementos geométricos que podem possuir uma configuração estruturada ou não estruturada, recobrando o domínio computacional sem superposição. Segundo o autor, no método de discretização por volumes finitos, as malhas estruturadas são invariavelmente compostas por elementos hexaédricos e as malhas não estruturadas podem utilizar tanto elementos hexaédricos quanto tetraédricos ou poliédricos. A malha é um componente essencial para a realização de simulações, uma vez que a geometria dos seus elementos, o número de elementos e as suas propriedades de integração determinam o tempo gasto na simulação, bem como a qualidade dos resultados gerados (RAMOS, 2015). A geometria do elemento deve ser uniforme e homogênea. Normalmente, as malhas tetraédricas apresentam resultados mais grosseiros, enquanto malhas hexaédricas fornecem melhores resultados em virtude do maior número de pontos de integração e maior

homogeneidade na distribuição destes pontos e dos nós do elemento. Contudo, as malhas hexaédricas são indicadas somente para casos de modelos com geometrias mais simples, já que o gasto computacional é mais elevado (RAMOS, 2015).

O terceiro passo é a definição das propriedades físicas e do fluido. O usuário deve declarar se as simulações devem ser para soluções transientes ou estacionárias. Em seguida, deve indicar a qual classe o fluido pertence: se é viscoso ou não viscoso. Em geral, o escoamento de fluidos não viscosos são compressíveis. O escoamento de fluidos viscosos pode se apresentar em estado laminar ou turbulento. Ainda, o transporte de calor pode contribuir significativamente no processo de escoamento. Portanto, nesta etapa, o usuário deve identificar e formular os problemas de escoamento em termos de fenômenos físicos (TU, YEOH & LIU, 2012).

O quarto passo no pré-processamento é definir as condições de contorno adequadas que imitem a representação física real do escoamento do fluido em um problema solucionável em CFD. Assim, é preciso especificar condições de contorno aceitáveis, disponíveis para situações iminentes.

### **4.3 SOLUÇÃO NUMÉRICA - SOLVER**

A segunda etapa da simulação em CFD envolve o entendimento dos aspectos numéricos subjacentes no CFD solver. Existem dois processos dentro do CFD solver, que são inicialização e controle de solução. As condições iniciais são cruciais para o processo iterativo e, conseqüentemente, menor custo e tempo computacional. A configuração de parâmetros apropriados no controle da solução geralmente implica na especificação de esquemas adequados de discretização (interpolação) e seleção de solucionadores iterativos adequados. Dentre as técnicas de discretização disponíveis, as principais são diferença finita, elementos finitos e volumes finitos. Normalmente, os códigos comerciais empregam o método de volumes finitos como padrão para técnicas de solução numérica (NORTON & SUN, 2006).

Em seguida, o próximo passo do solver envolve a interligação de três processos, sendo eles a solução de monitoramento, cálculo CFD e verificação da convergência. Uma solução convergente é alcançada quando os resíduos caem abaixo do limite mínimo de alguns critérios de convergência predefinidos dentro dos parâmetros de controle dos solvers iterativos. Além da avaliação dos resíduos, o usuário pode usar pontos de monitoramento para verificar a convergência das soluções numéricas por meio de variáveis, como a força de elevação, arrasto ou momento (TU, YEOH & LIU, 2012).

#### 4.4 PÓS-PROCESSAMENTO

Os resultados obtidos por meio de CFD podem ser visualizados graficamente e podem ser classificados em categorias que ajudam o usuário a melhorar a análise e verificar as diversas características físicas relevantes dentro do problema do escoamento do fluido (NORTON & SUN, 2006; RAYNAL et al., 2015). Plotagens em vetores, contornos ou linhas facilitam a interpretação dos resultados simulados (NORTON & SUN, 2006).

Os gráficos bidimensionais (x, y) representam a variação de uma variável de transporte dependente em relação a outra, que seja independente. Estes são uma forma de comparar diretamente os dados numéricos com os valores experimentais medidos. O gráfico vetorial fornece meios pelos quais uma quantidade de vetores é exibida em pontos discretos (normalmente velocidade) com setas, cuja orientação e tamanho indicam a direção e magnitude. Geralmente, apresenta uma visão em perspectiva do campo de escoamento em duas dimensões. Os gráficos de contorno também consistem em uma técnica útil e muito utilizada em resultados de CFD. Os contornos são comumente plotados de forma que a diferença entre o valor numérico da variável de transporte dependente e uma linha de contorno adjacente seja mantida constante (TU, YEOH & LIU, 2012).

Além disso, relatórios alfanuméricos podem ser úteis para verificar qualitativamente a solução numérica alcançada e/ou extrair resultados quantitativos para fins de pós-processamento. Além disso, os dados também podem ser visualizados na categoria animação dinâmica, auxiliando no aprimoramento físico, mostrando o movimento das partículas com o fluido em escoamento multifásico, por exemplo em geometrias moveis, como tanques de mistura e propagação de choque em fluxos de alta velocidade (ROCHA, 2012).

Segundo TU, YEOH & LIU (2012), as simulações em CFD possuem diversas vantagens, dentre as quais pode-se destacar: a possibilidade de estudar termos específicos nas equações governantes, de forma detalhada; a técnica complementa abordagens experimentais e analíticas, sendo uma forma econômica de simulação de fluxos de fluidos reais, reduzindo o tempo de entrega e custos nos projetos e na produção; a capacidade de simular condições de fluxo que não podem ser reproduzidas em condições experimentais encontradas em dinâmica de fluidos geofísicos e biológicos, como cenários muito grandes ou muito remotos para serem simulados experimentalmente; fornece informações bem detalhadas, visualizadas e abrangentes quando comparadas à dinâmica de fluidos analíticos e experimentais; permite a avaliação de projetos alternativos em uma variedade de parâmetros adimensionais. Além disso, é mais barato em relação a custos para realização de experimentos. As principais desvantagens e limitações do uso de CFD são: diferenças entre resultados calculados e a realidade, devido a erros

numéricos computacionais; podem existir características de fluxo incorretas, produzidas numericamente, que poderiam ter sido interpretadas como fenômenos físicos aceitáveis. Portanto, o usuário de CFD deve aprender a analisar corretamente e a fazer um julgamento crítico sobre os resultados calculados.

#### **4.5 APLICAÇÃO DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) EM ESTUDOS DE INSTALAÇÕES AVÍCOLAS**

Os modelos de transporte de calor, massa e momento baseado em CFD tem sido muito usados mais especificamente em estudos do comportamento de variáveis climáticas no interior de instalações animais e vegetais (REYNOLDS, 2009; SARAZ et al., 2012). A modelagem CFD na área de construções rurais possibilita a solução de problemas envolvendo trocas de ar e auxilia na previsão de uma condição ambiental que proporcione conforto térmico, bem-estar animal e qualidade do ar no interior da instalação. Neste contexto, diversos artigos foram publicados sobre a utilização do método em aviários, com ênfase no sistema de ventilação (MISTRITIS et al., 1997; BJERG et al., 2002; BARTZANAS et al., 2007; BLANES-VIDAL et al., 2008; SARAZ, 2010; BUSTAMANTE et al., 2013; SARAZ et al., 2017).

O uso de CFD em pesquisas no setor da avicultura permitem reduzir o número de experimentos e aperfeiçoar as instalações com base na validação dos dados experimentais, tornando-se assim cada vez mais importante na indústria agropecuária. Essa importância é crescente desde que esta ferramenta tem sido otimizada e assim, problemas derivados da baixa precisão nas simulações e deficiência dos equipamentos computacionais para a solução de problemas com grandes domínios computacionais foram aperfeiçoados, permitindo maior aplicabilidade em várias áreas (SARAZ et al., 2012). O principal diferencial dos modelos baseados em CFD na avicultura é a possibilidade redução do número de experimentos e repetições, além de prever o comportamento e a distribuição de variáveis climáticas e gases tóxicos no interior das instalações. Ainda, com esta ferramenta, é possível otimizar o projeto de hélices e difusores dos ventiladores, bem como o arranjo e a posição dos mesmos dentro da instalação e, com isso, simular diversas condições que auxiliem na tomada de decisão para solução de problemas práticos sem a necessidade de muitos experimentos.

Saraz et al. (2012) afirma que o CFD analisa sistemas envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e massa e outros fenômenos associados, que são difíceis de modelar sem a ajuda computacional. O modelo que descreve o escoamento de fluidos é determinado pelas equações de conservação de massa, momento e energia, como pode ser visto nas Equações 1 a 3.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c T) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j c T) - \frac{\partial}{\partial x_j} (K \frac{\partial T}{\partial x_j}) = S_T \quad (3)$$

Em que:

$p$  - pressão (Pa);

$g$  - aceleração da gravidade ( $\text{m s}^{-2}$ );

$\tau$  - Tensor de tensão (Pa), dado por  $\bar{\tau} = [\nabla \cdot \vec{v} + \nabla \cdot \vec{v}^T] - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \mathbf{I}$  ;

$\rho$  - densidade do fluido ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$c$  - calor específico ( $\text{W kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ );

$K$  - condutividade térmica ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ );

$S_T$ : termo fonte térmico ( $\text{W m}^{-3}$ ).

Existem vários modelos de turbulência disponíveis na modelagem CFD, dentre eles:  $k$ - $\epsilon$  padrão,  $k$ - $\epsilon$  RNG,  $k$ - $\epsilon$  *realizable*, *Reynolds Stress Model* (RSM),  $k$ - $\omega$  padrão, SST  $k$ - $\omega$  e *Large Eddy Simulation* (LES) (BUSTAMANTE et al., 2013). Segundo Saraz et al. (2012), dentre estes, o RANS e LES são os mais comuns. Mesmo com boa confiabilidade, os modelos LES necessitam muito tempo para a solução, e por isso são pouco utilizados, a menos que seja necessária uma grande precisão. Já os modelos RANS exigem menor período de tempo para a solução, mas são menos precisos. Assim, os modelos RANS tais como  $k$ - $\epsilon$  padrão, “*two-equation k- $\epsilon$* ”, “*Realizable k- $\epsilon$* ”, “*Renormalization-group (RNG) k- $\epsilon$* ” e “*Reynolds stress model (RMS)*” são os mais usados para simulação de processos com fluxo turbulento. Para sistemas com ventilação natural e mecânica, os autores citam que o uso do modelo  $k$ - $\epsilon$  padrão é predominante para a descrição da turbulência do fluido devido a precisão razoável e convergência favorável. Para instalações equipadas com sistema de resfriamento evaporativo, o modelo “*Realizable k- $\epsilon$* ” é o mais apropriado pois oferece melhores previsões da distribuição da velocidade. Ao mesmo tempo, para a determinação da distribuição de gases no interior das instalações, o modelo “*Renormalization-group (RNG) k- $\epsilon$* ” tem sido frequentemente utilizado para condições de ventilação mínima no inverno porque fornece uma formula analítica para a

derivada diferencial da viscosidade efetiva, que se utiliza para baixos números de Reynolds. Já em condições de altas taxas de ventilação, como no verão, o  $k-\epsilon$  padrão apresenta o melhor comportamento.

Segundo Rocha (2017), em geral, uma simulação não apresenta resultados totalmente idênticos às medições experimentais em virtude de erros derivados de aproximações dos modelos de turbulência, erros numéricos e erros relacionados à discretização etc. Para reduzir esses erros, é muito importante que seja realizado o teste de independência de malha. Para isso, os resultados das simulações devem ser comparados sob diferentes níveis de refinamento da malha, e assim, a malha a ser adotada é aquela em que seus resultados sejam independentes do do número de nós e elementos; e que apresente uma boa acurácia dos resultados obtidos nas simulações. Ou seja, deve-se buscar pelo tamanho de malha que represente a melhor relação precisão  $\times$  custo computacional.

Além do estudo da independência de malha, a realização da validação do modelo desenvolvido é fundamental, já que, a partir da comparação dos resultados da simulação CFD com as medições de campo, é possível verificar se o desempenho do modelo é satisfatório para fornecer resultados confiáveis. De acordo com Vilas Boas & Vatavuk (2018), a validação define a acurácia do modelo na representação do mundo real. Existem diversos parâmetros estatísticos preconizados pela literatura para a validação de modelos CFD, como por exemplo, o erro quadrático médio normalizado (NMSE) a variação média geométrica (VG) e a fração de dois (FAC2), dentre outros (HADJAB & MEDJAHED, 2012; SARAZ et al., 2017; TONG et al., 2019).

Para exemplificar a aplicação da modelagem CFD na avicultura, pode-se citar o estudo realizado por Coradi et al. (2016), que teve como objetivo testar o modelo computacional de dinâmica de fluidos (CFD) para simular o movimento do ar aquecido dentro de uma instalação avícola. Os autores consideraram, como condições de contorno, a temperatura de 38°C para paredes onde estão as saídas de tubos de aquecimento, para o lado esquerdo, além de um fluxo de calor de zero, em simetria para o mesmo lado. Quanto aos lados leste, sul e norte, o fluxo de calor nas paredes foi adotado igual a zero. O sistema de aquecimento aviário não alcançou homogeneidade na distribuição de temperatura, fluxo de calor, pressão de ar aquecido e velocidade (Figuras 4.1 a 4.3).

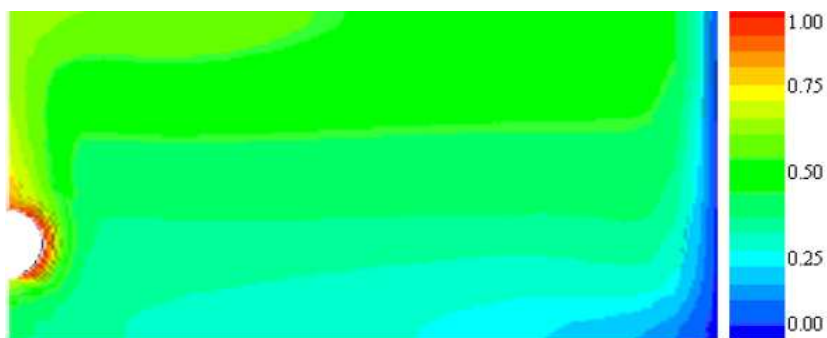


Figura 4.1: Distribuição da temperatura do ar (adimensional) dentro da instalação de aves de corte.  
Fonte: Coradi et al., 2016.



Figura 4.2: Velocidade do ar aquecido (adimensional) no interior da instalação de aves de corte.  
Fonte: Coradi et al., 2016.

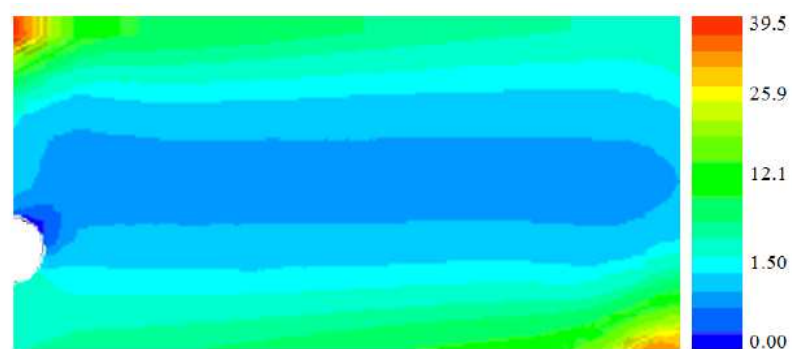


Figura 4.3: Distribuição de pressão do ar (adimensional) no interior da instalação de aves de corte.  
Fonte: Coradi et al., 2016.

Bustamante et al. (2013) compararam a modelagem CFD com medições diretas por sistema de sensores em uma granja comercial de frangos de corte com o objetivo de analisar um sistema mecânico de ventilação cruzada com foco na distribuição de velocidade do ar. Não foram encontradas diferenças significativas entre os resultados de CFD e medições diretas, e

portanto, a variável velocidade do ar não foi afetada pela metodologia (CFD ou medições diretas). Assim, as simulações de CFD foram válidas para analisar ambiente interno de granjas avícolas. Contudo, os valores observados na instalação em estudo foram inferiores ao recomendado para os animais, havendo a necessidade de modificação do sistema para atender o requerimentos das aves quanto à renovação do ar. Nas figuras 4.4 e 4.5 estão representados, graficamente, os resultados da simulação encontrados para o comportamento do fluxo de ar no galpão.

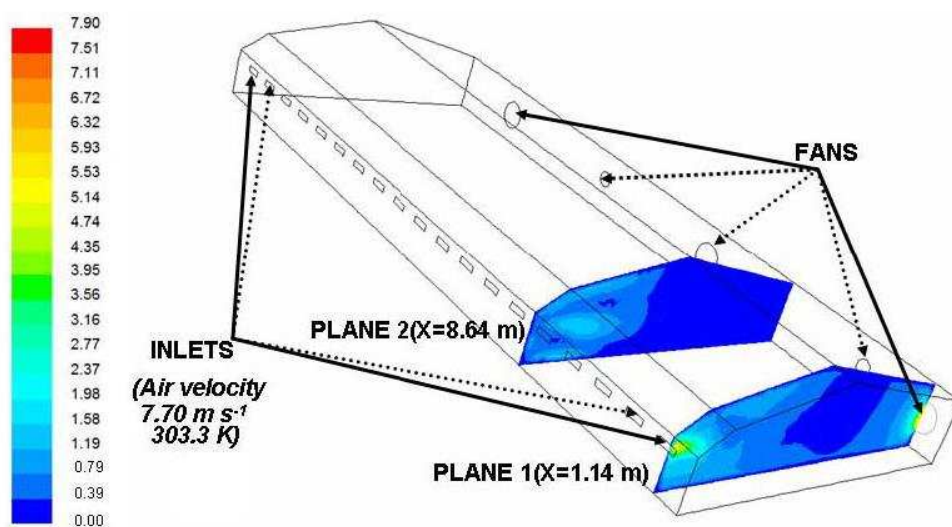


Figura 4.4: Contornos da velocidade do ar ( $\text{m s}^{-1}$ ) nos planos 1 e 2.  
Fonte: Bustamante et al., 2013.

