

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**MODELAGEM DO EQUILÍBRIO TÉRMICO DE FRANGOS DE
CORTE: UM ESTUDO DA GERAÇÃO E TRANSFERÊNCIA DE
CALOR**

Sheila Tavares Nascimento

Zootecnista

2015

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**MODELAGEM DO EQUILÍBRIO TÉRMICO DE FRANGOS DE
CORTE: UM ESTUDO DA GERAÇÃO E TRANSFERÊNCIA DE
CALOR**

Sheila Tavares Nascimento

Orientador: Prof. Dr. Alex Sandro Campos Maia

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de
Jaboticabal, como parte das exigências para
a obtenção do título de Doutor em Zootecnia

2015

N244m Nascimento, Sheila Tavares
Modelagem do equilíbrio térmico de frangos de corte: um estudo
da geração e transferência de calor. / Sheila Tavares Nascimento. – –
Jaboticabal, 2015
xix, 139 p.; 28 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias, 2015
Orientador: Alex Sandro Campos Maia
Banca examinadora: Marcos Macari, Evaldo Antonio Lencioni
Titto, Roberto Gomes da Silva, Jurandir Itizo Yanagihara
Bibliografia

1. Bioclimatologia. 2. Calor. 3. Avicultura. I. Título. II. Jaboticabal-
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 636.5:636.083.18

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

SHEILA TAVARES NASCIMENTO – filha de José Carlos do Nascimento e Lucia Tavares Nascimento, nasceu em Santos, São Paulo, no dia 17 de dezembro de 1984. Em agosto de 2003, iniciou o Curso de Graduação em Zootecnia, na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP - Campus de Ilha Solteira, onde foi bolsista de Iniciação Científica do Centro de Integração Empresa Escola (CIEE) junto à Casa de Agricultura da Prefeitura Municipal de Ilha Solteira, com orientação do Prof. Dr. Antonio Carlos Laurentiz, graduando-se em dezembro de 2007. Em março de 2008, ingressou no Curso de Pós-Graduação em Ciências, em nível de Mestrado, Área de Concentração em Física do Ambiente Agrícola, na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ) da Universidade de São Paulo (USP), na cidade de Piracicaba, onde foi bolsista CAPES, com orientação do Prof. Dr. Iran José Oliveira da Silva, defendendo dissertação em novembro de 2010. Em março de 2011, iniciou o Curso de Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Área de Concentração em Produção Animal, na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP - Campus de Jaboticabal, onde foi bolsista da Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), com orientação do Prof. Dr. Alex Sandro Campos Maia, defendendo tese em fevereiro de 2015. Em julho de 2014 fez parte do seu doutorado na Universidade de Cornell, com orientação do professor Kifle Gebremedhin, onde foi bolsista CAPES. Atualmente, é Professora Colaboradora do Departamento de Zootecnia da Universidade Estadual de Maringá (UEM).

“O fato mais impressionante sobre o Universo é o conhecimento de que os átomos que compõem a vida na Terra - os átomos que constroem o corpo humano são rastreáveis aos cadinhos, transformando elementos leves em elementos pesados em seu núcleo, sob temperaturas e pressões extremas.

Essas estrelas, as de grande massa entre elas, quando instáveis nos seus últimos dias, entraram em colapso e explodiram, espalhando seu interior enriquecido pela galáxia, interior feito de carbono, nitrogênio, oxigênio e todos os elementos fundamentais para a vida. Estes ingredientes se tornaram parte de nuvens de gases, que condensaram, colidiram, formando a próxima geração de sistemas solares, estrelas com planetas em órbita.

E estes planetas agora possuem os ingredientes para a própria vida. Então, quando eu olho para o céu a noite, e eu sei que sim, nós somos parte desse universo, estamos dentro desse universo, mas talvez mais importante do que estes dois fatos, é que o universo está em nós.

Quando eu reflito sobre este fato e olho para cima... Muitas pessoas se sentem pequenas, porque são pequenas e o universo é grande, mas eu me sinto grande! Porque meus átomos vieram daquelas estrelas! Há um nível de conectividade.

Isso é o que você realmente quer na vida: você quer se sentir conectado, você quer se sentir importante, você quer se sentir como um participante sobre o que ocorre, em acontecimentos e atividades ao redor de você. Isso é precisamente o que somos simplesmente por estarmos vivos...”

Neil DeGrasse Tyson

"Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá."

Ayrton Senna

"O maior inimigo do conhecimento não é a ignorância, mas a ilusão do conhecimento"

Stephen Hawking

"Saber muito não lhe torna inteligente. A inteligência se traduz na forma que você recolhe, julga, maneja e, sobretudo, onde e como aplica esta informação."

"Nós somos feitos de poeira de estrelas"

Carl Sagan

"Temos o destino que merecemos. O nosso destino está de acordo com os nossos méritos"

"No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade"

Albert Einstein

"...Você não pode ter sempre o que quer

Mas se você tentar algumas vezes

Você pode encontrar o que precisa"

Keith Richards & Mick Jagger, "You Can't Always Get What You Want",

The Rolling Stones

Dedico...

Aos meus pais, **José Carlos e Lucia**,

Por sempre me mostrarem que a Educação é o caminho mais sublime para alcançarmos nossos sonhos, por compartilharem os meus sonhos e serem incondicionais, em todos os momentos da minha vida. Mãe, metade do que sou são seus sonhos, você é o meu maior exemplo! Pai, a outra metade sou você, sigo sua dedicação em fazer tudo com amor e da melhor maneira que posso!
Amo vocês!

À minha irmã e melhor amiga, **Viviane**,

Sempre ao meu lado, nos momentos bons e nos ruins. Minha companheira, os melhores momentos ao longo destes anos foram com você! Obrigada por me dar forças quando tudo parecia tão difícil e por estar comigo nos momentos felizes e inesquecíveis! Cada show, cada festival, cada corrida pra ouvirmos uma banda que amamos e outras tantas que você fez eu me apaixonar, são momentos que levarei sempre na memória e no coração! Nossa vida tem trilha sonora! Te amo incondicionalmente!

Aos meus avós, **José & Maria, Henrique & Marizete**,

Exemplos de vida, que sempre me mostraram que podemos ser aquilo que desejamos, mesmo com todas as dificuldades que a vida nos prega, pois basta querer! Amo vocês!

Ao meu orientador, **Alex Sandro Campos Maia**,

Ao mestre com carinho...

Há quase dez anos atrás, quando te conheci ainda na graduação, descobri através das suas aulas a área que gostaria de seguir, estudar e me dedicar. Seguimos para lugares diferentes, mas você sempre esteve presente, acompanhando meus passos profissionais e sendo o meu maior exemplo. E hoje, realizo um sonho, de ser sua orientada e companheira de trabalho. Obrigada por ter me dado várias oportunidades, para que eu pudesse mostrar o meu trabalho e a minha dedicação. Você é a perfeita tradução da palavra Mestre, pois é aquele que ensina sem egoísmos e me mostrou sempre que posso ir além, que as dificuldades são pequenos empecilhos quando realmente sabemos o que queremos pra nossa vida. E eu sei e sempre soube: espalhar a semente do que você me ensinou, e passar o amor à profissão e à nossa área adiante! Cada aula, cada conversa, cada ensinamento foram combustíveis imensuráveis pra mim, agradeço todos os dias por esses momentos. Obrigada!

Aos meus amigos, em especial:

Angela Regina Arduino, o seu nome é a perfeita tradução do que você é: um anjo! Obrigada por estar sempre ao meu lado, um porto seguro, uma amiga em todas as horas, nos bons e nos momentos difíceis ao longo dessa caminhada. Obrigada pelos incentivos e por sempre me fazer acreditar que eu posso voar alto. Minha eterna gratidão.

Viviane Endo, minha amiga e companheira, obrigada por sua amizade e todos os momentos que passamos juntas. Você esteve sempre presente quando precisei. Admiro muito você. Obrigada por ser minha irmã todos esses anos.

Marcos Davi de Carvalho, este trabalho não existiria não fosse por você. Não tenho palavras pra agradecer a sua dedicação, as inúmeras madrugadas, finais de semana e em todos os momentos em que você esteve ao meu lado. Você foi meu alicerce durante a realização da tese. Nos momentos difíceis, olhava ao redor e você sempre esteve ali... Obrigada pela amizade.

Fabiana Alves de Almeida, minha amiga querida. Sua força e dedicação sempre foram exemplos pra mim, desde Ilha Solteira. Obrigada pela oportunidade ao longo desses anos em conviver com você, por me acolher desde o início e por ser a melhor companheira. Admiro muito você!

Vocês são a família que a vida me deixou escolher. Amo muito vocês!

“Porque juntos somos mais fortes”

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo apoio incondicional e por estar junto comigo nessa caminhada comigo. E peço perdão pelos momentos de ausência. Agradeço pelo carinho e por acreditarem no meu sonho. Amo vocês.

À Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, UNESP, pela oportunidade e pelo orgulho de me graduar e me tornar doutora por essa instituição.

Ao Programa de Pós-Graduação em Zootecnia da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP, Campus de Jaboticabal, pela oportunidade da realização do curso de Doutorado.

Ao professor Alex Sandro Campos Maia, pela orientação, pelos ensinamentos e pela convivência ao longo desses anos. Obrigada pela sua dedicação e esforço incondicional.

A Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de estudos, fundamental para a execução da tese.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos no início do doutorado.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos para a realização do meu doutorado sanduíche na Universidade de Cornell, nos Estados Unidos.

A Universidade de Cornell pela oportunidade de desenvolver parte do meu projeto, e pelos preciosos ensinamentos do professor Kifle G. Gebremedhin. Jamais vou esquecer Cornell e os inúmeros ilustres Cornellianos, como Carl Sagan, que são uma fonte de inspiração. Uma experiência única.

Ao professor Roberto Gomes da Silva, pela oportunidade de assistir suas aulas e pela convivência. Uma das mentes brilhantes da área de Bioclimatologia.

Aos professores Jurandir Itizo Yanagihara e Maurício Ferreira, da Faculdade de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP, pelas aulas, contribuições e por compartilhar o conhecimento de vocês conosco.

À todos os professores, amigos da primeira turma de Zootecnia, pesquisadores, funcionários e amigos da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira especialmente o Prof. Antonio Carlos Laurentiz, o Prof. Marcos Chiquitelli Neto e o Prof. Fernando Bergamaschine; e a Ana Claudia Martins e família, amiga de turma, obrigada por toda a sua ajuda, jamais vou esquecer tudo o que fez por mim.

À todos os amigos da ESALQ, que mesmo com a distância se mantiveram presentes, especialmente o Prof. Iran José Oliveira da Silva, pela orientação no mestrado; aos amigos Nupeanos, Ariane Castro, Natalia Risi, Elisabete Mellace, Ilze Helena das Neves, Maria Luiza Nunes e Claiton Zotti, por sua amizade; Giselle Borges, minha irmã a qual tenho muito orgulho por suas conquistas.

Simone Pertile, pela sua amizade e sempre me amparar nos momentos bons e ruins. Sua amizade é muito importante pra mim.

Maicon Sbardella, amigo querido, cuja amizade se manteve ao longo de todos esses anos. Admiro-te como pessoa e profissional, obrigada por estar sempre junto comigo.

Lélia Gonçalves Leite, obrigada por todos os momentos. Você esteve presente ao longo desse trabalho e sou muito feliz que hoje somos amigas. O seu sorriso e alegria foram forças importantíssimas para que eu me mantivesse serena. Obrigada por ser incondicional comigo.

Allan Troni, obrigada pelas risadas, conversas e amizade. Obrigada pelo suporte que me deu durante as minhas coletas. Você é um amigo inesquecível, te desejo muito sucesso.

Aos amigos de Jaboticabal, que foram fundamentais ao longo dessa caminhada, especialmente Valéria, Carlos Renato, Evandro, Elias (Nízio), Eduardo, Raquel,

Taciana, Adriana, Carol Scapellini. Obrigada por todos os momentos que passamos juntos.

Jacqueline Arduino, obrigada por seu carinho e amizade. Você foi uma amiga presente nos momentos bons e ruins. Obrigada pelas risadas e por todos os momentos que compartilhamos. Adoro muito você e te desejo muito sucesso!!

Aos amigos do Laboratório de Bioclimatologia: Marcos Davi de Carvalho, meu braço direito, amigo e irmão. Obrigada por toda a ajuda e por estar sempre ao meu lado. Cintia Carol de Melo Costa, obrigada pela amizade, convivência e pela viagem inesquecível. Quero ver você brilhando por aí, estrelinha! Carol Nagib Nascimento, amiga pra todas as horas, obrigada pelo suporte, pelas conversas e contribuições, por nossos papos e por sempre estar pronta para ajudar, sempre disposta. Adoro muito você, você faz falta aqui no Brasil! Bruno Simão, por estar sempre disposto a me ajudar e a aprender. Te desejo toda a força do mundo, logo você estará de volta, firme e fortalecido. Muita luz, e conte comigo sempre para o que você precisar. Angela Regina Arduino, nossa empatia foi instantânea, pois você tem muita energia positiva e um coração de ouro. Você é incondicional, um exemplo de profissional. Obrigada por sempre estar junto comigo, seja nos momentos bons ou ruins, pelos conselhos. Sua dedicação é exemplar. O sucesso do laboratório tem muita participação sua. Amo você!

Vinicius Fonseca, amigo especial da Paraíba, obrigada pela sua amizade. Admiro muito a sua dedicação e força de vontade. Obrigada por ser um amigo presente, mesmo que exista a distância física. Obrigada pela ajuda, conselhos e pelos momentos de descontração. Sucesso pra você!

Aos professores da FCAV, vocês estão entre os melhores do país. Obrigada pelos ensinamentos e convivência.

Aos Professores Kenia Bicego, Luciane Batalhão, Luciano Hauschild e Glauco Rolim pelas sugestões na banca de Qualificação.

Aos Professores Evaldo Titto, Marcos Macari, Jurandir Yanagihara e Roberto Gomes da Silva, por aceitarem compor a minha banca de tese.

Aos alunos da turma “Zoo 08” da FCAV, comecei minha caminhada na FCAV junto com vocês. Vocês são especiais. Desejo sucesso a todos vocês, colegas de profissão!

Aos funcionários da FCAV, em especial Eliene, Renata, Cassia, Nina, Edio, Pedro, Robson, Izildo e Vicente, por toda a ajuda. E ao setor de Avicultura da FCAV, exemplo para a pesquisa avícola no país.

A Mariana Oliveira e Carolina Mahfuz, amigas de infância, por sempre estarem presentes na minha vida.

Aos amigos: Leandro Martins, obrigada pela sua amizade, conselhos e risadas. Você é um amigo especial, agora juntos no Paraná! Sucesso! Priscilla MacLean, pela sua amizade e companhia nas viagens, adoro muito você. Joyce Sato, não existem palavras para descrever a minha gratidão por tudo o que você faz por mim: apoio fundamental durante minha ida para Maringá, amiga para todas as horas, dedicada. Obrigada por tudo, conte comigo para o que você precisar, adoro muito você!

Aos amigos, colegas e alunos da UEM, pela oportunidade incrível pela qual estou passando. As amigas de república em Maringá: Ana, Laiane, Camila, Jaqueline e Betty, obrigada pela amizade.

A Viviane Endo e Fabiana Almeida, agradeço pela amizade e companheirismo. Vocês foram fundamentais ao longo dessa caminhada. Amo vocês. A Paris e Cotoco, inesquecíveis.

Aos meus queridos “bibitos”, todos os frangos que utilizei durante a pesquisa.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho... meu muito obrigada!

