



**MARCELO BAHUTI**

**MODELAGEM DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM  
GALINHAS POEDEIRAS SUBMETIDAS A DIFERENTES  
DESAFIOS TÉRMICOS**

**LAVRAS – MG**

**2020**

**MARCELO BAHUTI**

**MODELAGEM DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM GALINHAS POEDEIRAS  
SUBMETIDAS A DIFERENTES DESAFIOS TÉRMICOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Construções, Ambiente e Tratamento de Resíduos, para a obtenção do título de Mestre.

Dr. Tadayuki Yanagi Junior  
Orientador

Dr. Alessandro Torres Campos  
Coorientador

**LAVRAS – MG**

**2020**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Bahuti, Marcelo.

Modelagem da transferência de calor em galinhas poedeiras  
submetidas a diferentes desafios térmicos/ Marcelo Bahuti. - 2020.  
61 p.

Orientador(a): Tadayuki Yanagi Junior.

Coorientador(a): Alessandro Torres Campos.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2020.

Bibliografia.

1. Ambiente Térmico. 2. Avicultura. 3. Balanço de Calor. 4.  
Construções e Ambiência. 5. Modelagem matemática. 6.  
Termorregulação. I. Yanagi Junior, Tadayuki. II. Campos,  
Alessandro Torres. III. Título.

**MARCELO BAHUTI**

**MODELAGEM DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM GALINHAS POEDEIRAS  
SUBMETIDAS A DIFERENTES DESAFIOS TÉRMICOS**

**HEAT TRANSFER MODELING IN LAYING HENS SUBJECTED TO DIFFERENT  
THERMALS CHALLENGES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Construções, Ambiente e Tratamento de Resíduos, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 08 de outubro de 2020.

Dr. Alessandro Torres Campos  
Dr. Flávio Alves Damasceno UFLA  
Dra. Patrícia Ferreira Ponciano Ferraz Dr.  
Dr. Yamid Fabián Hernández Julio

UFLA  
UFLA  
UFLA  
UNISINÚ (Colômbia)

Prof. Dr. Tadayuki Yanagi Junior  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2020**

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), ao Departamento de Engenharia (DEG) e Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) pela oportunidade concedida para a realização do mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado que me permitiu conduzir ativamente este projeto (o presente trabalho foi realizado com apoio da CAPES – Código de Financiamento 001).

Ao professor e orientador, Tadayuki Yanagi Junior, pela dedicada orientação, ensinamentos, conselhos, amizade e confiança, que se estendem desde à graduação.

Ao amigo e professor Lucas Henrique Pedrozo Abreu, pelos ensinamentos, conselhos e principalmente por me incentivar e introduzir, ainda como bolsista de graduação, a essa linha de pesquisa e a equipe do professor Tadayuki.

Aos funcionários do PPGEA/UFLA, em especial a Helem por me auxiliar sempre que possível.

Aos colegas e amigos de departamento, Bruna Pontara, Daniel Soares, Jacqueline Cardoso, Maria Alice, Maria Teresa, Wellington Washington e Rômulo Gandia, pelo convívio, contribuições, incentivos e trocas de experiências.

Aos meus pais, Moises Bahuti e Sandra Moreira da Silva, pelo amor e apoio incondicional, por deixarem de lado muito dos seus planos a fim de dedicar seus esforços aos meus estudos!

À Fernanda, pelo companheirismo, amor, compreensão, apoio e incentivo em todos os momentos.

Ao meu irmão Frederico Bahuti, pelas colaborações que contribuíram para essa conquista.

Sobretudo à Deus, que conduz meus passos para o melhor caminho, pela oportunidade de poder vivenciar esse crescimento profissional e pessoal.

## RESUMO GERAL

Objetivou-se, com o presente estudo, desenvolver um balanço de calor em galinhas poedeiras e analisar o seu desempenho, além de simular e verificar a influência das variáveis térmicas sobre as partições de calor sensível e latente. Os dados usados no desenvolvimento do modelo matemático são oriundos de um experimento conduzido previamente em túneis de vento climatizados, no qual 90 galinhas com 28 semanas de idade foram submetidas à combinação fatorial de cinco temperaturas de bulbo seco do ar ( $t_{ar}$ ; 20, 24, 28, 32 e 36 °C), dois níveis de umidade relativa (UR; 40 e 60%) e três velocidades do ar ( $V_{ar}$ ; 0,2; 0,7 e 1,4  $m \cdot s^{-1}$ ), totalizando 30 desafios térmicos com três repetições cada. Para o modelo de transferência de calor considerou-se as partições dos calores transferidos por condução no corpo da ave ( $Q_{ave}$ ), por convecção ( $Q_{Conv}$ ), por radiação ( $Q_{Rad}$ ) e pelo trato respiratório ( $Q_{Resp}$ ). Assim, foram coletados dados referentes às variáveis térmicas, às temperaturas cloacal e superficial, frequência respiratória (FR) e massa corporal das aves, além da temperatura da vizinhança (estrutura dos túneis). Primeiramente foram realizadas ANAVA e MANOVA, a fim de ajustar equações para a FR e o coeficiente global de transferência de calor por condução no corpo da ave (U), respectivamente. Foram gerados 24 modelos com diferentes configurações de entrada para os coeficientes de transferência de calor por convecção ( $h_{conv}$ ) e U. A definição e validação da melhor configuração foi realizada comparando os valores de temperatura cloacal preditos aos obtidos experimentalmente. Como resultado, o modelo mostrou-se adequado para análise da interação entre ave e ambiente, sendo que, foi possível constatar que a complexidade na determinação do U e  $h_{conv}$  interfere no desempenho do mesmo. A partir do teste t de Student ( $p < 0,05$ ) e dos indicadores estatísticos, verifica-se que valores constantes para esses parâmetros não são recomendados. O U mostrou-se ser influenciado pelos diferentes níveis de  $t_{ar}$ , UR e  $V_{ar}$ . Para as condições estudadas, a perda de calor latente apresentou maior contribuição que os meios sensíveis a partir da temperatura de 32,9 °C. O aumento da  $V_{ar}$  eleva as taxas de  $Q_{ave}$  e  $Q_{Conv}$  e não altera o  $Q_{Resp}$ , no entanto, são necessários mais estudos sobre a influência no  $Q_{Rad}$ . Destaca-se que o modelo é acurado para predição da temperatura cloacal, pois permite simulações do processo de termorregulação das aves e auxilia na identificação de possíveis estratégias para mitigação do estresse térmico.

**Palavras-chave:** Ambiente térmico. Avicultura. Balanço de Calor. Construções e Ambiência. Modelagem Matemática. Termorregulação.

## GENERAL ABSTRACT

This study aimed at developing a heat balance model in laying hens and analyzing its performance besides simulating and verifying the influence of the thermal variables on sensitive and latent heat partitions. The data used in the development of the mathematical model was from an previously experiment carried out in climate-controlled wind tunnels in which ninety laying hens aged 28 weeks were submitted to the factorial combination of five dry-bulb temperatures ( $t_{\text{air}}$ : 20, 24, 28, 32 and 36 °C), two levels of relative humidity (RH: 40 and 60%), and three air velocities ( $V_{\text{air}}$ : 0.2, 0.7 and 1.4  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) totaling 30 thermal challenges with three replicates each. For the heat transfer model, the partitions of heat transferred to the bird's body through conduction ( $Q_{\text{bird}}$ ), convection ( $Q_{\text{Conv}}$ ), radiation ( $Q_{\text{Rad}}$ ) and respiratory tract ( $Q_{\text{Resp}}$ ) were taken into account. Thus, data from thermal variables, cloacal and surface temperatures, respiratory rate (RR) and body weight of birds as well as the surrounding temperature (tunnel frame) were collected. Firstly, ANOVA and MANOVA were performed in order to adjust equations to the RR and the overall heat transfer coefficient by conduction in the bird's body ( $U$ ), respectively. Twenty-four models using different input configurations for the convective heat transfer coefficient ( $h_{\text{conv}}$ ) and  $U$  were determined. The definition and validation of the best configuration were performed by comparing the predicted cloacal temperature values to those obtained experimentally. As a result, the model has proven its suitability for analyzing the interaction between the bird and the environment, and the complexity in determining  $U$  and  $h_{\text{conv}}$  interferes with its performance. Based on Student's t-test ( $p < 0.05$ ) along with statistical indicators, constant values for such parameters are not recommended.  $U$  was affected by different levels of  $t_{\text{ar}}$ , RH and  $V_{\text{ar}}$ . For the conditions researched, the latent heat loss presented a larger contribution than the sensitive ways after 32.85 °C temperature. The increase of  $V_{\text{ar}}$  raises  $Q_{\text{bird}}$  and  $Q_{\text{Conv}}$  rates but it does not change the  $Q_{\text{Resp}}$ , however, further studies about its influence on  $Q_{\text{Rad}}$  are needed. It is noteworthy that the model is accurate to predict the cloacal temperature, once it allows simulations of the birds' thermoregulation process and helps in the identification of possible strategies for mitigating thermal stress.

**Keywords:** Thermal Environment. Aviculture. Heat Balance. Structures and Environment. Mathematical Modeling. Thermoregulation.

## LISTA DE FIGURAS

### PRIMEIRA PARTE

Figura 1 – Comportamento dos mecanismos de troca de calor da ave com o meio em função da temperatura. ....27

### SEGUNDA PARTE – ARTIGO

Figure 1 – Respiratory rate as a function of air temperature. ....48

Figure 2 – Profile of overall heat transfer coefficient by conduction in the bird's body ( $U$ ), obtained by Eq. (26), depending on temperature ( $t_{air}$ ) and air velocity ( $V_{air}$ ), for relative air humidity (RH) of (a) 40% and (b) 60% .....49

Figure 3 – Profile of the different equations for the overall heat transfer coefficient by conduction in the bird's body ( $U$ ) as a function of the air temperature ( $t_{air}$ ). .....50

Figure 4 – Profile of heat partitions (transferred in the bird's body,  $Q_{bird}$ ; by convection,  $Q_{Conv}$ ; by radiation,  $Q_{Rad}$  and; by the respiratory tract,  $Q_{Resp}$ ), as a function of different air velocities ( $V_{air}$ ), for the conditions of (a) 24 °C and 40% relative humidity (RH), (b) 24 °C and 60% RH, (c) 36 °C and 40% RH and (d) 36 °C and 60% RH.....55

Figure 5 – Partitioning of sensible heat (convection and radiation) and latent (breathing) for laying hens subjected to different air temperatures ( $t_{air}$ ). .....56



## LISTA DE ABREVIATURAS, SÍGLAS E SÍMBOLOS

PCA	Análise de componentes principais
ANOVA	Análise de variância
MANOVA	Análise multivariada de variância
$A_s$	Área superficial da ave ( $m^2$ )
$C_p$	Calor específico à pressão constante ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )
$\lambda$	Calor latente da vaporização da água ( $J \cdot g^{-1}$ )
$Q_{Resp}$	Calor latente transferido pelo trato respiratório da ave (W)
$Q_{bird}$	Calor transferido por condução do núcleo corporal da ave à superfície (W)
$Q_{Conv}$	Calor transferido por convecção (W)
$Q_{Rad}$	Calor transferido por radiação (W)
$R^2$	Coefficiente de determinação
$h_{conv}$	Coefficiente de transferência de calor por convecção ( $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ )
$h_{conv\_sphere}$	Coefficiente de transferência de calor por convecção em um corpo esférico ( $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ )
U	Coefficiente global de transferência de calor por condução no corpo da ave ( $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ ).
$\kappa$	Condutividade térmica do ar ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ )
CRD	Delineamento inteiramente casualizado
$\rho$	Densidade ( $kg \cdot m^{-3}$ )
d	Dimensão característica do corpo da ave (m)
Eq(s).	Equação(ões)
$\varepsilon$	Emissividade
MAE	Erro absoluto médio
MSE	Erro quadrático médio
MAPE	Erro percentual absoluto médio (%)
Fig.	Figura
FR e RR	Frequência respiratória das aves ( $movimento \cdot minuto^{-1}$ )
$m_b$	Massa corporal das aves (kg ou g)
e	Número de Euler
Nu	Número de Nusselt

$P_R$	Número de Prandtl
$R_E$	Número de Reynolds
$P_{ws}$	Pressão do vapor saturado (kPa)
$P_w$	Pressão parcial do vapor de água à temperatura do ar (kPa)
RMSE	Raiz do erro quadrado médio
$W$	Razão de mistura ( $\text{kg de água} \cdot \text{kg de ar seco}^{-1}$ )
$t_{clo}$	Temperatura cloacal ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{surd}$	Temperatura da vizinhança (K)
$t_{air}$	Temperatura de bulbo seco do ar ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{air}$	Temperatura de bulbo seco do ar (K)
$T_{exh}$	Temperatura do ar expirado pela ave (K)
$t_{surf}$	Temperatura superficial da ave ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{surf}$	Temperatura superficial da ave (K)
$\varphi_A$	Umidade absoluta do ar atmosférico ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )
$\varphi_E$	Umidade absoluta do ar expirado pela galinha ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )
RH	Umidade relativa do ar (%)
$V_{air}$	Velocidade do ar ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
$V_{resp}$	Ventilação respiratória ( $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ )
$\nu$	Viscosidade cinemática do ar ( $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ )
$\mu$	Viscosidade dinâmica ( $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ )

## SUMÁRIO

	<b>PRIMEIRA PARTE .....</b>	<b>12</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1</b>	<b>Ambiente de criação .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Influência da temperatura do ar .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Influência da umidade relativa do ar.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Influência da ventilação .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>Mecanismos de termorregulação das aves .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Transferência de calor por condução no corpo da ave .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Transferência de calor por convecção .....</b>	<b>24</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Transferência de calor por radiação.....</b>	<b>25</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Transferência de calor por evaporação respiratória.....</b>	<b>26</b>
<b>3</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>31</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>32</b>
	<b>SEGUNDA PARTE – ARTIGO .....</b>	<b>38</b>
	<b>A NOVEL HEAT TRANSFER MODEL USING COMPLEX INPUT VARIABLES TO PREDICTING ACCURATELY HEN’S CORE TEMPERATURE .....</b>	<b>39</b>

## PRIMEIRA PARTE

### 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, devido à maior acessibilidade às informações, os hábitos alimentares dos brasileiros têm se tornado mais saudáveis. Em decorrência dessas mudanças, tem-se observado a crescente demanda pela produção de ovos, por constituírem fonte proteica de qualidade. Ademais, o menor custo em relação às outras fontes de proteína de origem animal, possibilita o enriquecimento das dietas das pessoas que possuem baixa renda.

Em consonância ao atendimento desta demanda, o aprimoramento da genética das aves, da nutrição, do manejo e da sanidade, tem propiciado às aves alcançarem o máximo potencial produtivo. Entretanto, o potencial genético das aves pode não ser atingido caso o ambiente térmico onde as aves são criadas não seja considerado ao longo do processo de produção.

Assim, torna-se imperativo, o fornecimento de condições adequadas de ambiente acústico, aéreo, lumínico e térmico às aves. Em relação ao ambiente térmico, ressalta-se que as galinhas poedeiras são animais homeotérmicos, portanto, buscam o equilíbrio térmico com o meio via mecanismos de troca de calor para manterem-se com temperatura corporal dentro dos limites fisiológicos que caracterizam o conforto.

Dessa forma, quando as condições térmicas em que as aves estão alojadas ultrapassam os limites da faixa termoneutra (zona de conforto), a capacidade dos animais em dissipar ou reter calor é reduzida, ocasionando maior necessidade de energia metabólica para a manutenção da temperatura corporal, e conseqüentemente, resulta em decréscimo na produtividade e na qualidade dos ovos.

Considerando que a atividade de produção de ovos tem se tornado cada vez mais competitiva, é fundamental buscar ao máximo o uso de recursos naturais para manter as aves dentro de ambientes confortáveis. Assim, devido à posição geográfica do Brasil, a maioria dos sistemas de criação podem se beneficiar dos recursos climáticos naturais, reduzindo os custos de produção e tornando-se mais sustentáveis (economicamente e ambientalmente).

Entretanto, as variações espaço-temporais das variáveis térmicas (temperatura, umidade relativa, velocidade do ar e radiação térmica) no interior dos aviários, estabelecem ajustes constantes nas práticas de manejo, visando eliminar ou mitigar os efeitos deletérios do desconforto térmico, como, por exemplo, pelo aumento da dissipação de calor.

Neste contexto, a interação entre animal e ambiente é determinante no sucesso da produção avícola e deve ser considerada ao longo do processo produtivo. Assim, a

determinação das transferências de calor e massa entre as aves e o ambiente circunvizinho é fundamental para a compreensão da termorregulação, permitindo o aprimoramento do projeto e do manejo das instalações e equipamentos. Por sua vez, o estabelecimento de condições de conforto térmico, um dos pré-requisitos para que as aves estejam em condições de bem-estar, pode propiciar aumento de produtividade e de saúde destes animais.

Desse modo, faz-se necessário meios que promovam o aperfeiçoamento da estimativa do equilíbrio térmico de galinhas poedeiras. Nesse aspecto, a modelagem matemática possui aplicabilidade para auxiliar a predição da real condição fisiológica dos animais frente a diferentes condições climáticas, estabelecendo uma avaliação, em tempo real, das exigências térmicas das poedeiras e as possíveis modificações que podem ser realizadas no microclima para a manutenção do potencial produtivo.