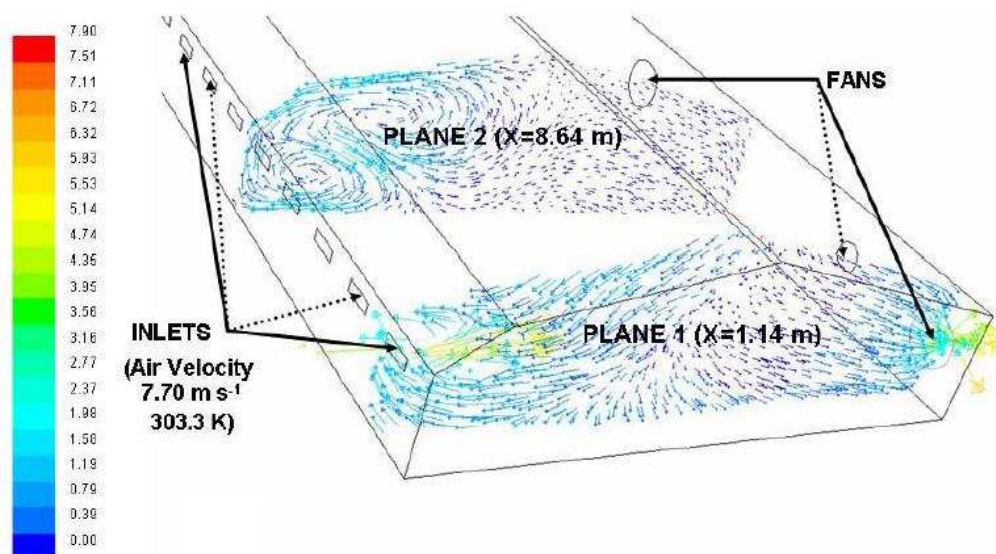


Figura 4.5: Vetores da velocidade do ar ( $\text{m s}^{-1}$ ) mostrando trajetórias nos Planos 1 e 2 da Figura 4.4.  
Fonte: Bustamante et al., 2013.

Mostafa et al. (2012) desenvolveram diferentes sistemas de ventilação por duto, a fim de estabelecer o modelo mais adequado para utilização durante o inverno. Os autores também utilizaram simulações em CFD para testar estes diferentes sistemas. Quatro diferentes novos modelos de ventilação foram comparados com o sistema de ventilação em modo túnel (sistema padrão do galpão em estudo), sendo eles configurados como: entrada e saída diretamente conectados com o trocador de calor sem o uso de dutos; saída de ar conectada diretamente com o trocador de calor na parede lateral e dutos de entrada de ar localizados no centro do galpão; dutos de entrada e saída de ar localizados no centro do galpão; e dutos de entrada e saída de ar e localizados em cada lado do galpão. Para todos os modelos, os autores observaram maior uniformidade em cerca de 60 a 70% quando comparados ao sistema padrão (ventilação em modo túnel).

Norton et al. (2009) desenvolveram um modelo de dinâmica de fluidos computacional (CFD) para analisar a ventilação natural de uma instalação rural sob diferentes direções de incidências de vento, para três diferentes áreas de abertura de entrada. Como pode ser visualizado na Figura 4.6, a maior homogeneidade de ventilação foi verificada quando o vento soprava na direção normal a edificação, devido à formação de dois vórtices de vento no interior do galpão. Já a maior heterogeneidade foi observada para ângulos de incidência de 10 a 40° porque o vórtice primário ocupa apenas uma porção do volume total da edificação.

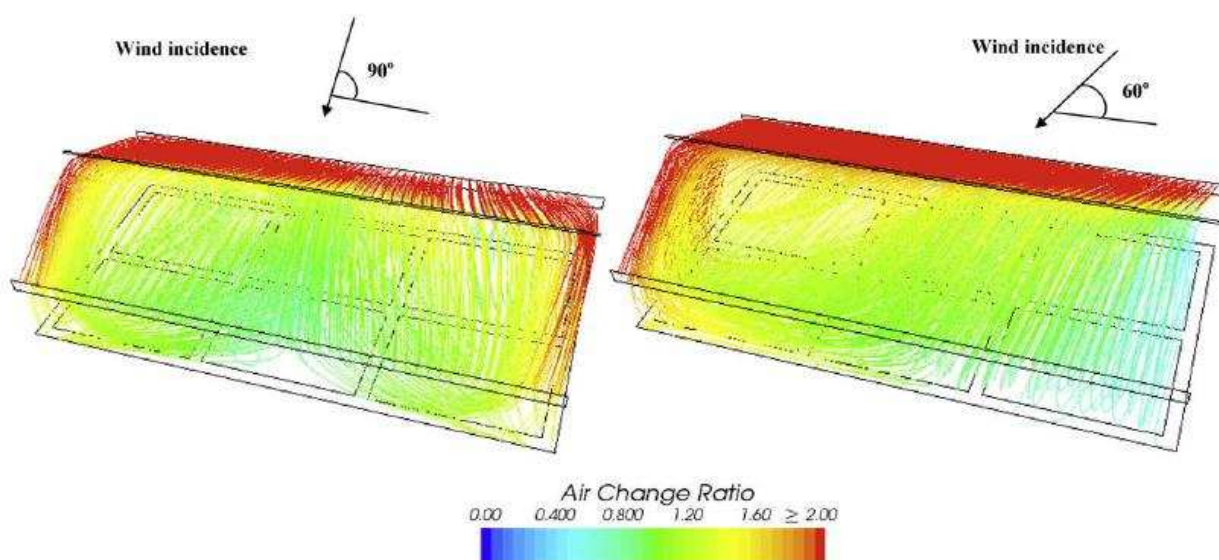


Figura 4.6: Linhas de fluxo ilustrando os padrões de escoamento de ar na instalação.  
Fonte: Norton et al., 2009.

Já Bianchi et al. (2015), em seu estudo, compararam a eficiência dos sistemas de ventilação longitudinal e transversal, por meio da análise do comportamento de variáveis como

temperatura, umidade relativa e concentração de dióxido de carbono, utilizando simulações em CFD. Os autores concluíram que, no sistema de ventilação longitudinal, as maiores concentrações de CO<sub>2</sub> ocorreram no corredor central do galpão, ou seja, o sistema não permitiu um fluxo de ar uniforme e eficaz ao longo das paredes laterais do galpão, como pode ser visto na Figura 4.7. Já a simulação para o sistema de ventilação transversal mostrou uma maior uniformidade da troca de ar (Figura 4.8) e, conseqüentemente, melhor distribuição da concentração de CO<sub>2</sub>.

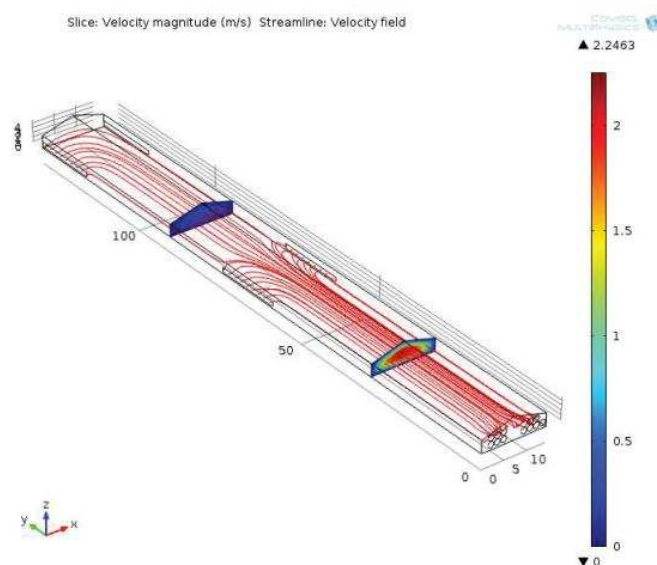


Figura 4.7: Simulação do campo de escoamento do fluido na instalação comercial em estudo. Fonte: Bianchi et al., 2015.

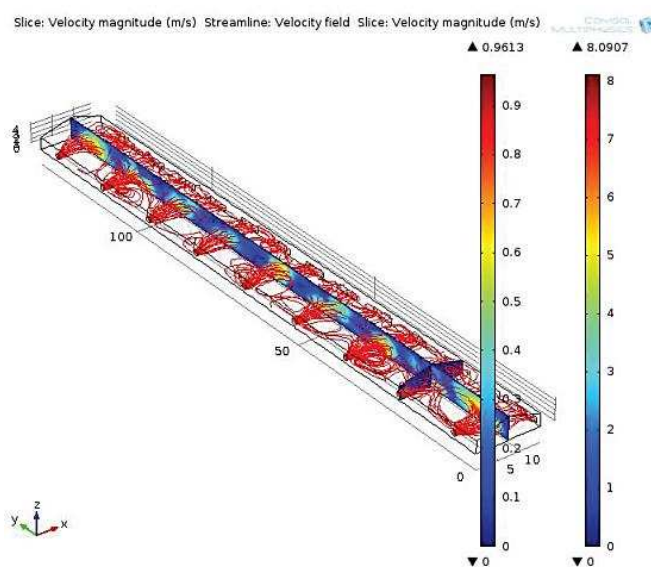


Figura 4.8: Simulação do campo de escoamento no caso de ventilação cruzada na instalação comercial em estudo. Fonte: Bianchi et al., 2015.

Saraz et al. (2017) utilizaram CFD com o intuito de avaliar condições de conforto por meio da temperatura e da concentração de amônia ( $\text{NH}_3$ ) durante a noite em aviários comerciais de tipologias praticadas no Brasil e países de clima tropical e subtropical. Foram utilizados quatro modelos com diferentes alturas de cortinas e diferentes posições de entrada e saída de ar, adotando a tipologia de construção aberta sem isolamento térmico. Segundo os autores, o modelo validado não apresentou diferenças estatísticas em relação aos dados experimentais, o que viabiliza seu uso para prever o comportamento do ar nos quatro casos propostos. Na Figura 4.9 está representado o comportamento dos vetores de velocidade ao longo do plano XY da instalação, onde o eixo X representa o comprimento e Y, a altura do pé-direito do aviário. Ainda, afirmam que este modelo pode ser usado para melhorar as condições internas das instalações de aves durante a noite e pode ser uma ferramenta importante para reduzir o consumo de energia e gerar melhores condições para a produção de aves com mais de 21 dias de idade.

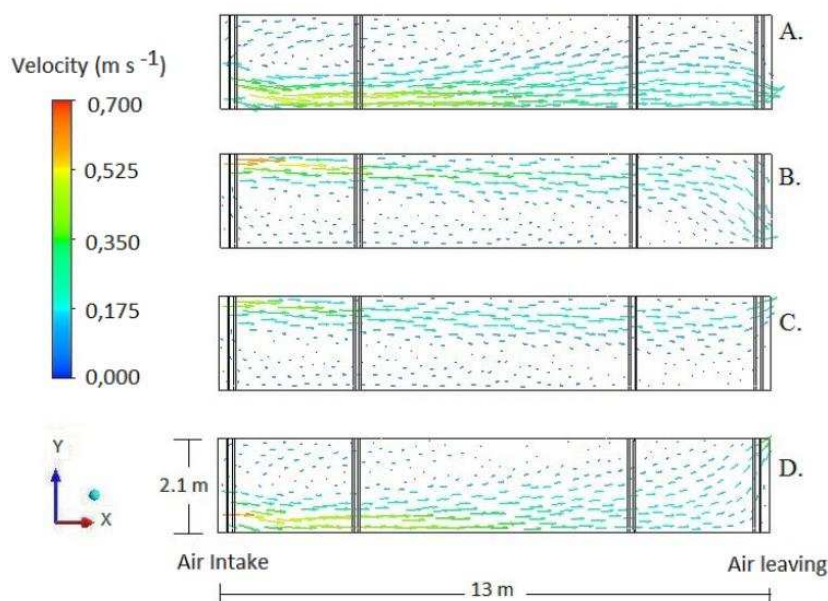


Figura 4.9: Vetores de velocidade para os diferentes casos no plano XY da instalação, onde X: comprimento; e Y: altura do pé-direito do aviário.

Fonte: Saraz et al., 2017.

#### **4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A fluidodinâmica computacional (CFD) é uma metodologia em constante ascensão, cada vez mais utilizada nas pesquisas em instalações animais. Trata-se de uma ferramenta muito eficiente e viável que facilita a visualização do comportamento de diversas variáveis ambientais em diferentes circunstâncias, possibilitando a determinação do melhor arranjo para sistemas de ventilação. Para isso, é essencial que seja realizada a validação da simulação em CFD com medições de campo, a fim de verificar se o desempenho do modelo é satisfatório para fornecer resultados confiáveis.

#### 4.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARTZANAS, T., KITTAS, C., SAPOUNAS, A. A., NIKITA-MARTZOPOULOU, C. H. Analysis of airflow through experimental rural buildings: Sensitivity to turbulence models. **Biosystems Engineering**, v. 97, n. 2, p. 229–239, 2007.

BIANCHI, B., CATALANO, P., GENTILE, A., GIAMETTA, F., LA FIANZA, G. Microclimate measuring and fluid dynamic simulation in an industrial broiler house: testing of an experimental ventilation system. **Veterinaria italiana**, 51(2), 85-92, 2015.

BJERG, B., SVIDT, K., ZHANG, G., MORSING, S., e JOHNSEN, J. O. Modeling of air inlets in CFD prediction of airflow in ventilated animal houses. **Computers and Electronics in Agriculture**, 34(1), 223-235, 2002.

BLANES-VIDAL, V., GUIJARRO, E., BALASCH, S., TORRES, A. G. Application of computational fluid dynamics to the prediction of airflow in a mechanically ventilated commercial poultry building. **Biosystems Engineering**, 100(1), 105-116, 2008.

BUSTAMANTE, E., GARCÍA-DIEGO, F. J., CALVET, S., ESTELLÉS, F., BELTRÁN, P., HOSPITALER, A., TORRES, A. G. Exploring ventilation efficiency in poultry buildings: The validation of computational fluid dynamics (CFD) in a cross-mechanically ventilated broiler farm. **Energies**, 6(5), 2605-2623, 2013.

CORADI, P. C., MARTINS, M. A., COSTA, D. R., VIGODERIS, R. B., TINÔCO, I. F. F. Computational Fluid Dynamics (CFD) simulating heated air from wood burning inside a poultries barn. **Engenharia Agrícola**, 36(5), 768-778, 2016.

CURI, T. M. R. C. Avaliação do sistema de ventilação em instalações para frangos de corte através de diferentes modelagens. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas. 263p. 2014.

DAMASCENO, F. A., SARAZ, J. A. O., MENDES, L. B., MARTIN, S., MARTINS, M.A. Evaluation of a heating system in poultry houses using a CFD model. **Revista Facultad Nacional de Agronomía**, Medellín, 67(2), 7311-7319, 2014.

HADJAB, M.; MEDJAHED, B. Comparison and statistical validation of a model of a photovoltaic module. **International Journal of Energy**, 6(4), 133-140, 2012.

LEE, I. B., SHORT, T. H. Two-dimensional numerical simulation of natural ventilation in a multi-span greenhouse. **Transactions of the ASAE**, 43(3), 757, 2000.

MISTRITIS, A., JONG, T., WAGEMANS, M. J. M., BOT, G. P. A. Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool for the analysis of ventilation and indoor microclimate in agricultural buildings. **NJAS wageningen journal of life sciences**, 45(1), 81-96, 1997.

MOSTAFA, E.; LEE, I.B.; SONG, S.H.; KWON, K.S.; SEO, I.H.; HONG, S.W.; HAN, H.T. Computational fluid dynamics simulation of air temperature distribution inside broiler building fitted with duct ventilation system. **Biosystems Engineering** 112, 293–303, 2012.

NORTON, T., & SUN, D. W. Computational fluid dynamics (CFD) - an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: a review. **Trends in Food Science & Technology**, 17(11), 600-620, 2006.

NORTON, T., GRANT, J., FALLON, R., SUN, D. W. Assessing the ventilation effectiveness of naturally ventilated livestock buildings under wind dominated conditions using computational fluid dynamics. **Biosystems Engineering**, 103(1), 78-99, 2009.

RAMOS, H. M. E. Modelação numérica de processos de soldadura usando ESI Sysweld. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. 233 p. 2015.

RAYNAL, L., AUGIER, F., BAZER-BACHI, F., HAROUN, Y., FONTE, C. P. CFD applied to process development in the oil and gas industry—a review. **Oil & Gas Science and Technology—Revue d’IFP Energies nouvelles**, 71(3), 42, 2016.

REYNOLDS, S. D. Using computational fluid dynamics (CFD) in laboratory animal facilities. **Planning and designing research animal facilities**, 479-488, 2009.

ROCHA, K. S. O. Modeling and simulation of the cooling process of grain stored in bins with trapezoidal floor through the energy and mass conservation laws. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 177p. 2012.

ROCHA, S. L. Análise numérica do campo de escoamento externo na geometria de referência Ahmed para aplicações automotivas. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Automotiva). Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville. 67 p. 2017.

ROJANO, F., BOURNET, P. E., HASSOUNA, M., ROBIN, P., KACIRA, M., CHOI, C. Y. Modelling heat and mass transfer of a broiler house using computational fluid dynamics. **Biosystems Engineering**, 136, 25-38, 2015.

SARAZ, J. A. Measurement and CFD Modelling of ammonia concentration, flux and thermal environment variables in open side broiler housing. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 132p. 2010.

SARAZ, J. A., MARTINS, M. A., MARÍN, O. L. Z., DAMASCENO, F. A., VELASQUEZ, H. J. C. Una revisión acerca de la dinámica de fluidos computacionales (CFD) en instalaciones avícolas. **Dyna**, 79(175), 142-149, 2012.

SARAZ, J. A., ROCHA, K. S. O., DAMASCENO, F. A., TINÔCO, I. F., OSORIO, R., TOBÓN, J. C. A CFD approach to assess the effects of different opening combinations in poultry houses. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 21(12), 852-857, 2017.

TONG, X.; HONG, S.W.; ZHAO, L. CFD modeling of airflow, thermal environment, and ammonia concentration distribution in a commercial manure-belt layer house with mixed ventilation systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 162, p. 281-299, 2019.

TU, J., YEOH, G. H., LIU, C. Computational fluid dynamics: a practical approach. 2a. ed. Oxônia: Butterworth-Heinemann, 2012. 456 p.

VERGEL, J. L. G. Estudo da influência da malha computacional, modelos de turbulência e aspectos numéricos da modelagem CFD em impelidores PBT usando malhas não-estruturadas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP. 121 p. 2013.

VILAS BOAS, E. V., VATAVUK, P. Técnicas de validação de modelos computacionais. In: Anais do Congresso Brasileiro de Fluidodinâmica Computacional. Rio de Janeiro. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2018. Disponível em: <<https://proceedings.science/cbcbfd-2018/papers/tecnicas-de-validacao-de-modelos-computacionais>> Acesso em: 11 out. 2020.

XIA, B., SUN, D.W. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the food industry: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 34, p. 5-24, 2002.