SUMÁRIO

Página

MODELAGEM DO EQUILÍBRIO TÉRMICO DE FRANGOS DE CORTE: UM ESTUDO DA GERAÇÃO, PRODUÇÃO E PERDA DE CALOR

RESUMO	xiii
ABSTRACT	xv

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

1 Introdução	1
2. Revisão de literatura	4
2.1. Fatores ambientais que influenciam as aves	4
2.2. Transferência de calor em sistemas biológicos	5
2.3 Mecanismos de Geração de energia	7
2.4 Mecanismos de Troca de Energia	11
2.4.1 Mecanismos de transferência de calor sensível	11
2.4.1.1 Transferência de calor por Condução	11
2.4.1.2 Transferência de Calor por Convecção	13
2.4.1.3 Transferência de Calor por Radiação	14
2.4.2 Mecanismos de transferência de calor latente	16
2.4.2.1 Evaporação na Superfície Cutânea	17
2.4.2.2 Evaporação Respiratória.....	18
2.5 Transferência de calor nos tecidos	25
2.6 Transferência de calor na capa de cobertura	26
2.7 Modelagem matemática	28
2.8 Modelos matemáticos desenvolvidos para aves.....	30
2.9 Aspectos fisiológicos das aves	32
3. Objetivos	35
3.1 Objetivo geral.....	35
3.2 Objetivos específicos	35
4. Referências	35

CAPÍTULO 2 – ESTUDO DAS TEMPERATURAS CORPORAIS E PERDA DE CALOR SENSÍVEL DE FRANGOS DE CORTE NO CICLO DE CRIAÇÃO

1 Introdução	46
2 Objetivos	47
3 Material e métodos	47
3.1 Descrição geral do experimento	48
3.2 Aves	49
3.3 Delineamento Experimental	50
3.4 Variáveis meteorológicas	52
3.5 Medidas das Temperaturas Corporais	53
3.6 Transferência de Calor Sensível	53
3.6.1 Transferência de Calor Sensível no Corpo	54
3.6.2 Transferência de Calor Sensível nas Patas	56
3.7 Condutividade térmica da capa de penas	61
3.8 Resistência da capa de penas à transferência de calor	64
3.9 Análise Estatística	64
4 Resultados e Discussão	66
5 Conclusões	86
6 Implicações Futuras	87
7 Referências	87

CHAPTER 3 – HEAT PRODUCTION AND EVAPORATION OF POULTRY

1 Introduction	91
2 Materials and Methods	93
2.1. Broiler Chicks	93
2.2 Broiler Chickens	97
2.2.1 Development of the hood and valves	98
2.2.2 Physiological measurements	100
3 Results and Discussion	101
3.1 Broiler Chicks	101
3.2 Broiler Chickens	104
4 Conclusions	113

5 References	113
--------------------	-----

CHAPTER 4 - A MODEL OF HEAT TRANSFER THROUGH FEATHER LAYERS OF BROILER CHICKENS

1 Introduction.....	117
2 Objectives.....	119
3 Material and methods	119
3.1 Assumptions	119
3.2 Analytical Model Development.....	120
3.3 Validation of the model.....	126
4 Results and Discussion	129
5 Conclusions.....	137
6 Future Implications	137
7. References.....	137

LISTA DE TABELAS

Página

CAPÍTULO 2

Tabela 1.	Delineamento experimental adotado na pesquisa entre os meses de junho e julho, compreendido por seis frangos de corte analisadas em seis diferentes dias do ciclo de criação em seis diferentes horários	51
Tabela 2.	Delineamento experimental adotado na pesquisa entre os meses de novembro e dezembro, compreendido por seis frangos de corte analisados em seis diferentes dias do ciclo de criação em seis diferentes horários	52
Tabela 3.	Números adimensionais para o cálculo do fluxo de calor sensível por convecção para esferas.	56
Tabela 4.	Números adimensionais para o cálculo do fluxo de calor sensível por convecção para cilindros verticais.	61
Tabela 5.	Quadrados médios da temperatura do ar (T_{ar}) e da umidade relativa do ar (UR)	66
Tabela 6.	Médias gerais ($\pm EP$), valores máximos ($máx$) e mínimos ($mín$) da temperatura do ar, umidade relativa do ar e pressão parcial de vapor	67
Tabela 7.	Quadrados médios da temperatura do ar expirado (T_{exp}); temperatura retal (T_{retal}); temperatura da epiderme (T_{epi}); temperatura da superfície corporal (T_{sup}) e temperatura da pata (T_{pata}) de frangos de corte da linhagem Cobb	68
Tabela 8.	Médias aritméticas e estimadas pelo método dos quadrados mínimos ($\pm EP$) para a temperatura do ar expirado (T_{exp}), temperatura retal (T_{retal}), temperatura da epiderme (T_{epi}), temperatura superficial (T_{sup}) e temperatura da pata (T_{pata}) de acordo com os meses, as diferentes classes de peso e horários de coleta	69

CHAPTER 3

Table 1.	Latin square design used in the experimental procedure (6 chicks, 6 days in 6 schedules)	93
Table 2.	Latin square design used in the experimental procedure (12 chickens, (C), 12 days (D) in 12 schedules)	97
Table 3.	Averages ($\pm$ SE) of the temperature inside the heat exchanger (T_{he}), the temperature of the feathers ($T_{feather}$), live weight and body surface area of Cobb chicks in the first six days of the rearing period	101
Table 4.	Mean squares of the metabolic heat production (q_{met}) and total evaporation (q_e) of Cobb broiler chicks	102
Table 5.	Mean squares of the metabolic heat production (q_{met}), respiratory evaporation (q_R), ventilation (V), tidal volume (TV), minute volume (MV) and respiratory rate (RR) of Cobb broiler chickens	105

CHAPTER 4

Table 1.	Physical properties used in the model	128
Table 2.	Physiological and environmental variables used in the model in the month of July for the six live weight classes (LW): skin temperature (T_s); rectal temperature (T_r); feathers temperature (T_f), air temperature (T_{air}), black globe temperature (T_{bg}); body surface area (A_s), effective conductivity of feathers (k_{eff}) and thickness of the feather layer (L_f)	129
Table 3.	Physiological and environmental variables used in the model in the month of December for the six live weight classes (LW): skin temperature (T_s); rectal temperature (T_r); feathers temperature (T_f), air temperature (T_{air}), black globe temperature (T_{bg}); body surface area (A_s), effective conductivity of feathers (k_{eff}) and thickness of the feather layer (L_f)	129

LISTA DE FIGURAS

	Página
CAPÍTULO 2	
Figura 1.	47
Figura 2.	49
Figura 3.	50
Figura 4.	50
Figura 5.	52
Figura 6.	57
Figura 7.	62
Figura 8.	67
Figura 9.	71

linhagem Cobb de acordo com a classe de peso corporal nos meses de julho e dezembro: Classe 1 – até 500g; Classe 2 – entre 501 g e 1000 g; Classe 3 – entre 1001 g e 1500 g; Classe 4 – entre 1501 g e 2000 g; Classe 5 – entre 2001 g e 2500 g; Classe 6 – acima de 2501 g. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem para cada um dos meses da pesquisa e pela mesma letra minúscula entre os meses de Julho e Dezembro não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 0,05$)

- Figura 10. Temperatura do ar expirado de frangos de corte da linhagem Cobb em função da temperatura do ar 72
- Figura 11. Médias estimadas pelo método dos quadrados mínimos da temperatura retal ($\pm EP$) de frangos de corte da linhagem Cobb de acordo com a classe de peso corporal nos meses de julho e dezembro: Classe 1 – até 500g; Classe 2 – entre 501 g e 1000 g; Classe 3 – entre 1001 g e 1500 g; Classe 4 – entre 1501 g e 2000 g; Classe 5 – entre 2001 g e 2500 g; Classe 6 – acima de 2501 g. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem para cada um dos meses da pesquisa e pela mesma letra minúscula entre os meses de Julho e Dezembro não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 0,05$) 74
- Figura 12. Temperatura retal de frangos de corte da linhagem Cobb em função da temperatura da epiderme 75
- Figura 13. Médias da temperatura da epiderme ($\pm EP$) de frangos de corte da linhagem Cobb de acordo com a classe de peso corporal nos meses de julho e dezembro: Classe 1 – até 500g; Classe 2 – entre 501g e 1000g; Classe 3 – entre 1001g e 1500g; Classe 4 – entre 1501g e 2000g; Classe 5 – entre 2001g e 2500g; Classe 6 – acima de 2501g. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem para cada um dos meses da pesquisa e pela mesma letra minúscula entre os meses de Julho e Dezembro não 76

- diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 0,05$)
- Figura 14. Médias estimadas pelo método dos quadrados mínimos da temperatura superficial ($\pm EP$) de frangos de corte da linhagem Cobb de acordo com a classe de peso corporal nos meses de julho e dezembro: Classe 1 – até 500g; Classe 2 – entre 501g e 1000g; Classe 3 – entre 1001g e 1500g; Classe 4 – entre 1501g e 2000g; Classe 5 – entre 2001g e 2500g; Classe 6 – acima de 2501g. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem para cada um dos meses da pesquisa e pela mesma letra minúscula entre os meses de Julho e Dezembro não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 0,05$) 78
- Figura 15. Médias da transferência de calor sensível de frangos de corte da linhagem Cobb de acordo com a classe de peso corporal nos meses de julho e dezembro: Classe 1 – até 500g; Classe 2 – entre 501g e 1000g; Classe 3 – entre 1001g e 1500g; Classe 4 – entre 1501g e 2000g; Classe 5 – entre 2001g e 2500g; Classe 6 – acima de 2501g 80
- Figura 16. Médias da transferência de calor sensível para o corpo e as patas de frangos de corte da linhagem Cobb de acordo com a classe de peso corporal nos meses de julho e dezembro: Classe 1 – até 500g; Classe 2 – entre 501g e 1000g; Classe 3 – entre 1001g e 1500g; Classe 4 – entre 1501g e 2000g; Classe 5 – entre 2001g e 2500g; Classe 6 – acima de 2501g 81
- Figura 17. Médias da condutividade térmica da camada de penas de frangos de corte da linhagem Cobb de acordo com a classe de peso corporal nos meses de julho e dezembro: Classe 1 – até 500g; Classe 2 – entre 501g e 1000g; Classe 3 – entre 1001g e 1500g; Classe 4 – entre 1501g e 2000g; Classe 5 – entre 2001g e 2500g; Classe 6 – acima de 2501g 82
- Figura 18. Médias da resistência da camada de penas de frangos de corte da linhagem Cobb de acordo com a classe de peso 83

corporal nos meses de julho e dezembro: Classe 1 – até 500g; Classe 2 – entre 501g e 1000g; Classe 3 – entre 1001g e 1500g; Classe 4 – entre 1501g e 2000g; Classe 5 – entre 2001g e 2500g; Classe 6 – acima de 2501g.

- Figura 19. Perfil de temperaturas corporais: temperatura retal (Tretal), temperatura da epiderme (Tepi), temperatura superficial das penas (Tsup) e temperatura do ar para frangos de corte da linhagem Cobb em função da espessura das camadas de pele e de penas – (a) com peso vivo até 500 g; (b) com peso vivo entre 501 e 1000 g; (c) com peso vivo entre 1001 g e 1500 g; (d) com peso vivo entre 1501 g e 2000 g; (e) com peso vivo entre 2001 g e 2500 g; (f) com peso vivo superior a 2501 g 85

CHAPTER 3

- Figure 1. System of Physiological Measurements for broiler chicks: A – flow meter and pump (SS4 Subsampller, Sable Systems), and a flow of 150 mL min⁻¹ was directed to the heat exchanger; B – heat exchanger (20 cm x 10 cm x 10 cm), made of stainless steel; C – flow head (MLT1L, ADInstruments); D – chamber to the mixing of gases; E – spirometer (ML141, ADInstruments); F – Oxygen, Carbon Dioxide and Water Vapour Analyzers (FMS-1201-05, Sable Systems); G – System of data acquisition (PowerLab 16/30 and LabChart Pro, ADInstruments); H – temperature sensor, measuring the temperature inside the heat exchanger (MLT415/AL, ADInstruments); I – temperature sensor, measuring the temperature outside the heat exchanger (MLT22/A, ADInstruments); J – Computer. 94
- Figure 2. Stainless steel heat exchanger developed for physiological measurements of broiler chicks 95
- Figure 3. System of Physiological Measurements for broiler chickens: B – valves to the inlet of atmospheric air and outlet of 98

expired air of chickens; C – hood, made of plastic and sealed with a rubber sheet; D – flow head (MLT10L, ADInstruments); E – spirometer (ML141, ADInstruments); F – Oxygen, Carbon Dioxide and Water Vapour Analyzers (FMS-1201-05, Sable Systems); G – chamber to the mixing of gases; H – System of data acquisition (PowerLab 16/30 and LabChart Pro, ADInstruments); I –Computer

Figure 4.	First attempt of a broiler respiratory mask	99
Figure 5.	Prototype of the hood developed for physiological measurements of broiler chickens	99
Figure 6.	Averages of the metabolic heat production ($W\ m^{-2}$) estimated by the least squares method of Cobb chicks in the first six days of the rearing period	103
Figure 7.	Total evaporation of Cobb chicks in the first six days of the rearing period estimated by the least squares method	104
Figure 8.	Relative humidity and air temperature inside the climatic chamber estimated by the least squares method in the 12 days-trial for Cobb broiler chickens correspondent to the 8 th , 12 th , 15 th , 18 th , 21 st , 24 th , 27 th , 30 th , 33 rd , 36 th , 39 th and 42 nd day of the rearing period	104
Figure 9.	Live weight (g) of Cobb broiler chickens estimated by the least squares method in the 12 days-trial for Cobb broiler chickens correspondent to the 8 th , 12 th , 15 th , 18 th , 21 st , 24 th , 27 th , 30 th , 33 rd , 36 th , 39 th and 42 nd day of the rearing period	105
Figure 10.	Metabolic heat production ($W\ m^{-2}$) estimated by the least squares method of Cobb broiler chickens in the 12 days-trial for Cobb broiler chickens correspondent to the 8 th , 12 th , 15 th , 18 th , 21 st , 24 th , 27 th , 30 th , 33 rd , 36 th , 39 th and 42 nd day of the rearing period	106
Figure 11.	Metabolic heat production ($W\ m^{-2}$) as a function of the live weight of Cobb broiler chickens	107
Figure 12.	Heat production ($W\ m^{-2}$) of Cobb broiler chickens measured in the trial (Nascimento et al., 2014) in comparison with	108

literature data (Chepete & Xin) and predicted by the diet intake

Figure 13.	Respiratory evaporation ($W\ m^{-2}$) of Cobb broiler chickens estimated by the least squares method in the 12 days-trial for Cobb broiler chickens correspondent to the 8 th , 12 th , 15 th , 18 th , 21 st , 24 th , 27 th , 30 th , 33 rd , 36 th , 39 th and 42 nd day of the rearing period	109
Figure 14.	Respiratory Rate and Ventilation of Cobb broilers in the 12 days-trial for Cobb broiler chickens correspondent to the 8 th , 12 th , 15 th , 18 th , 21 st , 24 th , 27 th , 30 th , 33 rd , 36 th , 39 th and 42 nd day of the rearing period	111
Figure 15.	Minute ventilation of Cobb broilers in the 8th, 12nd, 15th and 18th day of the rearing period	111
Figure 16.	Minute volume and tidal volume of Cobb broiler chickens as a function of the live weight	112
Figure 17.	Tidal volume of Cobb broiler chickens as a function of the respiratory rate	113

CHAPTER 4

Figure 1.	Assumptions of the model	121
Figure 2.	Measured and predicted values for skin and feather temperature of Cobb broiler chickens up to 500 g of live weight (Live weight class 1) – (a) in July; (b) in December	131
Figure 3.	Measured and predicted values for skin and feather temperature of Cobb broiler chickens between 501 g and 1000 g of live weight (Live weight class 2) – (a) in July; (b) in December	131
Figure 4.	Measured and predicted values for skin and feather temperature of Cobb broiler chickens between 1001 g and 1500 g of live weight (Live weight class 3) – (a) in July; (b) in December	132
Figure 5.	Measured and predicted values for skin and feather temperature of Cobb broiler chickens between 1501 g and	132

	2000 g of live weight (Live weight class 4) – (a) in July; (b) in December	
Figure 6.	Measured and predicted values for skin and feather temperature of Cobb broiler chickens between 2001 g and 2500 g of live weight (Live weight class 5) – (a) in July; (b) in December	133
Figure 7.	Measured and predicted values for skin and feather temperature of Cobb broiler chickens above 2501 g of live weight (Live weight class 6) – (a) in July; (b) in December	133
Figure 8.	Comparison between measured and predicted feather temperature for Cobb broiler chickens	134
Figure 9.	Comparison between measured and predicted feather temperature for Cobb broiler chickens	135
Figure 10.	Temperature profile of broiler chickens up to 500 g of live weight with the supply of a heat source (100 W, 200 W, 300 W and 400 W) – (a) in July; (b) in December	135
Figure 11.	Temperature profile of broiler chickens up to 500 g of live weight with the supply of a heat source (0 W, 100 W and 400 W in July simulating an air temperature of 10°C, 20°C, 30°C and 40°C, respectively	135
Figure 12.	Temperature profile of broiler chickens up to 500 g of live weight with the supply of a heat source (0 W, 100 W and 400 W in December simulating an air temperature of 10°C, 20°C, 30°C and 40°C, respectively	137
Figure 13.	Temperature profile of broiler chickens above 2501 g – (a) in July; (b) in December simulating an air temperature of 0°C, 10°C, 20°C, 30°C and 40°C	137

MODELAGEM DO EQUILÍBRIO TÉRMICO DE FRANGOS DE CORTE: UM ESTUDO DA GERAÇÃO E TRANSFERÊNCIA DE CALOR

RESUMO – Frente ao aquecimento global e ao iminente aumento da produção animal nos países tropicais, o estudo acerca do equilíbrio térmico dos animais de produção torna-se imprescindível, uma vez que o estresse térmico influencia diretamente a produtividade dos animais. Devido a importância da Avicultura no cenário agrícola nacional, destaca-se a importância de se desenvolver técnicas aplicáveis nas condições de criação das aves, para a predição da condição de conforto térmico. Baseado nessas informações, o principal objetivo deste trabalho foi propor modelos para o equilíbrio térmico de frangos de corte. Os objetivos específicos foram: estudar as variáveis fisiológicas (temperatura retal, temperatura da epiderme, temperatura das penas, temperatura do ar expirado e temperatura da pata) de frangos de corte ao longo do ciclo de criação em diferentes condições ambientais; estudar o fluxo de calor sensível de frangos de corte ao longo do ciclo de criação em diferentes condições ambientais; descrever e validar um modelo para a predição das temperaturas corporais de frangos de corte; determinar a quantidade necessária de radiação a ser fornecida para pintos de corte para manutenção da temperatura corporal; propor uma metodologia para a mensuração do metabolismo e das variáveis respiratórias de frangos de corte ao longo do ciclo de criação em condições de campo; estudar as variáveis respiratórias (volume respiratório corrente, frequência respiratória, ventilação) de frangos de corte durante todo o ciclo de criação; aplicar as medidas fisiológicas e variáveis respiratórias mensuradas ao longo do ciclo de criação para sustentar um modelo de transferência de calor para frangos de corte. O estudo foi realizado a partir da coleta de dados em diferentes experimentos e lotes de animais, com as aves em distintas condições ambientais e épocas do ano. As temperaturas corporais de frangos de corte foram estudadas durante todo o ciclo de criação em Julho e Dezembro. Essas variáveis foram influenciadas pela idade (peso vivo) e pelas variáveis ambientais as quais estão expostas ($P < 0.05$). Juntamente com essas variáveis, a transferência de calor sensível na porção corporal coberta pela camada de penas e nas desprovidas de penas também foi alterada pelo peso vivo e pelas condições

ambientais. Os frangos de corte aumentam proporcionalmente as perdas de calor via mecanismos sensíveis pelas patas com o aumento do peso vivo, devido ao aumento da cobertura de penas, que está relacionada com o aumento na resistência da camada de penas à transferência de calor. O aumento do efeito da resistência foi mais acentuado durante o mês de Dezembro em comparação com Julho. Duas metodologias foram propostas para a mensuração de variáveis respiratórias, produção de calor metabólico e evaporação em aves: uma para pintos de corte nos seis primeiros dias de vida; outra para frangos de corte a partir do 8º até os 42 dias do ciclo de criação. Para os pintos de corte a evaporação é pequena em comparação com a produção de calor metabólico. O metabolismo foi influenciado pelo peso vivo e foi crescente para os seis primeiros dias de vida ($P < 0.05$). Para os frangos de corte, o metabolismo foi intrinsecamente relacionado com o aumento do peso vivo, assim como as variáveis respiratórias ($P < 0.05$). Um modelo mecanístico para a predição das temperaturas da pele e das penas de frangos de corte durante o ciclo de criação foi determinado e validado com dados experimentais. O modelo pode ser utilizado como uma ferramenta no aprimoramento de sistemas de aquecimento e resfriamento de instalações avícolas.