Portanto, objetivou-se com o presente trabalho, avaliar o comportamento dos mecanismos de transferência de calor de galinhas poedeira com o ambiente de criação, frente a diferentes condições climáticas de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Foi realizada uma revisão de literatura sobre transferência de calor entre ave e ambiente, abordando os fatores climáticos que influenciam o comportamento e o desempenho dos animais, assim como a atuação dos diferentes mecanismos de transferência de calor.

### 2.1 Ambiente de criação

O estresse representa a reação biológica do organismo da galinha a estímulos que perturbam seu equilíbrio fisiológico normal ou homeostase. Assim, o estresse será térmico caso haja desequilíbrio entre a quantidade de energia produzida pelo animal e a quantidade de calor que flui do corpo do animal para o ambiente (LARA; ROSTAGNO, 2013; OMRAN; NEGM, 2020). Por sua vez, o conforto térmico é o estado da ave em que ocorre harmonia com o ambiente de criação, no qual o animal não perde ou ganha energia na forma de calor para o ambiente.

As aves conseguem manter sua temperatura corporal relativamente constante ou com mínima variação, mesmo sobre determinadas modificações térmicas do ambiente de criação, e por isso são categorizadas como animais homeotérmicos. A faixa de amplitude térmica que mantém a taxa metabólica da ave em níveis mínimos é chamada de zona termoneutra. Assim, as galinhas devem ser alojadas e gerenciadas em ambiente confortável (termoneutro), para que as mesmas possam manter um equilíbrio térmico com gasto mínimo de energia metabólica.

Devido à localização geográfica e à vasta extensão territorial, o Brasil possui uma diversidade climática que deve ser considerada ao escolher a linhagem, procurando aquela que melhor se adapte às condições ambientais do local. Tal possibilidade, ocorre em virtude dos avanços genéticos alcançados nas últimas décadas, que além de tornarem as aves mais resistentes às adversidades térmicas, também proporcionaram animais mais eficientes, obtendo produtos de baixo custo e alta qualidade, aumentando assim, a competitividade do mercado.

Entretanto, perdas econômicas irreversíveis podem ser resultantes de mudanças repentinas de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, bem como, do ajuste inadequado dessas variáveis (ANDRADE, R. et al., 2019; MORETTI et al., 2020). Além do mais, com o cenário climático em mudança, a frequência e a duração da exposição das aves a estressores abióticos e bióticos aumentam (OMRAN; NEGM, 2020), intensificando o estresse. Desse modo, antecipar-se às variações do microclima de alojamento e ofertar condições em que

o ambiente não seja desconfortável às galinhas poedeiras e aos trabalhadores é o grande desafio da ambiência.

Neste contexto, melhorias no projeto de habitação para as aves e no controle do microclima em seu interior auxiliam enfrentar o estresse térmico e mitigar o declínio de desempenho, devendo ocorrer de forma economicamente viável visando à sustentabilidade econômica do empreendimento. Portanto, a compreensão das respostas fisiológicas e produtivas, frente aos fatores climáticos, é requerida para auxiliar na tomada de decisão sobre o tipo de estratégia que deve ser aplicada para gerenciar o estresse (OMRAN; NEGM, 2020).

### **2.1.1 Influência da temperatura do ar**

O sistema endócrino, que controla o metabolismo, o crescimento e a reprodução das galinhas, varia em função das condições ambientais às quais estão expostas, impactando diretamente a produção e bem-estar (LARA; ROSTAGNO, 2013; HAMDY, 2020). Desse modo, a elevada temperatura é um dos estressores ambientais mais importantes que desafiam a produção de aves em todo o mundo.

A faixa de conforto para galinhas poedeiras em fase de postura situa-se em torno de 23 °C (HASSAN et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2014; SOLIMAN; SAFWAT, 2020) e a relação entre temperatura e nutrição deve ser analisada, visto que as aves diminuem a ingestão de ração em ambientes quentes para reduzir a produção de calor a partir da digestão e metabolismo energético, desencadeando uma série de reações que afetam negativamente a nutrição e produtividade da mesma (MELO et al., 2016).

De acordo com Saeed et al. (2019), a partir de 20 °C, cada aumento de 1 °C na temperatura do ar, acarreta diminuição de 1,5% na ingestão de alimentos, mas o consumo de água permanece normal. Por sua vez, Soliman e Safwat (2020), afirmam que em temperaturas acima de 30 °C, o consumo de ração e a produção de ovos são reduzidos em 5% e 1,5%, respectivamente, também para cada aumento de 1 °C. Contudo, tanto Saeed et al. (2019) quanto Soliman e Safwat (2020), não informaram os limites superiores de temperatura do ar no qual as respostas se mantêm com esses comportamentos lineares.

Nesse aspecto, segundo Souza Junior (2014), o estresse térmico além de afetar negativamente a termorregulação, reduz a qualidade da casca de ovo de galinhas poedeiras. Tal fato ocorre à medida que o consumo de ração diminui, pois, a ingestão reduzida de cálcio e a perda de fósforo resultam em ovos de cascas finas (SAEED et al., 2019). Desse modo, o peso do ovo tem redução estimada entre 0,07 e 0,98 g ovo<sup>-1</sup> para cada aumento de 1 °C na

temperatura do ambiente de criação acima da temperatura preconizada como conforto (24 °C) (SOLIMAN; SAFWAT, 2020), redução que ocorre tanto pelo decréscimo da espessura da casca quanto pela diminuição dos componentes líquidos. Ademais, a espessura da casca é importante pois está diretamente relacionada a resistência a choques mecânicos, além de atuar como barreira física que dificulta a proliferação de organismos deletérios (bactérias como, *Salmonellas*, *Coliformes*, dentre outras).

Ainda sobre qualidade de ovos, segundo os resultados de Ebeid, Suzuki e Sugiyama (2012), o estresse pelo calor demonstrou causar uma redução significativa no peso dos ovos (3,55%), espessura da casca (12%), peso da casca (9,93%), porcentagem de casca (6,65%) e densidade da casca (7,8%). Resultados sustentados por Oliveira et al. (2014), nos quais verificaram que o aumento da temperatura promoveu reduções no peso do ovo, gravidade específica, unidade Haugh, espessura da casca e índice de gema. Ademais, os mesmos autores ainda constataram reduções de 13 e 14% na taxa de postura de galinhas submetidas a 32°C, quando comparadas as temperaturas de 20 e 26 °C, respectivamente. Esses resultados corroboram com a tendência apresentada na pesquisa de Mack et al. (2013), que também observaram diminuição da produção de ovos de galinhas poedeiras quando expostas a 32,6 °C em relação a 24,3 °C.

Por sua vez, em relação às respostas fisiológicas, Leite (2020) ao submeter galinhas d'angola a temperaturas acima da faixa de conforto, verificou elevações da temperatura cloacal, temperatura superficial e frequência respiratória, quando comparada a situação em que as aves foram submetidas à temperatura termoneutra.

Portanto, a temperatura do ar é considerada um dos fatores ambientais mais importantes, que afetam diretamente o *status* fisiológico e produtivo das aves, causando estresse constante. Contudo, o estresse térmico geralmente não é experimentado isoladamente pelas aves, sendo geralmente acompanhado por outros agentes estressores como, níveis inadequados de umidade relativa, alta densidade de alojamento e ventilação insuficiente.

### **2.1.2 Influência da umidade relativa do ar**

A umidade relativa do ar é definida como a relação entre a pressão parcial da água contida no ar e a pressão de vapor da água tomada à temperatura do ar. Ou seja, é a quantidade de vapor d'água existente numa amostra de ar úmido e o teor máximo que este ar poderia reter a uma determinada temperatura. Por sua vez, a evaporação ocorre quando as moléculas de um líquido vencem a força de atração entre si e escapam de uma lâmina d'água passando à forma



de vapor (ALVARENGA et al., 2014), sendo mais eficaz quando se tem ocorrência de vento para transportar a umidade.

Desse modo, a temperatura e umidade relativa do ar possuem relação dependente para explicar o comportamento das variações na razão de mistura do ar. Nesse aspecto, em um ambiente quente e seco a evaporação é intensa, porém, em altas temperaturas, altos níveis de umidade relativa acarretam condições de evaporação lenta ou nula. Portanto, a capacidade das aves em suportar o calor é inversamente proporcional à umidade relativa do ar (ANDRADE, F. et al., 2019), pois sob altas temperaturas, as trocas de calor que necessitam de um diferencial de temperatura, tornam-se ineficientes, e o alto teor de água no ar reduz a perda de calor evaporativa.

A faixa de umidade relativa ideal para aves situa-se no intervalo de 40 a 80% (FERREIRA, 2011; MENEGALI et al., 2013). No entanto, não existem intervalos bem definidos como no caso das temperaturas. Sabe-se que em circunstâncias de elevada umidade relativa, as aves ficam mais sensíveis ao estresse calórico, desse modo, o teor de umidade relativa ideal varia de acordo com a temperatura e, também, com a idade das aves. Dessa forma, há um consenso de que se deva manter a umidade relativa do ar no interior das instalações próxima de 60%, sendo esta preconizada como um teor padrão para grande faixa de temperaturas. Além do mais, ressalta-se que a baixa umidade relativa do ar promove o ressecamento do trato respiratório das poedeiras.

Chang et al. (2018) verificaram que a temperatura do ar necessária para proporcionar alterações nas temperaturas cloacal e superficial das aves são distintas, e que as magnitudes necessárias para promover tais alterações variam de acordo com a umidade relativa à qual estão expostas. Essas constatações corroboram com as de Lin et al. (2005), nos quais, afirmam que o efeito da umidade relativa do ar na relação entre a temperatura superficial e temperatura cloacal depende da temperatura ambiente. Os autores supracitados, ainda verificaram que as temperaturas cloacal e superficial eram maiores em frangos de corte expostos à umidade relativa de 85% quando comparado aos níveis de 35% e 50%, tanto em ambiente com 30 quanto 35 °C.

Ademais, a velocidade do ar também é uma variável que influencia na aclimação da ave ao ambiente e está relacionada às demais, pois uma ventilação mínima é requerida para manutenção adequada da temperatura e umidade relativa. Além de que, a renovação do ar garante o suprimento de oxigênio, remoção de poeira e gases nocivos (como, amônia, monóxido de carbono e dióxido de carbono), tornando o ambiente compatível as necessidades biológicas das aves (MENEGALI et al., 2013; CASTILHO et al., 2015; SOUSA et al., 2016).

### 2.1.3 Influência da ventilação

A fim de obter aumento expressivo na produção de ovos, os sistemas de criação passaram a ser altamente intensivos, tornando indispensável o gerenciamento da eficiência de ventilação (BUSTAMANTE et al., 2013). Nesse âmbito, sempre que as condições de ventilação natural não proporcionam renovação adequada do ar, com conseqüente redução de temperatura, tem-se a opção de se adotar a ventilação artificial como recurso mitigador do estresse térmico. Porém, além do gasto operacional com energia elétrica, a mesma pode requerer alto investimento inicial na aquisição dos equipamentos (ventiladores ou exaustores e controladores) e na instalação elétrica (fios e sistemas de proteção).

O efeito conjunto da ventilação deficiente e elevadas temperaturas é um agravante para a intensificação do estresse térmico em aves, sendo os sistemas de ventilação (natural ou forçada) uns dos responsáveis por estabilizarem o ambiente, proporcionando melhor conforto (ANDRADE, F. et al., 2019; MORETTI et al., 2020). Assim, de acordo com Omran e Negm (2020), para que o excesso de calor dentro do alojamento possa ser eliminado suficientemente, a ventilação deve estar em taxas de 5 a 6 m<sup>3</sup> de ar · h<sup>-1</sup> · kg de peso vivo<sup>-1</sup>, de forma que o ar deve ser renovado a uma taxa de 20 a 50 vezes por hora. Por sua vez, o manual de criação da linhagem Hy Line (HY-LINE, 2016) especifica que a ventilação necessária é de 4 m<sup>3</sup> de ar · h<sup>-1</sup> · kg de peso vivo<sup>-1</sup>.

Nesse âmbito, em regiões de clima quente, a velocidade de 1,0 m·s<sup>-1</sup> pode não ser suficiente para fornecer condições térmicas satisfatórias na área ocupada pelas aves (LI et al., 2016), visto que a sensação térmica do calor é agravada pela alta densidade de alojamento, e requer maiores fluxos de ar para reduzir a temperatura efetiva sentida pelas aves.

Yahav et al. (2004) verificaram que, para frangos de corte submetidos à temperatura de 35 °C, a velocidade do ar de 2,0 m·s<sup>-1</sup> promove desempenho mais adequado em relação às velocidades de 0,8 e 1,5 m·s<sup>-1</sup>. No entanto, a alta velocidade também pode ser prejudicial, visto que os mesmos autores ressaltam que o fluxo de ar a 3,0 m·s<sup>-1</sup> pode estimular o desequilíbrio de água corporal nas aves, prejudicando o consumo de ração, ganho de peso e conversão alimentar.

Por sua vez, Ruzal et al. (2011), ao submeterem galinhas poedeiras à temperatura de 35 °C, verificaram que as características de qualidade de ovos como, massa total, densidade da casca e teor de cálcio na casca, sofreram variações em função da velocidade do ar e do tempo de exposição a tais velocidades. Desse modo, os autores supracitados constataram que velocidades de 1,5; 2,0 e 3,0 m·s<sup>-1</sup> apresentam desempenho superior à velocidade de 0,5 m·s<sup>-1</sup> no auxílio da perda de calor sensível pela ave.

Relacionado à produtividade, Purswell et al. (2013), ao submeter poedeiras Hy-line W-36 com 27 semanas de idade à temperatura do ar de 27,7 °C, umidade relativa de 82% e, em ambientes com ar parado e com velocidades de 0,8 e 1,5 m·s<sup>-1</sup>; verificaram que as taxas de postura foram de aproximadamente 92,2; 94,4 e 97,5%, respectivamente. Por sua vez, Ruzal et al. (2011), observaram aumento da produtividade de ovos em ambiente com velocidade de 3 m·s<sup>-1</sup>, em comparação a 0,5 m·s<sup>-1</sup>, no entanto, o ambiente com ventilação natural também apresentou resultados semelhantes aos de altas velocidades.

Em relação as respostas fisiológicas, Hamrita e Conway (2017) resfriaram aves, que estavam sobre altas temperaturas, com ventilação natural e forçada (3,4 m·s<sup>-1</sup>), e observaram que a temperatura cloacal das aves submetidas à ventilação natural foi de até 1,3 °C superior às das aves em ventilação forçada. Além do mais, todas as aves sob ventilação artificial obtiveram ganho de peso, enquanto no ambiente de ventilação natural, alguns animais apresentaram perdas de até 9%.

Em síntese, a produção e a perda de calor das aves são afetadas pela eficiência do sistema de ventilação (SOLIMAN; SAFWAT, 2020) e as diferentes velocidades do ar são usadas para regular a transferência de calor do animal com o ambiente de criação, porém, as informações de como otimizar as trocas de calor por meio da ventilação ainda são escassas (BUSTAMANTE et al., 2013).

Diante do exposto, ao projetar as instalações para criação de aves, deve-se considerar o aproveitamento das condições climáticas naturais, a fim de melhorar o acondicionamento térmico. Em vista disso, é importante avaliar a influência do vento no ambiente de criação, principalmente quando combinado a diferentes temperaturas e umidades relativas, com o intuito de fornecer conforto as aves e otimizar o consumo de energia, reduzindo os custos e viabilizando o empreendimento. E, em aviários fechados, dever-se-á considerar o efeito da velocidade do ar sobre as aves.

## **2.2 Mecanismos de termorregulação das aves**

Os animais vivem sob constantes desafios térmicos, sejam eles diários ou sazonais, e, de acordo com Silva e Maia (2013), os seus organismos devem ser capazes de sobreviver em condições climáticas conflitantes. Dessa forma, quando submetidos a clima seco e com altas temperaturas, devem ser protegidos contra a perda de água, assim como contra os efeitos nocivos da intensa radiação solar, sendo capazes de transferir o excesso de calor do corpo para o ar e, ao mesmo tempo, reduzir a entrada de calor do ambiente. Por sua vez, em condições frias

é necessário isolamento térmico corporal adequado, por meio da camada de penas, para evitar a perda de calor (SILVA; MAIA, 2013).

Habitualmente, os limites termoneutros são definidos a partir de medidas indiretas, como temperatura do ar, umidade relativa, ventilação, entre outras variáveis ambientais (SCHIASI et al., 2015). Porém, a fim de alcançar o estado de equilíbrio ideal, faz-se necessário correlacionar esses fatores às respostas fisiológicas, e a partir dessas compreender melhor a interação entre ave e ambiente por meio dos mecanismos de transferência de calor.

O estresse térmico pode ser agudo ou crônico, e ambos podem afetar significativamente o desempenho das poedeiras devido às alterações metabólicas e fisiológicas, além da possibilidade de ocasionar supressão imunológica, tornando as aves suscetíveis a doenças (ROUSHDY; ZAGLOOL; EL-TARABANY, 2018; SOLIMAN; SAFWAT, 2020).

Por serem animais endotérmicos, as aves controlam sua temperatura de núcleo corporal por meio da produção de calor endógeno. Assim, o calor é produzido constantemente no corpo como resultado do metabolismo, e caso não haja providências para a perda de calor, a temperatura do corpo aumenta para níveis intoleráveis (REECE et al., 2015).