## **CAPÍTULO V**

### **VALIDAÇÃO DE MODELOS CFD PARA SIMULAÇÕES DO FLUXO DE AR E CONCENTRAÇÃO DE AMÔNIA EM AVIÁRIOS PARA FRANGOS DE CORTE COM VENTILAÇÃO TIPO TÚNEL**

## **Validação de modelos CFD para simulações do fluxo de ar e concentração de amônia em aviários para frangos de corte com ventilação tipo túnel**

### **RESUMO**

A ventilação desempenha um papel fundamental no controle do ambiente térmico e na qualidade do ar interno de uma instalação animal. Dentro de limites ideais de velocidade, o ar fresco que entra na instalação favorece as trocas de calor no meio, permite o controle da temperatura do ar, umidade relativa e umidade da cama, além de melhorar a qualidade do ar, diluindo e eliminando gases nocivos à saúde, tanto dos animais quanto do trabalhador. Dentre os principais gases gerados em um aviário, a amônia ( $\text{NH}_3$ ) é o poluente de maior toxicidade, se estiver em altas concentrações. Sabe-se que, em determinadas zonas de um aviário, concentram-se maiores níveis de amônia ou altas velocidades do ar, enquanto em outras áreas, a ventilação é deficiente. As condições verificadas nesses ambientes podem ser cruciais para o bom desenvolvimento das aves. Nesse sentido, objetivou-se, com o presente trabalho, desenvolver e validar dois modelos tridimensionais de aviários típicos da região da Zona da Mata Mineira, em Minas Gerais, a partir de técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD). Os modelos foram desenvolvidos com o intuito de avaliar o sistema de ventilação em termos de distribuição de fluxo de ar e concentração de  $\text{NH}_3$ . Para isto, foram modelados dois aviários de características similares, dotados de ventilação por pressão negativa tipo túnel, sendo um dotado de sistema de resfriamento evaporativo por meio de painéis de celulose, e o outro, por meio de nebulizadores. Para validação do modelo, foram selecionados dados experimentais medidos a campo de velocidade do ar ( $\text{m s}^{-1}$ ) e concentração de amônia ( $\text{kg m}^{-3}$ ), referentes ao final do ciclo de produção. Os modelos foram validados com base nos parâmetros estatísticos: erro quadrático médio normalizado (NMSE), variação média geométrica (VG) e fração de dois (FAC2). Os testes indicaram boa concordância entre os dados mensurados a campo e os resultados das simulações. Estes modelos podem ser utilizados para simular novos projetos e arranjos do sistema de ventilação, visando maior uniformidade do fluxo de ar e, conseqüentemente, melhor qualidade do ar e do ambiente térmico de criação de frangos de corte.

**Palavras-chave:** Modelagem computacional; produção animal; qualidade do ar; ventilação mecânica.

## ABSTRACT

Ventilation plays an important role in controlling thermal environment and indoor air quality of an animal facility. Within ideal limits, fresh incoming air velocity favors heat exchange with the environment, allows control of air temperature, relative humidity and litter moisture, and improves air quality by diluting and eliminating gases harmful to both animals and workers. Among the main gases generated in an aviary, ammonia ( $\text{NH}_3$ ) is the most toxic pollutant if at high concentration. It is known that some areas of an aviary concentrate higher levels of ammonia or high air velocities, while other areas have poor fresh air distribution. The environmental conditions in these facilities are crucial for the growth and development of broilers. In this sense, the objective was to develop and validate three-dimensional models of two typical broiler houses located in the Zona da Mata Mineira region, Minas Gerais, using computational fluid dynamic (CFD) techniques. The models were developed in order to evaluate the ventilation system in terms of distribution of airflow and  $\text{NH}_3$  concentration. For this, two poultry houses with similar characteristics were modeled, equipped with tunnel negative pressure ventilation, one with an evaporative cooling system utilizing cellulose pads, and the other utilizing mist nozzles. For model validation, measured air velocity ( $\text{m s}^{-1}$ ) and ammonia concentration ( $\text{kg m}^{-3}$ ) corresponding to measurements at the end of the production cycle were utilized. The models were validated based on three statistical parameters: normalized mean square error (NMSE), geometric mean variation (VG), and fraction of two (FAC2). These two building models can be used to simulate new designs and management of ventilation systems, aiming at improved uniformity of airflow and consequently, better air quality and thermal environment quality for broiler production.

**Keywords:** Animal production; air quality; computational modeling; mechanical ventilation.

## 5.1. INTRODUÇÃO

O êxito da produção de carne de frango na atualidade é resultado de inúmeras pesquisas conduzidas em função do desenvolvimento tecnológico do setor, dentre os quais destacam-se o aprimoramento das características construtivas da instalação, da nutrição, da sanidade, genética e do ambiente ao qual o animal está inserido (AMARAL et al., 2016; FERREIRA et al., 2016). No entanto, sabe-se que o efeito das variações climáticas tem sido um obstáculo na produção de proteína animal em todo o mundo, uma vez que, conforme o clima se altera, o potencial produtivo é prejudicado. O estresse térmico é um dos principais fatores que interferem no

desempenho de frangos de corte, levando à diminuição da ingestão de ração e, portanto, prejudicando a taxa de crescimento, peso corporal, qualidade da carne e fertilidade (NAWAB et al., 2018). Nas últimas décadas, a fim de manter a competitividade, foi essencial a implantação de sistemas de criação em alta densidade de alojamento, o que de fato, agravou o problema do estresse térmico dos frangos e ocasionou o aumento da excreção de nitrogênio e da umidade da cama. Esse processo também resultou em maior produção de gases em virtude da fermentação desse material (FREITAS et al., 2009).

Atualmente, o mercado consumidor está cada vez mais exigente quanto aos conceitos de boas práticas de produção, tendo em vista o bem-estar dos animais e do trabalhador, sustentabilidade e segurança alimentar. Portanto, é imprescindível garantir o bom manejo das condições ambientais e, para isto, temperatura, umidade relativa, ventilação, radiação, luminosidade, emissão de gases e poeira devem ser monitoradas e controladas. Segundo Cassuce et al. (2013) e Saraz et al. (2017), temperatura do ar na faixa de 21 a 27°C, umidade relativa entre 50 e 70% e velocidade do ar de 0,5 a 1,5 m s<sup>-1</sup> caracterizam um ambiente confortável a frangos de corte. A ventilação deve suprir as exigências ambientais para a manutenção da boa qualidade do ar do interior do aviário, de modo a manter as concentrações de amônia (NH<sub>3</sub>) dentro de limites que não afetem a saúde das aves e dos funcionários (SARAZ et al., 2017).

Diante disso, é notório que a ventilação desempenha um papel muito importante tanto na distribuição espacial de calor e umidade quanto nas concentrações de gases e poeira em instalações de produção animal (ABREU e ABREU, 2005; TONG et al., 2019). Para evitar problemas com estresse por calor, o sistema de ventilação modo túnel é habitualmente empregado em aviários de corte. Esse tipo de ventilação facilita a entrada de ar fresco e, assim, favorece as trocas de calor por convecção e a renovação do ar (TONG et al., 2018). Ainda, a ventilação por pressão negativa tipo túnel facilita a redução dos níveis de amônia, diluindo-a e removendo-a para o exterior da instalação (SOUSA et al., 2016). Todavia, existe uma enorme variação espacial e temporal no ambiente térmico e nos níveis de concentração de amônia no interior dos aviários devido à baixa uniformidade do fluxo de ar, e conseqüentemente, desuniformidade das variáveis de desempenho produtivo (XIN et al., 1994; SILVA et al., 2013; e TONG et al., 2019). Como exemplo, é comum observar elevadas concentrações de amônia na região mais próxima à saída de ar (exaustores) em aviários com sistema de ventilação tipo túnel. Os animais que permanecem mais próximos aos exaustores tendem a apresentar menor ganho de peso e a desenvolver mais problemas de saúde quando comparados àqueles que se mantêm mais afastados dessa região (TONG et al., 2019).

Há diversas ferramentas muito eficientes para auxiliar produtores e pesquisadores na solução de problemas relacionados ao dimensionamento dos sistemas de condicionamento térmico de uma edificação, como por exemplo a fluidodinâmica computacional (CFD). A fluidodinâmica computacional é uma ferramenta poderosa, em constante ascensão no meio científico e muito utilizada em pesquisas que envolvem ambiência em aviários para frangos de corte. A metodologia configura uma abordagem alternativa para a predição da variabilidade, de forma tridimensional, de variáveis climáticas e gases, como por exemplo, temperatura, umidade relativa, velocidade do ar, pressão e concentração de amônia no ambiente de criação das aves. Para fins de otimização do controle das condições ambientais internas de aviários, inúmeros arranjos do sistema de ventilação podem ser modelados e avaliados e, com isto, o produtor é capaz de obter informações pertinentes ao diagnóstico, mitigação dos problemas práticos de condicionamento térmico e tomadas de decisão mais acertadas, reduzindo custos com testes experimentais (SARAZ et al., 2012; VILELA et al., 2019).

Frente à necessidade de soluções mais racionais e constante aprimoramento do ambiente térmico em aviários situados em regiões de clima quente, como no Brasil, é de suma importância o desenvolvimento de estudos específicos relacionados à ventilação e a qualidade do ar de acordo com as condições climáticas do local, tendo em vista o bem-estar animal e a sustentabilidade da produção. Portanto, este estudo teve como objetivo desenvolver e validar modelos CFD capazes de prever a distribuição do fluxo de ar e concentração de amônia em aviários comerciais com ventilação por pressão negativa tipo túnel, baseados em galpões industriais para produção de frangos de corte situados na Zona da Mata Mineira.

## **5.2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **5.2.1. Considerações gerais**

Todos os procedimentos adotados para a coleta de dados no presente experimento foram aprovados pela Comissão Ética no Uso de Animais (CEUA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), com protocolo de registro nº 71/2017 (cópia do certificado na página 186 – Anexo A). A presente pesquisa foi desenvolvida em parceria entre o Núcleo de Pesquisa em Ambiência e Engenharia de Sistemas Agroindustriais – AMBIAGRO, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa e a empresa PIF PAF alimentos.

A coleta de dados foi executada em uma granja comercial de frangos de corte, localizada na região sudeste do Brasil, no município de Ervália – MG (Mesorregião da Zona da Mata), a 730 m de altitude, latitude 20° 50' 24" S e longitude 42° 39' 25" W. O clima, pela classificação

de Koppen, é caracterizado como Cwa (clima subtropical de inverno seco e verão temperado), com temperatura média anual de 19,9°C.

### 5.2.2. Características dos aviários

A granja é composta por dois aviários, onde cada um possui capacidade para o alojamento de 30.000 aves/ciclo. O fornecimento de ração e água é automatizado. Os aviários apresentam características construtivas semelhantes, com orientação leste-oeste; dimensões individuais de 12 metros de largura por 145 metros de comprimento e 2,5 metros de pé-direito; cobertura com telha de fibrocimento e forro de poliuretano; muretas de 30 cm de altura nas laterais do galpão, e fechamento lateral com telas e cortinas de poliuretano; fechamento de alvenaria nas cabeceiras.

O sistema de ventilação praticado na granja é a ventilação mecânica por pressão negativa em modo túnel, composto por oito exaustores de 1,27m de diâmetro (50 in) (Plasson®, Ma'agan Michael, IL), modelo com cone direcionador de ar, instalados na cabeceira oeste do aviário, divididos em quatro grupos de dois exaustores (Figura 5.1). Cada grupo é acionado em função das condições térmicas internas da instalação e da idade dos animais alojados. Os aviários também são equipados com sistema de resfriamento evaporativo, contudo, em um dos galpões, esse processo é realizado por meio de placas evaporativas de celulose e, no outro, por nebulizadores distribuídos ao longo do aviário. O detalhamento das características de cada aviário e do sistema de climatização está descrito na seção Material e Métodos, no Capítulo III.

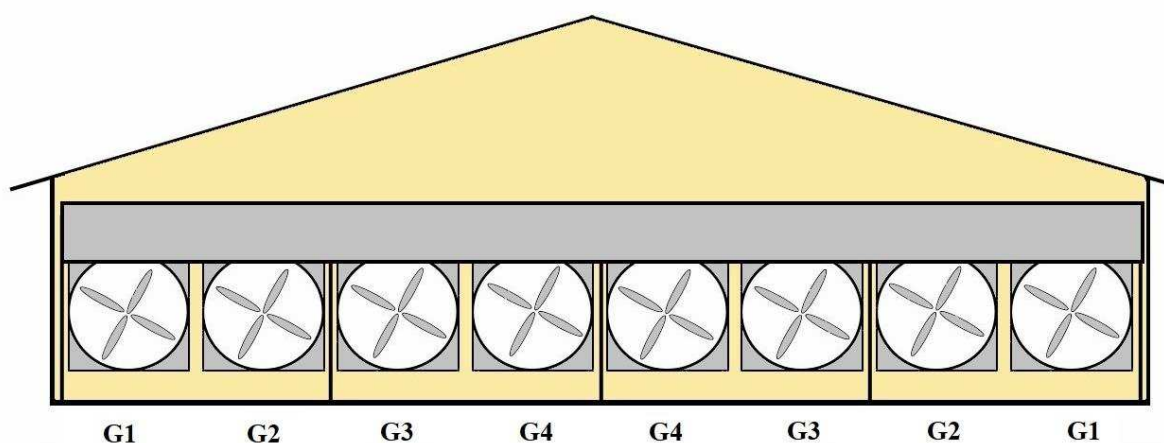


Figura 5.1: Distribuição dos grupos de acionamento dos exaustores nos aviários estudados.

O manejo adotado para o controle do ambiente térmico é dividido em duas etapas: fase de aquecimento (durante aproximadamente os primeiros 15 dias de vida das aves); e fase de

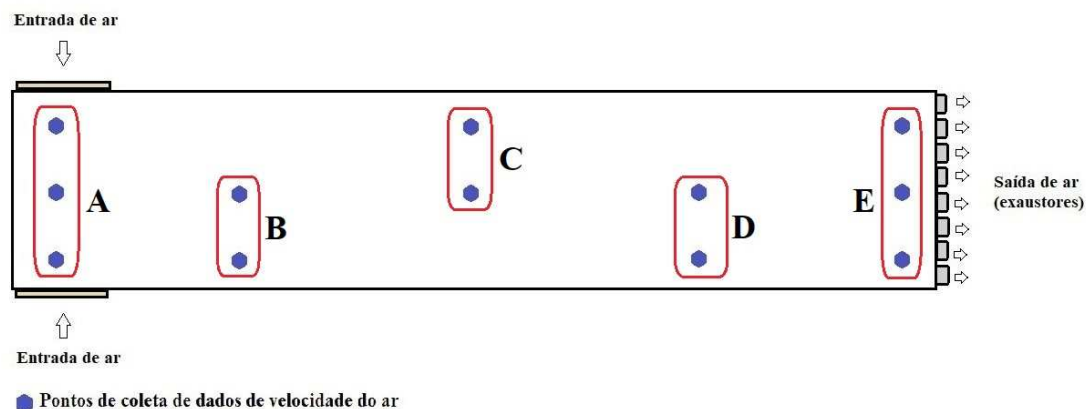
pós-aquecimento, que compreende o período entre o fim da fase de aquecimento e o fim do ciclo, por volta dos 42 dias de vida das aves.

### **5.2.3. Instrumentação e coleta de dados**

Para a validação do modelo computacional, foram selecionados dados experimentais coletados a partir do 20º dia de vida das aves, uma vez que melhor representam as condições implementadas nos modelos. Os dados de velocidade do ar ( $\text{m s}^{-1}$ ) e concentração de amônia foram obtidos em 12 pontos distribuídos ao longo do aviário, a 0,4 m e 1,5 m de altura. Na Figura 5.2 são demonstradas as localizações dos pontos de coleta de dados de velocidade do ar e concentração de amônia ao longo dos aviários, nas duas alturas estabelecidas, totalizando 24 pontos de mensuração. Para isso, utilizou-se termômetro de fio quente, da marca TECPEL (Tecpel Co., Ltd., Taipei, Taiwan), Modelo AVM714 e resolução de  $0,1 \text{ m s}^{-1}$ . Os dados de velocidade do ar foram computados duas vezes por semana, com média de duas medições por dia, totalizando seis dias de coleta de dados até o final do ciclo produtivo.

As concentrações de amônia foram registradas em cada ponto de coleta por meio do sensor Gas Alert Extreme  $\text{NH}_3$  Detector (BW Technologies®®, Oxfordshire, UK) com capacidade de detecção de 0-100 ppm, temperatura de operação de -4 e 40 °C, e precisão de 2%, previamente calibrados. Os dados foram também computados duas vezes por semana, sendo duas aferições por dia durante seis dias da fase final do ciclo produtivo.

### A) Vista Superior



### B) Vista frontal

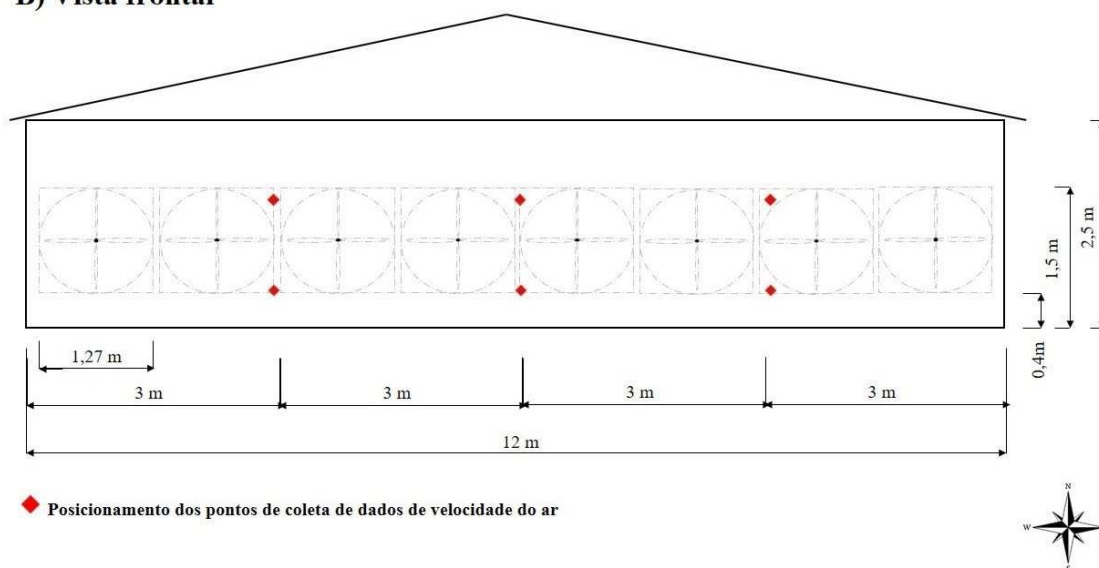


Figura 5.2: Localização dos pontos de coleta de dados de velocidade do ar agrupados em cinco seções ao longo do aviário, onde A): vista superior; B): vista frontal.