Palavras-chave: avicultura, biometeorologia, modelagem matemática, transferência de calor e massa

THERMAL BALANCE MODELING OF BROILER CHICKENS: A STUDY OF HEAT GENERATION AND TRANSFER

ABSTRACT – Due to global warming and the imminent increase of animal production in tropical areas, the study about thermal equilibrium of the animals becomes essential, once that thermal stress influences directly their productivity. Poultry has a major importance in the Brazilian agricultural scene, so there is a great importance to the development of techniques applicable to birds' husbandry conditions, to predict their condition of thermal comfort. Based on these information, the main objective was to propose a model of the thermal equilibrium of broiler chickens. The specific objectives were: to study the physiological variables (rectal temperature, skin temperature, feather temperature, exhaled air temperature and foot temperature) of broiler chickens during the rearing period in different environmental conditions; to study the sensible heat flow of broilers chickens in the rearing period in different environmental conditions; to develop and to validate a mathematical model to the prediction of body temperatures of broiler chickens; to determine the amount of radiation to broiler chicks to the maintenance of body temperature; to propose a methodology to measure the metabolic heat production and respiratory functions of broiler chickens (tidal volume, respiratory rate, ventilation) in the rearing period; to apply physiological and respiratory variables measured during the rearing period to sustain a mathematical model to study the heat transference in broiler chickens. The study was performed with the data collection in several trials and flocks of animals, and the birds were exposed to different environmental conditions and seasons. The body temperatures of broiler chickens were studied during the rearing period in July and December. These variables were influenced by the age (live weight) and by environmental variables ($P < 0.05$). The sensible heat flow in the body covered by the feathers and in the foot was also different in accordance with the live weight and environmental conditions. Broilers chickens increase proportionally heat losses through sensible mechanisms in the foot with an increase in the live weight, because there is an increase of feathering, which is related to an increase of the resistance of feather layer to the heat transfer. The resistance was higher during December in comparison with July. Two methodologies to the

settlement of respiratory functions, metabolic heat production and evaporation in poultry were proposed: one for broiler chicks in the first six days of the rearing period; the other for broiler chickens from the 8th up to the 42nd day of life. Total evaporation was small for broiler chicks in comparison with the heat production. Heat production was influenced by the live weight and was increasing to the six first days of life ($P < 0.05$). For broiler chickens the heat production was intrinsically related to the increase of live weight, as observed for the respiratory functions ($P < 0.05$). A mechanistic model was described and validated against experimental data to the prediction of skin and feather temperatures of broilers in the rearing period. The model can be used as a decision tool to the improvement of heating and cooling systems of poultry houses.

Keywords: biometeorology, heat and mass transfer, mathematical modeling, poultry

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

1. Introdução

O grande desafio na área de Bioclimatologia, atualmente, é a proposta de metodologias para a mensuração das trocas de calor e massa entre os animais e o ambiente, que possam ser utilizadas em condições de campo. E ainda, o desenvolvimento de equações e modelos, que sejam ferramentas de fácil acesso e aplicabilidade no meio científico e produtivo. Dessa forma, é possível traçar um cenário para o estudo nas condições reais de criação dos animais, frente os diferentes tipos de construção e situações ambientais.

Uma previsão da possível reação dos animais mantidos em ambientes específicos, em relação à sua termorregulação, é de bastante interesse (DA SILVA, 2000). Isso pode ser proposto por meio de modelos que descrevam a reação fisiológica dos animais frente às mais diversas condições ambientais. Na literatura, ressalta-se a carência de modelos elaborados a partir de dados de animais mantidos em condições de campo, e principalmente, em regiões tropicais.

Os animais realizam trocas de calor com o ambiente por radiação, condução e convecção (que caracterizam as trocas sensíveis, dependentes da diferença de temperatura entre a superfície corporal e a temperatura do ar); e pela evaporação, que ocorre nas superfícies cutânea e respiratória. A determinação dessas trocas entre o organismo dos animais e o ambiente circundante é de fundamental importância para a determinação do estoque de energia corporal e da manutenção da homeotermia.

Hoffman et al. (2007) classificaram as trocas evaporativas nas aves em bucofaringeal (isolando-se a região da cabeça dos animais) e cutânea. As perdas cutâneas nas aves domésticas (*Gallus gallus domesticus*), representadas pela perspiração insensível, contribui com aproximadamente 1,2 a 1,8 W m⁻² (RICHARDS, 1976), ou seja, com menos de 25% das perdas totais.

Portanto, as perdas pelo trato respiratório assumem importância fundamental para frangos de corte e galinhas poedeiras quando estão em condição de estresse térmico por elevadas temperaturas. A ressalva é que essas perdas, por períodos

prolongados, podem acarretar elevados custos metabólicos aos animais, por exemplo, pela ocorrência de alcalose respiratória (BORGES et al., 2003). Há na literatura carência de metodologias que possam ser aplicadas para a avaliação da evaporação respiratória em aves (DA SILVA, 2008).

Embora a evaporação respiratória possa ser medida com o uso de calorímetros ou pela pletismografia, por exemplo, sua obtenção juntamente com a de outras variáveis fisiológicas da respiração (como volume respiratório corrente, frequência respiratória e a proporção de oxigênio e dióxido de carbono no ar expirado) com as aves expostas às condições ambientais, seriam de extrema importância para a compreensão de sua termorregulação e futura aplicação no desenvolvimento e aprimoramento dos sistemas de climatização das instalações.

Maia et al. (2005) ressaltaram a dificuldade de medir as trocas por vias respiratória em condições de campo. Os autores adotaram o uso de máscara respiratória para a determinação em bovinos leiteiros, a qual pode ser adaptada para a determinação em frangos de corte, cujos resultados preliminares corroboram a aplicabilidade da técnica para aves poedeiras e frangos de corte (NASCIMENTO et al., 2011).

Após testes e aperfeiçoamento de métodos na coleta de dados, Maia et al. (2014b) desenvolveram um capuz para frangos de corte que pode ser utilizado para a mensuração dos gases no ar expirado (oxigênio, dióxido de carbono e vapor de água) e que, associado a um espirômetro, nos fornece as variáveis respiratórias das aves (frequência respiratória, volume respiratório corrente, fluxo respiratório, pressão de vapor do ar expirado). A técnica ainda permite a avaliação de várias aves ao longo de um dia, o que se torna uma importante metodologia e que causa o mínimo distúrbio nos animais.

Na literatura existem alguns modelos desenvolvidos para a determinação do equilíbrio térmico de animais de produção. McArthur & Monteith (1980) propuseram um modelo para ovinos, e posteriormente McArthur (1987) propôs um modelo para animais endotermos em geral, mas o modelo compreendia apenas as trocas sensíveis e perdas latentes da superfície dos animais e o seu ambiente circundante. Turnpenny (2000ab) elaborou um modelo com aplicações para frangos de corte, mas considerou um valor único para a resistência do tecido à transferência de calor,

fato que pode ser questionado, uma vez que essa resistência é variável em função, por exemplo, da temperatura a qual as aves estão submetidas.

Yanagi Jr. et al. (2001), descreveram um modelo para poedeiras, mas que é aplicável para situações onde é efetuado o molhamento superficial dos animais, e não levaram em consideração as perdas respiratórias das aves, as quais ressalta-se sua importância em casos de estresse térmico por elevadas temperaturas. Da Silva (2000) propôs um modelo para mensuração do estoque de energia térmica em bovinos, mas o metabolismo dos animais era baseado somente na massa corporal, o que também sabe-se que varia em função das condições ambientais às quais os animais estão expostos.

Diversos pesquisadores reportaram modelos empíricos e mecanísticos (BOUCHILLON et al., 1970; WATHES & CLARK, 1981; KETTLEWELL & MORAN, 1992; TURNPENNY et al., 2000a; TURNPENNY et al., 2000b; YANAGI Jr. et al., 2001) para prever o equilíbrio térmico de frangos de corte e galinhas poedeiras, mas esses modelos não apresentam validação com dados mensurados nos animais. Outro aspecto importante é que os frangos de corte apresentam diversas e importantes alterações fisiológicas ao longo do ciclo de vida, como por exemplo em relação a sensibilidade a altas temperaturas, que aumenta durante o ciclo de vida; a camada de penas, caracterizada por penugem nos primeiros de vida, sendo substituída por uma camada de penas; a importância da perda evaporativa pela respiração, que aumenta significativamente com o decorrer do ciclo.

Nos primeiros dias de vida as aves são extremamente sensíveis a baixas temperaturas, e portanto é necessário o fornecimento de uma fonte adicional de calor, evitando gastos energéticos para manutenção da homeotermia. Nascimento et al. (2014b) propuseram um modelo matemático que prediz a temperatura da epiderme e da camada de penas de acordo com o fornecimento de uma fonte adicional de radiação nos galpões. Já para aves com o sistema termorregulatório maduro é necessário a inclusão de sistemas de climatização nas instalações, para auxiliar as aves na manutenção da temperatura corporal e consequentemente, manter o desempenho produtivo.

Baseado nisso, é de grande valia o desenvolvimento e aperfeiçoamento da estimativa do equilíbrio térmico de animais de produção, pelo uso de ferramentas

matemáticas e aplicação de conceitos de transferência de calor e massa, que possam prever de forma efetiva a real condição fisiológica dos animais frente às diversas situações ambientais. Em continuidade às pesquisas do Laboratório de Bioclimatologia da FCAV/ UNESP, Campus de Jaboticabal, que é pioneiro no desenvolvimento de metodologias para a obtenção do equilíbrio térmico de bovinos, caprinos e ovinos em ambiente tropical, ressalta-se a importância da expansão da pesquisa, englobando um modelo físico de estimativa do equilíbrio térmico em aves. Sabe-se da importância da Avicultura para a agropecuária nacional, uma vez que o Brasil é um dos líderes mundiais de exportação de carne e produtos avícolas.

2. Revisão de literatura

2.1. Fatores ambientais que influenciam as aves

Os seres vivos juntamente com o ambiente em que se encontram formam sistemas complexos, e os animais sempre apresentam reações frente às constantes alterações ambientais (DA SILVA & MAIA, 2013). Bicego et al. (2007) descrevem que os animais ectotérmicos apresentam uma baixa taxa metabólica, enquanto os endotérmicos apresentam uma alta taxa metabólica e maiores custos de manutenção, os quais incluímos os mamíferos e as aves. E segundo os mesmos autores, os animais endotérmicos mantêm a temperatura corporal mais elevada que a temperatura ambiente devido a elevada taxa metabólica, principalmente nos órgãos mais internos; porém, também ressaltam que parte da produção de calor é devido a dieta ou a temperatura do ar.

A energia disponível para o crescimento das aves é uma relação entre a energia de entrada e a energia gasta pelo organismo. Portanto, destaca Hayne et al. (1986) que o deslocamento de energia necessário para a manutenção da temperatura corporal significa uma menor energia disponível para o crescimento. Os frangos de corte utilizam alterações comportamentais primeiramente para a manutenção da temperatura corporal, e depois regulam a quantidade de energia ingerida (diminuindo), aumentando a energia perdida para o meio, ou uma combinação entre as duas. Frangos de corte em condições de estresse térmico

apresentam uma diminuição da taxa de crescimento e consequentemente um pior rendimento de carne (YALÇIN, 2001).

Frangos de corte expostos a elevadas temperaturas apresentam alta taxa de mortalidade em idade próxima ao abate, ocasionando perdas econômicas significativas (LACY & CZARICK, 1992). Portanto, devem ser utilizados nas instalações sistemas de climatização que associem, por exemplo, temperaturas do ar e velocidade do vento que permitam a transferência de calor sem que as aves dispendam energia de crescimento para a manutenção da temperatura corporal.

Em condições de baixas temperaturas, porém, aves com uma camada de penas escassa perderão uma maior quantidade de calor e necessitarão consequentemente de diversos mecanismos termorregulatórios para a manutenção da temperatura corporal em 41°C (LEESON & WALSH, 2004b). Richards (1977) observou uma maior taxa metabólica em aves de postura expostas a 15°C em comparação a outras aves expostas a 25°C.

Baixas temperaturas acarretam custos metabólicos para as aves no período pós-eclosão e nos primeiros dias de vida. Estudos como o de Malheiros et al. (2000) demonstraram que pintos de corte de até cinco dias de vida apresentam menores temperaturas superficial e cloacal e, consequentemente, maiores perdas de calor quando mantidos a 20°C, além de atingir menor peso aos sete dias de vida. Para aves, deve ser fornecida uma fonte adicional de calor nas instalações até que atinjam a maturidade termorregulatória, a fim de evitar perdas excessivas de calor e problemas de desempenho e morte por hipotermia.

2.2. Transferência de calor em sistemas biológicos

O estudo da termodinâmica demonstra que energia pode ser transferida por meio de interações entre um sistema e sua vizinhança. Porém, a teoria de transferência de calor e massa nos permite entender por quais mecanismos ocorrem essas interações e calcular suas respectivas taxas e fluxos. Ocorre transferência de calor quando há uma diferença de temperatura no espaço, e calor é definido como energia térmica em trânsito (INCROPERA et al., 2008). Se considerarmos os seres vivos, observamos que são sistemas dinâmicos, com inúmeras interações com o meio circundante, ou seja, caracterizados por diferenças de temperatura entre o

organismo, o meio e as tentativas de se manter um estado de equilíbrio. Portanto, podemos estudar esses fenômenos de transferência de energia que ocorrem nos diferentes tecidos corporais (órgãos, pele, gordura, capa de proteção), aplicando-se na interação desses organismos com o ambiente circundante.

Podemos tratar os animais como sistemas análogos aos encontrados na engenharia e aplicar os conceitos de transferência de calor. Por exemplo, veias e artérias podem ser consideradas como trocadores de calor em contracorrente, uma vez que estão dispostas em pares ao longo do corpo e carregam sangue a diferentes temperaturas, portanto, trocando energia térmica a diferentes taxas. Ocorre a transferência de energia entre o sangue arterial mais quente com o sangue venoso mais frio através do tecido. Além disso, também há nos tecidos a presença de vasos de menor calibre, que permitem o fenômeno da perfusão sanguínea (INCROPERA et al., 2008).

A primeira lei da termodinâmica, que descreve a conservação de energia em um volume de controle (ou sistema aberto), é uma ferramenta muito útil nos estudos de transferência de calor. A lei descreve que “o aumento na quantidade de energia armazenada em um volume de controle deve ser igual à quantidade de energia que entra no volume de controle menos a quantidade de energia que deixa o volume de controle” durante um intervalo de tempo (INCROPERA et al., 2008). Ela também pode ser expressa na forma de taxa, isto é, para um dado instante, conforme a eq. 1.

$$\dot{E}_{acu} = \dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} + \dot{E}_g \quad (1)$$

em que: $\dot{E}_{acu}$ é a energia acumulada; $\dot{E}_{ent}$ é a energia entrando; $\dot{E}_{sai}$ é a energia saindo e $\dot{E}_g$ é a energia gerada no volume de controle.

A aplicação da primeira lei da termodinâmica implica na definição apropriada do volume de controle e de sua superfície de controle. Se considerarmos um período de tempo onde não ocorra ingestão de água ou alimento pelos animais, podemos considerá-los como sistemas fechados (desconsiderando-se também as perdas respiratórias), em que a energia pode entrar e sair (sendo sua superfície de controle o ambiente circundante), com a geração de energia interna (DESHAZER & YEN, 2008). Podemos considerar como volume de controle um animal e o ambiente circundante (superfície de controle), ou ainda um dado órgão ou tecido do

organismo, e até estudos sobre a transferência de calor em vasos sanguíneos. A partir desses conceitos, podemos descrever cada um dos componentes definidos na eq. 1, pela definição dos mecanismos de transferência de energia.

2.3 Mecanismos de Geração de energia

No caso dos seres vivos, a geração de energia ocorre pelo metabolismo, pela transformação da energia química dos alimentos (oxidação) em calor (SCHMIDT-NIELSEN, 2002; RANDALL et al., 2008).

De toda a energia química ingerida nos alimentos (energia bruta), parte não é absorvida, sendo degradada pela flora intestinal ou perdida pelas fezes (energia digestível). Da energia absorvida, parte é perdida pela urina (energia metabolizável) e parte é calor resultante de reações metabólicas exergônicas (trabalho químico, elétrico ou mecânico). A energia restante (energia retida) é conservada como formação anabólica de tecidos, ou seja, disponível para a produção de ovos, carne, leite, lã e também para a reprodução e trabalho, que inclui locomoção e alimentação (RANDALL et al., 2008; DESHAZER et al., 2008). A energia utilizada para a manutenção da temperatura corporal não é disponível para produção; uma menor ingestão de alimentos, devido a variações climáticas, por exemplo, diminui a energia retida. Por outro lado, se as condições ambientais exigem um maior uso da energia bruta para a manutenção da temperatura corporal, ocorrerá uma diminuição da produtividade dos animais (DESHAZER et al., 2008).