O correto balanço de energia ocorre quando o calor perdido do corpo é igual ao produzido, evitando o estresse térmico causado pelo desequilíbrio entre a quantidade líquida de energia emanada do corpo da galinha para o meio e a quantidade de energia térmica produzida pela ave, além da derivada do ambiente (SAEED et al., 2019; HAMDY, 2020). Em vista disso, a manutenção do estado de equilíbrio dos animais ocorre pela transferência de calor do corpo para o ambiente pelos processos sensíveis e latentes.

As trocas de calor sensível dependem de um diferencial de temperatura para ocorrer, e o fluxo de calor sempre sai do corpo ou superfície de maior temperatura em direção a locais de menor temperatura (COLLIER; GEBREMEDHIN, 2015). Assim, esse fluxo de energia ocorre até que o equilíbrio térmico seja alcançado e não envolve mudanças no estado físico da substância ou superfície. Desse modo, a transmissão de energia sensível pode acontecer de três formas: condução, convecção e radiação, e quanto maior a diferença de temperaturas entre superfícies emissora e receptora, maior é o fluxo de energia transferida.

Dentre esses mecanismos, a condução e convecção ocorrem tanto internamente quanto externamente à ave. No entanto, a condução para o meio resulta do contato direto entre o corpo do animal e superfícies como, piso, ripas, paredes e gaiolas. Assim sendo, nos sistemas mais recentes com o uso de gaiolas enriquecidas (*enriched cages*), assim como nos sistemas semi-intensivos *cage free* e *free range*, as aves podem estar em constante contato com as cortinas e estruturas dos ninhos, com o piso, cama ou solo (com ou sem vegetação). Nesse aspecto, deve-

se levar em consideração a área de contato e a condutividade térmica dessas superfícies, sendo a umidade da cama, vegetação ou solo um fator de influência sobre essa propriedade térmica (SANTOS et al., 2016). Entretanto, no sistema intensivo de gaiolas convencionais, a área superficial de contato com os fios das gaiolas é pequena, sendo desprezível a perda por condução para o meio, além de que o ar apresenta baixo valor de condutividade térmica (NASCIMENTO, 2015; SAEED et al., 2019).

Por sua vez, o calor latente ocorre devido às diferenças de pressão de vapor, de modo que envolva mudanças de fase entre líquidos, gases e sólidos. Nesse âmbito, o principal mecanismo de troca de calor latente nas aves é a evaporação respiratória, uma vez que as aves não possuem glândulas sudoríparas, além de que a cobertura de plumagem dificulta a troca de calor na superfície do corpo, aumentando a importância da evaporação da água na superfície do trato respiratório (MUTAF; KAHRAMAN; FIRAT, 2008; SILVA; MAIA, 2013; SOUZA JUNIOR et al., 2019).

Além do mais, há também perdas de calor através da deposição de ovos e excreção de fezes e urina, pois esses são eliminados com temperaturas próximas à corporal, no entanto, essas perdas são consideradas insignificantes perante as demais (REECE et al., 2015; SCANES, 2015; OMRAN; NEGM, 2020).

Com relação ao gasto energético para o processo de manutenção, de acordo com Turnpenny (1997), as aves priorizam o controle vasomotor em relação aos demais mecanismos sensíveis e latentes, uma vez que estes demandam maior gasto energético. Assim, a fim de maximizar a eficiência do mecanismo vasomotor de dissipação do calor, e conseqüentemente as demais formas, as aves apresentam respostas comportamentais como, se afastarem umas das outras, moverem-se para próximo de superfícies e locais frios (como paredes ou regiões com massa de ar corrente e fria), se manterem em repouso, abrir as asas, ofegar, diminuir consumo de ração e aumentar a ingestão de água (MACK et al., 2013; MIGLIAVACCA, 2017; OMRAN; NEGM, 2020).

Desse modo, quando um animal é alojado em um determinado ambiente, as trocas térmicas que ocorrem entre ele e o meio dependem das condições em que ambos se encontram. E, em busca da termorregulação, tentam se adaptarem ao ambiente em que vivem, alterando seu comportamento e homeostase fisiológica, entretanto, essas mudanças podem ter efeitos negativos diretos na eficiência de produção.

Em vista disso, independentemente dos avanços do melhoramento genético, existe a necessidade de estudar os aspectos produtivos e fisiológicos das aves, visto que este é um processo contínuo e dinâmico, pois, segundo Silva, Pardorfi e Guiselini (2015), as aves agem

como um sistema termodinâmico vivo, a fim de trocar continuamente energia com o meio ambiente.

### **2.2.1 Transferência de calor por condução no corpo da ave**

O processo de transferência de calor por condução ocorre a partir do contato entre duas partículas, de modo que a mais energética transfere sua energia para a menos energética, sejam elas pertencentes a mesma ou a distintas substâncias que estejam adjacentes. Por outro lado, a condutividade térmica é uma propriedade que indica o ritmo no qual a energia é transferida pelo processo de difusão (INCROPERA et al., 2008).

Segundo Saeed et al. (2019) as aves podem regular a temperatura do corpo usando o calor gerado em seu organismo. Nesse caso, por serem animais endotérmicos, o calor corporal é oriundo de processos metabólicos, envolvidos nas diversas funções do organismo, que estão diretamente relacionadas à atividade muscular e alimentação (ingestão, digestão e absorção de nutrientes). Nesse aspecto, Christensen et al. (2012), compararam as temperaturas cloacais de frangos de corte em jejum e quando alimentados com ração fornecida *ad libitum*, e constataram diminuição de até 0,78 °C do calor interno, após 12 horas de abstinência, devido à falta de energia proveniente da alimentação. Em vista disso, de acordo com Omran e Negm (2020), a máxima produção de calor metabólico ocorre no intervalo de 3 a 6 horas após a ingestão. Portanto, em períodos de elevadas temperaturas do ar, é recomendado alimentar as aves no início da manhã e no final da tarde, pois dessa maneira, evita-se que a máxima produção de calor corporal ocorra durante o período do dia de maior estresse térmico.

Entretanto, uma parte da energia térmica corporal também pode ser proveniente do ambiente de criação, necessitando de meios de dissipação do calor, pois, de acordo com os resultados de Abreu et al. (2017), tanto a temperatura corporal interna (temperatura cloacal) quanto a temperatura superficial das aves, aumentam conforme a magnitude da temperatura ambiente, além de que essa variação das temperaturas corporais, também está sujeita à duração da exposição térmica.

Assim, para manter o controle da temperatura e evitar o superaquecimento corporal, o excesso de calor é dissipado para o ambiente circundante primeiramente por condução celular e advecção vascular (SCANES, 2015). Assim, por meio da interação entre as respostas fisiológicas, pode-se estudar a transferência de calor que ocorre nos órgãos, gordura, pele e penas. Isso se faz importante pois a temperatura corporal é responsável pelas respostas

biológicas em todos os sistemas vivos, podendo ser um marco entre a saúde e a doença (BERGMAN et al., 2014), ou até mesmo a morte quando excede o limite fisiológico.

Desse modo, sob exposição a condições térmicas elevadas, o sistema cardiovascular das aves redistribui o fluxo sanguíneo e ativa o sistema termorregulador, de forma que os órgãos e tecidos mais significativos para efetuar as trocas de calor recebam um maior suprimento sanguíneo (YAHAV, 2009; SOUZA JUNIOR et al., 2019). Nesse propósito, veias e artérias atuam como trocadores de calor, pois estão dispersas pela extensão corporal e carregam sangue em diferentes temperaturas (sangue arterial quente e sangue venoso mais frio), promovendo troca de energia térmica a diferentes taxas. Ademais, ocorre também perfusão sanguínea em decorrência de vasos capilares menores que estão distribuídos ao longo dos tecidos (BERGMAN et al., 2014).

Além do mais, a redistribuição e aumento do fluxo sanguíneo, tem por finalidade alcançar extremidades desprovidas de penas como, pernas, pés, crista, barbeta e, em algumas linhagens, pescoço. Tais regiões corporais das aves, também chamadas de janelas térmicas, conforme Souza Junior et al. (2019), são áreas anatômicas especializadas na dissipação, em virtude das anastomoses arteriovenosas (arranjos vasculares que possibilitam ao sangue aquecido fluir para a superfície da pele) (WOLFENSON, 1983). Ademais, o fluxo sanguíneo também tem como destino as vias respiratórias, a fim de dissipar o calor por convecção e evaporação.

Por outro lado, quando as galinhas são expostas a condições de temperaturas abaixo da faixa de conforto, ocorre a vasoconstrição nas janelas térmicas corporais, diminuindo assim a condução de calor do núcleo corporal para a superfície da pele. Além disso, nessas regiões existe também a presença de *venae comitantes* (grupo de veias circundantes a uma artéria), que evitam a perda excessiva de calor sensível, visto que essa estrutura promove a transferência de calor do sangue arterial para o sangue venoso, que por sua vez, retorna ao coração ao invés de ser perdido nas extremidades corporais para o ambiente circunvizinho (NASCIMENTO, 2015).

Em vista disso, diversos autores relatam que a transferência de calor através do corpo da ave varia em função de fatores como, temperatura de exposição, peso e tamanho dos animais, espessura da camada de penas, região do corpo, fluxo sanguíneo e ciclo circadiano (ASCHOFF, 1981; MCARTHUR, 1981; SILVA; MAIA, 2013; NASCIMENTO, 2015; SANTOS et al., 2016). Portanto, para englobar todas as variáveis de influência e simplificar o uso em equações de análises, faz-se necessário a determinação e ou uso do coeficiente global de transferência de calor por condução no corpo da ave (U).

### 2.2.2 Transferência de calor por convecção

A convecção é caracterizada pela transferência de energia entre uma superfície sólida e um fluido adjacente (líquido ou gasoso) situados em diferentes temperaturas. Esse mecanismo é classificado em razão da natureza do escoamento do fluido como, convecção forçada (escoamento devido a meios externos tais quais, ventos atmosféricos, ventiladores e bombas), convecção livre ou natural (ocorre em virtude das diferenças de pressão, temperatura e densidade do ar) e convecção mista (combinação entre forçada e livre) (INCROPERA et al., 2008).

Além de depender do regime de escoamento, a transferência de calor por convecção também decorre das condições da camada-limite (que por sua vez depende do formato corporal), da natureza laminar ou turbulenta do escoamento do fluido, e diversas propriedades termodinâmicas e de transporte como, densidade, viscosidade, calor específico, condutividade térmica e velocidade de deslocamento do fluido sobre a superfície (YAHAV et al., 2005; RUZAL et al., 2011; BERGMAN et al., 2014; TICKLE; CODD, 2019). Desse modo, a fim de integrar a complexidade de variáveis que implicam no processo de transferência, tem-se o coeficiente de transferência de calor por convecção ( $h_{conv}$ ).

Usualmente, nas análises de transferência de calor em frangos de corte e galinhas poedeiras, os animais têm seus corpos considerados como uma esfera, além de que diferentes direções do ar não são levadas em consideração, como em Yanagi Junior (2002), Nascimento et al. (2014) e Leite (2020). Desse modo, Li et al. (2016), desenvolveram um modelo de galinha virtual com formato realístico, para análise da influência da direção do fluxo de ar. O estudo foi realizado considerando o ar atuando sobre o animal nos ângulos 0, 45 e 90° em relação ao tronco do mesmo, e como resultado, verificou-se a baixa influência da orientação do ar sobre a transferência de calor por convecção, de modo que as discrepâncias relativas entre os casos, 0 vs. 45°, 45 vs. 90° e 0 vs. 90°, foram de 4,1; 5,2 e 9,1%, respectivamente. Ademais, os autores supracitados observaram que o formato corporal realista proporciona pequenas diferenças no bloqueio do fluxo de ar, quando comparado ao animal representado por uma esfera. Assim, os valores de  $h_{conv}$  determinados para os modelos realista e esférico, com a mesma área superficial, mostram-se altamente correlacionados, indicando que o animal pode ser simplificado como modelo esférico nas investigações.

A transferência de calor por convecção também está correlacionada com os mecanismos de condução interna, uma vez que, diante de altas temperaturas corporais, ocorrerá a vasodilatação e o fluxo sanguíneo percorrerá pelas áreas desprovidas de penas, que por sua vez,



estão expostas e em contato com o ar em movimento, promovendo assim a transferência convectiva na superfície da pele.

De acordo com os resultados de Yahav et al. (2004), que ao avaliarem a perda de calor em frangos de corte, verificaram que a velocidade do ar é uma das principais variáveis ambientais envolvida na termorregulação, principalmente quando os animais estão submetidos a altas temperaturas. Entretanto, deve-se atentar para que a velocidade do ar, adequada para aumentar a remoção do calor das aves por convecção, ocorra na zona da instalação ocupada pelas aves (LI et al., 2016). Tickle e Codd (2019) constataram que os pés das aves são importantes trocadores de calor quando a velocidade do ar é nula, visto que as demais regiões com penas perdem a eficiência de dissipação na ausência do fluxo de ar circundante.

Portanto, a relação entre a taxa de transferência convectiva e a velocidade do ar, é essencial para obter o conforto térmico dos animais, devendo ser considerada na definição do manejo e controle do sistema de ventilação no ambiente de criação.

### **2.2.3 Transferência de calor por radiação**

Ao contrário da condução e convecção, a transferência de calor por radiação não necessita de um meio material para se propagar, de modo que a energia térmica é propagada sob a forma de ondas eletromagnéticas ou fótons.

A radiação é emitida por toda matéria que se encontra a uma temperatura diferente de zero absoluto (0 K ou -273,15 °C), no entanto, a quantidade transmitida varia de acordo com as propriedades físicas do elemento emissor. Com base nisso, a emissividade ( $\epsilon$ ) é uma propriedade radiante da superfície conhecida em relação a um corpo negro na mesma temperatura. Em estudos realizados com galinhas poedeiras e frangos de corte, existem diferentes valores de  $\epsilon$  referente à superfície corporal, como, 0,86 (utilizado por Ferreira et al. (2011) em avaliação de pintinhos de corte Ross<sup>®</sup>), 0,94 (empregado por Nääs et al. (2014) ao analisar pintinhos Cobb<sup>®</sup>), 0,95 (utilizado na averiguação de pintinhos Cobb<sup>®</sup> por Abreu et al. (2017)), 0,96 (adotado por Buijs et al. (2018) ao examinar poedeiras marrons da linhagem British Blacktail) e 0,98 (empregado por Nascimento et al. (2017) e Souza Junior et al. (2019) para analisar frangos de corte Cobb<sup>®</sup> e poedeiras marrons de pescoço pelado da linhagem Label Rouge, respectivamente).

Sabe-se que temperatura da superfície corporal pode ser usada para avaliar o equilíbrio térmico em animais (NASCIMENTO et al., 2014; SILVA; PANDORFI; GUISELINI, 2015) e cada região corporal do animal emite diferente quantidade de radiação (MCMANUS et al.,

2016), fato que pode explicar as variações de  $\epsilon$  na literatura, uma vez que os animais possuem regiões com presença e ausência de penas. Desta forma, a termografia por infravermelho tem sido utilizada em diversas pesquisas (ANDRADE et al., 2017; SANTOS et al., 2019; CÂNDIDO et al., 2020), pois essa tecnologia permite o mapeamento das diferentes áreas, uma vez que as câmeras são capazes de detectar variações de temperatura e fornecem a distribuição sobre a superfície em análise. Assim, a termografia atua de forma similar ao sensoriamento remoto, sendo um método não invasivo para realizar as avaliações de transferência de calor e fluxo sanguíneo no animal, por meio da temperatura superficial (ROBERTO et al., 2014; SILVA; PANDORFI; GUISELINI, 2015).

De acordo com Nascimento (2015), ao estudarem o fluxo de calor sensível em frangos de corte, os animais diminuem a capacidade de perdas de calor por radiação em virtude da elevação da temperatura do ambiente a qual estão expostas, e também, devido ao aumento da camada de penas, que por sua vez, é diretamente proporcional ao aumento do peso. Essa diminuição da capacidade de perda em função da espessura da camada de penas, ocorre devido as penas conferirem maior resistência à transferência de calor, ocasionando um menor gradiente de temperatura entre a superfície da ave e o ar.

Ademais, a radiação sobre uma superfície também pode ser proveniente da vizinhança. Segundo Bergman et al. (2014), a vizinhança pode ser referida como uma superfície isotérmica de grandes proporções, de forma a envolver o elemento menor com o qual ocorrerá a troca de calor. Em um aviário, estas superfícies podem ser referentes ao fechamento de uma instalação (cortinas, alvenaria de tijolos, isopainéis, etc.) ou ao forro. Em ambiente laboratorial, a superfície de menor proporção envolta pela vizinhança será a própria ave, enquanto que, a vizinhança é constituída pelas superfícies circunvizinhas.

#### **2.2.4 Transferência de calor por evaporação respiratória**

Além de fornecer oxigênio e eliminar o dióxido de carbono, o sistema respiratório desempenha um papel importante na regulação da temperatura corporal e no equilíbrio da água em aves.