Para medir o fluxo de massa de amônia gerado pela cama, aplicou-se o método Saraz para determinação da emissão de amônia (SMDAE), proposto por Saraz et al. (2015). A técnica é baseada em método de fluxo passivo, composto por um dispositivo de difusão passiva com base em uma esponja cilíndrica de poliuretano cuja função é absorver a amônia gasosa emitida pela cama de frango. As esponjas são impregnadas com solução de ácido sulfúrico e glicerina, realizando a fixação de  $\text{NH}_3$  por microdifusão. Após a captura, a amônia é quantificada por titulação ácido-base, por meio do método de Kjeldhal (SARAZ et al., 2013). Os dispositivos foram posicionados sobre a cama em ambos os aviários, a cada 27,5 m, nas mesmas posições onde foram coletados os dados de velocidade do ar e concentração de amônia, conforme mostrado na Figura 5.2 A. A coleta de dados foi realizada três vezes durante o ciclo produtivo:

uma no início da fase inicial (primeira semana de vida das aves); uma no início da fase final (terceira semana de vida das aves) e outra no final do ciclo (sexta semana de vida das aves).

A concentração de  $\text{NH}_3$  (g  $\text{NH}_3$ ) capturada pela esponja foi obtida pelo volume da solução de diluição (mL), a concentração da solução usada na titulação ( $\text{mol L}^{-1}$ ) e o número de moles de  $\text{NH}_3$ .

$$\text{NH}_3(\text{mg.kg}^{-1}) = \frac{V \times N \times F \times 17 \times 1000}{A} \quad (1)$$

Onde:

V: Volume de ácido clorídrico gasto na titulação da amostra (mL); N: Concentração da solução ácida ( $\text{mol.L}^{-1}$ ); F: Fator de correção da padronização da solução ácida usada na titulação (MATOS, 2012); A: Volume da alíquota da amostra (L).

O fluxo de massa SMDAE foi calculado por meio da Equação 2. O valor da taxa de emissão de amônia implementado nos modelos CFD de ambos os aviários foi obtido a partir da média dos valores de fluxo de massa mensurados pelo método SMDAE ao longo de todo o período experimental.

$$\text{SMDAE} = \frac{\text{NH}_3}{A_{ma}t} \quad (2)$$

Onde:

SMDAE: Fluxo de  $\text{NH}_3$  (g  $\text{NH}_3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ );  $\text{NH}_3$ : Massa de  $\text{NH}_3$  (g  $\text{NH}_3$ );  $A_{ma}$ : Área da seção transversal do material absorvente ( $\text{m}^2$ ); t: Período de exposição (s).

#### 5.2.4. Modelagem Computacional

As simulações tridimensionais em CFD do fluxo de ar e distribuição de amônia no interior do aviário foram realizadas utilizando-se o software ANSYS CFX<sup>®</sup> 2019 R3 Academic (Ansys, Inc., PA, USA). Apesar de seu extenso comprimento, todo o aviário foi modelado, visto que o domínio computacional não pode ser reduzido, já que a geometria não é simétrica no sentido transversal.

Os modelos desenvolvidos não incluíram a estrutura do telhado devido à presença de forro nas instalações. Além disso, devido ao fato de que as condições implementadas para validação representam as condições do final do ciclo de criação, o mesmo não possui efeito expressivo no fluxo interno.

Embora a nomenclatura adotada contemple características em termos do tipo de sistema de resfriamento evaporativo de cada aviário, as condições de contorno referentes ao resfriamento evaporativo em ambos os casos não foram implementadas. Os modelos aqui validados foram simplificados para efeitos de validação.

#### 5.2.4.1. *Configurações do modelo*

A geometria tridimensional foi criada utilizando a ferramenta Design Modeler e a malha foi desenvolvida por meio do ICEM-CFX Mesh<sup>®</sup> (Ansys, Inc., PA, USA). As geometrias dos aviários utilizados na modelagem CFD estão apresentadas nas Figuras 5.3 e 5.4.

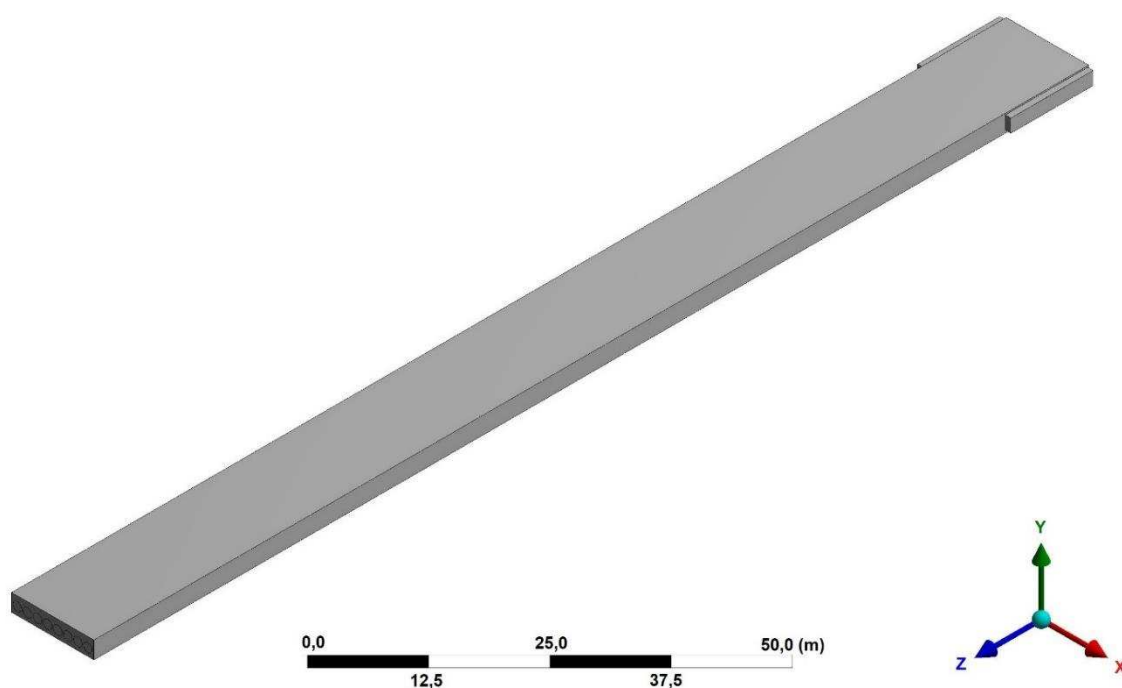


Figura 5.3: Geometria do aviário com ventilação por pressão negativa com painel evaporativo (APNPE) no software ANSYS<sup>®</sup> 2019 R3.

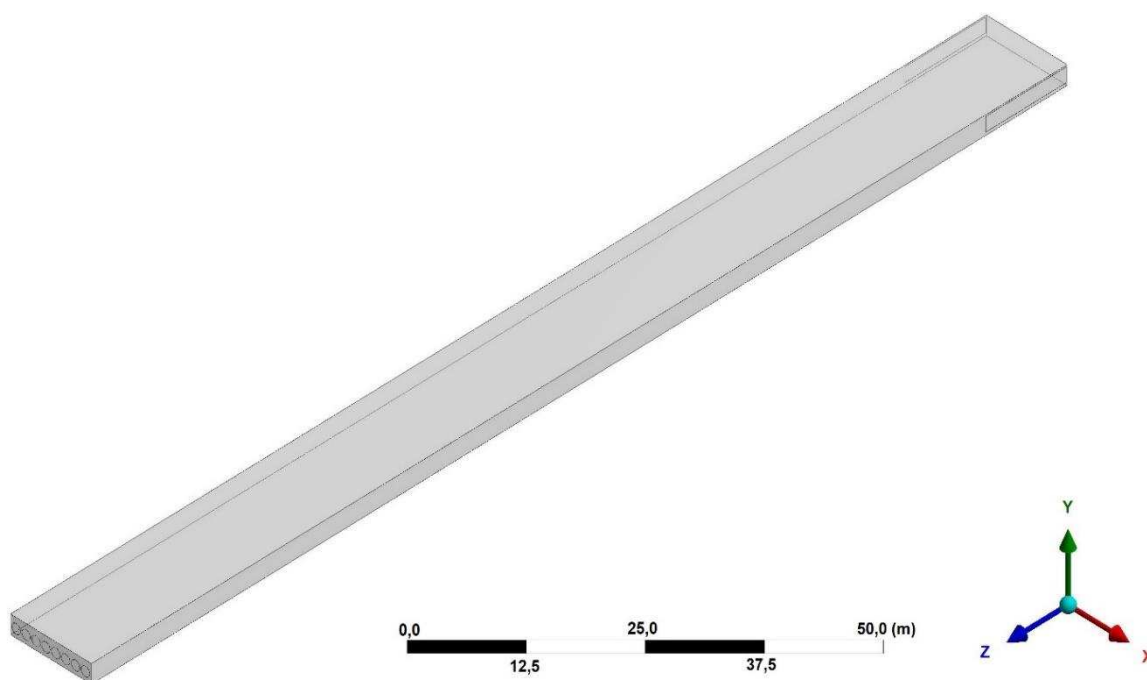


Figura 5.4: Geometria do aviário com ventilação por pressão negativa e sistema de nebulização (APNN) no software ANSYS® 2019 R3.

#### 5.2.4.2. Equações governantes

A metodologia CFD foi empregada para a solução das equações governantes correspondentes às equações de Navier-Stokes e equação de concentração de amônia pelo método dos volumes finitos (MVF), a fim de converter as equações diferenciais parciais em um sistema equivalente de equações algébricas discretas (HAJMOHAMMADI et al., 2013). Para a validação dos modelos de ambos os aviários, foi considerado o escoamento turbulento, isotérmico, incompressível e regime permanente. A modelagem do escoamento turbulento foi realizada por meio do modelo padrão k- $\epsilon$ .

O painel evaporativo do APNPE foi implementado no modelo como meio poroso, haja vista a sua estrutura de característica permeável. As equações governantes para o meio poroso são dadas pelas equações de Navier-Stokes:

$$\nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon_{pe} \rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot \bar{\tau} - F_r + \rho \mathbf{g} \quad (4)$$

Onde:

$\rho$ : densidade do fluido ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $\varepsilon_{pe}$ : porosidade do painel evaporativo (fração ocupada pelo ar no painel evaporativo);  $P$ : Pressão (Pa);  $\tau$ : Tensor de tensão (Pa), dado por  $\bar{\tau} = [\nabla \cdot \vec{v} + \nabla \cdot \vec{v}^T] - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} \mathbf{I}$ , onde  $\mathbf{I}$  é tensor unitário;  $F_r$ : força resistiva ( $\text{N m}^{-3}$ );  $g$ : aceleração da gravidade ( $\text{m s}^{-2}$ );

A força resistiva ( $F_r$ ) adicionada à Equação 4 é dada pela Equação 5:

$$F_r = C_1 \vec{v} + C_2 \vec{v} |\vec{v}| \quad (5)$$

Onde:

$C_1$ : Coeficiente linear do termo fonte;  $C_2$ : Coeficiente de perda ( $\text{m s}^{-1}$ ).

O coeficiente  $C_1$ , por sua vez, é estimado a partir da Equação 6, que relaciona a viscosidade e a permeabilidade:

$$C_1 = \frac{\mu}{k_p} \quad (6)$$

Onde:

$\mu$ : viscosidade do ar ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ );  $k_p$ : permeabilidade do meio poroso ( $\text{m}^2$ ).

Os valores de porosidade e permeabilidade implementados no modelo foram estimados por Franco et al. (2011). Segundo os autores, o valor de porosidade para painéis evaporativos de celulose é 0,937, enquanto a permeabilidade é de  $3,254 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ .

Na região não porosa, após a passagem do ar pelos painéis evaporativos, as equações governantes no domínio são as equações da continuidade, conservação da quantidade de movimento e concentração de amônia. Estas equações também correspondem ao domínio do APNN.

$$\nabla \cdot \rho v = 0 \quad (7)$$

$$\nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla P + \nabla \cdot \bar{\tau} + \rho g \quad (8)$$

$$\vec{m} \cdot \nabla C_A = \nabla \cdot (D \nabla C_A) \quad (9)$$

Onde:

$m$ : componente velocidade ( $\text{m s}^{-1}$ );  $C_A$ : concentração da espécie A no gás ( $\text{g m}^{-3}$ );  $D$ : coeficiente de difusão ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ).

O tensor de Reynolds foi modelado usando modelo  $k$ - $\epsilon$  padrão de turbulência, abordando a viscosidade do escoamento turbulento ( $\mu_T$ ), que relaciona a energia cinética de turbulência ( $k$ ) e dissipação de energia cinética de turbulência ( $\epsilon$ ) (SARAZ et al., 2017).

#### **5.2.4.3. Condições iniciais e condições de contorno**

Para os dois modelos desenvolvidos para os aviários em estudo, a simulação foi realizada em duas análises. Primeiramente, foi processada uma análise mais robusta e, após a convergência desse primeiro estágio, a segunda análise foi iniciada, utilizando os resultados da primeira como estimativa inicial para os campos de velocidade e pressão.

As simulações em CFD para a validação dos modelos computacionais dos aviários em estudo foram realizadas a partir das seguintes considerações: regime estacionário, escoamento incompressível, turbulento e isotérmico, com média de temperatura do ar a  $25^\circ\text{C}$  e fluxo de ar de aproximadamente  $12 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ ave}^{-1}$ . Um subdomínio poroso foi criado para o APNPE, a fim de representar os painéis evaporativos. Ainda, foi considerado que em cada modelo havia o total de 30.000 frangos de corte adultos, com idade de aproximadamente 30 dias, distribuídos uniformemente pelo piso do aviário. Os parâmetros adotados para os painéis evaporativos do APNPE e propriedades do ar estão dispostos na Tabela 5.1. As condições de contorno de ambos os aviários e seus parâmetros, nos dois estágios da simulação, estão descritos na Tabela 5.2. As médias de velocidade normal do ar na saída, utilizadas como condições de contorno, foram obtidas por meio de medições experimentais.

Tabela 5.1 – Parâmetros utilizados para a modelagem do escoamento do ar no interior dos aviários

<b>Painel Evaporativo</b>	
Espessura	150 mm (Plasson)
Porosidade	0,937 (Franco et al., 2011)
Permeabilidade	$3,254 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ (Franco et al., 2011)
<b>Propriedades básicas do ar</b>	
Densidade	$1,185 \text{ kg m}^{-3}$
Calor específico	$1,0044 \times 10^3$
Viscosidade	$1,831 \times 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$
Coefficiente de expansividade térmica	0,003356 1/K
Condutividade térmica	$2,61 \times 10^{-2} \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Tabela 5.2 – Condições de contorno utilizadas para a simulação do escoamento do ar no interior dos aviários

<b>Primeira etapa da análise (Estágio 1)</b>			
	<i>Localização</i>	<i>Condição de contorno</i>	<i>Propriedades</i>
APNPE*	Painel evaporativo	Inlet	Média da velocidade normal do ar = 3 m s <sup>-1</sup>
APNN#	Entradas de ar (lateral)		
APNPE	Exaustores	Outlet	Média da pressão estática = 0 Pa
APNN			
APNPE	Paredes laterais (cortinas)	Wall	No slip wall
APNN			
<b>Segunda etapa da análise (Estágio 2)</b>			
	<i>Localização</i>	<i>Condição de contorno</i>	<i>Propriedades</i>
APNPE	Painel evaporativo	Opening	Opening Pres. and dirn = 0 Pa
APNN	Entradas de ar (lateral)		
APNPE	Exaustores	Outlet	Média da velocidade normal do ar = 8 m s <sup>-1</sup>
APNN			
APNPE	Paredes laterais (cortinas)	Wall	No slip wall
APNN			
APNPE	Piso	Wall	No slip wall
APNN			
			Fluxo de massa da amônia = 4,15×10 <sup>-4</sup> kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>

\*: Aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos; #: Aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores.

Assumiu-se que o fluxo de massa de NH<sub>3</sub> gerado pela cama foi emitido uniformemente ao longo de todo o aviário, com taxa constante estimada a partir dos dados experimentais com base no método SMDAE. Tanto para a análise da condição inicial (primeiro estágio) quanto para o segundo estágio, o esquema de advecção selecionado foi *upwind*, com esquema de alta resolução. O critério de convergência implementado foi resíduo médio quadrático da estimativa (em inglês, *Root Mean Square*) RMS <10<sup>-5</sup>.

### 5.2.5. Teste de independência de malha

As malhas computacionais foram geradas no software ANSYS ICEM – CFX Mesh®. No APNPE foi gerada uma malha não estruturada, do tipo tetraédrica, com refinamento local direcionado particularmente na região de entrada de ar (painéis evaporativos ou abertura de cortinas) e saída de ar (exaustores), por meio das ferramentas *Face Sizing* e *Edge Sizing*, respectivamente. Essas funções foram aplicadas com o intuito de gerar malhas mais consistentes e de maior qualidade nessas zonas para detectar os gradientes acentuados de velocidade do ar e concentração de NH<sub>3</sub>. No modelo do APNN, o refinamento local tanto na área dos exaustores quanto nas aberturas para entrada de ar foi realizado por meio da ferramenta *Edge Sizing*. A malha gerada é do tipo tetraédrica, similar ao APNPE.

Para garantir a independência dos resultados da malha, diferentes níveis de refinamento foram gerados no CFX Mesh®. O teste de independência de malha foi efetuado para três tamanhos de malha no APNPE, variando em torno de 199 mil a 400 mil nós. Já para o APNN, dois tamanhos de malha foram testados, variando de 51 mil a 74 mil nós. Assim, foi possível demonstrar uma dependência mínima do número de nós e elementos e uma boa acurácia dos resultados obtidos nas simulações.

Os valores de velocidade do ar e concentração de amônia obtidos nas simulações foram comparados com os dados correspondentes nos diferentes tamanhos de malhas, por meio dos testes não-paramétricos Kruskal-Wallis (para os três tipos de malha do APNPE) e Mann-Whitney (para comparar as duas malhas avaliadas no modelo do APNN). De acordo com Callegari-Jacques (2007), o Teste Kruskal-Wallis é um teste não paramétrico para comparar três ou mais populações no que se refere à tendência central dos dados. Do mesmo modo, segundo Viali (2008), o Teste Mann Whitney é empregado para a avaliação da distribuição de frequência dos dados e verificação se duas amostras independentes foram retiradas de populações com médias iguais. A amostra incluiu 36 pontos localizados próximo as paredes, entrada de ar, exaustores e região central do aviário, a fim de abordar a variação que pode haver em locais distintos ao longo das instalações.