A atividade metabólica de um animal é estreitamente relacionada com sua temperatura corporal. Animais com menor taxa metabólica apresentarão, portanto, uma temperatura corporal também menor, e os animais endotermos (que mantêm a temperatura corporal alta mesmo sob flutuações da temperatura ambiente) apresentarão uma maior taxa metabólica (RANDALL et al., 2008).

Outro fator que influencia o gasto energético dos animais é sua massa corporal, isto é, animais menores apresentam taxas metabólicas mais elevadas do que animais maiores. Indivíduos mais pesados armazenam uma maior quantidade de energia e precisam de uma menor taxa de produção de calor, pois quanto maior o corpo, menor é sua relação área/ volume (DA SILVA, 2000). Randall et al. (2008)

aponta outros fatores que também influenciam a taxa metabólica dos animais, como a hora do dia, a estação do ano, a idade, o sexo, a forma corporal, a presença de fatores estressantes, o tipo de alimento que está sendo metabolizado e o estado reprodutivo.

Alguns autores propuseram equações exponenciais para descrever a produção de calor metabólico, uma vez que esta pode ser relacionada à massa corporal dos animais (KLEIBER, 1932; BRODY, 1945). Da Silva & Maia (2013) apresentam uma extensa revisão sobre equações que predizem o metabolismo de repouso de mamíferos, aves, répteis e anfíbios. A área superficial dos animais também pode ser estimada por equações baseadas na massa corporal, uma vez que sua determinação é bastante dificultosa, considerando a conformação dos animais (DA SILVA & MAIA, 2013).

Em estudos acerca do equilíbrio térmico dos animais o ideal é que se obtenha a taxa metabólica (energia metabólica por unidade de tempo) em diferentes condições ambientais, pois podemos estudar para cada situação quais os mecanismos de conservação ou de dissipação de calor mais importantes (RANDALL et al., 2008). Portanto, se considerarmos na equação de conservação de energia o termo $\dot{E}_g$ obtido por meio de equações em função do peso corporal, o real valor do metabolismo naquele instante ora será sub ou superestimado.

Da Silva e Maia (2013) descrevem três métodos para a determinação do metabolismo:

- pelo cálculo da diferença nos valores energéticos do alimento ingerido e das excretas (urinas e fezes): este método não pode ser aplicado a animais em fase de crescimento, ou submetidos a alterações no armazenamento de gordura ou outro componente corporal, pois supõe-se que não ocorra mudança na composição estrutural do organismo;

- calorimetria direta: é o método mais preciso para a determinação do metabolismo e envolve a determinação da perda total de calor. Os animais são mantidos em câmaras com paredes isolantes e as quantidades de calor eliminadas por radiação, convecção, condução e evaporação são mensuradas;

- calorimetria indireta: método mais utilizado, com os animais mantidos em câmaras fechadas com o fluxo de ar controlado. O conteúdo de gases (oxigênio,

dióxido de carbono e metano) desse ar é analisado na entrada e na saída de ar da câmara. Amostras de urina também são coletadas para a determinação do conteúdo de nitrogênio.

A calorimetria direta avalia a taxa metabólica de um animal pela quantidade de energia liberada como calor em certo período de tempo. As medições são feitas num calorímetro, com paredes adiabáticas (sem trocas de calor com o meio externo). A perda de calor é determinada pelo aumento da temperatura em uma massa conhecida de água utilizada para receber o calor proveniente do animal. A técnica não é a mais adequada para a avaliação de animais que apresentam taxa metabólica muito baixa ou para animais muito grandes, pois requer a construção de câmaras muito volumosas. O comportamento do animal também pode ser alterado durante as determinações, resultando em alterações em sua taxa metabólica, sendo esta outra desvantagem (RANDALL et al., 2008).

A calorimetria direta avalia as perdas de calor dos animais, enquanto que a calorimetria indireta mensura a produção de calor (NIENABER et al., 2008). A quantidade de calor produzida se relaciona com a quantidade de oxigênio consumida; assim, a taxa metabólica pode ser obtida a partir do consumo de oxigênio e da produção de dióxido de carbono pela respirometria (RANDALL et al., 2008).

A calorimetria indireta se baseia na quantidade de calor produzida para cada litro de oxigênio utilizado nos processos de oxidação dos carboidratos, proteínas e gorduras, que é aproximadamente a mesma. A maior quantidade de calor é produzida a partir da oxidação dos carboidratos, e a menor, das gorduras (DA SILVA & MAIA, 2013).

Embora um litro de oxigênio forneça quantidades semelhantes de energia para os três principais alimentos (carboidrato, gordura e proteína), a energia da oxidação das gorduras é mais que o dobro da oxidação da mesma quantidade de carboidrato ou proteína. Para a obtenção do tipo de alimento que está sendo oxidado calcula-se o quociente respiratório, que é a relação entre as taxas de dióxido de carbono produzido e oxigênio consumido, com valores geralmente entre 0,7 e 1,0. Valores mais próximos de 1,0 sugerem principalmente metabolismo de carboidrato, e valores próximos a 0,7 apontam para a gordura (SCHMIDT-NIELSEN,

2002). Portanto, este método requer medidas precisas do consumo de oxigênio e da produção de dióxido de carbono, metano e ureia. Sua grande vantagem em relação à calorimetria indireta é que algumas modificações ambientais podem ser efetuadas testando, por exemplo, diferentes temperaturas, aquecimento ou resfriamento do piso (Nienaber et al., 2008). Em casos onde não é possível a mensuração do metano produzido e do nitrogênio excretado, pode-se estimar o metabolismo pelo oxigênio consumido e o dióxido de carbono produzido (DA SILVA & MAIA, 2013).

A taxa metabólica poderia ser estimada apenas pela produção de dióxido de carbono, porém é muito menos precisa. O corpo apresenta uma grande reserva de dióxido de carbono, que se modifica facilmente. Por exemplo, um animal com hiperventilação pulmonar elimina grandes quantidades de dióxido de carbono no ar expirado, e que não refletem a taxa metabólica do animal. Outra razão para sua imprecisão é que os alimentos fornecem quantidades distintas de energia para cada litro de dióxido de carbono produzido (SCHMIDT-NIELSEN, 2002).

A calorimetria indireta pode ser mensurada pelo uso de câmaras, capuzes ventilados ou máscaras respiratórias, podendo se adaptar às condições de criação dos animais (NIENABER et al., 2008). O uso de máscaras respiratórias em estudos de calorimetria indireta torna-se extremamente interessante, pois permite a estimação da taxa metabólica dos animais em condições as mais próximas possíveis das condições de campo, sejam elas em ambiente aberto ou no interior de instalações. Para localidades com predominância de clima tropical, como a maior parte do Brasil, pode ter diversas aplicações, como na avaliação da taxa metabólica de bovinos (COSTA, 2013) e caprinos (MAIA et al., 2014) expostos ou não à radiação solar e na relação entre evaporação respiratória e taxa metabólica de ovinos (MAIA et al., 2013). Nascimento et al. (2011) desenvolveram uma máscara respiratória para a avaliação da taxa metabólica associada a diferentes condições ambientais e variáveis fisiológicas de frangos de corte e poedeiras. Após alguns testes, Maia et al. (2014b) propuseram um capuz para aves, que proporciona um maior conforto às mesmas no momento da coleta, além de evitar vazamento do ar expirado do animal.

2.4 Mecanismos de Troca de Energia

Os termos de entrada e saída de energia num volume de controle são considerados fenômenos de superfície, ou seja, referem-se aos processos que ocorrem na superfície de controle e são geralmente proporcionais à área superficial (INCROPERA et al., 2008). Os mecanismos de entrada de energia podem ser: condução, convecção e radiação, e os de saída pelos mesmos mecanismos sensíveis ou por mecanismos de troca de calor latente: pela evaporação de água nas superfícies respiratória e cutânea. Os mecanismos de troca de calor sensível ocorrem devido a um diferencial de temperatura e a velocidade do ar, enquanto que os mecanismos latentes ocorrem devido a um gradiente de pressão de vapor (MAIA et al., 2005).

2.4.1 Mecanismos de transferência de calor sensível

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. Os gastos energéticos para a manutenção da temperatura corporal pelos mecanismos em questão são muito menores do que os necessários para a manutenção da perda de calor por meio da evaporação respiratória, que para frangos de corte se torna o principal mecanismo quando as aves estão em ambientes com altas temperaturas. Portanto, qualquer mudança das perdas de calor latente em relação à de calor sensível reduz a energia gasta para a manutenção e aumenta o conteúdo de energia disponível para o crescimento (YAHAV et al., 2009).

2.4.1.1 Transferência de calor por Condução

A transferência de calor por condução é a transferência de energia de partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância devido às interações entre as partículas. A equação da taxa de condução é definida pela lei de Fourier, que foi baseada em evidências experimentais e não a partir de princípios

fundamentais (INCROPERA et al., 2008). A taxa de transferência de calor por condução (W) é definida pela eq. 2:

$$q_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

em que: q_{cond} é a taxa de transferência de calor, W; k é a condutividade térmica do material, $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$; A é a área de superfície, m^2 ; dT é o gradiente de temperaturas, K; dx é o comprimento do objeto, m.

E o fluxo de calor por condução (W m^{-2}) é obtido ao dividirmos a eq. (2) pela área do material (eq. 3):

$$q_{\text{cond}}'' = \frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

Os sinais negativos nas equações indicam que tanto a taxa quanto o fluxo de calor por condução ocorrem no sentido de diminuição das temperaturas. Além disso, a lei de Fourier nos permite inferir uma importante propriedade térmica das matérias, a condutividade térmica (k , $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$). A condutividade térmica é uma propriedade de transporte, que indica a taxa na qual a energia é transferida pelo processo de difusão (INCROPERA et al., 2008).

Para animais em pé, podemos considerar a transferência de calor por condução como desprezível (HAHN, 1976; MCARTHUR, 1987), pois o ar, que é o meio em contato com o animal neste caso, apresenta um valor baixo de condutividade térmica, o que torna este mecanismo pouco significativo frente a todos os outros. Porém, se considerarmos os animais deitados, em contato com o piso ou alguma outra estrutura, as trocas de calor por condução devem ser consideradas (HAHN, 1976).

A transferência de calor por condução torna-se fundamental em estudos sobre a escolha de pisos (FÆREVIK et al., 2005) e do impacto do material de cobertura (COOPER et al., 1998) das instalações para animais.

O fluxo por condução também ocorre no interior da massa de um corpo (DA SILVA, 2000), conseqüentemente esse mecanismo é de fundamental importância no estudo da transferência de calor nas camadas de pele e gordura dos animais (DA SILVA & MAIA, 2013) e na capa de cobertura dos animais, como no estudo de Wolf & Walsberg (2000) sobre a importância da transferência de calor por condução na

camada de penas das aves; os estudos de Gebremedhin & Hillman (1997) sobre o perfil de temperatura e fluxo de calor em pelames com uma fonte adicional de radiação e o de Jiang et al. (2005) que determinaram um modelo para a simulação da temperatura da pele e fluxos sensíveis e latentes em uma camada de pelame.

2.4.1.2 Transferência de Calor por Convecção

A transferência de calor por convecção ocorre entre uma superfície e um fluido em contato com a mesma, quando eles estiverem a diferentes temperaturas. Esse mecanismo é devido ao movimento molecular aleatório e ao movimento global do fluido no interior da camada limite. Ela é classificada de acordo com a natureza do escoamento do fluido: convecção forçada, quando o escoamento é devido a meios externos, como ventiladores, bombas ou ventos atmosféricos; convecção natural, quando o escoamento é induzido por forças de empuxo originadas por diferenças de densidade causadas por variações de temperatura no fluido; convecção combinada, quando há uma combinação de convecção forçada e natural (INCROPERA et al., 2008).

Se considerarmos um objeto em contato com um fluido (com uma menor temperatura), a porção do fluido em contato direto com a superfície do objeto será aquecida a uma temperatura mais próxima à da superfície, do que o restante do fluido envolvente. Sempre haverá uma camada de fluido aderida à superfície do objeto, cuja espessura depende da força de movimento do fluido. Quanto maior a turbulência, menos espessa é essa camada, denominada camada limite (DA SILVA, 2000).

O fluxo de calor por convecção ($W\ m^{-2}$) é definido pela lei do resfriamento de Newton, eq. 4.

$$q_{conv}'' = h(T_s - T_{\infty}) \quad (4)$$

em que: q_{conv} é o fluxo de calor por convecção, $W\ m^{-2}$; h é o coeficiente de transferência de calor por convecção, $W\ m^{-2}\ K^{-1}$; T_s é a temperatura superficial do animal, K; T_{∞} é a temperatura do fluido, K.

O coeficiente de transferência de calor por convecção (h , $W m^{-2} K^{-1}$) depende da geometria da superfície (plana ou curva), da natureza laminar ou turbulenta do escoamento do fluido (líquido ou gasoso), de uma série de propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido (densidade, viscosidade, calor específico, condutividade térmica do fluido e velocidade de deslocamento do fluido sobre a superfície) e da ocorrência de evaporação ou condensação sobre a superfície. A dificuldade está na determinação deste coeficiente de maneira adequada à superfície do objeto de estudo (DA SILVA, 2000; INCROPERA et al., 2008).

Estudos como o de Yahav et al. (2004), Aerts & Berckmans (2004) e Nascimento et al. (2014) discutem a importância da convecção para a manutenção da temperatura corporal das aves, atingindo valores entre 70 e 80% do total das trocas sensíveis. Yahav et al. (2004) ainda afirma que apesar dos outros fatores ambientais, como a temperatura e umidade relativa, a velocidade do vento é o principal fator que impacta o desempenho de frangos de corte, quando associado a um diferencial de temperatura entre a superfície corporal e o meio.

2.4.1.3 Transferência de Calor por Radiação

Radiação térmica é a energia emitida por toda matéria com temperatura acima de zero absoluto (zero Kelvin). A transferência de energia ocorre por meio de ondas eletromagnéticas (INCROPERA et al., 2008), que constituem uma fração do espectro eletromagnético.

As ondas são irradiadas por átomos e moléculas devido a alterações no seu conteúdo energético, e a quantidade de radiação emitida depende da natureza do material, da constituição física e da temperatura absoluta da superfície emissora. As ondas de radiação térmica atravessam o vácuo e ao atingir uma superfície qualquer, parte da energia é absorvida, parte é refletida e parte é transmitida através da massa sob a superfície. O somatório dessas três propriedades (absortância, refletância e transmitância) é igual a um (DA SILVA, 2000). Há uma quarta propriedade, a emissividade, que mede a eficiência com que uma superfície emite energia em relação a um corpo negro (INCROPERA et al., 2008). A emissividade e a absortância são complementares entre si, isto é, as superfícies com maiores

valores de absorptância apresentam maiores valores de emissividade (DA SILVA, 2000).

Para um corpo negro, o poder emissivo de uma superfície é determinado pela lei de Stefan-Boltzmann, eq. 5.

$$E_n = \sigma T_s^4 \quad (5)$$

em que: E_n é a potência da radiação emitida por um corpo negro, $W\ m^{-2}$; σ é a constante de Stefan-Boltzmann, igual a $5,67051 \cdot 10^{-8}\ W\ m^{-2}\ K^{-4}$; T_s é a temperatura absoluta da superfície, K.

O fluxo térmico emitido por uma superfície real (corpo cinzento) é menor do que a de um corpo negro, e é função de sua emissividade, como definido na eq. 6.

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (6)$$

em que: E é a potência da radiação emitida por um corpo cinzento, $W\ m^{-2}$; σ é a constante de Stefan-Boltzmann, igual a $5,67051 \cdot 10^{-8}\ W\ m^{-2}\ K^{-4}$; T_s é a temperatura absoluta da superfície, K.

A Lei de Wien (eq. 7), deduzida a partir da eq. 6, indica o comprimento de onda, λ (μm) para uma determinada temperatura.

$$\lambda_{max} = 2897,8 T^{-1} \quad (7)$$

em que: λ_{max} é o comprimento de onda onde ocorre o máximo valor da potência emissiva, μm ; T é a temperatura da superfície do corpo, K.

Se considerarmos a troca de radiação entre uma superfície a uma temperatura T_s e uma superfície isotérmica muito maior que envolve completamente a menor (podemos citar como exemplo um animal e o ambiente circundante, cuja temperatura pode ser representada pela Temperatura Radiante Média (T_{rm})), temos o fluxo de troca de calor por radiação ($W\ m^{-2}$) determinado pela eq. 8.

$$q_{rad}'' = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{rm}^4) \quad (8)$$

em que: q_{rad} é o fluxo de calor por radiação, $W\ m^{-2}$; ε é a emissividade do corpo, que no caso de tecidos biológicos é igual a 0,98; σ é a constante de Stefan-Boltzmann,

igual a $5,67051 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$; T_s é a temperatura da superfície do corpo, K; T_m é a temperatura radiante média, K.

Malheiros et al. (2000) estudaram a importância do fluxo de radiação de ondas longas para pintos entre um e sete dias de vida mantidos a 20, 25 ou 35°C, indicando que as perdas por radiação a 20°C foram aproximadamente nove vezes o valor das perdas a 35°C. Nascimento et al. (2014a) determinaram o fluxo de calor sensível para frangos de corte ao longo de um ciclo produtivo (seis semanas) e observaram que as perdas de calor por radiação e convecção foram crescentes com o aumento do peso dos frangos. Essas maiores perdas de calor tem relação com a maior proporção entre área e volume nos animais nos primeiros dias de vida.