O calor produzido endogenamente é transportado via corrente sanguínea até a superfície ou à mucosa que reveste o trato respiratório, para que então seja dissipado ao ambiente. A transferência de calor ocorre à medida que o ar frio passa pelo sistema respiratório, sendo aquecido e saturado com vapor de água durante a inspiração (SVERDLOVA et al., 2012), desse

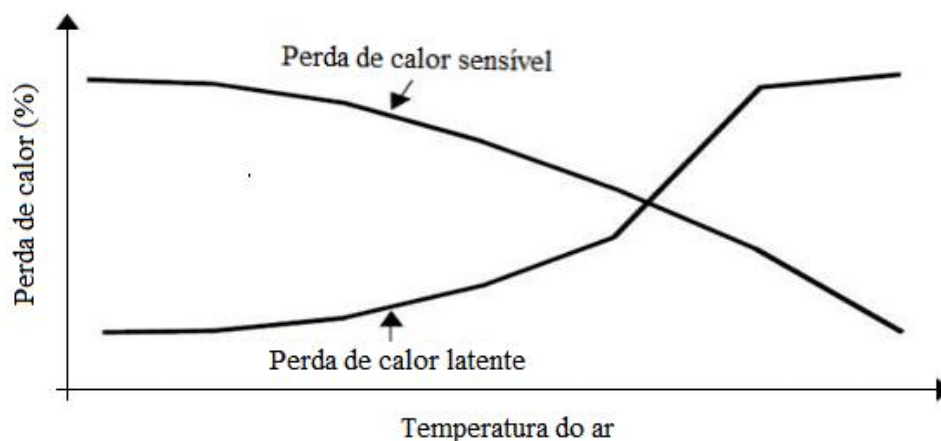
modo, o calor é dissipado no momento da evaporação, visto que esse é um processo endotérmico.

Assim, esse mecanismo é um processo de resfriamento que ocorre devido à vaporização da umidade da superfície do trato respiratório, por meio da circulação do ar, seja através da inspiração e expiração, ou pela vibração gular (ofegação), de modo que os vapores saem pelo bico da ave após atingirem o estado físico de vapor devido ao calor corporal (REECE et al., 2015; SCANES, 2015; SAEED et al., 2019). Em outras palavras, o ar inspirado (à temperatura ambiente) é aquecido até atingir a temperatura do núcleo corporal nos pulmões, acarretando redução da sua pressão de vapor, fato que torna possível a absorção de maior quantidade de água pelo ar ao longo da superfície respiratória (NASCIMENTO, 2015). Assim, o sistema respiratório equilibra as trocas gasosas com a perda de calor por evaporação (REECE et al., 2015).

A transferência de calor latente por meio da respiração evaporativa demanda maior custo metabólico em relação aos meios sensíveis, dessa forma, esse mecanismo é intensificado pelo animal somente quando o mesmo se encontra sujeito a altos valores de temperatura do ar. Pois, a elevação da temperatura ambiente acarreta no aumento das temperaturas cloacal, superficial e da vizinhança, promovendo um decréscimo no diferencial entre as mesmas e também em relação à própria temperatura ambiente, fato que reduz drasticamente a eficiência dos mecanismos de perda de calor sensível.

A Figura 1 ilustra o comportamento dos mecanismos sensíveis e latente em função da temperatura do ar.

Figura 1 – Comportamento dos mecanismos de troca de calor da ave com o meio em função da temperatura.



Fonte: Melo et al. (2016).

Silva, Pandorfi e Guiselini (2015), observaram comportamento similar ao analisarem a transferência de calor em frangos de corte durante diferentes horários ao longo do dia, de modo que constataram redução do calor sensível e aumento do latente perante os horários mais quentes do dia. Assim, observa-se que a perda de calor por evaporação torna-se maior com o aumento da temperatura ambiente (ABREU et al., 2012).

Em relação ao padrão da respiração, esse é regulado de acordo com as demandas estabelecidas pelas atividades metabólicas (por exemplo, repouso, voo ou movimentação constante), informações sensoriais (calor ou frio) e contribuições emocionais (REECE et al., 2015). Portanto, a principal forma das galinhas poedeiras alcançarem o equilíbrio térmico em condições quentes, é aumentando a evaporação respiratória através da ofegação (TURNPENNY et al., 2000). Nestas condições, as aves realizam padrão de respiração curto e acelerado (e, conseqüentemente, com maior fluxo de ar por escala temporal, por exemplo, volume expirado  $\cdot \text{min}^{-1}$ ) quando comparadas àquelas expostas à condição de conforto. Isso, se deve ao fato de as aves aumentarem sua frequência respiratória (FR) a taxas que promovam melhor desempenho da evaporação respiratória (OLIVEIRA et al., 2014). Assim, a ave começa a ofegar quando a temperatura atinge 29 ° C, sendo uma resposta visível ao estresse (OMRAN; NEGM, 2020).

Além do mais, de acordo com Silva e Maia (2013), ao se comparar o volume respiratório à massa corporal, as aves têm uma relação cerca de três vezes maior que os mamíferos. Conseqüentemente, a troca térmica respiratória é mais importante para as aves do que para os mamíferos. Nesse contexto, Saeed et al. (2019), afirmaram que quando expostas a temperatura de 35 ° C e baixa umidade relativa (40%), a perda de calor pela respiração corresponde a 80% do total. Este resultado corrobora com os obtidos por Richards (1976) que, ao submeter galinhas poedeiras a 35 ° C e 80% de umidade relativa, verificou que a perda de calor latente por evaporação respiratória foi de 72%.

O recurso de ofegar e aumentar a FR possibilita às aves um aumento de seis a sete vezes na ventilação total por minuto (REECE et al., 2015), porém, em virtude da atividade muscular requerida para elevar a respiração, pode ocorrer uma produção excessiva de calor dentro do corpo (SAEED et al., 2019), diminuindo a eficiência de dissipação ou até mesmo anulando-a caso a umidade relativa também esteja alta.

Em altos níveis de umidade relativa a perda de calor por evaporação é dificultada, pois depende da capacidade do ar de transportar vapor de água. Assim, Chang et al. (2018), verificaram que em ambiente com 85% de umidade relativa, as galinhas aumentaram sua temperatura superficial quando a temperatura do ar atingiu 21,93 ° C, enquanto que, em

condições de 35 e 50% de umidade relativa, a temperatura superficial sofreu alteração somente quando expostas a temperatura do ar de 24,11 e 23,89 °C, respectivamente. Dessa forma, Chang et al. (2018), relataram comportamento compensatório das aves quando submetidas à umidade relativa de 85%, mesmo estando sobre temperaturas amenas (21 a 23 °C), de modo que elas elevaram sua temperatura superficial (por meio da vasodilatação) para melhorar a dissipação sensível da perda de calor. Pois assim, a ave consegue aumentar o diferencial entre as temperaturas da sua superfície e do ambiente, favorecendo a perda de calor por convecção. Entretanto, esse recurso só é possível caso a temperatura do ar não esteja muito alta, do contrário, o animal não conseguirá elevar a temperatura superficial a níveis tão altos quanto a temperatura do ar possa estar. Portanto, é importante considerar o sistema de ventilação para remover o ar quente do aviário e substituí-lo por ar seco e fresco.

Por sua vez, outro fato relacionado à FR é que os altos índices de respiração elevam a perda de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) dos pulmões e prejudica o equilíbrio ácido-base, resultando em um aumento do pH no plasma sanguíneo, que por sua vez, provoca a alcalose respiratória. Nesse contexto, além de deteriorar a saúde, o aumento do pH no sangue também prejudica o desempenho das aves, pois interfere no equilíbrio eletrolítico e mineral que implica na diminuição da qualidade da casca do ovo (CARVALHO et al., 2013; OMRAN; NEGM, 2020), podendo até ocorrer ovos sem a presença de casca. Portanto, o estresse pode ter um efeito deletério significativo na segurança alimentar.

Com relação à perda de água pelo sistema respiratório, Menuam e Richards (1975), ao exporem galinhas poedeiras a temperaturas de 20 e 40 °C, verificaram aumento de 260% na perda de água quando analisado a trato respiratório por inteiro. Em vista disso, alterações no consumo de água pelas aves estão diretamente relacionadas ao aumento do processo de perda de calor por meios evaporativos (LEITE, 2020). Porém, após longo período de exposição a altas temperaturas, esse mecanismo pode perder eficiência, pois, por estar diretamente relacionada à quantidade de água no corpo, a perda de calor irá diminuir se a ave atingir um estágio de desidratação (NASCIMENTO, 2015), e isso pode ocorrer frente ao aquecimento excessivo no ambiente de criação, visto que a ingestão de água pode diminuir em decorrência da elevação de temperatura da mesma. Fairchild e Ritz (2015), afirmam que a água estando a qualquer temperatura abaixo da temperatura corporal da ave (situada entre 41 e 42 °C, segundo Cândido et al. (2020)), a mesma será benéfica para a regulação da temperatura corporal. Entretanto, outros autores destacam que, para auxiliar a manutenção da homeotermia e obter eficiência na dissipação do calor corporal, a temperatura ideal da água de bebida das aves deve estar entre

20 e 24 °C (ABREU; ABREU, 2000; MACARI; FURLAN, 2001; XIN et al., 2002; SANTANA et al., 2018).

Contudo, o excesso no consumo de água também é prejudicial à qualidade dos ovos, pois promove aumento na excreção de íons de bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), elemento fundamental para a formação do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), que por sua vez, é o componente predominante da casca dos ovos, e seu déficit acarreta a produção de ovos de casca fina e ou quebradiça (SANTANA et al., 2018).

### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto, verifica-se que as variáveis climáticas do ambiente de criação estão diretamente relacionadas ao equilíbrio fisiológico requerido para o estado de conforto térmico das aves. Assim, variações nas intensidades das variáveis temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, são capazes de impactar a eficiência produtiva das aves, pois exigem modificações comportamentais e fisiológicas, diminuindo a quantidade de energia disponível para produção.

Portanto, dentre os diversos desafios a serem estudados na área de ambiência animal, destaca-se o efeito do ambiente térmico sobre as respostas fisiológicas e produtivas das aves, bem como, no seu bem-estar. E, para tal, o estudo da transferência de calor entre ave e ambiente circunvizinho pode atuar como estratégia de intervenção, tanto preventiva quanto corretiva, visando a mitigação do estresse térmico.

Desse modo, o estudo da transferência e calor no corpo da ave, assim como entre o animal e o ambiente de alojamento, podem ser utilizados para o aperfeiçoamento de outras modelagens, como aquelas realizadas por dinâmica de fluidos computacional (CFD). Além do mais, é possível atualizar as faixas de conforto de índices como, entalpia e índice de temperatura e umidade (ITU), aperfeiçoando assim suas utilizações. Ademais, a modelagem das trocas de calor pode ser embarcada em sistemas que automatizem o controle do microclima na instalação das aves.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, L. H. P. et al. Cloacal and surface temperatures of broilers subject to thermal stress. **Engenharia Agrícola**, v. 37, n. 5, p. 877-886, 2017.
- ABREU, P. G. et al. Medidas morfológicas em função do peso e da idade da ave, por meio de imagens. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 7, p. 795-801, 2012.
- ABREU, V. M. N.; ABREU, P. G. Temperatura da água em bebedouros tipo calha. **Comunicado Técnico Embrapa Suínos e Aves**, 2000.
- ALVARENGA, C. B. et al. Efeito do déficit de pressão de vapor d'água no ar na pulverização hidropneumática em alvos artificiais. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 1, 2014.
- ANDRADE, A. M. F. et al. Frangos de corte de linhagens pescoço pelado e carijó, criados sob condições de estresse térmico. **Arquivos de Ciências Veterinárias e Zoologia da UNIPAR**, v. 22, n. 4, 2019.
- ANDRADE, R. R. et al. Evaluation of the surface temperature of laying hens in different thermal environments during the initial stage of age based on thermographic images. **Agronomy Research**, v. 15, n. 3, p. 629-638, 2017.
- ANDRADE, R. R. et al. Influence of different thermal environments on the performance of laying hens during the initial stage of rearing. **Engenharia Agrícola**, v. 39, n. 1, p. 32-40, 2019.
- ASCHOFF, J. Thermal conductance in mammals and birds: its dependence on body size and circadian phase. **Comparative Biochemistry and Physiology**, v. 69, n. 4, p. 611-619, 1981.
- BERGMAN, T. L. et al. **Transferência de calor e de massa**. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 1698 p.
- BUIJS, S. et al. Behavioural and physiological responses of laying hens to automated monitoring equipment. **Applied animal behaviour science**, v. 199, p. 17-23, 2018.
- BUSTAMANTE, E. et al. 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.
- CÂNDIDO, M. G. L. et al. Effects of heat stress on pullet cloacal and body temperature. **Poultry Science**, v. 99, n. 5, p. 2469-2477, 2020.
- CASTILHO, V. et al. Bem-estar de galinhas poedeiras em diferentes densidades de alojamento. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 9, n. 2, p. 122-131, 2015.
- CARVALHO, L. L. S.; FERNANDES, E. A. Formação e qualidade da casca de ovos de reprodutoras e poedeiras comerciais. **Medicina Veterinária**, v. 7, n. 1, p. 35-44, 2013.



CHANG, Y. et al. Real-time variations in body temperature of laying hens with increasing ambient temperature at different relative humidity levels. **Poultry science**, v. 97, n. 9, p. 3119-3125, 2018.

CHRISTENSEN, K. et al. Changes in body temperature during growth and in response to fasting in growing modern meat type chickens. **British poultry science**, v. 53, n. 4, p. 531-537, 2012.

COLLIER, R. J.; GEBREMEDHIN, K.G. Thermal biology of domestic animals. **Annu. Rev. Anim. Biosci.**, n. 3, v. 1, p. 513-532, 2015.

EBEID, T. A.; SUZUKI, T.; SUGIYAMA, T. High ambient temperature influences eggshell quality and calbindin-D28k localization of eggshell gland and all intestinal segments of laying hens. **Poultry Science**, v. 91, n. 9, p. 2282-2287, 2012.

FAIRCHILD, B. D.; RITZ, C. W. **Poultry drinking water primer**. UGA Extension Bulletin 1301. 2015.

FERREIRA, R. A. **Maior produção com melhor ambiente para aves, suínos e bovinos**. 2ª ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2011. 401 p.

FERREIRA et al. Infrared thermography applied to the evaluation of metabolic heat loss of chicks fed with different energy densities. **Brazilian Journal of Poultry Science**, v. 13, n. 2, p. 113-118, 2011.

HAMDY, A. M. M. Climatic Change and Chicken Immunity. In: **Climate Change Impacts on Agriculture and Food Security in Egypt**. Springer, Cham, 2020. p. 499-521.

HAMRITA, T. K.; CONWAY, R. H. Effect of air velocity on deep body temperature and weight gain in the broiler chicken. **The Journal of Applied Poultry Research**, v. 26, n. 1, p. 111-121, 2017.

HASSAN, M. R. et al. Effect of monochromatic and combined light colour on performance, blood parameters, ovarian morphology and reproductive hormones in laying hens. **Italian Journal of Animal Science**, v. 12, n. 3, p. e56, 2013.

HY-LINE. **Guia de Manejo Hy-Line W-80**. 2016.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2008. 643 p.

LARA, L. J.; ROSTAGNO, M. H. Impact of heat stress on poultry production. **Animals** v. 3, p. 356–369, 2013.

LEITE, P. G. **Dissipação de energia térmica e desempenho produtivo de galinhas d'angola submetidas a diferentes condições ambientais**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2020.

LI, H. et al. A numerical study on forced convective heat transfer of a chicken (model) in horizontal airflow. **Biosystems Engineering**, v. 150, p. 151-159, 2016.

LIN, H. et al. Thermoregulation responses of broiler chickens to humidity at different ambient temperatures. II. Four weeks of age. **Poultry science**, v. 84, n. 8, p. 1173-1178, 2005.

MACARI, M.; FURLAN, R.L. **Ambiência na produção de aves em clima tropical**. In: SILVA, I.J.O. (Ed.). *Ambiência na produção de aves em clima tropical*. Jaboticabal: SBEA, 2001, p.31-87.

MACK, L. A. et al. Genetic variations alter production and behavioral responses following heat stress in 2 strains of laying hens. **Poultry science**, v. 92, n. 2, p. 285-294, 2013.

MCARTHUR, A. J. Thermal resistance and sensible heat loss from animals. **Journal of Thermal Biology**, v. 6, p. 43-47, 1981.

MCMANUS, C. et al. Infrared thermography in animal production: An overview. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 123, p. 10-16, 2016.

MELO, A. D. S. et al. Relação temperatura e nutrição sobre o desempenho de galinhas poedeiras. **PUBVET**, v. 10, p. 795–872, 2016.

MENEGALI, I. et al. Comportamento de variáveis climáticas em sistemas de ventilação mínima para produção de pintos de corte. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 1, 2013.

MENUAM, B.; RICHARDS, S. A. Observations on the sites of respiratory evaporation in the fowl during thermal panting. **Respiratory Physiology**, v.25, p.39-52, 1975.

MIGLIAVACCA, A. **Balanco de massa, energia e exergia na produção intensiva de frangos de corte**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

MORETTI, A. C. et al. Impact of acclimatization system on zootechnical performance and thermal comfort in young broiler chickens. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, 2020.

MUTAF, S.; KAHRAMAN, N. Ş; FIRAT, M. Z. Surface wetting and its effect on body and surface temperatures of domestic laying hens at different thermal conditions. **Poultry science**, v. 87, n. 12, p. 2441-2450, 2008

NÄÄS, I. A. et al. Infrared thermal image for assessing animal health and welfare. **J. Anim. Behav. Biometeorol**, v. 2, n. 3, p. 66-72, 2014.

NASCIMENTO, S. T. et al. Mean surface temperature prediction models for broiler chickens – a study of sensible heat flow. **International Journal of Biometeorology**, v. 58, n. 2, p. 195-201, 2014.

NASCIMENTO, S. T. **Modelagem do equilíbrio térmico de frangos de corte: um estudo da geração e transferência de calor**. 2015. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2015.