### 5.2.6. Validação dos modelos

Os resultados verificados com as simulações em CFD foram comparados com os valores experimentais de velocidade do ar e concentração de amônia obtidos a campo em 12 pontos distribuídos em toda a extensão do aviário, em duas alturas distintas a 0,4 m e 1,5 m (Figura 5.2). Para avaliar o desempenho do modelo, parâmetros estatísticos como o erro quadrático médio normalizado (NMSE) (Eq. 10), recomendado pela American Society for Testing

Materials (ASTM, 2002); a variação média geométrica (VG) (Eq. 11); e a fração de dois (FAC2) (Eq. 12) foram estimados.

Segundo Baraldi et al. (2017), NMSE e VG são medidas de dispersão e retratam erros sistemáticos e aleatórios. FAC2 é definido como a porcentagem do previsto dentro de um fator dos dois valores observados (HADJAB e MEDJAHED, 2012).

De acordo com American Society for Testing Materials (ASTM, 2002), Mostafa et al. (2012) e Saraz et al. (2017), valores de NMSE menores que 0,25 são considerados bons indicadores de concordância entre os valores preditos e observados. Chang e Hanna (2004), Tong et al. (2019) e Tabase et al. (2020) apontam os seguintes critérios a serem atendidos para garantir uma performance satisfatória dos modelos:  $NMSE < 0,25$ ;  $VG < 4$ ; e  $0,5 < FAC2 < 2$ .

$$NMSE = \frac{(C_o - C_p)^2}{(C_o \cdot C_p)} \quad (10)$$

$$VG = \exp \left[ \ln \left( \frac{C_o}{C_p} \right)^2 \right] \quad (11)$$

$$FAC2 = \frac{C_p}{C_o} \quad (12)$$

Onde:

$C_o$ : valor experimental (observado); e  $C_p$ : valor simulado.

### 5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 5.3.1. Teste de independência de malha

Diferentes tamanhos de malhas tetraédricas foram implementadas nos modelos dos aviários, e, após a avaliação dos resultados a partir dos níveis de refinamento, foi selecionada uma malha de 199.647 nós e 626.531 elementos para o APNPE (Figura 5.5); e uma malha de 51.410 nós e 253.569 elementos para o APNN (Figura 5.6). Os resultados do teste de malha estão apresentados nas Tabelas 5.3 a 5.5.

Tabela 5.3 – Velocidade do ar e concentração de  $\text{NH}_3$  (média e desvio padrão), nos distintos níveis de refinamento de malha avaliados no aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos (APNPE) e no aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores (APNN), em diferentes posições no galpão

<b>APNPE</b>					
<i>Tamanho da malha (m)</i>	<i>Número de nós</i>	<i>Elementos</i>	<i>Velocidade do ar (<math>\text{m s}^{-1}</math>)</i>		
			<i>Posição</i>		
			<i>Entrada de ar</i>	<i>Centro aviário</i>	<i>Exaustores</i>
0,4	400.721	1.309.316	$1,26 \pm 0,27$	$2,54 \pm 0,61$	$2,55 \pm 0,52$
0,6	253.296	794.864	$1,26 \pm 0,28$	$2,54 \pm 0,54$	$2,55 \pm 0,51$
0,9	199.647	626.531	$1,26 \pm 0,29$	$2,53 \pm 0,52$	$2,54 \pm 0,51$
<i>Tamanho da malha (m)</i>	<i>Número de nós</i>	<i>Elementos</i>	<i>Concentração de <math>\text{NH}_3</math> (<math>\text{g m}^{-3}</math>)</i>		
			<i>Posição</i>		
			<i>Entrada de ar</i>	<i>Centro aviário</i>	<i>Exaustores</i>
0,4	400.721	1.309.316	$0,2 \pm 0,328$	$4,4 \pm 0,353$	$8,6 \pm 0,328$
0,6	253.296	794.864	$0,3 \pm 0,387$	$4,4 \pm 0,186$	$8,6 \pm 0,087$
0,9	199.647	626.531	$0,3 \pm 0,405$	$4,4 \pm 0,137$	$8,6 \pm 0,106$
<b>APNN</b>					
<i>Tamanho da malha (m)</i>	<i>Número de nós</i>	<i>Elementos</i>	<i>Velocidade do ar (<math>\text{m s}^{-1}</math>)</i>		
			<i>Posição</i>		
			<i>Entrada de ar</i>	<i>Centro aviário</i>	<i>Exaustores</i>
0,6	73.619	365.830	$0,62 \pm 0,35$	$2,36 \pm 0,03$	$2,36 \pm 0,05$
0,9	51.410	253.569	$0,62 \pm 0,37$	$2,36 \pm 0,01$	$2,36 \pm 0,04$
<i>Tamanho da malha (m)</i>	<i>Número de nós</i>	<i>Elementos</i>	<i>Concentração de <math>\text{NH}_3</math> (<math>\text{g m}^{-3}</math>)</i>		
			<i>Posição</i>		
			<i>Entrada de ar</i>	<i>Centro aviário</i>	<i>Exaustores</i>
0,6	73.619	365.830	$1,2 \pm 0,769$	$5 \pm 0,211$	$9,9 \pm 0,0138$
0,9	51.410	253.569	$1,2 \pm 0,755$	$5,1 \pm 0,065$	$9,9 \pm 0,0177$

Pela Tabela 5.3 nota-se que, para ambos os modelos, os resultados obtidos para velocidade do ar e concentração de  $\text{NH}_3$  não apresentaram diferenças consideráveis entre os distintos refinamentos de malha. Velocidades do ar em 36 localidades ao longo de todo o aviário foram utilizadas para comparar as malhas propostas em cada caso (APNPE e APNN), a fim de

observar ponto a ponto a acurácia da simulação em função dos diferentes tamanhos de malha. Foram seleccionados 12 pontos de comparação na zona de entrada de ar, 12 pontos na zona central e 12 pontos próximos aos exaustores, conforme apresentado nas Figuras 5.5 e 5.6.

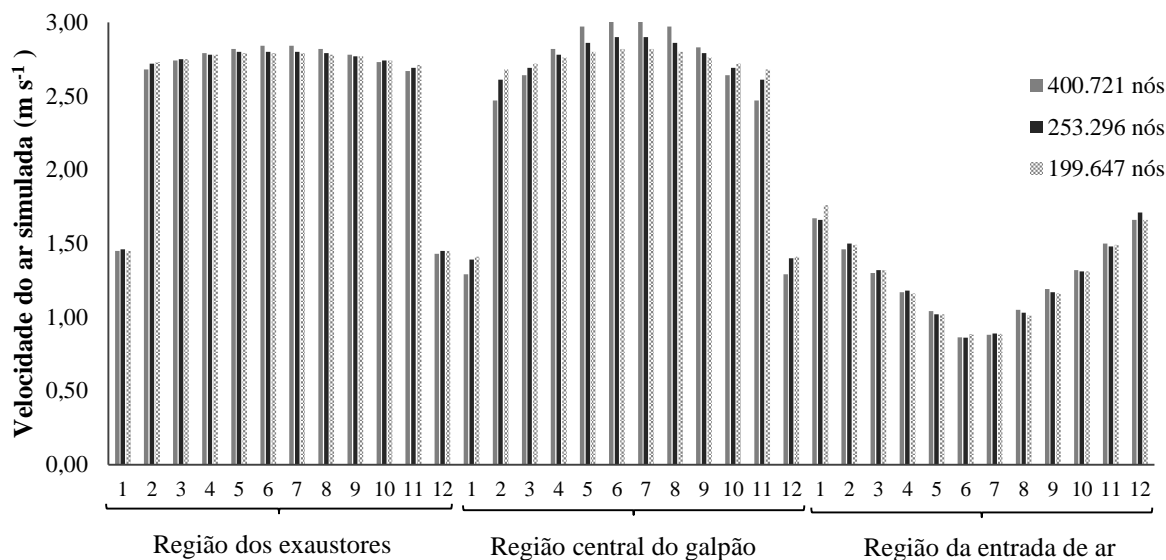


Figura 5.5: Velocidades do ar simuladas em 32 localidades no interior do aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos (APNPE), em três diferentes tamanhos de malha.

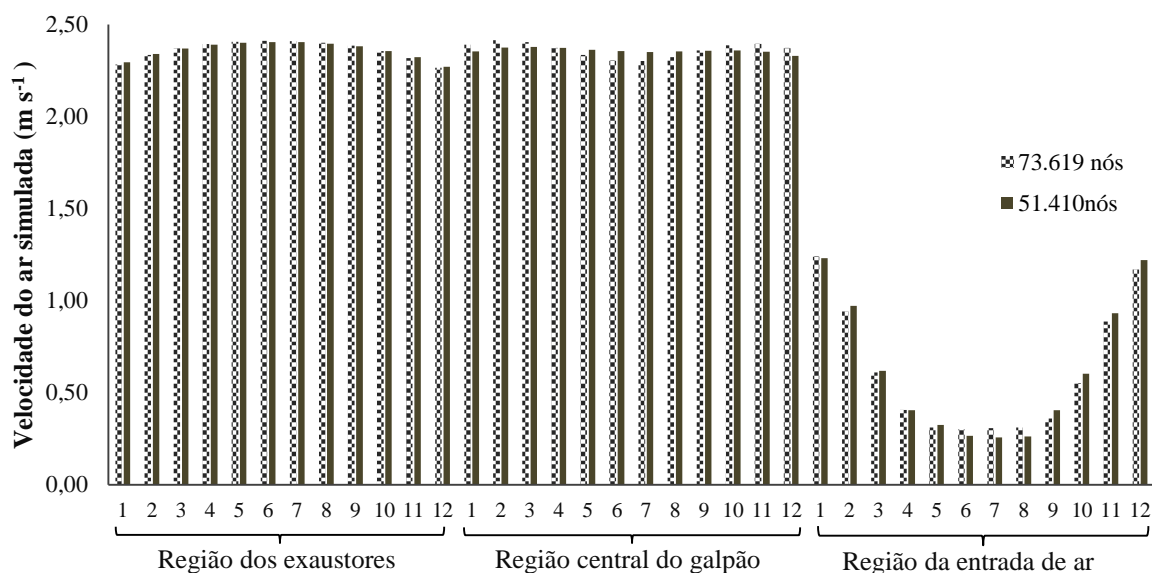


Figura 5.6: Velocidades do ar simuladas em 32 localidades no interior do aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores (APNN), em dois diferentes tamanhos de malha.

A fim de verificar o efeito do nível de refinamento das malhas propostas nos resultados das variáveis simuladas, os dados foram submetidos aos seus respectivos testes estatísticos: Kruskal-Wallis, comparando três tamanhos de malha para o APNPE; e Mann Whitney, comparando dois tamanhos de malha para o APNN. Nas Tabelas 5.4 e 5.5 estão apresentados os resultados dos testes Kruskal-Wallis e Mann Whitney, em função dos diferentes refinamentos de malha.

Tabela 5.4 – Velocidade do ar e concentração de  $\text{NH}_3$  (mediana e intervalo interquartil) para cada tamanho de malha testado para o modelo do aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos (APNPE)

	APNPE (Kruskal-Wallis)			
	Tamanho de malha (m)			P
	0,4	0,6	0,9	
$V_{\text{ar}}$ ( $\text{m s}^{-1}$ )	2,55 (1,30-2,82)	2,65 (1,39-2,78)	2,69 (1,41-2,77)	0,939 <sup>n.s.</sup>
Concentração $\text{NH}_3$ ( $\text{g m}^{-3}$ )	4,42 (0,5-8,5)	4,42 (0,5-8,6)	4,43 (0,5-8,5)	0,984 <sup>n.s.</sup>

<sup>n.s.</sup>: Diferença estatística não significativa pelo Teste Kruskal-Wallis ao nível de 5 % de significância.

Tabela 5.5 – Velocidade do ar e concentração de  $\text{NH}_3$  (mediana e intervalo interquartil) para cada tamanho de malha testado para o modelo do aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores (APNN)

	APNN (Mann Whitney)		
	Tamanho de malha (m)		P
	0,6	0,9	
$V_{\text{ar}}$ ( $\text{m s}^{-1}$ )	2,32 (0,90-2,38)	2,35 (0,94-2,37)	0,673 <sup>n.s.</sup>
Concentração $\text{NH}_3$ ( $\text{g m}^{-3}$ )	5,0 (1,9-9,0)	5,1 (1,8-9,9)	0,826 <sup>n.s.</sup>

<sup>n.s.</sup>: Diferença estatística não significativa pelo Teste Mann Whitney ao nível de 5 % de significância.

Malhas mais finas tendem a ser mais acuradas, ao mesmo tempo que malhas maiores, em geral, resultam em menor exatidão dos valores simulados em relação às medições diretas. No entanto, permitem a redução do tempo e gasto computacional. Portanto, o teste de

independência de malha é fundamental para selecionar o nível de refinamento adequado, de modo que o modelo seja representativo na predição das variáveis de interesse e forneça resultados aceitáveis. Especificamente para as malhas abordadas neste estudo, não foram observadas diferenças estatísticas significativas ( $P > 0,05$ ) nas medianas dos dados de velocidade do ar e concentração de amônia, para ambos os modelos de aviários. Portanto, as malhas com 199.647 e 51.410 nós, respectivamente, foram selecionadas para o APNPE e APNN, pois não demonstraram variação nos resultados de velocidade do ar e concentração de amônia conforme o aumento do tamanho de malha.

Nas Figuras 5.7 e 5.8 estão apresentadas as malhas selecionadas, geradas na geometria como um todo e, com mais detalhes, as regiões de entrada e saída de ar, para os dois modelos de aviários. É possível observar maior nível de refinamento conforme se aproxima dessas áreas, onde há maior interesse em detectar as diferenças nos gradientes de velocidade do ar e concentração de amônia.

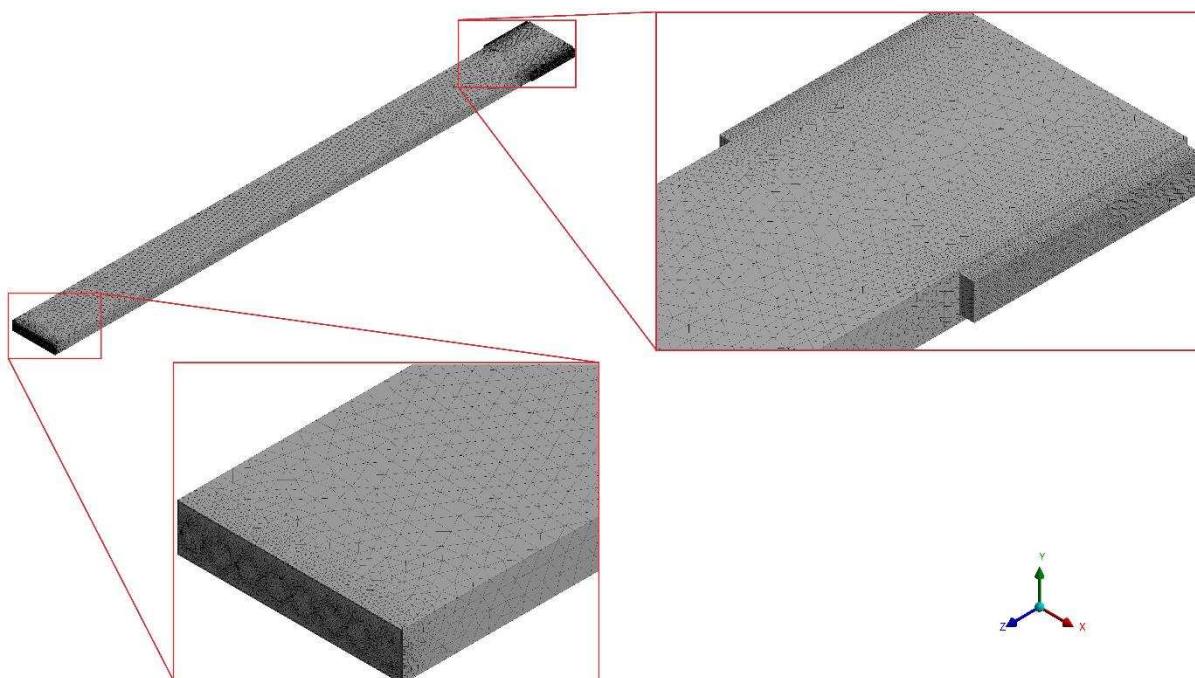


Figura 5.7: Vista detalhada da malha computacional não estruturada tetraédrica do aviário com ventilação por pressão negativa com painel evaporativo (APNPE), com 199.647 nós e 626.531 elementos.

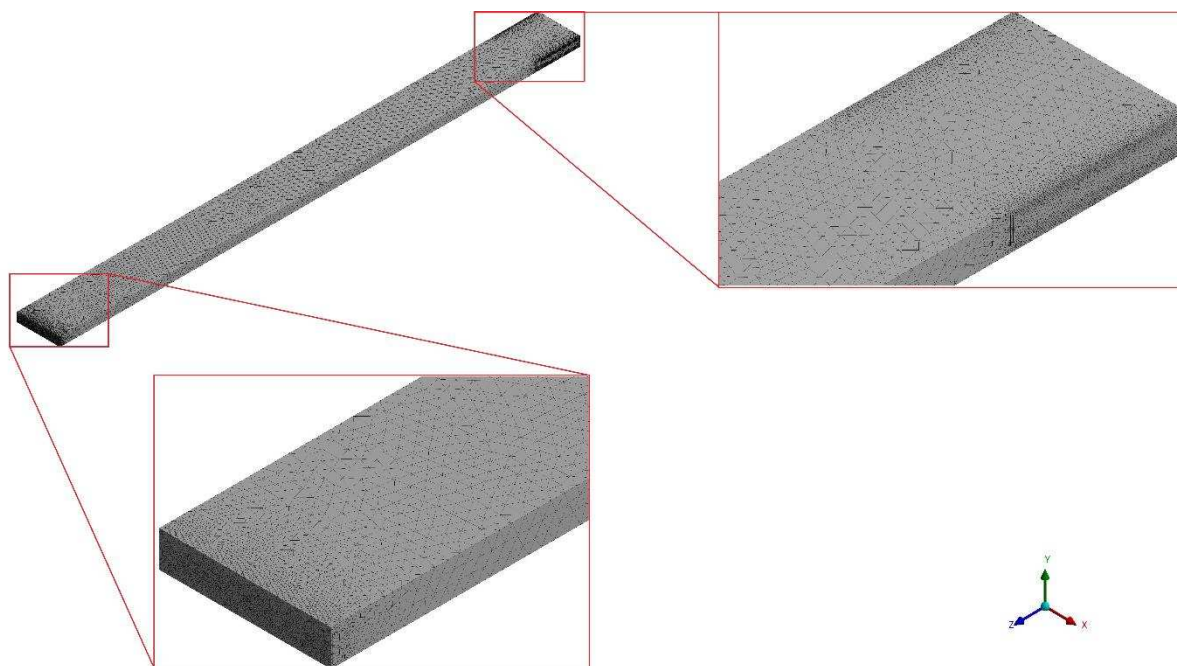


Figura 5.8: Vista detalhada da malha computacional não estruturada tetraédrica do aviário com ventilação por pressão negativa e sistema de nebulização (APNN), com 51.410 nós e 253.569 elementos.