2.4.2 Mecanismos de transferência de calor latente

Há um constante fluxo de massa entre os animais e a atmosfera, principalmente de gases como oxigênio e dióxido de carbono e vapor de água. Nos animais o fluxo de massa ocorre através dos tecidos superficiais e respiratórios e neles ocorre a mudança de estado das moléculas de água, sendo calor latente transferido neste processo (DA SILVA & MAIA, 2013). Portanto, a premissa de que ocorre transferência de calor por tal mecanismo é que haja uma diferença de concentração entre duas regiões ou superfícies.

A lei de Fick, análoga à lei de Fourier, pode ser aplicada para se estimar o fluxo de massa. Assim como a lei de Fourier define a condutividade térmica, a lei de Fick define outra importante propriedade de transporte, denominada difusividade mássica. A difusividade térmica ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) expressa a habilidade de um corpo em transferir energia térmica em relação à sua capacidade de estocar energia; e a difusividade mássica ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) indica a capacidade da massa em se difundir no meio. A lei de Fick é descrita pela eq. 9.

$$\phi_m = -\frac{D}{dz}(C_1 - C_2) \quad (9)$$

em que: Φ_m é a transferência de massa, W m^{-2} ; D é a difusividade mássica do material, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$; dz é a dimensão característica do corpo, m; C_1 e C_2 são as concentrações dos meios.

Nos animais, a transferência de calor latente envolve a evaporação de água, que implica sempre em um processo de perda de energia térmica do organismo. A evaporação envolve perda de água, que é um recurso vital para praticamente todos os processos bioquímicos. Portanto, a perda de calor por evaporação implica na perda de massa. Dentre todos os mecanismos de transferência de calor, este é o único que une uma via de perda de calor a uma perda de recurso (água). Os ajustes nas taxas de evaporação são feitos por uma mudança na condutância do epitélio ou por alterações na área superficial exposta do epitélio (HOFFMAN et al., 2007).

Até a década de 1960 acreditava-se que as aves eram incapazes de perder calor através da superfície cutânea (WEBSTER & KING, 1987). Estudos sobre os epitélios onde ocorrem perdas de calor por evaporação nas aves distinguem as regiões da boca e faringe e a pele (RICHARDS, 1976; WEBSTER & KING, 1987; WOLF & WALSBERG, 1996) e mais recentemente, adicionando uma terceira via, a evaporação cloacal, que representa aproximadamente 6% do total de perdas latentes em codornas mantidas a uma temperatura ambiente de 32°C e aproximadamente 21% para pombos mantidos a 42°C (HOFFMAN et al., 2007).

2.4.2.1 Evaporação na Superfície Cutânea

A evaporação cutânea depende de fatores como: (a) natureza e atividade das glândulas sudoríparas; (b) permeabilidade da epiderme à passagem de líquidos; (c) natureza da capa de cobertura e sua permeabilidade ao vapor de água. As aves, assim como os paquidermes e coelhos, não possuem glândulas sudoríparas; mas isso não indica que esses animais não sejam capazes de perder água pela pele. As aves e todos os outros animais conseguem perder água através da superfície cutânea, por meio de um processo de difusão de vapor de água através da epiderme, denominado perspiração insensível. Esse mecanismo pode ser estimado por métodos gravimétricos, por exemplo, com o uso de balanças de precisão (da Silva, 2008).

Wolf & Walsberg (1996) descrevem o uso de câmaras metabólicas divididas em dois compartimentos, onde é possível distinguir as perdas evaporativas da superfície cutânea e da respiração das aves. Hoffman et al. (2007) classificam as

trocas evaporativas nas aves em bucofaringeal (isolando-se a região da cabeça dos animais) e cutânea. As perdas cutâneas em aves, representadas pela perspiração insensível, contribui com aproximadamente 1,2 a 1,8 W m⁻² a uma temperatura de 40°C em aves domésticas. Em temperaturas de 21°C, a evaporação cutânea é maior do que a respiratória; a 0°C representam até 78% das perdas evaporativas (RICHARDS, 1976).

Webster & King (1987) citam outros métodos utilizados para a determinação da evaporação cutânea em aves, com seus respectivos pesquisadores: o método da cápsula dissecante (WITHERS, 1983); o método do porômetro de difusão modificado por Webster et al. (1985), que mede a resistência de difusão do vapor de água da pele e estima as perdas cutâneas por meio de um modelo físico.

Com o aumento da temperatura do ar e consequente aproximação da temperatura corporal, as aves apresentam diferentes padrões de perdas evaporativas: para pássaros que vivem em regiões desérticas, é observado primeiramente um aumento das perdas cutâneas; para outras aves, que incluem frangos de corte, codornas, faisões, perus, é observado primeiramente um aumento das perdas respiratórias (WOLF & WALSBERG, 1996). Por essa razão, em trabalhos com frangos de corte podemos considerar como desprezíveis as perdas evaporativas na superfície cutânea.

2.4.2.2 Evaporação Respiratória

As aves mantidas sob altas temperaturas ativam a evaporação respiratória através da ofegação, como o principal mecanismo para perda de calor (RICHARDS, 1971). Porém, como a sua ativação é associada ao conteúdo de água do corpo, a perda por essa via será diminuída se as aves estiverem em algum estágio de desidratação. Além disso, o aumento da evaporação respiratória para a manutenção da temperatura corporal implica num gasto energético muito maior para as aves do que ocorre nos mecanismos de radiação e convecção, o que pode interferir no equilíbrio ácido-básico do sangue e no conteúdo de água do organismo, consequentemente, alterando o metabolismo energético (YAHAV et al., 2009).

A principal função do sistema respiratório é a troca de gases: levar oxigênio até os tecidos e remover dióxido de carbono dos mesmos, atendendo as necessidades metabólicas dos animais. Além disso, o sistema respiratório é fundamental para a termorregulação, uma vez que a perda de água pelo sistema respiratório atua na manutenção da temperatura corporal (POWELL, 2000). O sistema respiratório das aves apresenta algumas peculiaridades que são fundamentais para a proposta de metodologias para avaliar suas funções respiratórias.

As aves possuem dois pulmões pequenos, que não alteram o volume durante a respiração, mais nove sacos aéreos (craniais e caudais, sendo que cada um dos grupos recebe em torno de 50% do ar inspirado), que atuam na ventilação do pulmão; eles não participam diretamente das trocas gasosas, são pouco vascularizados, mas ocupam a maior parte do volume do sistema respiratório. Proporcionalmente, o volume do sistema respiratório das aves é em torno de 15%, enquanto que o de um mamífero é de aproximadamente 7%. As aves também não apresentam o diafragma, que nos mamíferos separa a cavidade torácica da abdominal (POWELL, 2000). Julian (1989) afirma que o pulmão de frangos de corte corresponde a 2% e 1,4% aproximadamente do peso corporal para aves com um e 144 dias de vida, respectivamente. Teoricamente, devido a anatomia do sistema respiratório das aves, as trocas gasosas são mais eficientes em comparação com os mamíferos (PIIPER & SCHEID, 1975).

Da Silva (2008) relata que não existem descritos na literatura métodos específicos para a determinação da evaporação respiratória em aves. O autor sugere o uso de câmaras que meçam separadamente as perdas respiratórias e as da superfície cutânea. Porém, existem na literatura algumas metodologias para a mensuração da evaporação respiratória em aves (MENUAN & RICHARDS, 1975; WOLF & WALSBERG, 1996).

Wolf & Walsberg (1996) descrevem o uso de câmaras metabólicas que permitem a distinção das trocas cutâneas e respiratórias, com a separação de dois compartimentos: um para a região da cabeça e outro para o restante do corpo das aves. A câmara (0,16x0,14x0,09 m) é mantida dentro de uma sala com controle de temperatura e luminosidade. Os autores relatam que as mensurações, em pequenos

pássaros (com aproximadamente sete gramas de peso vivo), devem ser realizadas no escuro para evitar que os animais se agitem dentro da câmara, sendo o monitoramento feito por meio de uma câmera de infravermelho. Quando as aves começam a se debater muito, as medições são interrompidas, o que ocorre entre meia e uma hora após colocadas as aves na câmara. Na câmara existem duas entradas e duas saídas de ar, conectadas a um analisador de dióxido de carbono.

Hoffman et al. (2007) utilizaram a mesma metodologia de Wolf & Walsberg (1996). No entanto, foram analisadas simultaneamente nas coletas as taxas volumétricas de produção de dióxido de carbono e de consumo de oxigênio, o que torna as mensurações mais acuradas. Os autores referem que para aves como codornas (*Eurasian quail*) não é adequado o uso das câmaras com dois compartimentos, devido à massa corporal e à geometria corporal dessas aves; utilizaram uma câmara cilíndrica feita de vidro de borosilicato. Eles relatam ainda o uso de uma máscara facial cilíndrica feita de policarbonato, que é colocada na cabeça e presa ao pescoço por um barbante de nylon. O uso da máscara presa à cabeça é para que possa ser feita a distinção entre as perdas evaporatórias cutânea e respiratória. Em ambas as câmaras (de dois compartimentos ou a cilíndrica de borosilicato) as aves permaneciam por duas horas, também no escuro. Em média, os últimos dez minutos de coleta eram utilizados para as análises do oxigênio e dióxido de carbono.

Menuam & Richards (1975) determinaram os volumes respiratório corrente e minuto de poedeiras utilizando um sistema de fluxo aberto, isolando-se a região da cabeça do restante do corpo de poedeiras mantidas em câmara climática sob elevadas temperaturas do ar (até próxima dos 50°C), para estudar o perfil de temperatura ao longo do sistema respiratório das aves. Vários pontos da traqueia e dos sacos aéreos foram medidos por uma sonda inserida via cânula traqueal nas aves anestesiadas. Os autores observaram que o trato respiratório superior (cavidade bucal e traqueia) tem maior participação nas perdas evaporativas do que a porção inferior, representada pelos sacos aéreos. Portanto, os sacos aéreos pouco contribuem para as perdas evaporativas na superfície respiratória, o que também pode ser devido a sua temperatura ser equivalente ou superior a temperatura retal (representada como a temperatura do núcleo corporal, mas que

por vezes pode ser ligeiramente inferior a outras temperaturas mais profundas do corpo, como a temperatura dos pulmões, por exemplo), o que indicaria que existe um pequeno diferencial de temperatura entre as superfícies, diminuindo a ocorrência de transferência de calor.

Nightingale (1977) descreve o uso de intubação de frangos de corte, por meio de um tubo endotraqueal conectado a um pneumotacógrafo, sendo possível a mensuração do volume respiratório corrente, da frequência respiratória e do volume minuto de aves anestesiadas ou não. Apesar de o autor relatar que não houve alteração no volume minuto entre os animais anestesiados ou não, podem ser observadas diferenças no volume respiratório corrente, que foi menor nas aves anestesiadas, e na frequência respiratória, que foi menor nas aves sem anestesia.

A evaporação respiratória pode ser particionada em seu componente sensível (convecção respiratória) e latente (evaporação), que engloba o fluxo de massa. Da Silva & Maia (2013) ressaltam que durante a respiração o fluxo de ar que chega aos pulmões nas aves nunca vem diretamente da atmosfera, passando primeiramente pelos sacos aéreos caudais. Essa observação indica que o sangue que sai dos pulmões absorve oxigênio e libera o dióxido de carbono em maiores proporções do que os mamíferos; o ciclo respiratório também permite uma perda mais eficiente, tanto de calor sensível como o de latente, mas ainda não existem dados na literatura sobre isso.

Modelos para a estimativa desses mecanismos foram propostos para ovinos (DA SILVA et al., 2002); estes autores observaram que a convecção respiratória é praticamente nula a uma temperatura do ar de 40°C, tendo esse mecanismo uma menor importância para a transferência de calor no sistema respiratório de ovinos sob temperaturas acima de 30°C, e que a perda de calor latente é o mecanismo mais importante para a termorregulação desses animais. Os autores supracitados desenvolveram uma equação para a estimativa do calor sensível, baseando-se no modelo de Chapman (1987) para tubos curtos, considerando a traquéia como um tubo com comprimento e diâmetro internos conhecidos. Portanto, o fluxo de calor sensível pode ser estimado através da taxa do fluxo de massa, do calor específico do ar e pelo diferencial de temperatura entre o núcleo corporal e a temperatura do

ar, uma vez que a temperatura aumenta com a passagem de ar pelo tubo traqueal, pela transferência de calor das paredes para o ar.

Já a equação para o cálculo da perda de calor latente foi baseada nas informações de McArthur (1987), que afirma que o ar proveniente dos pulmões na expiração é saturado à temperatura interna do corpo. Dessa maneira, o ar inspirado (à temperatura do ar) é aquecido até atingir a temperatura do núcleo corporal nos pulmões, com redução da sua pressão de vapor; isto torna possível a absorção de maior quantidade de vapor pelo ar ao longo da superfície respiratória. Mas a temperatura do ar expirado é menor que a temperatura dos pulmões e saturado a esta temperatura. A transferência de calor latente é determinada pelo calor latente de vaporização da água, pela densidade do ar, pelo fluxo de massa e pela diferença entre as umidades absolutas do ar expirado e da atmosfera.

Maia et al. (2005) mediram os fluxos de calor sensível e latente pela respiração em vacas de leite sob temperaturas do ar entre 10 e 40°C, observando que a convecção respiratória é um mecanismo de menor importância, diminuindo em quase oito vezes o seu valor sob temperaturas entre 10 e 35°C; todavia, as perdas de calor latente aumentam, sendo responsáveis por mais de 90% das trocas totais. Baseando-se nas considerações de da Silva et al. (2003), os autores citados desenvolveram modelos associando variáveis fisiológicas e ambientais para a determinação da evaporação e de funções respiratórias de vacas de leite em clima tropical em condições de campo.

O fluxo de massa (kg s^{-1}) necessário para a estimativa das perdas respiratórias é determinado pelo produto do volume respiratório corrente pela frequência respiratória e a densidade do ar (DA SILVA et al., 2003. Apesar de serem facilmente medidas em laboratório (em câmaras respirométricas, por exemplo), as funções respiratórias dos animais são difíceis de serem mensuradas em condições de campo.

O volume respiratório corrente é definido por da Silva & Maia (2013) como a quantidade de ar deslocada em cada movimento respiratório, sendo associada à frequência respiratória. Ventilação é o produto do volume respiratório corrente com a frequência respiratória, que aumenta pelo aumento da frequência respiratória ou

devido a respirações mais profundas (MENUAM & RICHARDS, 1975; POWELL, 2000).

A pletismografia de corpo inteiro pode ser utilizada para medir a frequência respiratória e o volume respiratório corrente de aves em uma câmara respirométrica. Essa técnica avalia variações na pressão devido ao aquecimento ou resfriamento do volume corrente, medido por um transdutor de pressão. Um fluxo de ar conhecido é injetado e os valores de pressão, temperatura e umidade podem ser controlados dentro da câmara (BUCHER, 1981; ARENS & COOPER, 2005). A pletismografia tem sido bastante utilizada por permitir mensurações da ventilação dos animais sem contenção e ser um método não invasivo. Apesar disso, alguns erros podem estar associados a essa metodologia: a pressão dentro da câmara respirométrica aumenta com a expiração do ar quente pelo animal e diminui com a inspiração, o que pode acarretar erros em relação ao tempo para a leitura do decaimento do sinal da pressão (ARENS & COOPER, 2005).

Maia et al. (2005) utilizaram uma máscara para medir as funções respiratórias de vacas de leite. O volume corrente, por exemplo, foi avaliado com um termo-anemômetro de precisão na entrada de ar, medindo a velocidade do ar entrando na máscara durante a respiração das vacas. A frequência respiratória foi medida pela contagem do número de movimentos na entrada da válvula da máscara. E a temperatura do ar expirado foi determinada por um termistor na válvula de saída da máscara, defronte das narinas dos animais. As pressões de vapor do ar expirado e do ar atmosférico foram medidas por um analisador de gases conectado à válvula de saída da máscara, obtendo-se a umidade absoluta do ar expirado e do ar atmosférico.

Um ponto interessante no uso de máscaras respiratórias para o estudo das funções respiratórias como o descrito por Maia et al. (2005), é que as mensurações podem ser feitas sob condições as mais próximas possíveis do ambiente de criação dos animais. Isto permite a observação dos animais a campo, sendo a influência das variáveis ambientais na resposta fisiológica dos animais observada de maneira realista. Em lugares caracterizados por clima tropical, como o Brasil, isso é de extrema importância; por exemplo, os efeitos da radiação solar podem ser incluídos, o que não é possível em nível de câmaras respirométricas ou metabólicas.

Apesar de ser relatado o uso de máscaras respiratórias para os animais mantidos em condições ambientais naturais (sem estarem em câmaras respirométricas ou metabólicas), como para bovinos de leite (MAIA et al., 2005), bovinos de corte (COSTA, 2013), ovinos (MAIA et al., 2013), cabras (MAIA et al., 2014), não existiam na literatura referências a aves de interesse zootécnico, como frangos de corte e poedeiras, até o trabalho de Nascimento et al. (2011).

Brackenburry descreve diversos estudos desenvolvidos por ele e outros autores com o uso de uma máscara respiratória em galinhas e galos, também com o objetivo de se medir o consumo de oxigênio, a produção de dióxido de carbono, as perdas de água via sistema respiratório e estudar a ventilação (volume respiratório minuto, frequência respiratória e volume corrente). Porém, seus trabalhos eram feitos em câmaras com os animais correndo sobre uma esteira (BRACKENBURY & AVERY, 1980; BRACKENBURY et al., 1981a; BRACKENBURY et al., 1981b; BRACKENBURY et al., 1982). Os autores testavam diferentes temperaturas do ar e diferentes velocidades na esteira e suas conseqüentes influências nas respostas fisiológicas dos animais. O uso da máscara era para que a coleta dos gases e funções respiratórias pudesse ser feita sem interferir no movimento das aves ao realizarem exercício na esteira.