NASCIMENTO, S. T. et al. Metabolic heat production and evaporation of poultry. **Poultry Science**, n. 96, n. 8 p. 2691-2698, 2017.

OLIVEIRA, D. L. et al. Desempenho e qualidade de ovos de galinhas poedeiras criadas em gaiolas enriquecidas e ambiente controlado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 11, 2014.

OMRAN, E. E.; NEGM, A. M. **Climate Change Impacts on Agriculture and Food Security in Egypt**. Springer, 2020. 645 p.

PURSWELL, J. L. et al. Effects of air velocity on laying hen production from 24 to 27 weeks under simulated evaporatively cooled conditions. **Transactions of the ASABE**, v. 56, n. 6, p. 1503-1508, 2013.

REECE, W. O. et al. **Duke's physiology of domestic animals**. 13<sup>a</sup> ed. John Wiley & Sons, 2015. 762 p.

RICHARDS, S. A. Evaporative water loss in domestic fowls and its partition in relation to ambient temperature. **Journal of Agricultural Science**, v. 87, p. 527-532, 1976.

ROBERTO, J. V. B. et al. Gradientes térmicos e respostas fisiológicas de caprinos no semiárido brasileiro utilizando a termografia infravermelha. **Journal of Animal Behaviour and Biometeorology**, v. 2, n. 1, p. 11-19, 2014.

ROUSHDY, E. M.; ZAGLOOL, A. W.; EL-TARABANY, M. S. Effects of chronic thermal stress on growth performance, carcass traits, antioxidant indices and the expression of HSP70, growth hormone and superoxide dismutase genes in two broiler strains. **Journal of thermal biology**, v. 74, p. 337-343, 2018.

RUZAL, M. et al. Ventilation plays an important role in hens' egg production at high ambient temperature. **Poultry Science**, v. 90, n. 4, p. 856-862, 2011.

SAEED, M. et al. Heat stress management in poultry farms: A comprehensive overview. **Journal of Thermal Biology**, v. 84, p. 414-425, 2019.

SANTANA, M. H. M. et al. Ajuste dos níveis de energia e proteína e suas relações para galinhas poedeiras em diferentes condições térmicas. **Pubvet**, v. 12, n. 1, p. 1-12, 2018.

SANTOS, M. J. B. et al. Update of model to predict sensible heat loss in broilers. **Animal Production Science**, v.57 n.9, p.1877-1883, 2016.

SANTOS, T. C. et al. Productive performance and surface temperatures of Japanese quail exposed to different environment conditions at start of lay. **Poultry science**, v. 98, n. 7, p. 2830-2839, 2019.

SILVA, R. G.; MAIA, A. S. C. **Principles of animal biometeorology**. Volume 2. Springer Science & Business Media, 2013. 283 p.

SCANES, C. G. **Sturkie's Avian Physiology**. 6<sup>a</sup> ed. Milwaukee: Elsevier, 2015. 990 p.

SCHIASSI, L. et al. Modelagem Fuzzy aplicada na avaliação do desempenho de frangos de corte. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 140-146, 2015.

SILVA, T. P. N.; PANDORFI, H.; GUISELINI, C. Energy balance in the poultry-shed system and its influence on broiler performance. **J. of Braz. Assoc. of Agric. Eng.**, v. 35, n. 4, p. 613-624, 2015.

SOLIMAN, A.; SAFWAT, A. M. Climate Change Impact on Immune Status and Productivity of Poultry as Well as the Quality of Meat and Egg Products. In: **Climate Change Impacts on Agriculture and Food Security in Egypt**. Springer, Cham, 2020. p. 481-498.

SOUSA, F. C. et al. 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.

SOUZA JUNIOR, J. B. F. **Termorregulação e produção de ovos de galinhas Label Rouge em ambiente equatorial semiárido**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2014.

SOUZA JUNIOR, J. B. F. et al. Estimating sensible heat loss in laying hens through thermal imaging. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 166, p. 105038, 2019.

SVERDLOVA, N. S. et al. Boundary Conditions for Heat Transfer and Evaporative Cooling in the Trachea and Air Sac System of the Domestic Fowl: A Two-Dimensional CFD Analysis. **Plos ONE**, v. 7, n. 9, p. 1-9 2012.

TICKLE, P. G.; CODD, J. R. Thermoregulation in rapid growing broiler chickens is compromised by constraints on radiative and convective cooling performance. **Journal of thermal biology**, v. 79, p. 8-14, 2019.

TURNPENNY, J. R. **Potential impacts of climate change on the energy balance of UK livestock**. 1997. Tese (Doutorado em Fisiologia) - University of Nottingham, 1997.

TURNPENNY, J. R. et al. Thermal balance of livestock, 1. A parsimonious model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.101, p. 15-27, 2000.

WOLFENSON, D. Blood flow through arteriovenous anastomoses and its thermal function in the laying hen. **Journal of Physiology**, 334, p. 395-407, 1983.

XIN, H. et al. Drinking water temperature effects on laying hens subjected to warm cyclic environments. **Poultry Science**, v. 81, n. 5, p. 608-617, 2002.

YAHAV, S. et al. Ventilation, sensible heat loss, broiler energy, and water balance under harsh environmental conditions. **Poultry Science**, v.83, p.253-258, 2004.

YAHAV, S. et al. Sensible heat loss: the broiler's paradox. **World's Poultry Science Journal**, v. 61, n. 3, p. 419-434, 2005.

YAHAV, S. Alleviating heat stress in domestic fowl: different strategies. **World's Poultry Science Journal**, v.65, p.719-732, 2009.

YANAGI JUNIOR, T. **Partial surface wetting to relieve acute thermal stress of laying hens.** 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

**SEGUNDA PARTE – ARTIGO**

**A novel heat transfer model using complex input variables to predicting accurately  
hen's core temperature  
(Versão de submissão)**

**Artigo redigido conforme as normas da *Journal of Thermal Biology***

## A NOVEL HEAT TRANSFER MODEL USING COMPLEX INPUT VARIABLES TO PREDICTING ACCURATELY HEN'S CORE TEMPERATURE

Marcelo Bahuti, Tadayuki Yanagi Junior, Bruna Pontara Vilas Boas Ribeiro, Alessandro Torres Campos, Murilo Santos Freire

**Abstract:** The objective of this study was to develop a heat balance in laying hens and analyze their performance, besides simulating the partition between sensible and latent heats. The 28-d old Hy-line laying hens were subjected to a factorial combination of an environment with five levels of temperature (20, 24, 28, 32, and 36 °C), two levels of relative humidity (40 and 60%), and three levels of air velocity (0.2, 0.7 and 1.4 m·s<sup>-1</sup>). The minimum time of exposure for each bird to a given thermal challenge was 3 h and a maximum time of 6 h. Firstly, ANOVA and MANOVA were performed to fit equations of respiratory rate and the overall heat transfer coefficient by conduction in the bird's body (U), respectively. For the heat balance, the partitions of heat transferred to the bird's body through conduction, convection, radiation and respiratory tract were taken into account. Different input settings were evaluated for convection heat transfer coefficient ( $h_{conv}$ ) and U. The validation of the proposed model was performed by comparing the predicted cloacal temperature values to those obtained experimentally. As a result, the model proved to be adequate for analyzing the interaction between hen and environment, and the complexity in determining U and  $h_{conv}$  interferes in its performance. The analysis of statistical indicators reiterates that constant values for these coefficients are not recommended. For the studied conditions, latent heat loss had a greater contribution than sensible forms from the temperature of 32.85°C, not being influenced by air velocity. The model is accurate for the prediction of cloacal temperature, contributing to the identification of possible strategies for mitigating thermal stress, as it allows simulations of the thermoregulation mechanism of laying hens.

**Keywords:** heat exchange, latent heat, modeling, sensible heat, thermal environment, thermoregulation.

### 1. Introduction

The thermal environment directly affects the welfare and productive performance of laying hens. Therefore, the animal-thermal environment interrelations need to be continuously studied, either due to the genetic evolution or the necessity to improve the theoretical knowledge in order to obtain practical solutions to the challenges experienced in commercial production. Among these challenges, we highlight the design and management of laying hens housing and environmental systems (ventilation, heating, and evaporative cooling).

Birds are homeothermic animals, sensitive to weather variations. Therefore, the variables that characterize the thermal environment can affect the targeting of energy provided by feeding. Under adverse weather conditions, the energy is directed to maintain the bird's body temperature, rather than being spent on quality production (Melo et al., 2016; Souza Junior et al., 2019).

Several studies have analyzed the behavior of weather variables in the bird's environment over different production systems either through geostatistics (Coelho et al., 2015; Ferraz et al., 2018) or computational fluid dynamics (Damasceno et al., 2014; Saraz et al., 2017). Other studies evaluate the heat transfer through buildings (Barbosa et al., 2017; Goselink and Ramirez, 2019). However, a limited number of recent studies investigate the heat transfer in the body of birds and the interaction with the surrounding environment (Souza Junior et al., 2019; Tickle and Codd, 2019).

According to Castilho et al. (2015), the amount of energy stored in the body mass varies depending on the body temperature of the animal, which in turn varies according to the thermogenesis and thermolysis processes. Therefore, in order to identify the homeostasis of birds, it is important to know the metabolic production and determine the heat exchange between the animal and the production environment (Randall et al., 2011). In this regard, chickens perform sensible heat exchanges (conduction, convection, and radiation) due to the temperature gradient, while latent heat exchange (respiratory evaporation) occurs as a consequence of the vapor pressure difference.

In this manner, thermal stress has been one of the main adversities faced by poultry producers, due to the lower tolerance in the genotypes of current birds (Saeed et al., 2019). Hence, the use of technology in the poultry production is an important parameter to be considered for obtaining an appropriate environment (Barbosa et al., 2017), however, fast and precise methods are also necessary to frequently evaluate the behavior and reaction of birds, in order to minimize productive losses due to thermal effects.

Therefore, researches are justified to improve the understanding of the physiological interactions of birds over thermal variations in the production environment. Thus, mathematical modeling is a methodology for decision making, allowing predictions of several scenarios of interest. In this context, the objective of this research was to develop a heat balance in laying hens and analyze their performance according to the complexity of the input variables, besides simulating the partition between sensible heat and latent heat.



## 2. Material and methods

### 2.1. Experimental data

Experimental data from Ribeiro et al. (2020) were used to develop and validate de heat transfer model. The experiment was conducted in four environment-controlled wind tunnels, with the capability to control the air dry-bulb temperature ( $t_{\text{air}}$ ), air relative humidity (RH), and air velocity ( $V_{\text{air}}$ ) with deviations smaller than or equal to 0.4 °C, 3.0% and 0.1 m·s<sup>-1</sup>, respectively.

Ninety Hy-Line laying hens were evaluated in the highest production phase at 28 weeks of age. Initially, the chickens were subjected to seven days of acclimatization, under thermal comfort zone (Piestun et al., 2013; Abdelqader and Al-Fataftah, 2014; Kodaira et al., 2015), with  $t_{\text{air}}$  of  $23.2 \pm 0.1$  °C and RH of  $60\% \pm 0.8\%$  (Hassan et al., 2013; Oliveira et al., 2014).

After acclimatization, the birds were subjected to a factorial combination of five levels of  $t_{\text{air}}$  (20, 24, 28, 32, and 36 °C), two levels of RH (40 and 60%), and three levels of  $V_{\text{air}}$  (0.2, 0.7 and 1.4 m·s<sup>-1</sup>), a total of thirty thermal challenges, with three replications. Each bird was subjected once to each of these thermal challenges.

The minimum time of exposure for each bird to a given thermal challenge was 3 h (Yanagi Junior, 2002) and a maximum time of 6 h, aiming to mitigate the prolonged exposure of the bird to thermal stress. Among this time interval, when the bird's cloacal temperature ( $t_{\text{clo}}$ ) stabilized, the test was stopped.

During each thermal challenge, the  $t_{\text{clo}}$ , the surface temperature ( $t_{\text{surf}}$ ), and the respiratory rate (RR) of the birds were measured at 10 min intervals. The  $t_{\text{clo}}$  was measured using a digital thermometer (PT100 model Gulterm 200, with an accuracy of  $\pm 0.2$  °C). The  $t_{\text{surf}}$  was obtained using a thermographic camera (model Ti 55, Fluke, with 0.05 °C of accuracy). The RR was determined by visual observation for 15 s and later extrapolated to 1 min. The body mass of the birds was determined using a digital scale, with an accuracy of  $\pm 0.5$  g.

### 2.2. Thermophysical properties of air

Heat transfer between the animal and the surrounding environment is directly related to thermal variables and, consequently, to thermophysical properties, which constitutes the input data in several equations used.

According to Irvine and Liley (1984), specific heat at constant pressure ( $C_p$ ,  $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ), dynamic viscosity ( $\mu$ ,  $N \cdot s \cdot m^{-2}$ ), and thermal conductivity of air ( $\kappa$ ,  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ), can be estimated by Eqs. (1) – (3), respectively. The application intervals of these equations are  $250 \leq T_{air} \leq 2000$  K,  $250 \leq T_{air} \leq 600$  K, and  $250 \leq T_{air} \leq 1050$  K, respectively, with estimation errors of 0.25, 1.25, and 0.28%.

$$C_p = \left( \begin{array}{c} 1.03409 - 0.284887 \cdot 10^{-3} \cdot T_{air} + 0.7816818 \cdot 10^{-6} \cdot T_{air}^2 - \\ 0.4970786 \cdot 10^{-9} \cdot T_{air}^3 + 0.1077024 \cdot 10^{-12} \cdot T_{air}^4 \end{array} \right) \cdot 10^3 \quad (1)$$

$$\mu = \left( \begin{array}{c} -0.98601 + 9.080125 \cdot 10^{-2} \cdot T_{air} - 1.17635575 \cdot 10^{-4} \cdot T_{air}^2 + \\ 1.2349703 \cdot 10^{-7} \cdot T_{air}^3 - 5.7971299 \cdot 10^{-11} \cdot T_{air}^4 \end{array} \right) \cdot 10^{-6} \quad (2)$$

$$\kappa = \left( \begin{array}{c} -2.2765 \cdot 10^{-3} + 1.2598485 \cdot 10^{-4} \cdot T_{air} - 1.4815235 \cdot 10^{-7} \cdot T_{air}^2 + \\ 1.73550646 \cdot 10^{-10} \cdot T_{air}^3 - 1.066657 \cdot 10^{-13} \cdot T_{air}^4 + \\ 2.47663035 \cdot 10^{-17} \cdot T_{air}^5 \end{array} \right) \quad (3)$$

The saturated vapor pressure ( $P_{ws}$ , kPa), for  $t_{air}$  greater than  $0^\circ C$ , was calculated by Eq. (4) (Tetens, 1930). Furthermore, according to Wilhelm (1976), the partial pressure of water vapor at air temperature ( $P_w$ , kPa), humidity ratio ( $W$ ,  $kg_{water} \cdot kg_{dry\ air}^{-1}$ ), density ( $\rho$ ,  $kg \cdot m^{-3}$ ), and the kinematic viscosity of the air ( $\nu$ ,  $N \cdot s \cdot m^{-2}$ ), was determined by the Eqs. (5) – (8), respectively.

$$P_{ws} = 0.61078 \cdot 10^{\frac{7.5 \cdot t_{air}}{237.3 + t_{air}}} \quad (4)$$

$$P_w = \frac{UR}{100} \cdot P_{ws} \quad (5)$$

$$W = 0.62198 \cdot \frac{P_w}{P_{atm} - P_w} \quad (6)$$

$$\rho = \left[ \frac{R_{air} \cdot T_{air}}{P_{atm}} \cdot (1 + 1.6078 \cdot W) \right]^{-1} \quad (7)$$

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (8)$$

where,

$t_{\text{air}}$  and  $T_{\text{air}}$ : air dry-bulb temperature ( $^{\circ}\text{C}$  and  $\text{K}$ , respectively);

$P_{\text{atm}}$ : atmospheric pressure of air ( $\text{kPa}$ );

$R_{\text{air}}$ : gas constant for air, equivalent to  $0.28705 \text{ (kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$ .

The absolute humidity of atmospheric air ( $\varphi_{\text{A}}, \text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) can be determined by Eq. (9) (Nascimento et al., 2017).

$$\varphi_{\text{A}} = \frac{2166.87 \cdot P_{\text{w}}}{T_{\text{air}}} \quad (9)$$

Based on the previous equations, it is possible to determine some dimensionless numbers and coefficients that are related to the flow regime and heat transfer. The dimensionless Prandtl (PR), Reynolds (RE), and Nusselt (Nu) numbers are determined by the Eqs. (10), (11) and (12), respectively.

$$P_{\text{R}} = \frac{C_{\text{p}} \cdot \mu}{\kappa} \quad (10)$$

$$R_{\text{E}} = \frac{V_{\text{air}} \cdot d}{\nu} \quad (11)$$

$$\text{Nu} = 2 + (0.4 \cdot R_{\text{E}}^{\frac{1}{2}} + 0.06 \cdot R_{\text{E}}^{\frac{2}{3}}) P_{\text{R}} \quad (12)$$

where,

$V_{\text{air}}$ : air velocity ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );

$d$ : it is the characteristic dimension of bird's body ( $\text{m}$ ), estimated by Eq. (13) (Mitchell, 1930);

$m_{\text{b}}$ : it is the bird's body mass ( $\text{kg}$ ).

$$d = 0.131 \cdot m_{\text{b}}^{0.33} \quad (13)$$

According to Li et al. (2016), considering the bird as a sphere, the convection heat transfer coefficient ( $h_{\text{conv}}$ ,  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) can be calculated by Eq. (14). In turn, the latent heat of vaporization of water ( $\lambda$ ,  $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ ) can be obtained according to Eq. (15), for the range of  $273.16 < T_{\text{air}} < 338.72 \text{ K}$  (ASAE, 1974).

$$h_{\text{conv}} = \frac{\text{Nu} \cdot \kappa}{d} \quad (14)$$

$$\lambda = 2502.5353 - 2.3858 \cdot (t_{\text{air}} - 273.16) \quad (15)$$

### 2.3. Model development

For the development of the heat transfer model between a laying hen and surrounding environment, the following hypotheses were established: steady-state regime, the heat exchange between bird and environment is one-dimensional, the cloacal temperature is equal to the core body temperature, and the chicken has spherical body shape.