Diversas pesquisas científicas publicadas na área demonstram a importância de execução do teste de independência de malha, visto a complexidade de algumas geometrias, como é o caso de aviários comerciais, que possuem extensas dimensões. Dhahri et al. (2019) realizaram teste de independência de malha em modelo tridimensional para aviários de frangos de corte com ventilação natural em região semiárida. Os autores avaliaram cinco tamanhos de grade diferentes e, ao examinar a distribuição de temperatura e fluxo de ar no interior da instalação, constataram resultados semelhantes entre as malhas adotadas. Os autores afirmam que a solução foi independente do tamanho das malhas testadas, sendo então validada aquela com menor número de células e, conseqüentemente, menor tempo computacional.

Du et al. (2019) testaram quatro malhas, com número de células variando de 0,9 a 5,5 milhões, em um modelo tridimensional de aviário para galinhas poedeiras com ventilação tipo túnel. Considerando o tempo e a precisão, os autores concluíram que as malhas de 5,5 e 3,2 milhões de células forneciam resultados semelhantes e, portanto, a implementação da malha de maior tamanho foi mais conveniente para a realização do estudo.

### 5.3.2. Validação dos modelos

Para validar o desempenho dos modelos estudados, dados de velocidade do ar e concentração de amônia foram avaliados com base em três parâmetros estatísticos preconizados

pela literatura: o erro quadrático médio normalizado (NMSE); a variação média geométrica (VG); e a fração de dois (FAC2). A comparação entre os dados observados a campo e os dados obtidos à partir das simulações demonstrou, de maneira geral, que existe boa concordância entre os resultados. As Tabelas 5.6 e 5.7 apresentam os valores médios dos parâmetros estatísticos NMSE, VG e FAC2 calculados para o APNPE e APNN, respectivamente, em diferentes seções e em duas alturas, como descrito na Figura 5.2.

Tabela 5.6 – Parâmetros de avaliação do desempenho (adimensional) do modelo do aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos (APNPE) para diferentes seções do aviário, a 0,4 m (nível das aves) e a 1,5 m de altura

Seção	Posição	NMSE (<0,25)		VG (<4)		FAC2 (0,5<FAC2<2)	
		$V_{ar}$	Concentração $NH_3$	$V_{ar}$	Concentração $NH_3$	$V_{ar}$	Concentração $NH_3$
<i>0,4 m de altura</i>							
A	12	0,000	0,109	0,99	0,52	1,00	1,39
	11	0,175	0,915	2,30	0,16	0,66	2,52
	10	0,001	0,008	1,08	0,84	0,96	1,09
B	9	0,503	0,002	0,25	1,10	2,00	0,95
	8	0,223	0,034	0,39	1,44	1,60	0,83
C	7	0,262	0,000	0,36	0,99	1,66	1,00
	6	0,231	0,000	0,39	1,04	1,61	0,98
D	5	0,422	0,020	0,28	0,75	1,89	1,15
	4	0,340	0,005	0,32	0,87	1,78	1,07
E	3	0,317	0,023	0,33	0,74	1,74	1,16
	2	0,275	0,040	0,35	0,67	1,68	1,22
	1	0,366	0,100	0,30	0,53	1,81	1,37
<i>1,5 m de altura</i>							
A	12	0,002	2,42	0,92	17,52	1,04	0,24
	11	0,381	0,019	3,37	0,76	0,54	1,15
	10	0,018	0,023	1,31	0,74	0,87	1,16
B	9	0,208	0,030	0,41	1,41	1,57	0,84
	8	0,200	0,187	0,41	2,36	1,56	0,65
C	7	0,232	0,050	0,38	1,57	1,61	0,80
	6	0,111	0,052	0,52	1,57	1,39	0,80
D	5	0,124	0,002	0,50	1,10	1,42	0,95
	4	0,137	0,020	0,48	1,33	1,44	0,87
E	3	0,142	0,003	0,47	0,90	1,45	1,06
	2	0,066	0,010	0,60	0,82	1,29	1,10
	1	0,204	0,032	0,41	0,70	1,57	1,20

A: região mais próxima à entrada de ar e; E: região mais próxima à saída de ar (exaustores). Nota: Os critérios entre parênteses indicam os valores ideais para desempenho apropriado do modelo.

Tabela 5.7 – Parâmetros de avaliação do desempenho (adimensional) do modelo do aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores (APNN) para diferentes seções do aviário, a 0,4 m (nível das aves) e a 1,5 m de altura

Seção	Posição	NMSE (<0.25)		VG (<4)		FAC2 (0.5<FAC2<2)	
		$V_{ar}$	Concentração $NH_3$	$V_{ar}$	Concentração $NH_3$	$V_{ar}$	Concentração $NH_3$
<i>0,4 m de altura</i>							
A	12	2,066	2,648	14,47	0,05	0,26	4,42
	11	3,029	3,491	23,26	0,04	0,21	5,30
	10	1,346	0,600	9,09	0,22	0,33	2,13
B	9	0,175	0,001	0,44	0,95	1,52	1,03
	8	0,396	0,128	0,29	2,04	1,86	0,70
C	7	0,303	0,013	0,34	0,79	1,72	1,12
	6	0,186	0,013	0,42	0,80	1,53	1,12
D	5	0,225	0,006	0,39	0,85	1,60	1,08
	4	0,373	0,001	0,30	0,93	1,82	1,03
E	3	0,222	0,040	0,39	0,67	1,60	1,22
	2	0,113	0,065	0,51	0,60	1,40	1,29
	1	0,204	0,111	0,41	0,51	1,57	1,39
<i>1,5 m de altura</i>							
A	12	0,010	0,0155	1,23	0,78	0,90	1,13
	11	1,601	0,2985	10,88	0,34	0,30	1,72
	10	0,135	0,1904	2,08	2,38	0,69	0,65
B	9	0,052	0,0128	0,64	1,25	1,25	0,89
	8	0,274	0,2419	0,35	2,65	1,68	0,61
C	7	0,232	0,0007	0,38	1,05	1,61	0,97
	6	0,071	0,0000	0,59	1,00	1,31	1,00
D	5	0,036	0,0003	0,68	0,97	1,21	1,02
	4	0,238	0,0000	0,38	1,01	1,62	0,99
E	3	0,151	0,0376	0,46	0,68	1,47	1,21
	2	0,011	0,0562	0,81	0,62	1,11	1,27
	1	0,114	0,0899	0,51	0,55	1,40	1,35

A: região mais próxima à entrada de ar e; E: região mais próxima à saída de ar (exaustores). Nota: Os critérios entre parênteses indicam os valores ideais para desempenho apropriado do modelo.

Como pode ser visto nas Tabelas 5.6 e 5.7, para os dados de velocidade do ar a 0,4 m de altura (nível dos animais), o parâmetro NMSE foi superior ao intervalo de valores considerados ideais para indicar boa concordância entre os dados simulados e experimentais. Assim, é possível observar que, em alguns pontos avaliados a 0,4 m de altura, tanto o modelo APNPE quanto o modelo APNN não demonstraram performance satisfatória na predição de velocidade do ar. Entretanto, nas demais posições e na comparação da maioria dos valores de concentração de amônia, os resultados NMSE indicaram boa concordância entre os dados. Exceto na região de entrada de ar no APNN, onde os valores de concentração de amônia

simulados foram muito menores que a média de valores mensurados a campo e, com isso, o modelo também não atendeu os critérios estabelecidos para FAC2. Essa diferença pode ter ocorrido em virtude da resolução do detector de amônia disponível para utilização, já que o equipamento fornece dados com resolução de 1 ppm, ou seja, não detectou as mais baixas concentrações.

Tong et al. (2019), ao validar um modelo computacional de aviário de postura, assumiram que a discrepância notada entre os resultados simulados e as medições diretas de velocidade do ar podem ter ocorrido, em partes, pelo fato de que os dados experimentais não foram medidos simultaneamente em todas as posições de medição. Por isso, espera-se que haja oscilações na velocidade do ar em virtude dos efeitos de turbulência, por mais que o fluxo seja constante durante a coleta a campo. Du et al. (2019) também argumentaram que as diferenças encontradas entre as velocidades do ar medidas e simuladas, principalmente na região da entrada de ar, podem estar associadas à turbulência e perturbação do fluxo, uma vez que nessa área existem duas vertentes de fluxo originadas por entradas de ar em paredes laterais opostas.

Diversos autores vem utilizando em suas pesquisas os indicadores estatísticos de avaliação de desempenho do modelo presentes neste estudo (HADJAB e MEDJAHED, 2012; SARAZ et al., 2017; BARALDI et al., 2017; CURI et al., 2017; TONG et al., 2018; TONG et al., 2019; HERNANDEZ et al., 2020). No setor da avicultura, por exemplo, Saraz et al. (2017) analisaram o ambiente térmico e qualidade do ar em aviários comerciais por meio da dinâmica dos fluidos computacional, e constataram valores de NMSE de 0,0068 para concentração de amônia, certificando-se que o modelo prediz resultados confiáveis.

Tong et al. (2019) desenvolveram um modelo CFD em 3D para simular o fluxo de ar, ambiente térmico e concentração de amônia em aviários para galinhas poedeiras. Valores médios de NMSE de 0,06 e 0,01; VG de 1,28 e 0,98; e FAC2 de 0,9 e 1,01 foram alcançados para as variáveis velocidade do ar e concentração de amônia, respectivamente. Os autores afirmam que os indicadores estatísticos avaliados demonstraram acurácia aceitável para a simulação.

Mostafa et al. (2012), analisando diferentes designs de sistema de ventilação por dutos em aviários, desenvolveram um modelo CFD para testar quatro configurações distintas do sistema, e assim, verificar qual o melhor projeto a ser implementado no período de inverno. Os autores, que estimaram NMSE médio de 0,2 para concentração de amônia, constataram que o modelo é capaz de prever com precisão a concentração do gás no interior do aviário.

Tabase et al. (2020) utilizaram as técnicas de modelagem para padrões de fluxo de ar e emissão de amônia em instalações para suínos com sistema de distribuição de ar no subsolo e

exaustão no teto. Foram aplicados, além dos parâmetros já abordados, o desvio médio geométrico (MG) e desvio fracionário (FB) e, segundo os autores, o modelo CFD desenvolvido atendeu, de forma geral, os índices de validação aplicados no estudo.

Além de modelagem de instalações para produção animal, modelos computacionais de instalações para produção e processamento de produtos agrícolas vem sendo desenvolvidos. Edificações mal projetadas e deficiência no controle do ambiente térmico no processamento de café podem afetar a qualidade dos grãos. Nesse sentido, Hernandez et al. (2020) desenvolveram um modelo computacional para avaliar a influência da localização e área de aberturas para ventilação natural em instalações para processamento de café. Na validação do modelo, os autores obtiveram boa concordância entre os resultados do modelo e dados experimentais, com NMSE igual a 0,0031 para temperatura e 0,0025 para umidade relativa.

Hadjab e Medjahed (2012) desenvolveram e validaram um modelo CFD de módulo fotovoltaico, onde avaliaram diversos valores de temperatura e radiação solar. Os autores aplicaram vários testes estatísticos para a validação, dentre eles NMSE, VG e FAC2, para avaliar dados de força e corrente. Apesar de os resultados não satisfazerem integralmente os indicadores analisados, a maior parte dos dados simulados foram aceitáveis e, portanto, os autores afirmam que o modelo é de boa qualidade e realiza simulações confiáveis.

Para Chang e Hanna (2004) e Tabase et al. (2020), a recomendação para utilização de diversos parâmetros de validação se dá em vista de que não existe um índice universal apropriado para todas as condições de validação, já que cada um desses parâmetros apresentam características e distribuição variáveis. Tabase et al. (2020) afirmam que os parâmetros FB, MG e FAC2, por exemplo, avaliam se o modelo é capaz de prever os dados experimentais, ao passo que NMSE e VG revelam o nível de dispersão da variável em estudo.

De maneira geral, verificou-se, com o presente estudo, que os resultados dos três parâmetros estatísticos adotados demonstraram boa concordância entre os dados simulados e observados, satisfazendo a maior parte dos três critérios estabelecidos (NMSE, VG e FAC2), com exceção de alguns pontos avaliados a 0,4 m de altura, para ambos os modelos, que não demonstraram performance satisfatória na predição de velocidade do ar. Portanto, ambos os modelos apresentaram acurácias aceitáveis para a predição de velocidade do ar e concentração de amônia no interior dos aviários avaliados.

### 5.3.3. Resultados das simulações

O comportamento do fluxo de ar e a distribuição espacial da concentração de amônia nos aviários APNPE e APNN estão apresentados nas Figuras 5.9 a 5.13. As visualizações das variáveis foram exibidas em dois planos em função da altura do aviário (Y): um plano aproximadamente à altura das aves, a 0,4m (Figuras 5.9 A e 5.10 A); e o outro plano, a 1,5m de altura (Figuras 5.9 B e 5.10 B).

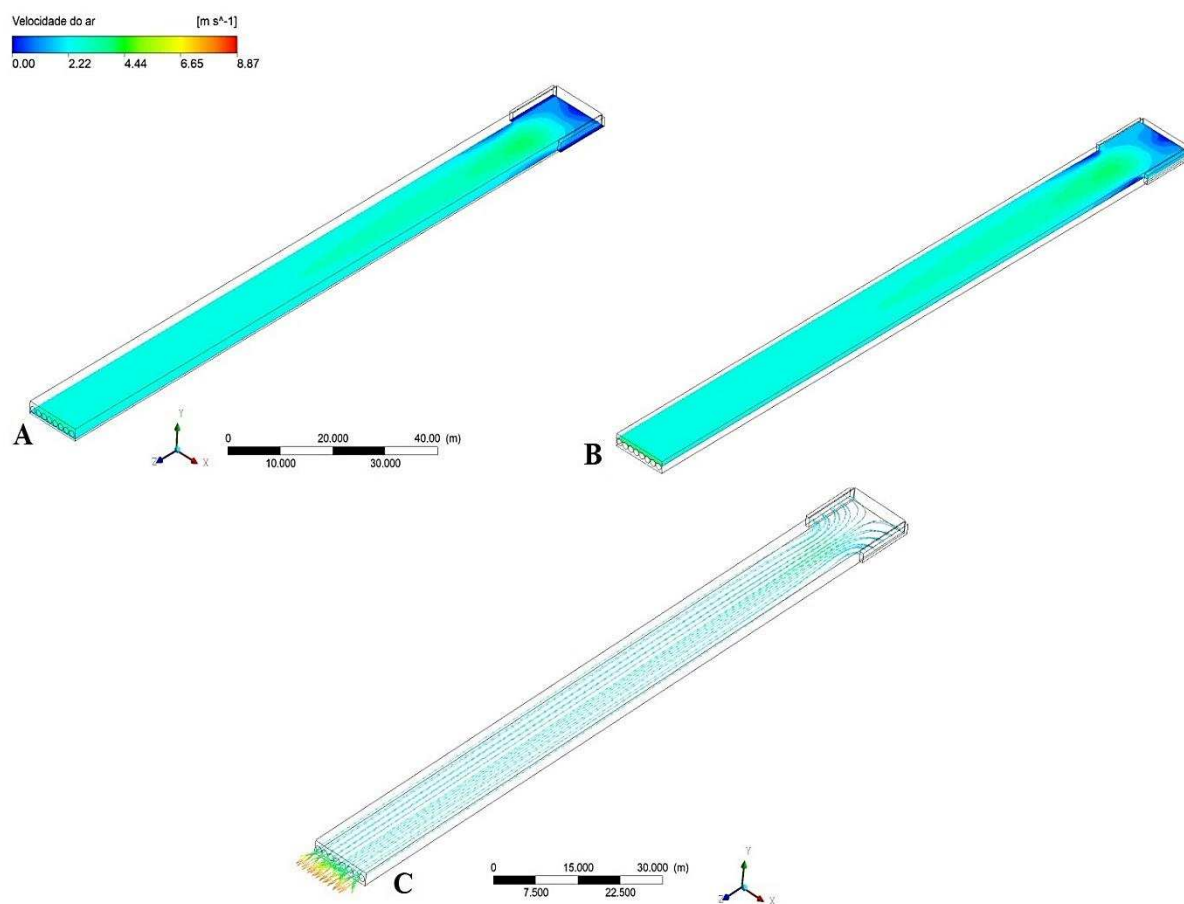


Figura 5.9: Velocidade do ar ( $\text{m s}^{-1}$ ) ao longo do plano ZX no aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos (APNPE), onde: A) contorno de velocidade do ar em  $Y=0,4$  m; B) contorno de velocidade do ar em  $Y=1,5$  m; C) vetor velocidade ao longo do comprimento do aviário.