Nascimento et al. (2011) desenvolveram uma máscara para mensurar as funções respiratórias de aves utilizando a técnica da espirometria. A espirometria é definida como um teste fisiológico que mede como um indivíduo inala ou exala volumes de ar em função do tempo. O sinal é medido na forma de volume ou fluxo (MILLER et al., 2005).

Nesta técnica, utiliza-se um espirômetro, um transdutor de pressão diferencial de precisão, que mede as taxas do fluxo de respiração. Ele deve estar conectado a um cabeçal de fluxo, cuja capacidade varia de acordo com a espécie estudada, sendo aplicada em humanos ou em animais de pequeno ou grande porte. O espirômetro conectado ao cabeçal de fluxo atua como um pneumotacógrafo, com um sinal de saída proporcional ao volume de ar. Por exemplo, para animais como ratos, frangos de corte e poedeiras, o cabeçal de fluxo utilizado tem a capacidade de um litro por minuto.

A pneumotacografia é um método para mensuração do fluxo de gás proposto por Fleisch (1925), que através da medida do gradiente de pressão é possível se determinar o fluxo de ar, e o volume pode ser determinado pela integração dos sinais do fluxo. As vantagens deste método são a baixa resistência, o mínimo de reinalação do ar expirado e a resposta rápida das características estudadas (GLASS et al., 1978).

2.5 Transferência de calor nos tecidos

Xu et al. (2011) definem que a transferência de calor nos tecidos é essencialmente um processo de condução associado a processos fisiológicos complexos, que incluem a circulação sanguínea, processos de perda evaporativos como a sudação, a geração de calor metabólico e também a dissipação de calor por meio da capa de cobertura. Portanto, segundo Da Silva & Maia (2013), podemos considerar o interior dos tecidos como um meio homogêneo em que ocorre a geração de energia térmica pelo metabolismo e há transferência de calor devido à passagem de sangue. Os princípios da conservação de energia podem ser aplicados aos tecidos, considerando estes como volume de controle e em que ocorrem os processos de transferência de calor por condução e de massa, envolvendo o escoamento de um fluido (sangue).

O calor produzido nos tecidos mais profundos é transportado até a superfície da pele ou a mucosa que reveste o trato respiratório superior antes de ser dissipado para o ambiente. Uma parte do calor é transportada via corrente sanguínea, devido ao fluxo de sangue na superfície da pele ou da mucosa. Se os animais estiverem em baixas temperaturas, os vasos sanguíneos estarão com sua máxima vasoconstrição e a transferência de calor ocorrerá por condução através dos tecidos (WHITTOW, 1986). Por outro lado, em situações de elevadas temperaturas os vasos sanguíneos estarão com sua máxima vasodilatação e grande parte do calor do interior do corpo será transportada através da corrente sanguínea, além da condução através dos tecidos.

Nas extremidades desprovidas de penas, uma perda excessiva de calor é evitada devido à presença de *venae comitantes*, ao mesmo tempo em que o fluxo de

sangue para os tecidos é mantido. A presença dessas estruturas permite que o calor contido no sangue arterial seja transferido para o sangue venoso (que retorna ao coração) ao invés de ser perdido nas extremidades corporais para o ambiente (MIDTGÅRD, 1989). Essas estruturas são compostas por um grupo de veias circundando uma artéria, e permitem a transferência de calor dos membros para o coração, e o calor é retido no corpo (DAWSON & WHITTOW, 2000).

As anastomoses arteriovenosas são arranjos vasculares que permitem que grande quantidade de sangue aquecido flua para a superfície da pele e assim facilitam a perda de calor, o que acarretaria num fluxo menor de sangue caso fosse transportado apenas pelos capilares. As anastomoses nas aves estão presentes na maioria das vezes na pele sem penas, o que representa aproximadamente 17, 53 e 83% do fluxo total de sangue em condições de baixas temperaturas, termoneutralidade e altas temperaturas, respectivamente (WOLFENSON, 1983).

McArthur (1981), propôs para animais que não apresentam perda de calor via sudação, considerar o organismo deles como análogos a um sistema elétrico em série, onde a resistência total à transferência de calor se dá pelo somatório das resistências do tecido, da capa de cobertura e do ambiente. A resistência à transferência de calor nos tecidos é considerada apenas nos seus valores mínimo e máximo, sendo mínima em elevadas temperaturas, em que ocorre a vasodilatação, e máxima em baixas temperaturas, onde ocorre vasoconstrição. Essa consideração limita o uso do modelo, pois a resistência à transferência de calor dos tecidos estará num intervalo entre seus valores mínimo e máximo em condições em que não sejam os extremos de estresse por altas ou baixas temperaturas, respectivamente.

2.6 Transferência de calor na capa de cobertura

A superfície do corpo atua como uma fronteira entre o organismo e o ambiente, que determina as características da superfície externa do corpo, em função do ambiente e da natureza do organismo. Por exemplo, animais que vivem em locais extremamente secos possuem uma proteção extra contra a perda de água e a radiação solar. Animais que vivem em regiões frias precisam de um isolamento contra a perda de energia térmica. E os que vivem em locais quentes devem

conseguir transferir o excesso de energia metabólica para o ambiente ao mesmo tempo em que evitam ganhar calor do ambiente (DA SILVA, 2008).

As penas das aves são classificadas como uma capa de cobertura com função de proteção térmica, assim como os pelos e a lã (MARSTON, 1955 *apud* DA SILVA & MAIA, 2013). Elas são responsáveis por retardar os fluxos de calor por convecção e radiação da superfície da pele das aves para o ambiente (WOLF & WALSBERG, 2000).

Da Silva (2008) descreve os processos em que os animais transferem calor do interior do corpo para a superfície corporal: por condução através dos tecidos superficiais (dérmicos e epidérmicos); por condução ao longo das fibras da capa externa (pêlos, lã ou penas); por condução através do ar e do vapor que permeiam os espaços entre as fibras; por convecção natural ou forçada; pela evaporação da umidade na superfície cutânea; radiação. No caso específico das aves, a transferência de calor através da capa de penas pode ocorrer por três vias, excluindo-se a evaporação, de acordo com Walsberg (1988): condução e convecção natural através do ar; condução através dos elementos sólidos da camada de penas; radiação. A determinação da importância de cada um desses mecanismos de transferência de calor pode nos fornecer uma base para entender como as aves interagem com o ambiente físico o qual habitam (WOLF & WALSBERG, 2000).

Alguns estudos foram realizados para estudar a importância de cada um desses mecanismos de transferência de calor na capa de cobertura de animais (velo, pelame e penas). Na literatura existem diversos estudos feitos sobre o pelame de mamíferos (CENA & MONTEITH, 1975; GEBREMEDHIN et al., 1983; JIANG et al., 2005).

Em aves, alguns estudos foram realizados como o de Dove et al. (2007) que estudaram os mecanismos que dez diferentes espécies utilizam para conservar o calor corporal na camada de penas. Wolf & Walsberg (2000) estudaram quais os mecanismos mais significativos que ocorrem na camada de penas e relatam que a quantidade de radiação absorvida nas penas têm relação com a espessura da mesma. Os autores descrevem que as propriedades ópticas das penas, associadas com aspectos do ambiente como a velocidade de deslocamento do ar, determinam a carga radiante absorvida pelas aves na camada de penas.

2.7 Modelagem matemática

Um modelo matemático pode ser definido como uma equação ou conjunto de equações que representam o comportamento de um sistema, havendo uma relação entre as variáveis do modelo e as mensuradas (THORNLEY & FRANCE, 2007). Os modelos podem ser divididos em estáticos, quando não levam em consideração a variável tempo, e os dinâmicos, que descrevem o comportamento considerando-se a variável tempo.

Os modelos matemáticos podem ser classificados como empíricos e mecanísticos. Um modelo mecanístico é construído baseado em algumas suposições e pode ser útil na observação do comportamento de um sistema, e que comparativamente com modelos empíricos, muitas vezes permite maiores possibilidades e melhores resultados. Porém, é importante ressaltar que muitos modelos mecanísticos compreendem e dependem de alguns elementos empíricos. Os modelos empíricos tem como principal objetivo descrever as respostas de um sistema, geralmente através de equações matemáticas ou estatísticas (THORNLEY & FRANCE, 2007).

Em relação aos modelos, nós podemos avaliá-los e validá-los. Segundo Thornley & France (2007) quando nos referimos à avaliação de um modelo, relacionamos todas as críticas com relação àquele modelo. As desavenças se relacionam ao fato de que os modelos geralmente nos respondem muito bem alguns questionamentos enquanto que outros não totalmente. A avaliação do modelo parte dos objetivos do pesquisador e inclui o questionamento quanto aos objetivos, mas é razoável que essa avaliação seja mais ampla.

De acordo com Rykiel (1966) *apud* Thornley & France (2007) a validação é a demonstração que um modelo, dentro de um domínio específico, tem um bom poder de predição (acurácia). A acurácia quantitativa de predições é denominada como a validade do modelo (THORNLEY & FRANCE, 2007).

Há muitos anos a modelagem matemática tem sido utilizada como uma ferramenta para o estudo do equilíbrio térmico e da transferência de calor de animais de produção. McArthur & Monteith (1980) desenvolveram um modelo para simular um ovino, construído a partir de um cilindro metálico, aquecido

eletricamente, com o objetivo de estudar a importância da convecção na transferência de calor entre a superfície da capa de cobertura e o meio. No mesmo ano, McArthur (1980a) estudou a transferência de calor sensível no velo de ovinos e calculou a resistência à transferência de calor em função da velocidade do vento, considerando que os fluxos por condução e convecção ocorriam simultânea e paralelamente.

Numa publicação subsequente, McArthur (1980b) estudou a taxa de perda de calor sensível em diferentes profundidades no velo em ambiente controlado e calculou o fluxo de calor para diferentes regiões corporais. O autor já discutia que a predição das taxas de produção de calor ou perdas evaporativas para manutenção da temperatura corporal requer o conhecimento da resistência entre o núcleo corporal do animal e o meio. Portanto, o autor propôs três resistências para a transferência de calor sensível: a dos tecidos corporais; a da capa de cobertura; e a do ambiente. O autor determinou valores de resistência máxima (quando ocorre vasoconstrição) e mínimo (no caso de vasodilatação), mas devemos considerar o fluxo e as propriedades do sangue, como a perfusão.

Posteriormente, McArthur (1987) propôs um modelo para animais endotermos em geral, mas o modelo compreendia apenas as trocas de calor sensível e perdas de calor latente da superfície corporal dos animais.

Turnpenny (2000ab) elaborou um modelo para o estudo da transferência de calor em bovinos, ovinos, suínos e também em frangos de corte, mas considerou um valor único para a resistência do tecido à transferência de calor; isto pode ser questionado, uma vez que essa resistência é variável em função, por exemplo, da temperatura do ar a qual as aves estão submetidas.

Yanagi Jr. et al. (2001), descreveram um modelo para poedeiras, mas que é aplicável para situações onde é efetuado o molhamento superficial dos animais, e não levaram em consideração as perdas respiratórias das aves, as quais tem sua importância em casos de estresse térmico por elevadas temperaturas. Da Silva (2000) propôs um modelo para estimação do estoque de energia térmica em bovinos, mas o metabolismo dos animais era baseado somente na massa corporal, o que também sabe-se que varia em função das condições ambientais às quais os animais estão expostos.

Pennes (1948) estudou o perfil de temperatura e o fluxo sanguíneo no antebraço humano, e propôs a chamada equação do bio-calor, que considera a perfusão sanguínea e as propriedades do sangue como calor específico e densidade. Apesar de algumas críticas com relação a equação, como por exemplo, por considerar a temperatura do sangue arterial igual a temperatura do núcleo corporal, sua aplicação apresenta resultados satisfatórios.

Estudos de modelagem matemática acerca da transferência de calor e massa em humanos são bastante avançados, relacionado com o desenvolvimento de modelos que consideram a transferência de calor ocorrendo nas três dimensões e considerando as diferentes regiões corporais, com suas geometrias e propriedades características. O trabalho desenvolvido por Ferreira & Yanagihara (2009) considera o organismo dividido em 15 segmentos, com a adoção da geometria adequada para cada segmento, além da representação refinada dos órgãos e tecidos corporais, o que pode servir como um guia com relação aos avanços que estudos na área de transferência de calor em animais podem seguir.

2.8 Modelos matemáticos desenvolvidos para aves

Diversos pesquisadores descreveram modelos empíricos e mecanísticos (BOUCHILLON et al., 1970; WATHES & CLARK, 1981; KETTLEWELL & MORAN, 1992; TURNPENNY et al., 2000ab; YANAGI Jr. et al., 2001) que predizem o equilíbrio térmico de frangos de corte e galinhas poedeiras. Turnpenny et al. (2000b) ao desenvolverem um modelo empírico que pode ser aplicado para frangos de corte, considerando que não haja incidência de radiação dentro das instalações, concluíram que uma importante limitação para a validação dos modelos e a carência de dados experimentais disponíveis a respeito do particionamento das perdas de calor, da produção de calor metabólico e do isolamento proporcionado pela capa de cobertura, onde a maioria dos dados foram obtidos a mais de 40 anos atrás.

Bouchillon et al. (1970) desenvolveram um modelo mecanístico para determinar a homeostase térmica de frangos de corte em diferentes condições ambientais. Os autores descreveram o modelo considerando a análise em estado transiente e estacionário, e incluem as perdas evaporatórias pela respiração. Porém

os autores utilizaram equações para prever as variáveis fisiológicas dos frangos baseadas no peso corporal, que variam de acordo com as condições ambientais as quais as aves estão expostas. Os autores supracitados concluem a necessidade de aprimoramento do modelo e a inclusão de dados fisiológicos mensurados nos frangos de corte.

Wathes & Clark (1981) estudaram o fluxo de calor sensível por convecção e radiação de ondas longas de frangos de corte durante todo o ciclo de criação. Apesar da discussão dos autores envolver a proteção térmica da capa de penas e o comportamento de agrupamento dos frangos dentro das instalações, a produção de calor metabólico e o seu particionamento nos mecanismos de perdas de calor não foi considerado.

Kettlewell & Moran (1992) propuseram um modelo matemático para o estudo da perda e produção de calor de frangos de corte durante o transporte em caixas. A ressalva dos autores é a necessidade de utilizar alguns parâmetros fisiológicos de outras pesquisas que não foram mensurados em frangos de corte, sendo, portanto, de aves que diferem fisiologicamente dos frangos. Devido ao grande número necessário de suposições, os pesquisadores mostraram ressalva em definir as conclusões a partir das predições do modelo, ressaltando a necessidade de se realizar mais pesquisas que ajudem na definição dos parâmetros mais importantes e que o modelo possa ser testado com dados mensurados em condições simuladas e reais de transporte de frangos de corte.

Yanagi Jr. et al. (2001) desenvolveram um modelo matemático mecanístico e transiente para estudar o aumento na temperatura corporal de galinhas poedeiras após um período de exposição de 50 minutos a uma condição de estresse térmico e relacionaram com a efetividade de se realizar o molhamento da superfície corporal das aves, mas o modelo considera a transferência de calor por radiação entre os animais e o ambiente como desprezíveis.

Nascimento et al. (2014) apresentaram um modelo para pintos de corte nos primeiros oito dias de vida, considerando um estado estacionário, para estimar as temperaturas da pele e da camada de penas. Além disso, o modelo pode ser útil na predição da quantidade de calor necessária (provida por uma fonte adicional de radiação) que precisa ser fornecida às aves para que mantenham sua homeostase.

Uma contribuição importante do modelo é considerar a produção de calor metabólico das aves, sendo utilizados dados coletados em frangos de corte por calorimetria indireta para a inclusão no modelo.

2.9 Aspectos fisiológicos das aves

Os frangos de corte de linhagens comerciais apresentam uma rápida taxa de crescimento e atingem o peso de abate por volta de seis semanas de vida. Portanto, essas aves sofrem diversas e importantes mudanças fisiológicas durante o ciclo de criação (NASCIMENTO et al., 2014). Essas mudanças estão relacionadas, por exemplo, com a estrutura da camada de penas e sensibilidade às condições ambientais.

Todas as aves apresentam uma camada de penas (pterilose), cobrindo aproximadamente 75% da superfície corporal, e as diferenças entre as espécies estão relacionadas à coloração, ao formato e ao tamanho. A variabilidade dessas características para frangos de corte diminuiu muito ao longo dos anos, devido à seleção genética, sendo hoje predominantemente criadas aves com uma camada de penas branca ou marrom. A camada de penas é fundamental para a proteção da pele e o seu desenvolvimento começa durante o período de incubação e é finalizado entre dois e três dias após a eclosão (LEESON & WALSH, 2004a).

Além disso, as penas fornecem uma eficiente barreira entre o corpo das aves e o ambiente (WOLF & WALSBERG, 2000), reduzem a resistência e auxiliam a propulsão durante o voo, são importantes para aspectos comportamentais como a camuflagem, e sua proteção isolante é fundamental para as aves, como animais homeotérmicos (HOMBURGER & DE SILVA, 2000; STETTENHEIM, 2000; RUBEN, 2000 *apud* WOLF & WALSBERG, 2000).

As penas não são uniformemente distribuídas na superfície corporal. A impressão de uniformidade é devida aos diversos ângulos e estratificação das penas, que são fundamentais para a máxima proteção da pele. Existem três tipos principais de penas que variam em relação a estrutura, tamanho e aparência: as visíveis a olho nu, definidas como penas de contorno, cuja função principal é proteger a pele. Elas apresentam um eixo central com duas séries paralelas de filamentos; as plumas, bastante evidentes nos pintos de um dia, e se acham

dispersas embaixo das penas de contorno nos frangos adultos (EDE, 1964); e as plumas onde os filamentos são ligados na extremidade da pena (LEESON & WALSH, 2004a).