In this manner, the heat balance equation (Eq. (16)) may be composed of conduction heat transferred from the bird's core body to the bird's surface ( $Q_{\text{bird}}$ ), convection heat transferred ( $Q_{\text{Conv}}$ ), radiation heat transferred ( $Q_{\text{Rad}}$ ) and latent heat transferred by the bird's respiratory tract ( $Q_{\text{Resp}}$ ).

$$Q_{\text{bird}} - Q_{\text{Conv}} - Q_{\text{Rad}} - Q_{\text{Resp}} = 0 \quad (16)$$

The energy that propagates through the animal's body is due to its physical and metabolic characteristics (Nascimento, 2015), which in turn define the rate of conduction heat transfer through the body. Hence,  $Q_{\text{bird}}$  (W) can be calculated according to Eq. (17).

$$Q_{\text{bird}} = U \cdot A_s \cdot (t_{\text{clo}} - t_{\text{surf}}) \quad (17)$$

where,

U: it is the overall heat transfer coefficient by conduction in the bird's body ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ );

$A_s$ : it is the bird's surface area ( $\text{m}^2$ ), which can be estimated from the  $m_b$  through Eq. (18), proposed by Mitchell (1930).

$$A_s = 0.106729 \cdot m_b^{0.705} \quad (18)$$

The bird in the production environment is subjected to the temperature gradient between its body and the surrounding air, resulting in heat exchange by convection. Thus,  $Q_{Conv}$  (W) can be determined by Eq. (19).

$$Q_{Conv} = h_{conv} \cdot A_s \cdot (t_{surf} - t_{air}) \quad (19)$$

where,

$t_{surf}$ : it is the bird's surface temperature ( $^{\circ}C$ ).

The radiation heat transfer ( $Q_{Rad}$ , W) from the bird's body to the surrounding surfaces can be calculated by Eq. (20).

$$Q_{Rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot (T_{surf}^4 - T_{surd}^4) \quad (20)$$

where,

$\varepsilon$ : it is the emissivity of the animal body, assumed as 0.95 (Abreu et al., 2017; Tickle and Codd, 2019; Cândido et al., 2020);

$\sigma$ : it is the Stefan-Boltzmann constant ( $5.67051 \times 10^{-8}$ ,  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ );

$T_{surf}$ : it is the bird's surface temperature (K);

$T_{surd}$ : it is the surrounding temperature around the bird (K).

The  $T_{surf}$  and  $T_{surd}$  data were obtained through thermographic images, and the  $T_{surd}$  values correspond to the average temperatures of the wind tunnel internal surfaces.

Another form of heat loss used by the bird is through respiratory evaporation, through panting. Thus,  $Q_{Resp}$  (W) can be determined by Eq. (21) (Nascimento et al., 2017).

$$Q_{Resp} = \lambda \cdot \left( \frac{V_{resp}}{1000} \right) \cdot (\varphi_E - \varphi_A) \quad (21)$$

where,

$V_{resp}$ : it is the respiratory ventilation ( $L \cdot s^{-1}$ );

$\varphi_E$ : it is the absolute humidity of exhaled air by chicken ( $g \cdot m^{-3}$ ).

The  $V_{\text{resp}}$  values can be estimated based on RR (mov.  $\cdot \text{min}^{-1}$ ), from Eq. (22) adjusted by Kassim and Sykes (1982), for laying hens, with  $R^2 = 0.99$ .

$$V_{\text{resp}} = \frac{391 + 7.85 \cdot \text{RR}}{60000} \quad (22)$$

In turn,  $\varphi_E$  can be obtained through the Tetens equation (Eq. (4)) to determine the pressure of exhaled air, and the Eq. (9), where, in both uses exhaled air temperature by the bird ( $T_{\text{exh}}$ , K), estimated according to Nascimento et al. (2017) by Eq. (23).

$$T_{\text{exh}} = 22.02 + 0.45 \cdot t_{\text{air}} + 273.15 \quad (23)$$

Therefore, based on the thermophysical properties of air and determining the balance of the heat transfer of birds with the medium, according to equation (16), it is possible to calculate the U values for each thermal condition and, thus, adjust an empirical model for its estimation. In this way, based on the Eqs. (17), (19), (20), and (21), we obtained the Eq. (24) to calculate U.

$$U = \frac{h_{\text{conv}} \cdot (t_{\text{surf}} - t_{\text{air}}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{\text{surf}}^4 - T_{\text{surd}}^4) + \frac{\lambda \cdot \left(\frac{V_{\text{resp}}}{1000}\right) \cdot (\varphi_E - \varphi_A)}{A_S}}{(t_{\text{clo}} - t_{\text{surf}})} \quad (24)$$

#### 2.4. Statistical analysis and model validation

The experiment conducted by Ribeiro et al. (2020) was performed in a completely randomized design (CRD), following a triple factorial arrangement (5x2x3), in other words, five  $t_{\text{air}}$  levels (20, 24, 28, 32, and 36 °C), two RH (40 and 60%) and three  $V_{\text{air}}$  (0.2, 0.7 and 1.4  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), with three replications. Thus, analysis of variance (ANOVA), at the 5% level of significance, and a regression analysis to estimate RR were applied to data using the software SISVAR 5.7 (Ferreira, 2019). Following, the equation used to estimate RR was applied to calculate  $V_{\text{resp}}$  (Eq. (22)) and  $Q_{\text{Resp}}$  (Eq. 21), then, combined with the inputs used to determine the sensible heat exchange, U (Eq. (24)) was obtained. Multivariate analysis of variance (MANOVA) and multiple linear regression were applied to the values calculated from U for

fitting the empirical model for U estimation. The PAST software (PAleontological STatistics) was used.

In turn, the validation of the proposed heat transfer model was performed by comparing the predicted  $t_{clo}$  values (Eq. (25)) to those obtained experimentally. The Eq. (25) was obtained from the heat balance, explaining  $t_{clo}$ . The statistical indicators bias, mean absolute error (MAE), mean square error (MSE), root mean square error (RMSE), mean absolute percentage error (MAPE), and Student's t-test ( $p < 0.05$ ) were used to evaluate the performance of the model.

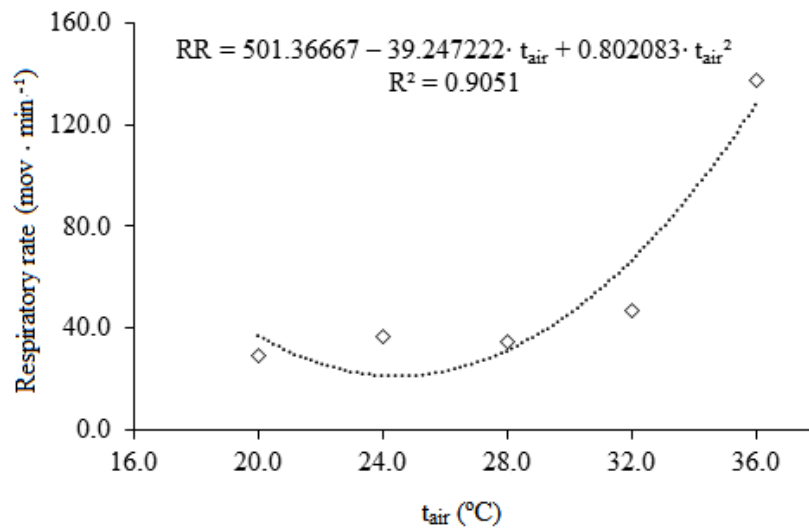
Furthermore, through the previous statistical indicators, it was evaluated the performance of the heat transfer model for predicting the  $t_{clo}$ , testing simplified forms of its use, such as the adoption of constant values of U and  $h_{conv}$  or to estimate through empirical equations, both using information from the literature.

$$t_{clo} = \left[ \frac{h_{conv} \cdot (t_{surf} - t_{air}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (t_{surf}^4 - t_{surd}^4) + \frac{\lambda \cdot \left(\frac{V_{resp}}{1000}\right) \cdot (\varphi_E - \varphi_A)}{A_s}}{U} \right] + t_{surf} \quad (25)$$

### 3. Results and discussion

#### 3.1. Empirical models to estimate RR and U

Respiration rate is directly related to the classification of the thermal comfort status of animals (Kassim and Sykes, 1982), preceding the changes in the  $t_{clo}$  (Yahav et al., 2005; Santana et al., 2018). It was observed that only the  $t_{air}$  factor was significant ( $p < 0.05$ ), a regression equation of RR was adjusted as a function of  $t_{air}$  (Fig. 1), with a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.9051. The equation was derived to obtain the minimum point, verifying that RR begins to increase at the  $t_{air}$  of 24.5°C, where the RR is 21  $\text{mov} \cdot \text{min}^{-1}$ . Kassim and Sykes (1982) reported that the normal RR value for laying hens is 23  $\text{mov} \cdot \text{min}^{-1}$ . Besides, Castilho et al. (2015) established that the ideal  $t_{air}$  interval for laying hens is 21.0 to 28.0 °C, whose mean value is 24.5°C.



**Fig. 1.** Respiratory rate as a function of air temperature.

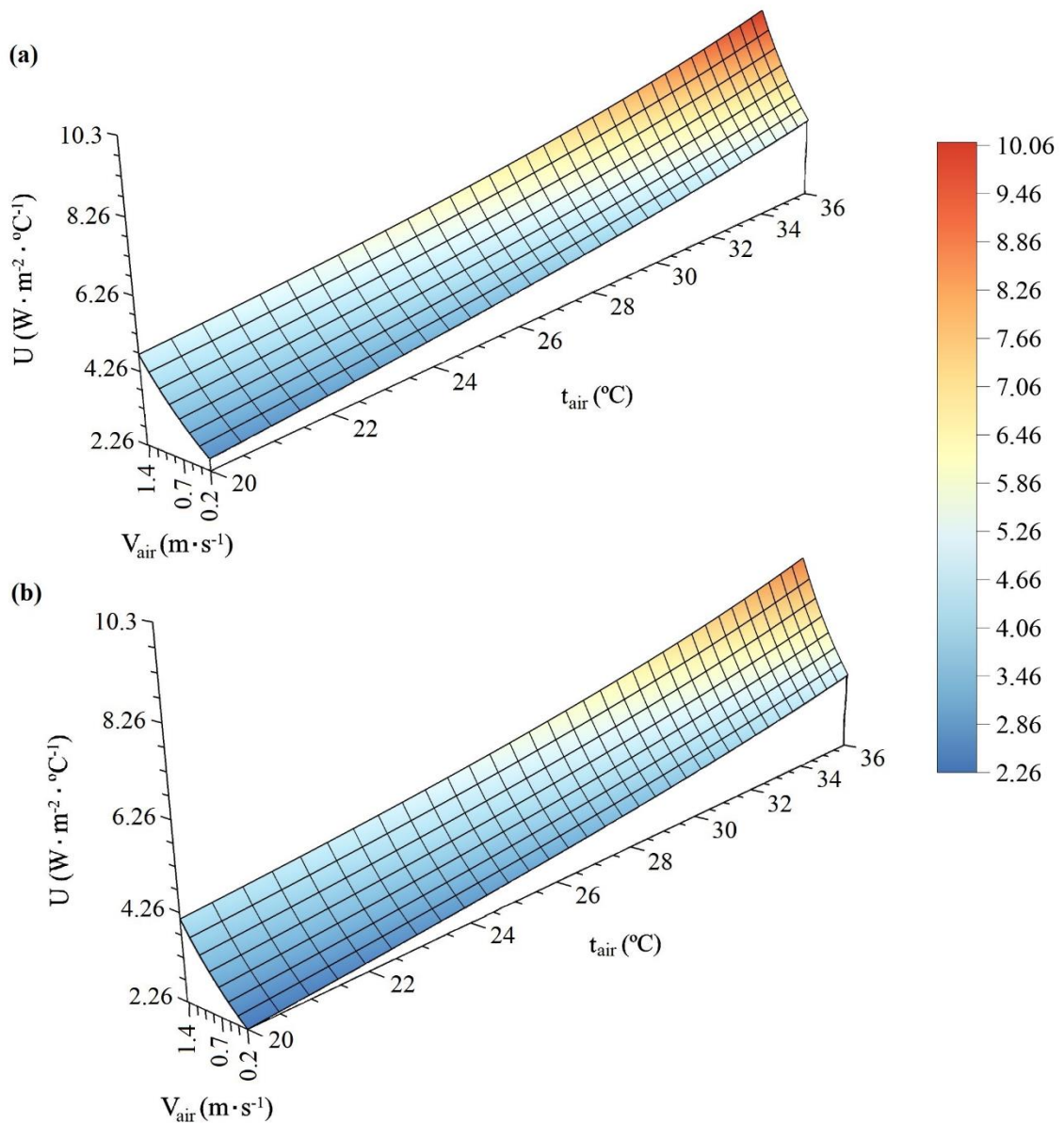
Grunitzky et al. (2020), submitting laying hens to  $t_{\text{air}}$  of 17 and 30 °C, observed low variation of RR (2  $\text{mov} \cdot \text{min}^{-1}$ ). In this research, a mean variation of 5  $\text{mov} \cdot \text{min}^{-1}$  was observed to  $t_{\text{air}}$  ranging from 20 to 28 °C (Fig. 1).

Moreover, the profile obtained for RR as a function of  $t_{\text{air}}$  corroborates to that reported by Oliveira et al. (2014), where, under high  $t_{\text{air}}$  the birds increase their RR to act as the main mechanism of heat loss. Arieli et al. (1980) verified that the RR of laying hens submitted to 32 °C was about 5 to 6 times higher than the comfort condition, presenting a significantly increasing behavior from 26 °C. However, the results in Fig. 1 denote 3 times increase in  $t_{\text{air}}$  at 32 °C when compared to 24 °C. The rise in an order of 6 times happened only for  $t_{\text{air}}$  of 36 °C. This variation may have occurred due to the strains and acclimatization of the hens. Thus, it was assumed the adequacy of the adjusted equation to estimate  $V_{\text{resp}}$  and, therefore,  $Q_{\text{Resp}}$ , used in the U prediction model.

Therefore, after applying the data to MANOVA and multiple linear regression analysis, both were significant ( $p < 0.05$ ), the Eq. (26) was adjusted with  $R^2$  of 0.5114. The profiles of U as a function of  $t_{\text{air}}$  and  $V_{\text{air}}$ , for RH of 40 and 60%, are illustrated in Fig. 2.

$$U = e^{0.1774 + 0.0473 \cdot t_{\text{air}} - 0.0068 \cdot \text{RH} + 0.4992 \cdot V_{\text{air}}} \quad (26)$$



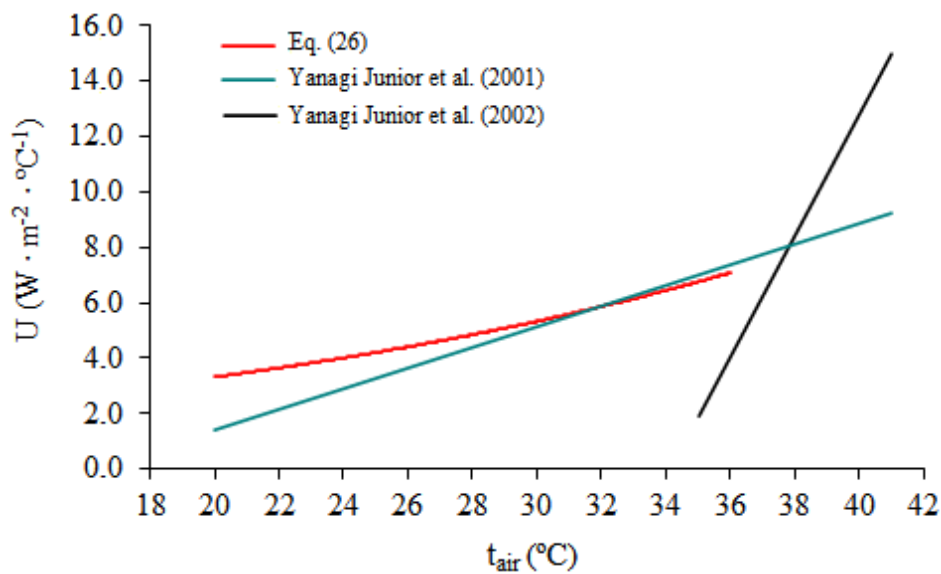


**Fig. 2.** Profiles of overall heat transfer coefficient by conduction in the bird's body ( $U$ ), obtained by Eq. (26), depending on temperature ( $t_{\text{air}}$ ) and air velocity ( $V_{\text{air}}$ ), for relative air humidity (RH) of (a) 40% and (b) 60%.