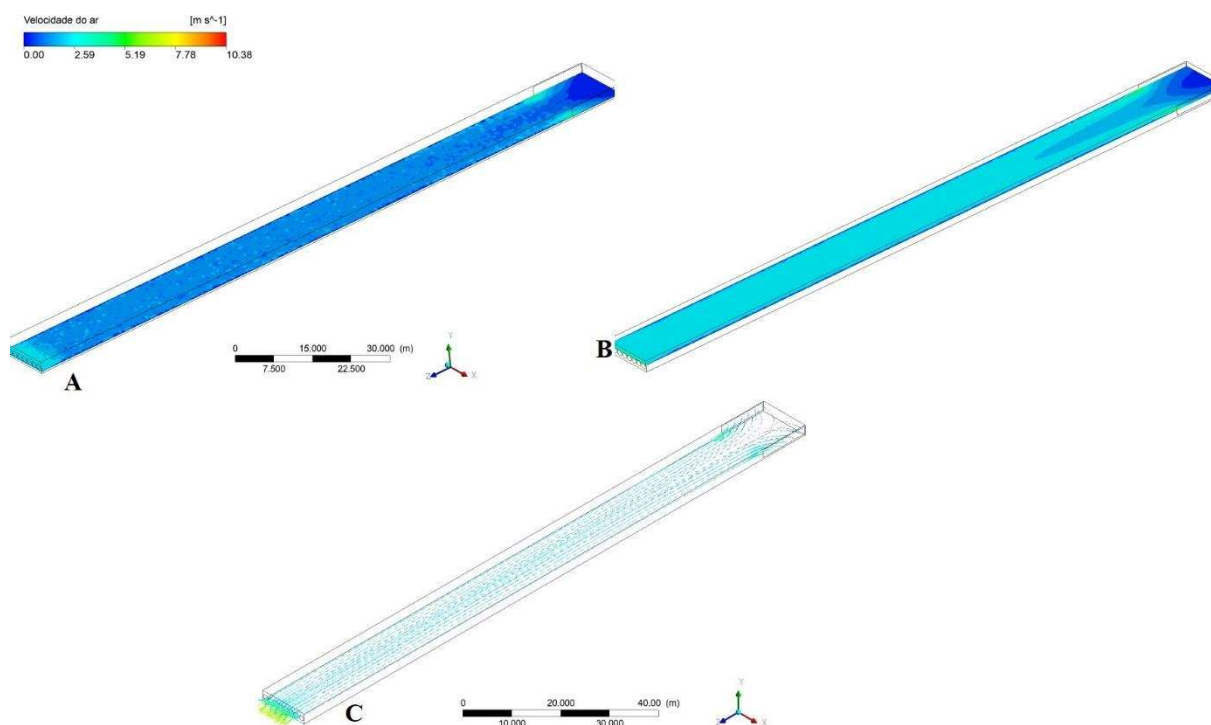


Figura 5.10: Velocidade do ar ( $\text{m s}^{-1}$ ) ao longo do plano ZX no aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores (APNN), onde: A) contorno de velocidade do ar em  $Y=0,4$  m; B) contorno de velocidade do ar em  $Y=1,5$  m; C) vetor velocidade ao longo do comprimento do aviário.

Nas figuras 5.9 (A e B) e 5.10 (A e B) estão representados os gráficos de contorno para a distribuição interna do fluxo de ar, nos dois planos estudados. É possível observar que, próximo à parede oposta aos exaustores, em ambos os planos, uma zona de ar estagnado foi formada. Essa área de estagnação é maior principalmente em níveis mais baixos, próximos ao piso, em virtude da má circulação de ar nessa região. Isso ocorre em função do escoamento natural do fluxo de ar perante as características do sistema de ventilação, uma vez que as entradas de ar localizam-se nas paredes laterais em uma das extremidades do aviário, enquanto os exaustores situam-se na extremidade oposta, originando zonas não atingidas pelo fluxo de ar. Essa é uma característica típica do sistema de ventilação do tipo túnel, como pode ser visto nas Figuras 5.9 C e 5.10 C, por meio de gráficos de vetores de velocidade.

Um gradiente de velocidade do ar foi visualizado ao longo do comprimento do aviário, com velocidades ligeiramente maiores observadas a 1,5 m de altura em comparação ao nível das aves. Essa diferença é particularmente visível no APNN, onde a média de velocidade do ar na região da entrada, no plano inferior, foi de  $0,2 \text{ m s}^{-1}$ ; e no plano superior,  $0,56 \text{ m s}^{-1}$ . Resultados semelhantes foram encontrados por Dhari et al. (2019), ao avaliar o microclima interno de aviário por meio da modelagem de temperatura e velocidade do ar em uma instalação para frangos de corte com ventilação natural. Na análise da distribuição interna de temperatura, foi

observada pouca diferença entre o nível de altura dos frangos e o nível de 1,4m de altura, porém as velocidades do ar foram mais elevadas no plano superior. Os autores afirmam que a presença de aberturas de entrada e saída de ar afetam os padrões do fluxo e, por isso, velocidades mais altas são comumente observadas em alturas correspondentes ao nível das aberturas. Acompanhando a mesma tendência observada por Dhari et al. (2019), para os dois planos abordados no presente estudo, as velocidades do ar mais elevadas foram observadas nas proximidades dos exaustores e nas entradas de ar, enquanto as menores velocidades foram encontradas ao longo dos galpões, nas proximidades das paredes laterais e na região da parede oposta aos exaustores. Comportamento similar também foi constatado por Curi et al. (2017), ao utilizar um modelo CFD para análise do sistema de ventilação em aviários com paredes sólidas.

Em sistemas de ventilação por pressão negativa em modo túnel, de acordo com os estudos de Bustamante et al. (2015), são nítidos três comportamentos distintos do fluxo interno, em função da distribuição da velocidade do ar. O centro do aviário representa a faixa de maior homogeneidade e conforme se aproxima dos exaustores, verifica-se maior heterogeneidade dos valores de velocidade do ar. Além disso, nas proximidades das entradas de ar existe uma região onde a distribuição da velocidade é bastante heterogênea, com valores mais elevados precisamente nas entradas de ar, em contraste com valores muito baixos na zona de ar estagnado (“zona morta”), perto da parede final. Distribuição semelhante foi verificada no APNPE e no APNN, como visto nas Figuras 5.9 e 5.10. Bustamante et al., (2017) afirmam que a heterogeneidade verificada principalmente na zona de entrada de ar é vista como um dos principais problemas em ventilação mecânica unilateral. Em estações quentes, os autores observaram maiores taxas de mortalidade de frangos de corte nessas regiões, onde a ventilação é deficiente.

Por questão de brevidade, a Figura 5.11 exhibe, com mais detalhes, a heterogeneidade na distribuição da velocidade do ar na região dos exaustores apenas para o APNPE, porém é preciso destacar que o mesmo comportamento foi observado para o APNN. Dependendo da localização geográfica e estação do ano, as correntes de ar na zona próxima aos exaustores podem ser fortemente prejudiciais aos animais, afetando seus padrões comportamentais e, conseqüentemente, seu desempenho produtivo. É preciso destacar também que, além das correntes de ar, essa região é caracterizada por maiores concentrações de gases e poeira oriundos de todo o galpão, e em conjunto com altos níveis de velocidade do ar, podem interferir na saúde das aves que permanecem nessa área. A turbulência gerada no centro dos aviários em frente as entradas também resultam em correntes de ar que podem afetar o comportamento e saúde dos animais (CURI et al., 2017). Blakely et al. (2007) e Vigoderis et al. (2010) afirmam

que a presença de correntes de ar, principalmente em dias mais frios, pode interferir no comportamento alimentar e na saúde das aves, comprometendo assim a conversão alimentar e a eficiência produtiva.

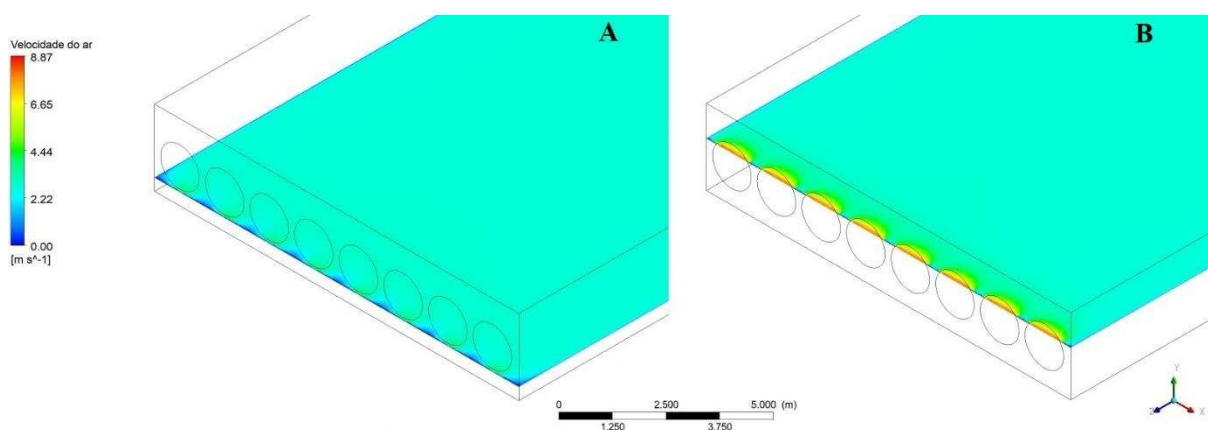


Figura 5.11: Detalhes da velocidade do ar ( $\text{m s}^{-1}$ ) na região próxima aos exaustores, no aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos (APNPE), onde: A) velocidade do ar em  $Y=0,4$  m; B) velocidade do ar em  $Y=1,5$  m.

Da mesma maneira que a velocidade do ar, um gradiente na concentração de amônia pode ser observado ao longo do comprimento dos aviários. Nas figuras 5.12 A e B e 5.13 A e B estão representados aspectos da distribuição de amônia em dois níveis ( $Y=0,4$  m e  $Y=1,5$  m). Nota-se, na região de entrada de ar, a heterogeneidade na distribuição de  $\text{NH}_3$ , especificamente em níveis mais baixos, conforme se aproxima da fonte emissora (cama). Com o escoamento do ar no sentido longitudinal, a amônia é deslocada ao longo do aviário, e, de fato, é previsto que a área próxima a saída de ar apresente os maiores valores de concentração de  $\text{NH}_3$ .

Nas figuras 5.12 C e 5.13 C, é possível observar a variação espacial da concentração de amônia em seções no plano vertical dos aviários. Três seções foram apresentadas, sendo uma na entrada de ar, uma no centro do galpão e a terceira, na zona de saída de ar. Pela distribuição espacial da concentração de amônia representada nas seções no plano vertical nas Figuras 5.12C e 5.13 C, é constatado que, quanto mais próximo ao piso, maiores são os níveis de concentração de amônia. Resultados semelhantes foram observados por Tong et al. (2019). Os autores afirmam que esse comportamento se deve ao fato de que o ar, ao fluir para os níveis mais baixos, carregou  $\text{NH}_3$  em suspensão nas camadas superiores durante o seu percurso, desde a entrada de ar até o nível das aves.

Saraz et al. (2016), ao utilizar as técnicas CFD para modelar um aviário provido de ventilação natural, também observaram maiores concentrações de amônia próximas ao piso,

especialmente na saída de ar. Neste caso, os autores supõem que as baixas velocidades do ar nas regiões das paredes e perto dos pilares podem ter interferido no aumento de concentração de amônia na altura dos frangos, sobretudo na saída de ar.

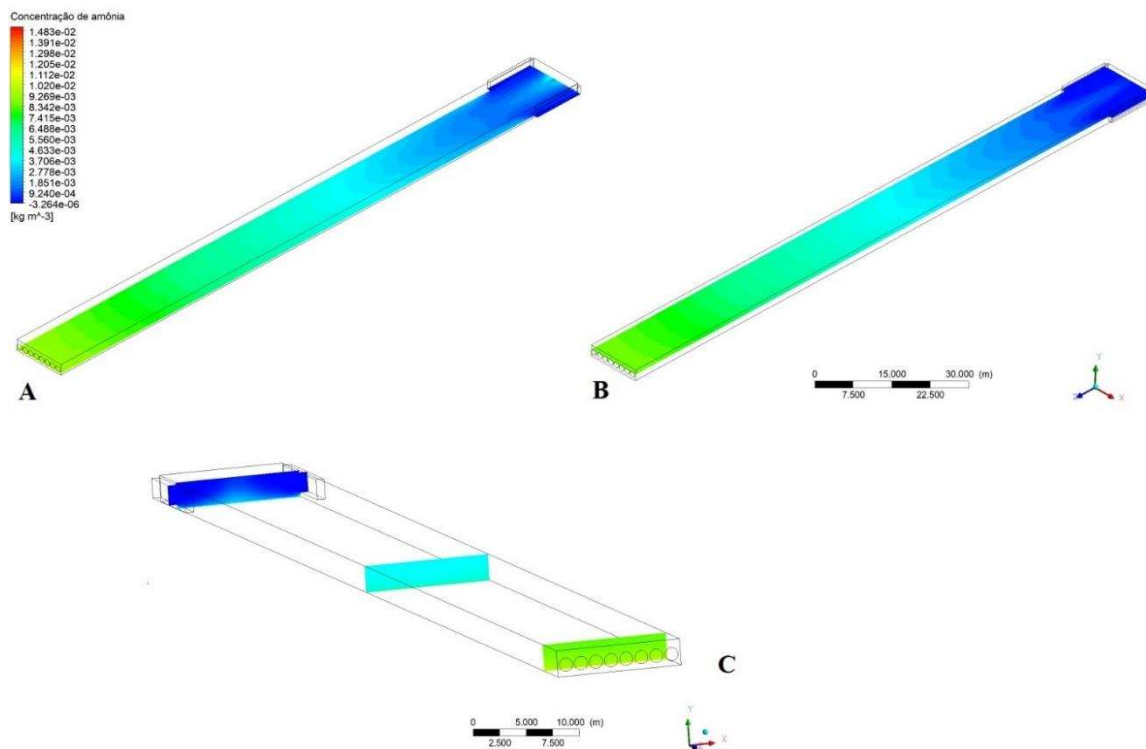


Figura 5.12: Concentração de amônia ( $\text{kg m}^{-3}$ ) nos planos horizontal e vertical do aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos (APNPE), onde: A) gráfico de contorno da concentração de amônia em  $Y=0,4$  m; B) gráfico de contorno da concentração de amônia em  $Y=1,5$  m; C) seções no plano vertical, em  $Z=6$  m;  $Z=75$  m; e  $Z=140$  m.

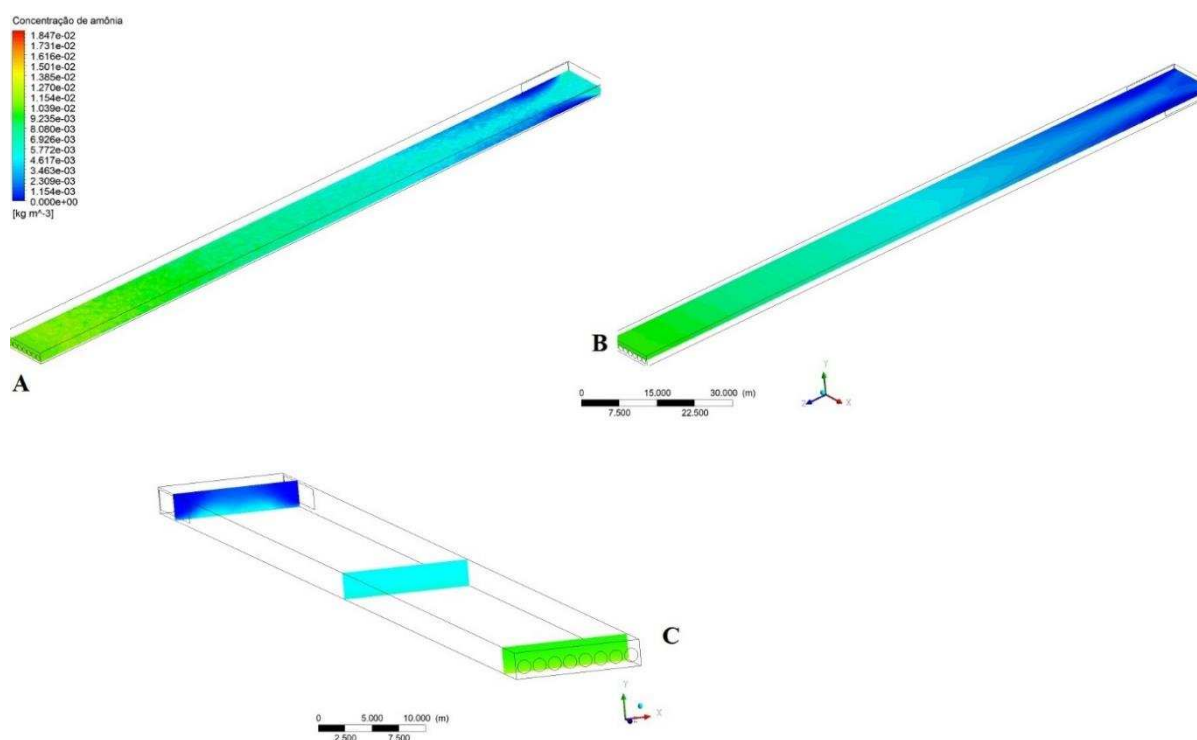


Figura 5.13: Concentração de amônia ( $\text{kg m}^{-3}$ ) nos planos horizontal e vertical do aviário com ventilação por pressão negativa nebulizadores (APNN), onde: A) gráfico de contorno da concentração de amônia em  $Y=0,4$  m; B) gráfico de contorno da concentração de amônia em  $Y=1,5$  m; C) seções no plano vertical, em  $Z = 6$  m;  $Z = 75$  m; e  $Z = 140$  m.

Concentrações relativamente mais altas foram verificadas em zonas de ar estagnado, especialmente em baixas alturas, como no espaço próximo à parede oposta aos exaustores, bem como na área de saída de ar. Na Figura 5.14 está representada a distribuição espacial da concentração de amônia imediatamente na saída de ar dos aviários, no plano XY.