A plumagem apresenta estruturas semelhantes a nós ou nódulos que podem contribuir para a conservação de calor na camada de penas; portanto, a presença das plumas ou das mesmas nas penas de contorno podem apresentar uma adaptação adicional para a conservação do calor corporal devido ao mecanismo da radiação. Muitas espécies de aves apresentam esses nós com coloração escura, ou seja, com a presença de grânulos escuros constituídos principalmente por melanina, que podem ser eficientes na absorção e na conservação de calor (DOVE et al., 2007).

As aves sofrem uma série de mudas durante o seu amadurecimento, com o desenvolvimento sucessivo de gerações de penas. Quatro gerações de penas se desenvolvem a partir de um mesmo folículo. A segunda muda se inicia aproximadamente entre a quarta e quinta semana de vida, o que nos aponta que para os frangos de corte em criações comerciais, esta é a única muda que pode ser observada. Nesta fase do ciclo de vida dos frangos, pode-se observar ainda a presença da plumagem na região da cabeça e às vezes em volta do abdômen. Após a eclosão, os pintos de um dia apresentam uma densa camada de plumagem, e após poucos dias, pode-se observar a presença da segunda geração de penas (LEESON & WALSH, 2004a). Essa observação é muito importante nos estudos da transferência de calor na camada de penas para aves durante a fase de crescimento, pois a presença simultânea de plumagem e penas de contorno dificultam a modelagem dessas características e também a mensuração de suas propriedades radiativas, e conseqüentemente, a aproximação a mais real possível da conformação corporal das aves.

Outro ponto importante a se considerar é que as empresas que trabalham com o melhoramento genético das linhagens de frango de corte comerciais fornecem ao mercado aves sexadas, cujo sexo é facilmente distinguível pela visualização do aparecimento da segunda geração das penas. A diferenciação das penas pode ser facilmente observada até aproximadamente o terceiro ou quarto dias

de vida, sendo que os machos apresentam um desenvolvimento mais lento em comparação às fêmeas (LEESON & WALSH, 2004b).

Tanto o folículo quanto as penas emergentes são derivados da camada da epiderme da pele. As penas são presas ao corpo através dos folículos, mas Leeson & Walsh (2004a) ressaltam que dificilmente ocorre contração muscular ao redor da base da pena, e que não está totalmente claro o porquê é tão difícil a remoção de penas de aves vivas. Essa observação sugere a necessidade de se propor metodologias para a mensuração das propriedades radiativas das penas de frangos de corte ao longo do ciclo de criação.

Alguns fatores influenciam o crescimento das penas. Os hormônios tireoidianos e as gonadotrofinas são os que mais influenciam no crescimento e desenvolvimento das penas. Aspectos nutricionais também afetam características como estrutura, cor e muda da camada de penas. Os fatores ambientais e o uso de anti-coccidianos também afetam o desenvolvimento das penas (LEESON & WALSH, 2004b).

Outro aspecto fisiológico importante a ser considerado nos frangos de corte é a importância das diferentes regiões corporais para as trocas de calor.

A contribuição de cada região está diretamente relacionada ao fluxo sanguíneo na superfície corporal, e portanto, no fluxo de calor do interior do organismo até a superfície. Mesmo nos primeiros dias de vida dos frangos, há uma distinção entre as regiões corporais com ou sem a presença de penas, e estas podem ser correlacionadas com parâmetros ambientais como a temperatura do ar e a temperatura do globo negro e umidade relativa (NASCIMENTO et al. 2014a).

A sensibilidade às condições ambientais também se altera com o decorrer do ciclo de vida dos frangos de corte. Essas aves atingem a maturidade do sistema termorregulatório aproximadamente dez dias pós-eclosão (MORAES et al., 2003) e, portanto, apresentam uma alta sensibilidade a baixas temperaturas nos primeiros dias de vida. Com o crescimento, a sensibilidade dos frangos passa a ser em relação às altas temperaturas e a capacidade de trocar calor com o ambiente circundante decresce.

3. Objetivos

3.1 Objetivo geral

Baseando-se nestas considerações, o objetivo principal deste trabalho foi propor modelos para o equilíbrio térmico de frangos de corte.

3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram:

- Estudar as variáveis fisiológicas (temperatura retal, temperatura da epiderme, temperatura das penas, temperatura do ar expirado e temperatura da pata) de frangos de corte ao longo do ciclo de criação em diferentes condições ambientais;
- Estudar o fluxo de calor sensível de frangos de corte ao longo do ciclo de criação em diferentes condições ambientais;
- Descrever e validar um modelo para a predição das temperaturas corporais de frangos de corte durante o ciclo de criação;
- Determinar a quantidade necessária de radiação a ser fornecida para pintos de corte para manutenção da temperatura corporal;
- Propor uma metodologia para a mensuração do metabolismo, das variáveis respiratórias e da evaporação de frangos de corte ao longo do ciclo de criação em condições de campo;
- Estudar as variáveis respiratórias (volume respiratório corrente, frequência respiratória, ventilação) de frangos de corte durante todo o ciclo de criação;
- Aplicar as medidas fisiológicas e variáveis respiratórias mensuradas ao longo do ciclo de criação para sustentar um modelo de transferência de calor para frangos de corte.

4. Referências

AERTS, J.M.; BERCKMANS, D. A virtual chicken for climate control design: static and dynamic simulations of heat losses. **Transactions of the ASAE**, v.47, n.5, p.1765-1772, 2004.

ARENS, J.R.; COOPER, S.J. Seasonal and diurnal variation in metabolism and ventilation in house sparrows. **The condor**, v.107, p. 433-444, 2005.

BICEGO, K.C.; BARROS, R.C.H.; BRANCO, L.G.S. Physiology of temperature regulation: Comparative aspects. **Comparative Biochemistry and Physiology**, Part A, 147, p. 616–639, 2007.

BORGES, S.A.; MAIORKA, A.; SILVA, A.V.F. Fisiologia do estresse calórico e a utilização de eletrólitos em frangos de corte. **Ciência Rural**, v.33, n.5, p. 975-981, 2003.

BOUCHILLON, C.W.; REECE, F.N; DEATON, J.W. Mathematical modeling of thermal homeostasis in a chicken. **Transactions of ASAE**, v.13, n.5, p. 648-652, 1970.

BRACKENBURY, J.H.; AVERY, P. Energy consumption and ventilatory mechanisms in the exercising fowl. **Comparative Biochemistry Physiology**, v. 66A, p. p. 439-445, 1980.

BRACKENBURY, J.H.; GLEESON, M.; AVERY, P. Respiration in exercising fowl. I. oxygen consumption, respiratory rate and respired gases. **Journal of Experimental Biology**, v. 93, p. 317-325, 1981a.

BRACKENBURY, J.H.; GLEESON, M.; AVERY, P. Respiration in exercising fowl. II. Respiratory water loss and heat balance. **Journal of Experimental Biology**, v. 93, p. 327-332, 1981b.

BRACKENBURY, J.H.; GLEESON, M.; AVERY, P. Respiration in exercising fowl. III. Ventilation. **Journal of Experimental Biology**, v. 96, p. 315-324, 1982.

BRODY, S. **Bioenergetics and growth**. Reinhold, New York, 1 ed., 1945.

BUCHER, T.L. Oxygen consumption, ventilation and respiratory heat loss in a parrot, *Bolborhynchus lineola*, in relation to ambient temperature. **Journal of Comparative Physiology**, v.142, p. 479-488, 1981.

CENA, K.; MONTEITH, J.L. Transfer processes in animal coats. I. Radiative transfer. **Proceedings of the Royal Society of London**, B 188:377-393, 1975.

CHAPMAN A.J. **Fundamentals of heat transfer**. MacMillan, New York, 1987.

COOPER, K.; PARSONS, D.J.; DEMMERS, T. A thermal balance model for livestock buildings for use in climate change studies. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.69, p. 43-62, 1998.

COSTA, C.C.M. Efeito da Radiação Solar e Temperatura na Emissão de Metano Associado à Produção e Perda de Calor em Bovinos. **Dissertação de Mestrado** – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2013.

DA SILVA, R.G. **Biofísica ambiental – os animais e seu ambiente**. Jaboticabal: Funep, 2008. 386 p.

DA SILVA, R.G. **Introdução à Bioclimatologia Animal**. São Paulo: Nobel, 2000. 286 p.

DA SILVA, R.G. Um modelo para a determinação do equilíbrio térmico de bovinos em ambientes tropicais. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.29, n.4, p.1244-1252, 2000.

DA SILVA, R.G.; LASCALA Jr., N.; LIMA FILHO, A.E.; CATHARIN, M.C. Respiratory heat loss in the sheep: a comprehensive model. **International Journal of Biometeorology**, v. 46, p. 136-140, 2002.

DA SILVA, R. G.; MAIA, A. S. C. Basic Physical Mechanisms. In:_____. (Ed.) 1. **Principles of animal biometeorology**. New York: Springer, 2013. p. 39-74.

DAWSON, W.R.; WHITTOW, G.C. Regulation of body temperature. *In: Avian Physiology* (P. D. Sturkie, ed.), 5th edition, Springer-Verlag, New York, 2000.

DESHAZER, J.A.; HAHN, L.G.; XIN, H. Basic principles of the thermal environment and livestock energetics. In: **Livestock energetics and thermal environmental management**. ASABE, St. Joseph, MI, p.1-22, 2009.

DESHAZER, J.A.; YEN, J.T. Energetics of biological processes. In: **Livestock energetics and thermal environmental management**. ASABE, St. Joseph, MI, p.49-72, 2009.

DOVE, C.J.; RIJKE, A.M.; WANG, X.; ANDREWS, L.S. Infrared analysis of contour feathers: the conservation of body heat radiation in birds. **Journal of Thermal Biology**, 32:1, p. 42-46, 2007.

EDE, D.A. In: Bird Structure. Publ. Hutchison Educational Ltd., London, 120p, 1964.

FÆREVIK, G.; ANDERSEN, I.L.; BOE, K.E. Preferences of sheep for different types of pen flooring. **Applied Animal Behaviour Science**, 90:3-4, p.265-276, 2005.

FERREIRA, M. S.; YANAGIHARA, J.I. A transient three-dimensional heat transfer model of the human body. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 36, 718-724, 2009.

FLEISCH, A. Der Pneumotachograph — ein Apparat zur geschwindigkeitsregistrierung der Atemluft. *Pflügers Arch. ges. Physiol.*, v. 209, p. 713–722, 1925.

GEBREMEDHIN, K.G.; PORTER, W.P.; CRAMER, C.O. Quantitative analysis of the heat exchange through the fur layer of Holstein calves. **Transactions of the ASAE**, 26:188-193, 1983.

GEBREMEDHIN, K.G., NI, H., HILLMAN, P.E. Temperature profile and heat flux through irradiated fur layer. In: INTERNATIONAL LIVESTOCK ENVIRONMENT SYMPOSIUM, 5, 1997, Bloomington, MN. **Proceedings...** Bloomington, v.1, p.226-233, 1997.

GLASS, M.L.; WOOD, S.C.; JOHANSEN, K. The application of pneumotachography on small unrestrained animals. **Comparative biochemistry and physiology part A: Physiology**, 59:4, p. 425-427, 1978.

HAHN, G.L. Shelter engineering for cattle and other domestic animals. **In Progress in Animal Biometeorology**, 1(1), p. 496-503. H.D. Johnson, ed. Amsterdam: Swets & Zenlinger, 1976.

HAYNE, H. ROVEE-COLLIER, C.; GARGANO, D. Ambient Temperature Effects on Energetic Relations in Growing Chicks. **Physiology & Behavior**, V. 37, p. 203-212, 1986.

HOFFMAN, T.C.M.; WALSBERG, G.E.; DENARDO, D.F. Cloacal evaporation: n important and previously undescribed mechanism for avian thermoregulation. **Journal of Experimental Biology**, v.210, p.741-749, 2007.

INCROPERA, F.P.; DeWITT, D.P. Fundamentos de transferência de calor e de massa. John Wiley & Sons, Inc., 6ed., 2008, 697p.

JIANG, M.; GEBREMEDHIN, K.G.; ALBRIGHT, L.D. Simulation of skin temperature and sensible and latent heat losses through fur layers. **Transactions of the ASAE**. Vol. 48(2): 767-775, 2005.

JULIAN, R.J. Lung volume of meat-type chickens. **Avian Diseases**, v.33, p.174–176, 1989.

KETTLEWELL, P.J.; MORAN, P. A study of heat production and heat loss in crated broiler chickens: a mathematical model for a single bird. **British Poultry Science**, 33:2, 239-252, 1992.

KLEIBER, M. **Bioenergética animal**. Zaragoza: Acribia, 1972, 428p.

LACY, M.P.; CZARICK, M. Tunnel-ventilated broiler houses: Broiler performance operating cost. **Journal of Applied Poultry Research**. v.1, p. 104–109, 1992.

LEESON, S.; WALSH, T. Feathering in commercial poultry I. Feather growth and composition. **World's Poultry Science Journal**, v. 60, p. 42-51, 2004a.

LEESON, S.; WALSH, T. Feathering in commercial poultry II. Factors influencing feather growth and feather loss. **World's Poultry Science Journal**, v. 60, p. 52-63, 2004b.

MAIA, A.S.C.; SILVA, R.G.; LOUREIRO, C.M.B. Sensible and latent heat loss from the body surface of Holstein cows in a tropical environment. **International Journal of Biometeorology**, v. 50, p. 17-22, 2005.

MAIA, A.S.C.; NASCIMENTO, S.T.; DA SILVA, R.B.; COSTA, C.C.M.; CARVALHO, M.D. Influence of meteorological variables on methane emission associated to metabolic heat production and latent heat loss in lambs. In: Greenhouse Gases & Animal Agriculture, Dublin, Ireland, 2013.

MAIA, A.S.C.; GEBREMEDHIN, K.G.; NASCIMENTO, S. T.; CARVALHO, M.D.; SIMAO, B.R.; CAMERRO, L.Z.; CHIQUITELLI NETO, M. Development of Facial Masks for Indirect Calorimetric Studies for Livestock. In: 2014 ASABE and CSBE/SCGAB Annual International Meeting, 2014, Montreal.

MALHEIROS, R.D.; MORAES, V.M.B.; BRUNO, L.D.G.; MALHEIROS, E.B.; FURLAN, R.L.; MACARI, M. Environmental temperature and cloacal and surface temperatures of broiler chicks in first week post-hatch. **Journal of Applied Poultry Science**, Stanford, v.9, p. 111-117, 2000.

McARTHUR, A.J. Thermal interaction between animal and microclimate: a comprehensive model. **Journal of Theoretical Biology**, n. 126, p.203–238, 1987.

McARTHUR, A.J.; MONTEITH, J.L. Air movement and heat loss from sheep. **Proceedings of the Royal Society**, v.209, p.209-217, 1980.

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

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.

MIDTGAARD, U. The effect of heat and cold on the density of arteriovenous anastomoses and tissue composition in the avian nasal mucosa. **Journal of Thermal Biology**, v. 14, p. 99–102, 1989.

MILLER, M.R.; HANKINSON, J; BRUSASCO, V., et al. Standardization of spirometry. **European Respiratory Journal**, v. 26, p. 319-338, 2005.

NASCIMENTO S.T., MAIA A.S.C., LEITE L.G. Respiratory flow and metabolism settlement in poultry. In: 19^o International Congress of Biometeorology, Auckland, New Zealand. 2011.

NASCIMENTO, S.T.; SILVA, I.J.O.; MAIA, A.S.C.; CASTRO, A.C.; VIEIRA, F.M.C. Mean surface temperature prediction models for broiler chickens – a study of sensible heat flow. **International Journal of Biometeorology**, 58(2), p. 195-201, 2014a.

NASCIMENTO, S.T.; MAIA, A.S.C.; GEBREMEDHIN, K. G.; CARVALHO, M.D.; LEITE, L.G. A Model of Heat Transfer through Feather Layers of Broiler Chicks An Operation with a Heat Source. In: 2014 ASABE and CSBE/SCGAB Annual International Meeting, 2014, Montreal.

NIENABER, J.A.; DESHAZER, J.A.; XIN, H.; HILLMAN, P.E.; YEN, J.T.; FERRELL, C.F. Measuring energetics of biological processes. In: Livestock energetics and thermal environmental management. ASABE, St. Joseph, MI, p.73-112, 2009.

NIGHTINGALE, T.E. Comparison of cardiopulmonary parameters in awake and anesthetized chickens. **Poultry Science**, v.56, p. 147-153, 1977.

PENNES, H.H. Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm. **Journal of Applied Physiology**, 1: 93–122, 1948.
PIIPER, J.; SCHEID, P. Gas transport efficacy of gills, lungs and skin: theory and experimental data. **Respiratory Physiology**, v. 23, p. 209-221, 1975.

POWELL. F.L. Respiration. In: **Sturkie's Avian Physiology**, 5 ed., G. Casey Whittow (editor). Elsevier, Amsterdam, p. 233-263, 2000.

RANDALL, D.; BURGGREN, W.; FRENCH, K. **Eckert, fisiologia animal: mecanismos e adaptações**. Rio de Janeiro, Guanabara Koogan, 4 ed., 729 p., 2008.

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.

RICHARDS, S.A. The influence of loss of plumage on temperature regulation in laying hens. **Journal of Agricultural Science**, v. 89, p. 393-398, 1977.

SCHMIDT-NIELSEN, K. S. **Fisiologia Animal**. Santos, 5ª ed. Ed. Santos, 2002.

THORNLEY, J.H.M.; FRANCE, J. Mathematical models in agriculture. Quantitative methods for the plant, animal and ecological sciences. 2nd ed. Wallingford, CABI, 928pp, 2007.

TURNPENNY, J.R.; McARHTUR, A.J.; CLARK, J. A.; WATHES, C.M. Thermal balance of livestock, 1. A parsimonious model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.101, p. 15-27, 2000a.