From an exploratory analysis of the surfaces, it was observed that  $V_{\text{air}}$  influences the increase of  $U$  in both RH conditions, both under high and low  $t_{\text{air}}$ . However, under high  $t_{\text{air}}$ , the  $U$  increment as a function of  $V_{\text{air}}$  occurs exponentially with higher-order when compared to those in lower  $t_{\text{air}}$ , regardless of the RH level. According to Wathes and Clark (1981a), the increase in  $U$  as a function of high  $V_{\text{air}}$  can occur due to the addition of turbulence in the boundary layer of the feathers.

Considering the influence of RH on U profile, higher magnitudes and amplitudes were found for the condition of 40% RH (Fig. 2a) compared to 60% RH (Fig. 2b). This profile occurs because in dry climate environments the bird has a greater ability to lose heat.

Fig. 3 illustrates the profile of U as a function of  $t_{\text{air}}$  for the adjusted equation (fixing RH = 40% and  $V_{\text{air}} = 0.70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) in comparison to the equations obtained by Yanagi Junior et al. (2001 and 2002), whose  $R^2$  values were 0.65 and 0.89, respectively. It was emphasized that the authors adjusted the equations to determine the overall resistance to heat transfer (R), where U is the inverse of R.



**Fig. 3.** Profile of the different equations for the overall heat transfer coefficient by conduction in the bird's body (U) as a function of the air temperature ( $t_{\text{air}}$ ).

The Eq. (26) and the equations of Yanagi Junior et al. (2001 and 2002) have different angular coefficients. However, it was observed that the increasing profile of U as a function of the increase in  $t_{\text{air}}$ , occurs for the three equations. The magnitude of U is high due to peripheral vasodilation mechanisms of the bird being triggered when exposed to high  $t_{\text{air}}$ . Thus, the heat of the bird's core body is transferred through the bloodstream to the surface, or, to the mucosa covering the respiratory tract, then, dissipated to the environment.

### 3.2. Validation of the proposed model and performance considering different settings

The performances of the mathematical model based on heat transfer equations, adopting different settings for the input variables  $h_{\text{conv}}$  and U, are listed in Table 1. The setting of model

1, originally proposed in this study, presented the best performance. In this setting, heat losses by conduction in the bird's body and by convection from the bird to the surrounding environment were calculated using the Eq. (26) (adjusted in this work) and  $h_{\text{conv}}$  considering the bird as a sphere (Eq. (14)), respectively. The  $t_{\text{clo}}$  values predicted by the model were statistically equal to those obtained experimentally ( $p>0.05$ , t-test).

Subsequently, when testing multiple settings of the input variables  $h_{\text{conv}}$  and  $U$ , the settings of models from 2 to 24 (Table 1), it was found that, in addition to setting 1, only settings 19 and 20 were not statistically different ( $p>0.05$ , t-test) for  $t_{\text{clo}}$  prediction. However, setting 19 was better than setting 20 and slightly lower than setting 1.

The empirical equation adjusted by Li et al. (2016) for estimating  $h_{\text{conv}}$ , was applied to the setting of model 19. Li et al. (2016) sought to approximate the  $h_{\text{conv}}$  of a sphere (Eq. (14)) to the  $h_{\text{conv}}$  of an animal represented by realistic body shape, obtaining a correlation of 99.78%. When analyzing the bias of model 19 compared to model 1, while the first underestimates the  $h_{\text{conv}}$  value, the second overestimate it, but with a lower magnitude. Moreover, the other performance indicators of model 1 indicate greater accuracy.

**Table 1.** Performance of the mathematical model proposed to estimate the cloacal temperature of laying hens, adopting different settings of the input variables convection heat transfer coefficient ( $h_{conv}$ ), and overall heat transfer coefficient by conduction (U).

Setting Model	Components ( $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ )		Indicators					
	$h_{conv}$	U	Bias	MAE	MSE	RMSE	MAPE	t-test
1**		Eq. (26)	0.158	2.064	7.141	2.672	5.148	$p > 0.05$ <sup>NS</sup>
2		<sup>A</sup> $(0.426 - 2.1 \cdot 10^{-4} \cdot t_{air})^{-1}$	1.761	3.408	19.413	4.406	8.519	$p < 0.05$ *
3	$h_{conv\_sphere}$	<sup>B</sup> 3.03	4.030	5.142	40.490	6.363	12.819	$p < 0.05$ *
4		<sup>C</sup> 2.83	4.900	5.676	50.762	7.125	14.147	$p < 0.05$ *
5		<sup>D</sup> 2.22	8.521	8.662	112.645	10.613	21.595	$p < 0.05$ *
6		<sup>E</sup> 3.27	3.127	4.597	31.705	5.631	11.460	$p < 0.05$ *
7			Eq. (26)	8.274	8.428	140.940	11.872	21.066
8	<sup>F</sup> 15	<sup>A</sup> $(0.426 - 2.1 \cdot 10^{-4} \cdot t_{air})^{-1}$	10.100	10.123	153.210	12.378	25.306	$p < 0.05$ *
9		<sup>B</sup> 3.03	13.960	13.960	241.943	15.555	34.833	$p < 0.05$ *
10		<sup>C</sup> 2.83	15.531	15.531	295.736	17.197	38.756	$p < 0.05$ *
11		<sup>D</sup> 2.22	22.073	22.073	580.332	24.090	55.087	$p < 0.05$ *
12		<sup>E</sup> 3.27	12.328	12.328	192.053	13.858	30.759	$p < 0.05$ *
13		Eq. (26)	5.897	6.122	56.506	7.517	15.301	$p < 0.05$ *
14	<sup>G</sup> $1.4058 \cdot (1.46 + \sqrt{V_{air} \cdot 100})$	<sup>A</sup> $(0.426 - 2.1 \cdot 10^{-4} \cdot t_{air})^{-1}$	8.520	8.747	123.204	11.100	21.864	$p < 0.05$ *
15		<sup>B</sup> 3.03	12.136	12.136	201.379	14.191	30.279	$p < 0.05$ *
16		<sup>C</sup> 2.83	13.578	13.578	246.636	15.705	33.880	$p < 0.05$ *
17		<sup>D</sup> 2.22	19.583	19.583	487.653	22.083	48.871	$p < 0.05$ *
18		<sup>E</sup> 3.27	10.637	10.637	159.561	12.632	26.539	$p < 0.05$ *
19		Eq. (26)	-0.580	2.305	7.753	2.784	5.757	$p > 0.05$ <sup>NS</sup>
20	<sup>H</sup> $1.3374 \cdot h_{conv\_sphere} - 2.182$	<sup>A</sup> $(0.426 - 2.1 \cdot 10^{-4} \cdot t_{air})^{-1}$	1.171	3.803	23.291	4.826	9.510	$p > 0.05$ <sup>NS</sup>
21		<sup>B</sup> 3.03	3.337	5.390	43.332	6.583	13.448	$p < 0.05$ *
22		<sup>C</sup> 2.83	4.158	5.910	53.042	7.283	14.742	$p < 0.05$ *
23		<sup>D</sup> 2.22	7.575	8.501	111.500	10.559	21.201	$p < 0.05$ *
24		<sup>E</sup> 3.27	2.485	4.850	35.024	5.918	12.103	$p < 0.05$ *

\*\*This study.  $h_{conv\_sphere}$  = Eq. (14). Constant obtained in: <sup>B</sup> Tunrpenney et al. (2000); <sup>C</sup> Deshazer et al. (1970); <sup>D</sup> Wathes and Clark (1981a); <sup>E</sup> Mean values cited by Wathes and Clark (1981a); <sup>F</sup> Nääs et al. (2014). Equation obtained by: <sup>A</sup> Yanagi Junior et al. (2001) <sup>G</sup> Nascimento et al. (2014); <sup>H</sup> Li et al. (2016). NS = no significant difference. \* = significant difference. Mean absolute error (MAE), mean square error (MSE), root mean square error (RMSE), and mean absolute percentage error (MAPE).

It was found that the use of  $U$  constant values is not recommended as model input data, since the performance indicators were worse and the predicted values of  $t_{clo}$  are statistically different from those obtained experimentally ( $p > 0.05$ , t-test). This result corroborates that obtained by McArthur (1981), who stated that it is inappropriate to assume constant values to describe the resistance of the tissue and feather layer of a bird, since the relationship between  $t_{air}$  and body heat flow is not linear. Identical profiles were observed using a  $h_{conv}$  constant, according to the settings of model 7 to 12 (Table 1).

Analogous to Eq. (26), the equation adjusted by Yanagi Junior et al. (2001) includes a wide temperature range (20 to 41°C) and different levels of RH, where data of laying hens at different ages and body masses, were obtained experimentally and from the literature. This equation presented a better performance when combined with the equation adjusted by Li et al. (2016) to estimate  $h_{conv}$  (model setting 20). When comparing the  $h_{conv}$  equations, it was verified that the one used by Nascimento et al. (2014) combined with numerous input settings of the  $U$  variable (model settings 13 to 18), resulted in high values of prediction errors (Table 1).

### 3.3. Simulations of sensible and latent heat partitions

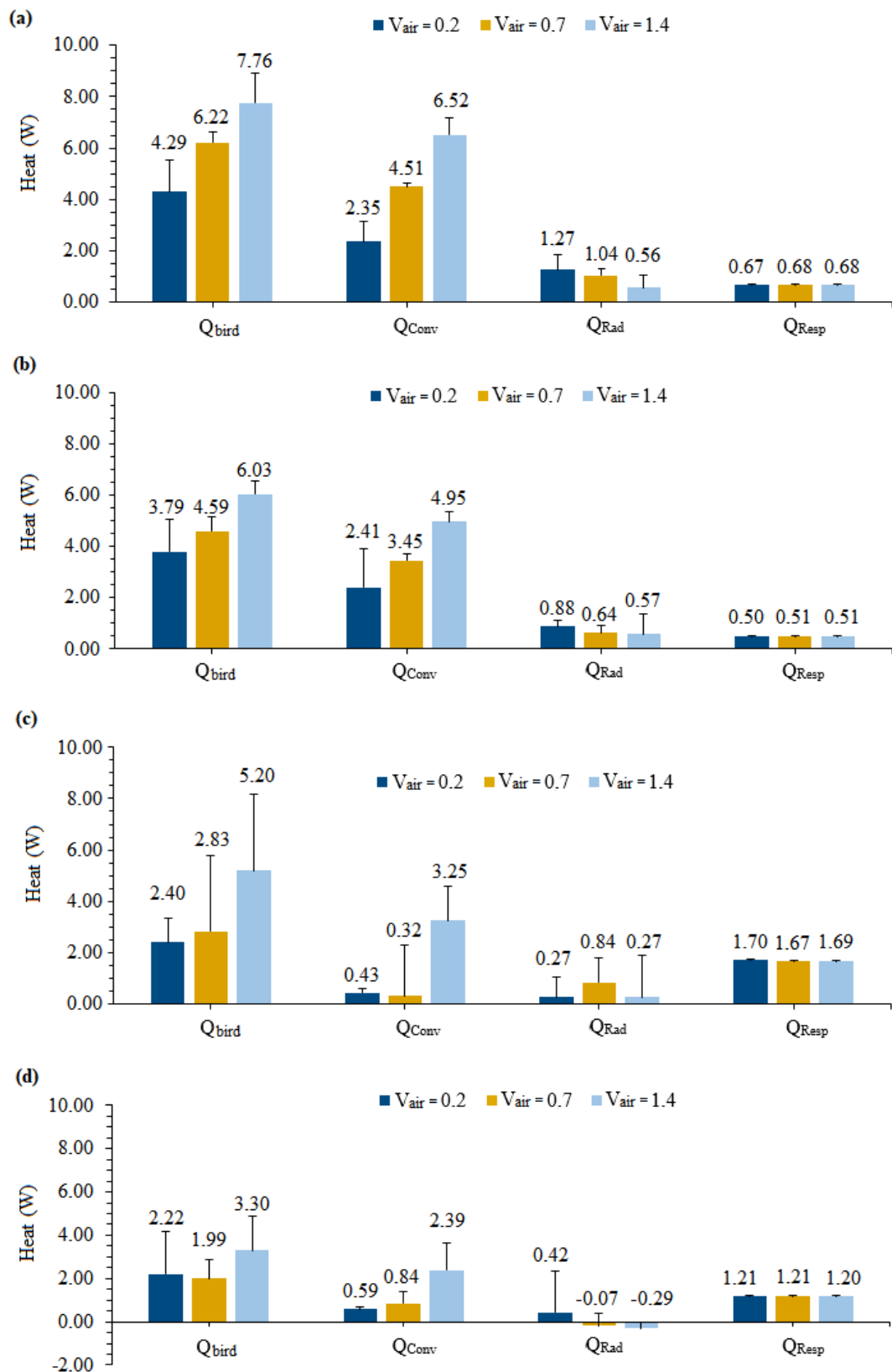
It was observed that an increase in  $V_{air}$  rises the  $Q_{Conv}$  of birds in both  $t_{air}$  conditions, regardless of RH levels (Fig. 4). These results corroborate Mitchell (1985) and Li et al. (2016), who stated that an increase in  $Q_{Conv}$  is directly related to a rise in  $V_{air}$ . Ruzal et al. (2011), when submitting laying hens to  $t_{air}$  of 35°C and 50% RH, also observed that increasing  $V_{air}$  from 0.5 to 1.5  $m \cdot s^{-1}$  significantly increased the  $Q_{Conv}$  (from 2.21 to 4.10 W).

The increase in  $Q_{bird}$  is related to  $Q_{Conv}$ , since the heat loss of peripheral body areas due to the rise in the surrounding airflow, causes a decrease in  $t_{surf}$  and also increases the difference to the  $t_{clo}$ . Moreover, according to Fig. 2, it was found that an increase in  $V_{air}$  also increases the  $U$  values.

Regarding the  $Q_{Rad}$ , the  $V_{air}$  modification did not present a typical profile in the analyzed conditions (Fig. 4). They were corroborating the results from Ruzal et al. (2011), where the  $V_{air}$  of 0.5, 2.0, and 3.0  $m \cdot s^{-1}$  obtained statistically equal and lower  $Q_{Rad}$  values than the condition of 1.5  $m \cdot s^{-1}$ . Yahav et al. (2004), did not find a difference for the  $Q_{Rad}$  of broilers submitted to  $V_{air}$  of 0.8, 1.5, 2.0, and 3.0  $m \cdot s^{-1}$  under 35 °C and 60% RH condition. However, Mitchell (1985), when modifying the  $V_{air}$  from 0.3 to 1.05  $m \cdot s^{-1}$ , found a 40% reduction in the  $Q_{Rad}$  of laying hens when exposed to low (20 °C) and high (30 °C)  $t_{air}$  values. In turn, Tickle and Codd (2019) submit broilers to  $V_{air}$  of 1.75, 2.375, or 3.0  $m \cdot s^{-1}$ , found that the sensible heat loss ( $Q_{Conv}$

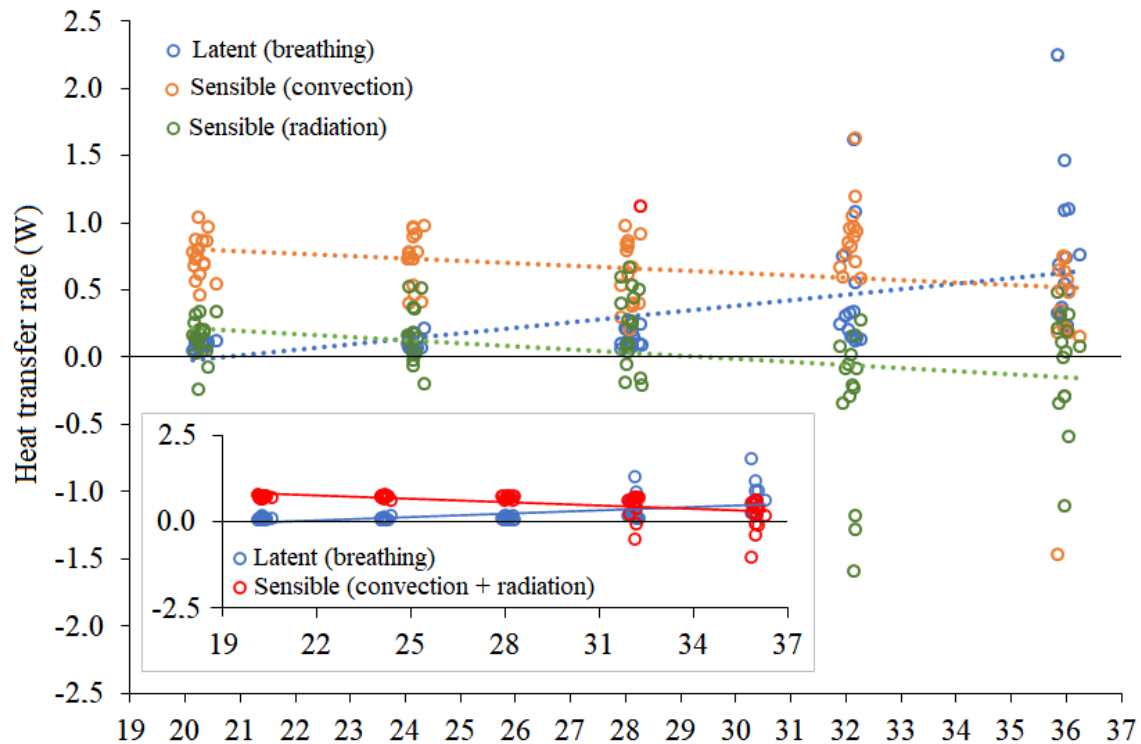
+  $Q_{\text{Rad}}$ ) increased with  $V_{\text{air}}$ , but the influence of the different  $V_{\text{air}}$  was more significant after the birds reached body mass between 1 and 1.5 kg. In this respect, Wathes and Clark (1981b) reported that in high  $V_{\text{air}}$  the feathers of birds could induce turbulence in the airflow and increase the  $Q_{\text{Conv}}$  in the skin.