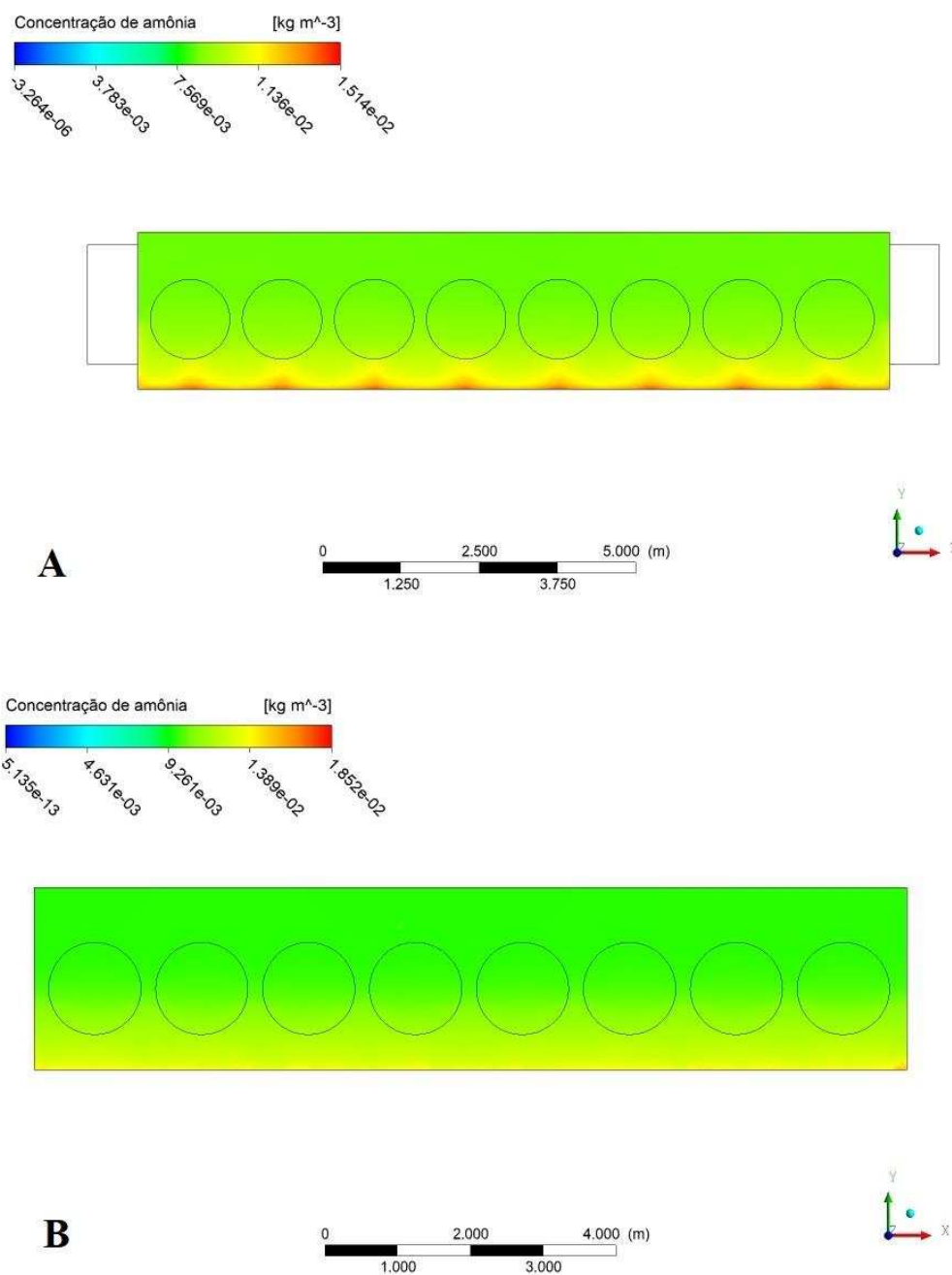


Figura 5.14: Distribuição espacial da concentração de amônia ( $\text{kg m}^{-3}$ ) na saída de ar, no plano XY, onde: A) aviário com ventilação por pressão negativa e painéis evaporativos (APNPE); e B) aviário com ventilação por pressão negativa e nebulizadores (APNN).

É evidente que os níveis mais elevados de amônia encontrados nas proximidades da saída de ar ocorre em virtude das características do escoamento, que leva a um acúmulo e aumento da concentração do gás ao longo da camada de escoamento. O acúmulo de amônia na região de saída de ar, quando em altas concentrações, pode ser nocivo aos animais. Este gás é normalmente detectado pelo homem em concentração próxima a 5 ppm, e a partir de 50 ppm

passa a interferir negativamente no crescimento e na saúde dos animais. A principal região de geração da amônia é na altura das aves (até cerca de 50 cm de altura), onde é realizada a fermentação aeróbia dos dejetos (LIMA et al., 2004). Os efeitos da amônia nas aves são expressivos, uma vez que a exposição a níveis elevados pode ocasionar transtornos como redução de apetite, conjuntivites e susceptibilidade à doenças, prejudicando substancialmente a produtividade dos animais (ZHAO et al., 2015) e afetando a saúde dos trabalhadores. Segundo o *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH, 2003), os limites de exposição a amônia para humanos é de 25 ppm por 8 horas, de 35 ppm por 15 minutos e 50 ppm para exposição de 5 minutos.

Apesar das variações espaciais de velocidade do ar e concentração de amônia observadas nos modelos, é possível afirmar que o ambiente interno ainda se encontra dentro dos limites de concentração de amônia indicados, tanto para as aves quanto para os trabalhadores. Em todas as regiões dos aviários, a concentração máxima verificada no APNPE foi 15 ppm e no APNN, 18 ppm.

## 5.4. CONCLUSÕES

Da forma como foi conduzida esta pesquisa e pelos resultados obtidos, foi possível concluir que:

1) Para as condições implementadas para o escoamento (turbulento, isotérmico e incompressível, em regime permanente), os modelos propostos apresentaram boa acurácia quando resultados de velocidade do ar e concentração de amônia foram comparados estatisticamente com medições diretas realizadas a campo.

2) A distribuição do fluxo de ar e concentração de amônia desuniformes verificadas em algumas áreas das instalações avaliadas podem representar ineficiência do sistema de ventilação e acarretar em problemas ao produtor. O aprimoramento do sistema de ventilação é fundamental para evitar que os animais mantidos nessas regiões sofram algum tipo de estresse térmico, além de reduzir a susceptibilidade à enfermidades, sejam elas direta ou indiretamente relacionadas ao sistema de ventilação. O melhor sistema de ventilação é aquele projetado de acordo com as características climáticas da região onde o aviário será construído.

Uma sugestão para otimizar a diluição e eliminação de amônia para o exterior é a simulação de um novo arranjo de entrada de ar, com pequenas aberturas laterais (nas muretas), próximas ao piso e ao longo do aviário, de modo a evitar que o gás se acumule ao longo do escoamento, e se concentre na região de saída de ar. Consequentemente, espera-se uma melhor qualidade do ar para as aves alojadas nas proximidades dos exaustores.

Considerando-se que a condição de escoamento isotérmico implementada, para fins de simplificação da modelagem, consiste em uma limitação do presente estudo, sugere-se, como recomendação para trabalhos futuros, o aprimoramento e validação de ambos os modelos considerando a transferência de calor e a inclusão e simulações dos gradientes de temperatura do ar. Outra sugestão é comparar a presença/ausência de painéis evaporativos ou nebulizadores. Assim, os projetos e dimensionamento dos sistemas de resfriamento evaporativos poderão ser otimizados. Outra sugestão é a avaliação mais detalhada do ambiente térmico e do comportamento do fluxo de ar no pinteiro, durante a fase inicial de criação, onde a ventilação mínima é realizada por meio das *inlets* do teto. Além disso, é importante propor e avaliar novas configurações de aberturas de entrada e saída de ar em aviários com ventilação tipo túnel, a fim de evitar o acúmulo de amônia na região de saída de ar, visando a melhoria do bem-estar animal, sustentabilidade e rentabilidade da atividade avícola.

## 5.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, P. G.; ABREU, V. M. N. Maximização dos sistemas de ventilação na avicultura. Concórdia: EMBRAPA, CNPSA. 2005.

AMARAL, G. F.; GUIMARÃES, D. D.; NASCIMENTO, J. C. D. O. F.; e CUSTÓDIO, S. Avicultura de postura: estrutura da cadeia produtiva, panorama do setor no Brasil e no mundo e o apoio do BNDES. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, (43), 2016.

ASTM - American Society for Testing Materials. Guide for statistical evaluation of indoor air quality models (D5157-97). 2.ed. West Conshohocken: ASTM, p.68-71, 2002.

BARALDI, D.; MELIDEO, D.; KOTCHOURKO, A.; REN, K.; YANEZ, J.; JEDICKE, O.; ... & MAKAROV, D. Development of a model evaluation protocol for CFD analysis of hydrogen safety issues the SUSANA project. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 11, p. 7633-7643, 2017.

BLAKELY, J. R.; SIMPSON, G.; DONALD, J.; CAMPBELL, J.; e MACKLIN, K. The economic importance of house and ventilation management. **Poult. Sci**, v. 57, p. 1124-1125, 2007.

BUSTAMANTE, E.; GARCÍA-DIEGO, F.; CALVET, S.; TORRES, A. G.; & HOSPITALER, A. Measurement and numerical simulation of air velocity in a tunnel-ventilated broiler house. **Sustainability**, v. 7, n. 2, p. 2066-2085, 2015.

BUSTAMANTE, E.; CALVET, S.; ESTELLÉS, F.; TORRES, A. G.; & HOSPITALER, A. Measurement and numerical simulation of single-sided mechanical ventilation in broiler houses. **Biosystems Engineering**, v. 160, p. 55-68, 2017.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística. Princípios e aplicações**. 2a. ed. [s.l.] Artmed, 2007.

CHANG, J.C.; HANNA, S.R. Air quality model performance evaluation. **Meteorol.Atmosph. Phys.** 87 (1–3), 167–196, 2004.

CASSUCE, D.C; TINÔCO, I. F. F; BAÊTA, F.C; ZOLNIER, S.; CECON, P.R; VIEIRA, M.F.A. Thermal comfort temperature update for broiler chickens up to 21 days of age. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 1, p. 28-36, 2013.

CURI, T. M. D. C.; MOURA, D. J. D.; MASSARI, J. M.; MESQUITA, M.; & PEREIRA, D. F. Computational fluid dynamics (CFD) application for ventilation studies in broiler houses. **Engenharia Agrícola**, v. 37, n. 1, p. 1-12, 2017.

DHAHRI, M.; AOUNET, H.; MHAMDI, N. CFD analysis of the effect of uniformly sheared airflow on natural ventilation in building. **International Journal of Ambient Energy**, p. 1-12, 2019.

DU, L.; YANG, L.; YANG, C.; DOMINY, R.; HU, C.; DU, H.; ... & JIANG, X. Investigation of bio-aerosol dispersion in a tunnel-ventilated poultry house. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 167, p. 105043, 2019.

FERREIRA, R. A. Maior produção com melhor ambiente - para aves, suínos e bovinos. 3a edição ed. Viçosa: Aprenda Fácil. 2016.

FRANCO, A., VALERA, D. L., PENA, A., & PÉREZ, A. M. Aerodynamic analysis and CFD simulation of several cellulose evaporative cooling pads used in Mediterranean greenhouses. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 76, n. 2, p. 218-230, 2011.

FREITAS, L.W.; ORRICO, A.C.A.; GARCIA, R.G; SCHWINGEL, A.W.; CALDARA, F.R.; SILVA E.B.A. Volatilização de amônia em diferentes tipos de cama de frango. **In: Conferência facta de ciência e tecnologia avícolas**, 2009, Porto Alegre. Anais dos trabalhos de pesquisa José Maria Lamas de Silva. [Campinas]: FACTA.

HADJAB, M.; MEDJAHED, B. Comparison and statistical validation of a model of a photovoltaic module. **International Journal of Energy**, 6(4), 133-140, 2012.

HAJMOHAMMADI, M. R.; CAMPO, A.; NOURAZAR, S. S.; OSTAD, A. M. Improvement of forced convection cooling due to the attachment of heat sources to a conducting thick plate. **Journal of Heat Transfer: ASME**, 135, 12, 2013.

HERNANDEZ, R. O.; SARAZ, J. A. O.; OLIVEIRA, K. S.; ARISTIZABAL, I. D.; ARANGO, J. C. Computational fluid dynamics assessment of effect of different openings configurations on the thermal environment of a facility for coffee wet processing. **Journal of Agricultural Engineering**, 51(1), 21-26, 2020.

LIMA, A. M. C.; NÄÄS, I. A.; BARACHO, M. S.; MIRAGLIOTTA, M. Y. Ambiente e bem-estar. In: MENDES, AA; NÄÄS, IA; MACARI, M. **Produção de frangos de corte**. Campinas: FACTA, 356 p., 2004.

MATOS, A.T. Qualidade do meio físico ambiental: práticas de laboratório. **Viçosa: Ed. UFV**, 2012. 150p.

MOSTAFA, E.; LEE, I.B.; SONG, S.H.; KWON, K.S.; SEO, I.H.; HONG, S.W.; HAN, H.T. Computational fluid dynamics simulation of air temperature distribution inside broiler building fitted with duct ventilation system. **Biosystems Engineering** 112, 293–303, 2012.

NAWAB, A.; IBTISHAM, F.; LI, G.; KIESER, B.; WU, J.; LIU, W., ... & AN, L. Heat stress in poultry production: Mitigation strategies to overcome the future challenges facing the global poultry industry. **Journal of thermal biology**, v. 78, p. 131-139, 2018.

NIOSH – National Institute for occupational safety and health. Versão eletrônica 2003. Disponível em: <http://cdc.gov/niosh/pe188/7664-41.html>. Acesso em: 06.04.2020.

SARAZ, J. A.; MARTINS, M. A.; MARÍN, O. L. Z.; DAMASCENO, F. A.; VELASQUEZ, H. J. C. Una revisión acerca de la dinámica de fluidos computacionales (CFD) en instalaciones avícolas. **Dyna**, v. 79, n. 175, p. 142-149, 2012.

SARAZ, J. A.; MARTINS, M. A.; ROCHA, K. S. O.; MACHADO, N. S.; VELASQUES, C.; JOSÉ, H. Use of computational fluid dynamics to simulate temperature distribution in broiler houses with negative and positive tunnel type ventilation systems. **Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica**, v. 16, n. 1, p. 159-166, 2013.

SARAZ, J. A.; TINOCO, I.F.F.; GATES, R. S.; ROCHA, K. S. O.; MARÍN, O. L. Z. A simple methodology to measure ammonia flux generated in naturally ventilated poultry houses. **Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias**, v. 28, n. 1, p. 3-12, 2015.

SARAZ, J. A. O., TINÔCO, I. D. F. F., ROCHA, K. S. O., MENDES, L. B., & NORTON, T. A CFD based approach for determination of ammonia concentration profile and flux from poultry houses with natural ventilation. **Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín**, v. 69, n. 1, p. 7825-7834, 2016.

SARAZ, J. A., ROCHA, K. S., DAMASCENO, F. A., TINOCO, I. F., OSORIO, R., & TOBÓN, J. C. A CFD approach to assess the effects of different opening combinations in poultry houses. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 12, p. 852-857, 2017.

SILVA, E. G. D., SANTOS, A. C. D., FERREIRA, C. L. S., SOUSA, J. P. L. D., ROCHA, J. M. L. D., SILVEIRA JÚNIOR, O. Spatial variability of the environmental characteristics and weight of broilers in shed negative ventilation. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 14, n. 1, p. 132-141, 2013.

SOUSA, F. C., TINÔCO, I. F. F., PAULA, M. O., SILVA, A. L., SOUZA, C. F., BATISTA, F. J. F., BARBARI, M. Medidas para minimizar a emissão de amônia na produção de frangos de corte: revisão. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 10, n. 1, p. 51-61, 2016.

TABASE, R. K., BAGCI, O., DE PAEPE, M., AARNINK, A. J., & DEMEYER, P. CFD simulation of airflows and ammonia emissions in a pig compartment with underfloor air distribution system: Model validation at different ventilation rates. **Computers and Electronics in Agriculture**, 171, 105297, 2020.

TONG, X.; HONG, S.W.; ZHAO, L. CFD modelling of airflow pattern and thermal environment in a commercial manure-belt layer house with tunnel ventilation. **Biosystems engineering**, v. 178, p. 275-293, 2018.

TONG, X.; HONG, S.W.; ZHAO, L. CFD modeling of airflow, thermal environment, and ammonia concentration distribution in a commercial manure-belt layer house with mixed ventilation systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 162, p. 281-299, 2019.

VIALI, L. **Testes de hipóteses não paramétricos**. Porto Alegre. Departamento de Estatística – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

VIGODERIS, R. B.; CORDEIRO, M. B.; TINÔCO, I. F. F.; MENEGALI, I.; SOUZA JÚNIOR, J. D.; e HOLANDA, M. D. Avaliação do uso de ventilação mínima em galpões avícolas e de sua influência no desempenho de aves de corte no período de inverno. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, n. 6, p. 1381-1386, 2010.

VILELA, M. O.; GATES, R. S.; SOUZA, C.F.; TELES JUNIOR, C.G S.; ZANETONI, H.H.R.; ALZATE, N.A.R. Utilização de fluidodinâmica computacional (CFD) na ambiência de instalações avícolas. In: Jaqueline de Oliveira Castro; Patrícia Ferreira Ponciano Ferraz. (Org.). **O papel da bioengenharia na segurança alimentar frente às mudanças climáticas**. 1ed.Lavras: v. 1, p. 375-384, 2019.

XIN, H.; BERRY, I. L.; TABLER, G. T.; BARTON, T. L. Temperature and humidity profiles of broiler houses with experimental conventional and tunnel ventilation systems. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 10, n. 4, p. 535-542, 1994.

ZHAO, Y.; SHEPHERD, T.A.; LI, H.; XIN, H. Environmental assessment of three egg production systems—Part I: Monitoring system and indoor air quality. **Poultry science**, v. 94, n. 3, p. 518-533, 2015.

## ANEXO A

### CERTIFICADO

A Comissão de Ética no Uso de Animais - CEUA/UFV certifica que o processo nº 71/2017, intitulado **“Comportamento do fluxo de ar, taxa de emissão de amônia e desempenho produtivo de frangos de corte em aviários com sistema de ventilação por pressão negativa em modo túnel e sistema híbrido”**, coordenado pelo professor Richard S. Gates do Departamento de Engenharia Agrícola, está de acordo com a Legislação vigente (Lei Nº 11.794, de 08 de outubro de 2008), as Resoluções Normativas editadas pelo CONCEA/MCTI, a DBCA (Diretriz Brasileira de Prática para o Cuidado e a Utilização de Animais para Fins Científicos e Didáticos) e as Diretrizes da Prática de Eutanásia preconizadas pelo CONCEA/MCTI, portanto sendo aprovado por esta Comissão em 19/04/2018, com validade de 12 meses.

### CERTIFICATE

The Ethic Committee in Animal Use/UFV certify that the process number 71/2017, named **“Behavior of airflow, ammonia emission rate and productive performance of broiler chickens in aviaries with negative pressure ventilation system in tunnel mode and hybrid system”**, is in agreement with the actual Brazilian legislation ( Lei Nº 11.794, 2008), Normative Resolutions edited by CONCEA/MCTI, the DBCA (Brazilian Practice Guideline for the Care and Use of Animals for Scientific Purposes and Teaching) and the Guidelines of Practice the Euthanasia recommended by CONCEA/MCTI therefore being approved by the Committee on April 19, 2018 valid for 12 months.

  
Prof. Atima Clemente Alves Zuanon

Presidente

Comissão de Ética no Uso de Animais – CEUA/UFV