The latent exchanges ( $Q_{\text{Resp}}$ ) demand a higher metabolic cost than sensible exchanges (Yahav et al., 2004; Ruzal et al., 2011; Sverdlova et al., 2012). Simmons et al. (1997), when exposing broilers to  $V_{\text{air}}$  of 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, and 3.0  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , observed a reduction in latent heat for all used  $t_{\text{air}}$  (29, 32, and 35 °C) when  $V_{\text{air}}$  increased. The previously mentioned authors also reported that the increase in  $V_{\text{air}}$  relieved the discomfort of birds because the visual analysis allowed to identify a relief in breathing with a decrease in panting. However, it was verified in Fig. 4 that  $V_{\text{air}}$  did not influence the  $Q_{\text{Resp}}$ .



**Fig. 4.** Profiles of heat partitions (transferred in the bird's body,  $Q_{bird}$ ; by convection,  $Q_{Conv}$ ; by radiation,  $Q_{Rad}$  and; by the respiratory tract,  $Q_{Resp}$ ), as a function of different air velocities ( $V_{air}$ ), for the conditions of (a) 24 °C and 40% relative humidity (RH), (b) 24 °C and 60% RH, (c) 36 °C and 40% RH and (d) 36 °C and 60% RH.

The partition profile of sensible and latent heat transfers as a function of air temperature are illustrated in Fig. 5. While sensible heat losses (by convection and radiation) decreases as  $t_{\text{air}}$  increases, latent heat (breathing) loss increases. These profiles corroborate those obtained by numerous researchers (Simmons et al., 1997; Estrada-Pareja et al., 2007; Silva et al., 2015; Milk, 2020).



**Fig. 5.** Partitioning of sensible heat (convection and radiation) and latent (breathing) for laying hens subjected to different air temperatures ( $t_{\text{air}}$ ).

The latent heat losses, by the respiration of the birds, exceeded the losses by radiation and convection at air temperatures of 23.7 and 34.2°C, respectively. It was verified that the birds began to gain heat by radiation when the  $t_{\text{air}}$  reached a value of 29.4°C.

Considering the total values of sensible and latent heat, it was observed that from the air temperature of 32.85°C, the latent heat becomes more important in heat loss by birds. Simmons et al. (1997) verified that broilers submitted to 29°C had latent heat loss higher than sensible forms. This profile occurs due to the gradient reduction between  $t_{\text{surf}}$  and  $t_{\text{air}}$ , and  $t_{\text{surd}}$ . Under these conditions, the sensible heat losses ( $Q_{\text{Conv}}$  and  $Q_{\text{Rad}}$ ) become less efficient compared to the latent ( $Q_{\text{Resp}}$ ), and the last one increases as RR increases, as a possible behavior of maintaining the homeothermy. Similarly, Souza Junior et al. (2019), when subjecting laying hens at the peak of laying to  $t_{\text{air}}$  ranging from 24 to 31°C, observed a decrease of total sensible



heat ( $Q_{\text{Conv}} + Q_{\text{Rad}}$ ) compared to an increase of  $t_{\text{air}}$ , however, the latent heat exchange was not quantified.

The proposed heat transfer model can be used to improve the understanding of the fundamental concepts involved in the heat transfer between the hens and the surround environment. The knowledges involved can be used for aiding in the projects of aviaries and climatization systems, as well as, for managing the hens, such as, the lodging densities definition. In addition, the heat transfer model can be linked to a computational algorithm to control the thermal environment inside of the aviaries.

#### **4 Conclusions**

The developed mathematical model, based on heat transfer equations, proved to be adequate for analyzing the interaction between birds and the environment. For the prediction of heat transfer through the bird body it was possible to adjust an empirical model to estimate the overall coefficient of heat transfer by conduction.

The choice of the equation to determine the overall coefficient of heat transfer by conduction and the coefficient of heat transfer by convection affects the model's performance. This study demonstrated that the use of inputs determined by constant values is not recommended, seeing that leads to less accurate results than the use of equations for these parameters.

Simulations aiming to obtain the profile of partitions between the sensible (convection and radiation) and latent (hen's breathing) heats help to understand the thermoregulation mechanism of birds, as well as in the identification of possible strategies to mitigate the thermal stress.

#### **Acknowledge**

This study was partially supported by the Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel - Brazil (CAPES) - Financial Code 001 and the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) (Process 310729/2018-1) for the financial support to this research.

## References

- Abreu, L. H. P., Yanagi Junior, T., Campos, A. T., Bahuti, M., Fassani, É. J., 2017. Cloacal and surface temperatures of broilers subject to thermal stress. *Engenharia Agrícola*, 37(5), 877-886. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n5p877-886/2017>
- Arieli, A., Meltzer, A., Berman, A., 1980. The thermoneutral temperature zone and seasonal acclimatisation in the hen. *British Poultry Science*, 21(6), 471-478. <http://dx.doi.org/10.1080/00071668008416699>
- ASAE. 1974. ASAE Standards. American Society of Agricultural Engineers: In Psychrometric Data, 18-25.
- Abdelqader, A., Al-Fataftah, A. R., 2014. Thermal acclimation of broiler birds by intermittent heat exposure. *Journal of Thermal Biology*, 39, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2013.11.001>
- Barbosa, R. C., Dalólio, F. S., Amorim, M. L., da Silva, J. N., Gonzaga, D. A., 2017. Análise de viabilidade econômica de sistemas de aquecimento de instalações agropecuárias para criação de frangos de corte. *Revista Engenharia na Agricultura*, 25(3), 212-222. <https://doi.org/10.13083/reveng.v25i3.721>
- Cândido, M. G. L., Tinôco, I. F. F., Albino, L. F. T., Freitas, L. C. S. R., Santos, T. C., Cecon, P. R., Gates, R. S., 2020. Effects of heat stress on pullet cloacal and body temperature. *Poultry Science*, 99(5), 2469-2477. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.11.062>
- Castilho, V.A.R., Garcia, R.G., Lima, N.D.S., Nunes, K.C., Caldara, F.R., Nääs, I.A., Bareto, B., Jacob, F.G., 2015. Bem-estar de galinhas poedeiras em diferentes densidades de alojamento/Welfare of laying hens in different densities of housing. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, 9(2), 122-131. <http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2015v9n2p122-131>
- Coelho, D.J.D.R., Tinoco, I.F., Vieira, M.D.F., Mendes, M.A., Sousa, F.C.D., França, L.G., 2015. Mapeamento do ambiente térmico de aviários de postura abertos em sistema vertical de criação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(10), 996-1004. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n10p996-1004>
- Damasceno, F.A., Saraz, J.A.O., Mendes, L.B., Martin, S., Martins, M.A., 2014. Evaluation of a heating system in poultry houses using a CFD model. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 67(2), 7311-7319. <http://dx.doi.org/10.15446/rfnam.v67n2.44178>
- Deshazer, J. A., Jordan, K. A., Suggs, C. W., 1970. Effect of acclimation on partitioning of heat loss by the laying hen. *Transactions of the ASAE*, 13(1), 82-84. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.38541>
- Estrada-Pareja, M. M., Márquez-Girón, S. M., Betancur, L. F. R., 2007. Efecto de la temperatura y la humedad relativa en los parámetros productivos y la transferencia de calor en pollos de engorde. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20(3), 288-303.
- Ferraz, P.F.P., Yanagi Junior, T., Melo, L.F.L.D., Castro, J.D.O., Cecchin, D., 2018. Spatial and temporal distribution of enthalpy in aviary heated by industrial furnace. *Revista Ceres*, 65(4), 346-355. <http://dx.doi.org/10.1590/0034-737X201865040007>

- Ferreira, D. F., 2019. SISVAR: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Revista Brasileira de Biometria*, 37(4), 529-535. <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>
- Goselink, Y.S.M., Ramirez, B.C., 2019. Characterization of an Air-to-Air Heat Exchanger for Manure Belt Drying Ventilation in an Aviary Laying Hen House. *The Journal of Applied Poultry Research*, 28(4), 1359-1369. <http://dx.doi.org/10.3382/japr/pfz075>
- Grunitzky, L., Centenaro, J. R., Silva, N. R. D., Paulo, J. D. M., Silveira, A. M. D., Lopes, G. V., Felix, G. A., Braz, P. H., 2020. Thermal stress alters the basal value of serum proteins in laying hens. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, 21. <http://dx.doi.org/10.1590/S1519-99402121062020>
- Hassan, M. R., Sultana, S., Choe, H. S., Ryu, K. S., 2013. Effect of monochromatic and combined light colour on performance, blood parameters, ovarian morphology and reproductive hormones in laying hens. *Italian Journal of Animal Science*, 12(3). <https://doi.org/10.4081/ijas.2013.e56>
- Irvine, T.F., Liley, P.E., 1984. *Steam and gas tables with computer equations*. Academic Press, Orlando. 185p.
- Kassim, H., Sykes, A. H., 1982. The respiratory responses of the fowl to hot climates. *Journal of Experimental Biology*, 97(1), 301-309.
- Kodaira, V., Pereira, D. F., Soares, N. M., Bueno, L. D. F., 2015. Concentração de glicose sanguínea e relação heterófilo: linfócito podem ser utilizados como indicadores de estresse térmico para aves poedeiras?. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, 9 (2), 182-190. <http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2015v9n2p182-190>
- Leite, P. G., 2020. *Dissipação de energia térmica e desempenho produtivo de galinhas d'angola submetidas a diferentes condições ambientais*. Universidade Federal de Campina Grande.
- Li, H., Rong, L., Zong, C., Zhang, G., 2016. A numerical study on forced convective heat transfer of a chicken (model) in horizontal airflow. *Biosystems Engineering*, 150, 151-159. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.08.005>
- McArthur, A. J., 1981. Thermal resistance and sensible heat loss from animals. *Journal of Thermal Biology*, 6(1), 43-47. [https://doi.org/10.1016/0306-4565\(81\)90042-5](https://doi.org/10.1016/0306-4565(81)90042-5)
- Melo, A.S., Fernandes, R.T.V., Marinho, J.B.M., Arruda, A.M.V., Figueirêdo, L.C., Fernandes, R.T.V., 2016. Relação temperatura e nutrição sobre o desempenho de galinhas poedeiras. *Pubvet*, 10, 795-872. <http://doi.org/10.22256/pubvet.v10n11.855-860>
- Mitchell, H.H., 1930. The surface area of single comb white leghorn chickens. *Journal of nutrition* 2(5), 443-449. <https://doi.org/10.1093/jn/2.5.443>
- Mitchell, M. A., 1985. Effects of air velocity on convective and radiant heat transfer from domestic fowls at environmental temperatures of 20° and 30 °C. *British Poultry Science*, 26(3), 413-423. <https://doi.org/10.1080/00071668508416830>
- Nääs, I. D. A., Graciano, D. E., Garcia, R. G., Santana, M. R. D., Neves, D. P., 2014. Heat loss in one day old pullets inside a hatchery. *Engenharia Agrícola*, 34(4), 610-616. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162014000400001>

Nascimento, G. R. D., Nääs, I. A., Baracho, M. S., Pereira, D. F., Neves, D. P., 2014. Termografia infravermelho na estimativa de conforto térmico de frangos de corte. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 658-663. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662014000600014>

Nascimento, S. T. (2015). Modelagem do equilíbrio térmico de frangos de corte: um estudo da geração e transferência de calor. Universidade Estadual Paulista.

Nascimento, S. T., Maia, A. S., Gebremedhin, K. G., Nascimento, C. C. 2017. Metabolic heat production and evaporation of poultry. *Poultry science*, 96(8), 2691-2698. <http://dx.doi.org/10.3382/ps/pex094>

Oliveira, D. L. D., Nascimento, J. W., Camerini, N. L., Silva, R. C., Furtado, D. A., Araujo, T. G., 2014. Desempenho e qualidade de ovos de galinhas poedeiras criadas em gaiolas enriquecidas e ambiente controlado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18(11), 1186-1191. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n11p1186-1191>

Piestun, Y., Druyan, S., Brake, J., & Yahav, S., 2013. Thermal manipulations during broiler incubation alter performance of broilers to 70 days of age. *Poultry science*, 92 (5), 1155-1163. <https://doi.org/10.3382/ps.2012-02609>

Randall, D., Burggren, W., French, K., 2011. *Fisiologia Animal: Mecanismos e Adaptações*. 4 ed.

Ribeiro, B. P. V. B., Yanagi Junior, T., Oliveira, D. D., Lima, R. R., Zangeronimo, M. G., 2020. Thermoneutral zone for laying hens based on environmental conditions, enthalpy and thermal comfort indexes. *Journal of Thermal Biology*, 93. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2020.102678>

Ruzal, M., Shinder, D., Malka, I., Yahav, S., 2011. Ventilation plays an important role in hens' egg production at high ambient temperature. *Poultry Science*, 90(4), 856-862. <https://doi.org/10.3382/ps.2010-00993>

Saeed, M., Abbas, G., Alagawany, M., Kamboh, A. A., El-Hack, M. E. A., Khafaga, A. F., Chao, S., 2019. Heat stress management in poultry farms: A comprehensive overview. *Journal of thermal biology* 84, 414–425. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2019.07.025>

Santana, M. H. M., Saraiva, E. P., Costa, F. G. P., Júnior, J. P. F., Santana, A. M. M. A., Alves, A. R., 2017. Ajuste dos níveis de energia e proteína e suas relações para galinhas poedeiras em diferentes condições térmicas. *Pubvet*, 12(1), 1-12. <https://doi.org/10.22256/pubvet.v12n1a20.1-12>

Saraz, J.A., Rocha, K.S., Damasceno, F.A., Tinoco, I.F., Osorio, R., Tobón, J.C., 2017. 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. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n12p852-857>

Silva, T.P., Pandorfi, H., Guiselini, C., 2015. Energy balance in the poultry-shed system and its influence on broiler performance. *Engenharia Agrícola*, 35(4), 613-624. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n4p613-624/2015>

Simmons, J. D., Lott, B. D., May, J. D., 1997. Heat loss from broiler chickens subjected to various air speeds and ambient temperatures. *Applied Engineering in Agriculture*, 13(5), 665-669. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.21645>

- Souza Junior, J.B.F., El-Sabrou, K., Arruda, A.M.V., Costa, L.L.M., 2019. Estimating sensible heat loss in laying hens through thermal imaging. *Computers and Electronics in Agriculture*, 166, 105038. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105038>
- Sverdlova, N. S., Lambertz, M., Witzel, U., Perry, S. F., 2012. Boundary conditions for heat transfer and evaporative cooling in the trachea and air sac system of the domestic fowl: a two-dimensional CFD analysis. *PloS one*, 7(9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0045315>
- Tetens, O., 1930. Über einige meteorologische Begriffe. *Zeitschrift Geophysic*, Würzburg, 6, 297- 309.
- Tickle, P. G., Codd, J. R., 2019. Thermoregulation in rapid growing broiler chickens is compromised by constraints on radiative and convective cooling performance. *Journal of thermal biology*, 79, 8-14. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.11.007>
- Turnpenny, J. R., McArthur, A. J., Clark, J. A., Wathes, C. M., 2000. Thermal balance of livestock: 1. A parsimonious model. *Agricultural and forest meteorology*, 101(1), 15-27. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00159-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00159-8)
- Wathes, G.M., Clark, J. A., 1981a. Sensible heat transfer from the fowl: thermal resistance of the pelt. *British Poultry Science*, 22 (2), 175-183. <https://doi.org/10.1080/00071688108447875>
- Wathes, C. M., & Clark, J. A. (1981b). Sensible heat transfer from the fowl: Boundary-layer resistance of a model fowl. *British poultry science*, 22(2), 161-173. <https://doi.org/10.1080/00071688108447874>
- Wilhelm, L.R., 1976. Numerical calculation of psychrometric properties in SI units. *Transactions of the ASAE*, 19(2), 318-321. <https://doi.org/10.13031/2013.36019>
- Yahav, S., Straschnow, A., Luger, D., Shinder, D., Tanny, J., Cohen, S., 2004. Ventilation, sensible heat loss, broiler energy, and water balance under harsh environmental conditions. *Poultry Science*, 83(2), 253-258. <https://doi.org/10.1093/ps/83.2.253>
- Yahav, S., Shinder, D., Tanny, J., Cohen, S., 2005. Sensible heat loss: the broiler's paradox. *World's Poultry Science Journal*, 61(3), 419-434. <https://doi.org/10.1079/WPS200453>
- Yanagi Jr., T., Xin, H., Gates, R. S., 2001. Modeling partial surface evaporative cooling of chickens. In 2001 ASAE Annual Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 01-3011, 1-7. <https://doi.org/10.13031/2013.5526>
- Yanagi Jr., T., 2002. Partial surface wetting to relieve acute thermal stress of laying hens. Universidade Federal de Viçosa.
- Yanagi Jr., T., Xin, H., & Gates, R. S., 2002. A research facility for studying poultry responses to heat stress and its relief. *Applied Engineering in Agriculture*, 18 (2), 255. <https://doi.org/10.13031/2013.7787>