TURNPENNY, J. R.; WATHES, C.M.; CLARK, J.A.; McARHTUR, A.J. Thermal balance of livestock, 2. Application of a parsimonious model. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.101, p. 29-52, 2000b.

WALSBERG, G.E. Heat flow through avian plumages: the relative importance of conduction, convection and radiation. **Journal of Thermal Biology**, v. 13, n.2, p. 89-92, 1988.

WATHES, C.M.; CLARK, J.A. Sensible heat transfer from the fowl: Radiative and convective heat losses from a flock of broiler chickens. **British Poultry Science**, Abingdon, v.22, n.2, p.185–196, 1981.

WEBSTER, M.D.; CAMPBELL, G.S.; KING, J.R. Cutaneous resistance to water-vapor diffusion in pigeons and the role of the plumage. **Physiology Zoology**, v. 58, n.1, p. 58-70, 1985.

WEBSTER, M. D.; KING, J. R. Temperature and humidity dynamics of cutaneous and respiratory evaporation in pigeons, *Columba livia*. **Journal of comparative Physiology B**, v. 157, p. 253–260, 1987.

WHITTOW, G. C. Energy metabolism. *In: Avian Physiology* (P. D. Sturkie, ed.), 4th edition, Springer-Verlag, New York.1986.

WITHERS, P.C. Measurement of $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, and evaporative water loss with a flow-through mask. **Journal of Applied Physiology Respiration Environment Exercise Physiology**, 42:1, p.120-123, 1983.

WOLF, B.O.; WALSBERG, G.E. Respiratory and cutaneous evaporative water loss at high environmental temperatures in a small bird. **The Journal of Experimental Biology**, v. 199, p. 451-457, 1996.

WOLF, B.O.; WALSBERG, G.E. The role of the plumage in heat transfer processes in birds. **Integrative and Comparative Biology**, v. 40, p. 575-584, 2000.

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

XU, F.; LU, T. **Introduction to skin biothermomechanics and thermal pain**, 414 p., Springer, Beijing, 2011.

YAHAV, S.; STRASCHNOW, A.; LUGER, D.; SHINDER, D.; TANNY, J.; COHEN, S. Ventilation, sensible heat loss, broiler energy, and water balance under harsh environmental conditions. **Poultry Science**, Champaign, v.83, p.253-258, 2004.

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

YALÇIN, S.; OZKAN, S.; TURKMUT, L.; SIEGEL, P. B. Responses to heat stress in commercial and local broiler stocks. I. Performance traits. **British Poultry Science**, v. 42, p. 149–152, 2001.

YANAGI, T.; Jr., XIN, H.; GATES, R.S. Modeling partial surface evaporative cooling of chickens. In: ASAE Annual International Meeting, paper no. 01-3011, St Joseph: ASAE, 2001.

CAPÍTULO 2 – ESTUDO DAS TEMPERATURAS CORPORAIS E PERDA DE CALOR SENSÍVEL DE FRANGOS DE CORTE NO CICLO DE CRIAÇÃO

RESUMO Os objetivos deste trabalho foram: estudar as temperaturas corporais (retal, da epiderme, das penas, da pata e do ar expirado) de frangos de corte ao longo do ciclo de criação em diferentes épocas do ano e em condições ambientais não controladas; estudar a transferência de calor sensível na porção do corpo coberta por penas e nas patas de frangos de corte ao longo do ciclo de criação em diferentes condições ambientais; estimar a condutividade térmica e a resistência da camada de penas à transferência de calor de frangos de corte ao longo do ciclo de criação em diferentes condições ambientais. Vinte e quatro frangos de corte foram avaliados em quatro experimentos durante os meses de Julho e Dezembro. Foi utilizado para cada mês de coleta um quadrado latino 6 x 6 replicado (seis aves em seis dias de observação em seis diferentes horários), com cada ave sendo avaliada por duas horas por dia, a cada 7 dias, a partir do 8º dia de vida. As variáveis fisiológicas foram mensuradas continuamente utilizando o Sistema de Medidas Fisiológicas desenvolvido pelo Laboratório de Bioclimatologia da FCAV/ UNESP. Todas as variáveis fisiológicas estudadas diferiram com relação o mês de coleta ($P < 0,05$) sendo maior durante o mês de Dezembro em relação a Julho, e de acordo com o peso vivo dos frangos ($P < 0,05$), porém nenhuma diferiu significativamente entre os horários de coleta ($P > 0,05$). Em relação a transferência de calor sensível, os frangos de corte diminuíram as perdas superficiais com o aumento do peso vivo, e essa diminuição foi mais acentuada durante o mês de Dezembro. Proporcionalmente, os frangos de corte aumentam as perdas através das patas em comparação com o corpo coberto por penas. A diminuição do fluxo de calor sensível no corpo coberto por penas se deve ao aumento da resistência térmica da capa de cobertura à transferência de calor, que mesmo com o aumento da condutividade térmica, se torna menor pois a espessura dessa capa aumenta com o aumento do peso vivo dos frangos, sendo mais acentuada durante o mês de Dezembro. Os resultados são promissores quanto à utilização da metodologia para mensuração de dados fisiológicos de frangos de corte em condições não controladas de ambiente e

passíveis de serem utilizados em modelos matemáticos de transferência de calor entre os animais e o meio.

Palavras-chave: ambiente, avicultura, fisiologia, transferência de calor

CHAPTER 2 – STUDY OF BODY TEMPERATURES AND SENSIBLE HEAT LOSS OF BROILER CHICKENS IN THE REARING PERIOD

ABSTRACT The aims of this work were: to study body temperatures of broiler chickens in the rearing period (rectal, skin, feather, leg and exhaled air) in different seasons and under non controlled conditions; to study the sensible heat transfer in the body covered by the feathers and in the legs of broiler chickens in the rearing period in different environmental conditions; to estimate the thermal conductivity and the resistance of the feathers to the heat transfer of broiler chickens in the rearing period in different environmental conditions. Twenty-four broiler chickens were evaluated in four experiments in July and December. A replicated 6 x 6 latin square was used in each sampling month (six broilers in six evaluation days in six different schedules). Each broiler was measured for two hours per day, each 7 days, from the 8th day of life. The physiological variables were continuously measured by the System of Physiological Measurements developed by the Bioclimatology Laboratory from the FCAV/ UNESP. All the physiological variables of the study differed between the months ($P < 0.05$), and they were higher during December in comparison with July; and differed between the live weight of broilers ($P < 0.05$), and any variable differed significantly between the schedules ($P > 0.05$). Regarding the sensible heat transfer, broilers decreased the surface losses with the increase of live weight, and this decrease was higher during December. Proportionally, broilers chickens increase the heat losses through the legs in comparison with the body covered by feathers. The decrease of sensible heat flow in the body covered by feathers is due to an increase of the thermal resistance of the feather layer to the heat transfer, which even with a higher thermal conductivity, becomes lower because the thickness of the layer is higher with a higher live weight, and it is more accentuated in December. The results are promissories about the methodology to the measurement of physiological data of broiler chickens under no controlled environmental conditions and can be used in mathematical models of heat transfer between animals and environment.

Keywords: environment, poultry, physiology, heat transfer

1. Introdução

Os seres vivos juntamente com o ambiente em que se encontram formam sistemas complexos, e os animais sempre apresentam reações frente às constantes alterações ambientais (DA SILVA & MAIA, 2013). Os frangos de corte, como os demais animais homeotérmicos, diminuem ou aumentam a produção de calor com o objetivo de manter a temperatura corporal estável (BRODY, 1945).

Portanto, o deslocamento de energia necessário para a manutenção da temperatura corporal significa uma menor energia disponível para o crescimento (HAYNE et al., 1986). Além disso, frangos de corte em condições de estresse térmico apresentam uma diminuição da taxa de crescimento e consequentemente um pior rendimento de carne e perdas econômicas significativas (LACY & CZARICK, 1992; YALÇIN, 2001).

Baixas temperaturas acarretam custos metabólicos para as aves no período pós-eclosão e nos primeiros dias de vida, apresentando menor temperatura superficial e cloacal quando mantidos em baixas temperaturas (MALHEIROS et al., 2000). Quando em altas temperaturas, os frangos de corte ativam a evaporação respiratória (ofegação) como o principal mecanismo para perda de calor (RICHARDS, 1971). Porém, como a sua ativação é associada ao conteúdo de água do corpo, a perda por essa via será diminuída se as aves estiverem em algum estágio de desidratação. Somadas a isso, as perdas evaporativas pela respiração diminuem pelo aumento da temperatura do ar expirado das aves.

Torna-se fundamental o estudo e desenvolvimento de metodologias não invasivas que mensurem as variáveis fisiológicas de frangos de corte durante o ciclo de vida. Esses estudos poderiam contribuir para o desenvolvimento e melhoria dos sistemas de climatização das instalações, maximizando o desempenho das aves, e principalmente, levando-se em conta os aspectos fisiológicos, além das variáveis ambientais.

2. Objetivos

Os objetivos deste trabalho foram:

- Estudar as temperaturas corporais (retal, da epiderme, das penas, da pata e do ar expirado) de frangos de corte ao longo do ciclo de criação em diferentes condições ambientais;
- Estudar a transferência de calor sensível na porção do corpo coberta por penas e nas patas de frangos de corte ao longo do ciclo de criação em diferentes condições ambientais;
- Estimar a condutividade térmica e a resistência da camada de penas à transferência de calor de frangos de corte ao longo do ciclo de criação em diferentes condições ambientais.

3. Material e métodos

O esquema geral adotado na pesquisa está descrito na Figura 1. Foram mensurados 24 frangos de corte da linhagem Cobb, em seis diferentes dias do ciclo de criação, em seis horários ao longo do dia. Um grupo de 12 aves foi estudado entre os meses de Junho e Julho de 2012 e outro grupo de 12 aves foi avaliado entre os meses de Novembro e Dezembro de 2012. Foram mensuradas as seguintes variáveis fisiológicas: temperatura retal, temperatura da epiderme, temperatura da pata, temperatura superficial das penas e temperatura do ar expirado.

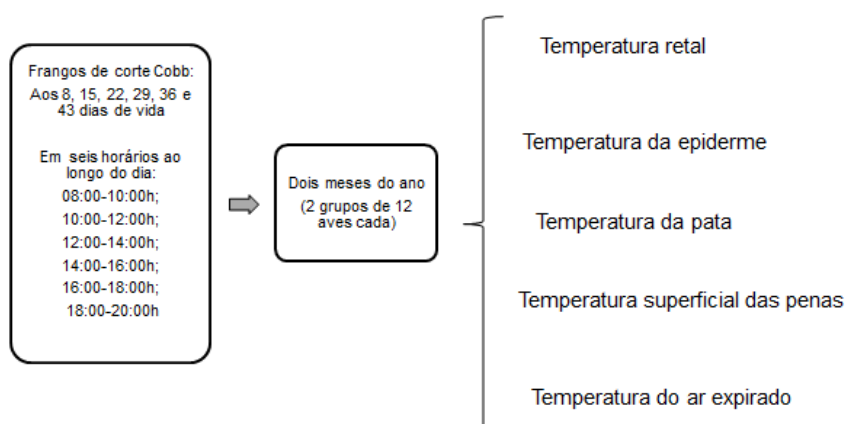


Figura 1 – Esquema geral adotado na pesquisa

3.1 Descrição geral do experimento

A pesquisa foi realizada na câmara climática nas dependências do Laboratório de Bioclimatologia da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV) da UNESP, câmpus de Jaboticabal, SP (21°15'17" de Latitude Sul, 48°18'58" de Longitude Oeste e 595 m de altitude). A câmara possui 36m² de área (6x6m) e 3 m de pé direito. Suas paredes são revestidas por um material isolante, permitindo uma menor variação da temperatura do ar ao longo dos dias.

Foram realizados dois experimentos: (1) entre os meses de Junho e Julho de 2012, o qual denominamos para facilitar a discussão dos dados como "Julho" e (2) entre os meses de Novembro e Dezembro de 2012, o qual denominamos como "Dezembro". Para analisarmos os frangos expostos às condições climáticas características dessas épocas do ano, nenhum controle ambiental foi realizado dentro da câmara climática, apenas para proteger os animais da exposição à radiação solar e simular as condições de criação observada nos aviários.

Um boxe suspenso, com dimensões de 1,5 m de comprimento e 0,98m de largura foi instalado no centro da câmara para acomodar as aves durante o período experimental. O boxe era coberto com cama de maravalha, e bebedouros e comedouros foram instalados, a fim de reproduzir o ambiente de criação dos frangos adotados nas granjas comerciais, como demonstrado na Figura 2.



Figura 2- Boxe experimental instalado na câmara climática para criação das aves durante as coletas.

3.2 Aves

Foram utilizados 24 frangos de corte da linhagem Cobb, obtidos a partir de um incubatório comercial, sendo todos machos e homogêneos, escolhidos de forma aleatória e identificados através de anilhas numeradas (Figura 3). As aves eram pesadas diariamente, utilizando-se uma balança de precisão (Toledo®, modelo 9094C/4).

A dieta fornecida era uma ração comercial padrão para frangos de corte, e o arraçoamento foi dividido em duas fases ao longo do ciclo de criação: crescimento, do primeiro ao 21º dia de vida; engorda, do 22º até o fim do período experimental.



Figura 3 – Anilhas utilizadas para a identificação dos frangos de corte da linhagem Cobb durante a pesquisa

Foi desenvolvida uma estrutura de contenção para pintos e aves adultas (Figura 4). A estrutura foi fundamental para manter os sensores conectados às aves, causando o mínimo de perturbação e manipulação das mesmas durante as coletas.



(a)

(b)

Figura 4 – Estruturas para contenção das aves durante o período de avaliação e coleta de dados

3.3 Delineamento Experimental

Foi adotado um delineamento experimental em quadrado latino 6 x 6, composto por seis aves em seis dias de coleta durante seis diferentes horários. Cada quadrado latino foi replicado nos meses de junho/ julho e novembro/ dezembro, totalizando, portanto, 12 aves para cada condição ambiental e 24 animais

ao longo do experimento. Os frangos de corte da linhagem Cobb foram divididos em dois lotes de seis aves dentro de cada uma das condições ambientais.

Os frangos foram avaliados no 8º, 15º, 22º, 29º, 36º e 43º dias de vida, o que correspondeu aos dias 18 e 19 de junho, 25 e 26 de junho, 2 e 3 de julho, 9 e 10 de julho, 16 e 17 de julho e 23 e 24 de julho de 2012 para os dois primeiros experimentos; e aos dias 3 e 4 de novembro, 10 e 11 de novembro, 17 e 18 de novembro, 24 e 25 de novembro, 1 e 2 de dezembro e 8 e 9 de dezembro de 2012 para os dois últimos experimentos.

Os horários de coleta foram distribuídos em seis intervalos: das 8:00h às 10:00h; das 10:00h às 12:00h; das 12:00h às 14:00h; das 14:00h às 16:00h; das 16:00h às 18:00h; das 18:00h às 20:00h. Cada ave era, portanto, avaliada por um período de duas horas, totalizando doze horas de coleta por cada dia de observação. O esquema experimental adotado na pesquisa entre os meses de junho e julho está descrito na Tabela 1, enquanto que o esquema adotado entre os meses de novembro e dezembro está descrito na Tabela 2.

Tabela 1 – Delineamento experimental adotado na pesquisa entre os meses de junho e julho, compreendido por seis frangos de corte analisados em seis diferentes dias do ciclo de criação em seis diferentes horários

	08:00h	10:00h	12:00h	14:00h	16:00h	18:00h
8º dia	Ave 1	Ave 2	Ave 3	Ave 4	Ave 5	Ave 6
15º dia	Ave 2	Ave 3	Ave 4	Ave 5	Ave 6	Ave 1
22º dia	Ave 3	Ave 4	Ave 5	Ave 6	Ave 1	Ave 2
29º dia	Ave 5	Ave 6	Ave 1	Ave 2	Ave 3	Ave 4
36º dia	Ave 4	Ave 5	Ave 6	Ave 1	Ave 2	Ave 3
43º dia	Ave 6	Ave 1	Ave 2	Ave 3	Ave 4	Ave 5

Tabela 2 – Delineamento experimental adotado na pesquisa entre os meses de novembro e dezembro, compreendido por seis frangos de corte analisados em seis diferentes dias do ciclo de criação em seis diferentes horários

	08:00h	10:00h	12:00h	14:00h	16:00h	18:00h
8º dia	Ave 1	Ave 6	Ave 4	Ave 5	Ave 3	Ave 2
15º dia	Ave 2	Ave 1	Ave 6	Ave 4	Ave 5	Ave 3
22º dia	Ave 3	Ave 2	Ave 1	Ave 6	Ave 4	Ave 5
29º dia	Ave 5	Ave 3	Ave 2	Ave 1	Ave 6	Ave 4
36º dia	Ave 4	Ave 5	Ave 3	Ave 2	Ave 1	Ave 6
43º dia	Ave 6	Ave 4	Ave 5	Ave 3	Ave 2	Ave 1

3.4 Variáveis meteorológicas

Na câmara, as variáveis meteorológicas: temperatura do ar (Tar, °C), umidade relativa (UR, %) e temperatura do globo negro (Tg, °C) foram mensuradas a cada 20 minutos (Figura 5). A altura do globo negro era ajustada conforme o crescimento dos frangos. Uma lâmpada de 100 W foi utilizada nos primeiros dias de vida como fonte adicional de calor aos pintos.



Figura 5 – Termômetro para mensuração da temperatura do ar e umidade relativa, e globo negro com termopar inserido para mensuração da temperatura

Para os meses de Junho e Julho a temperatura e a umidade relativa do ar, foram obtidas por meio de um termohigrômetro digital (modelo 7666, Incoterm®). A temperatura do globo negro foi mensurada por um termopar inserido dentro do globo conectado ao termômetro de infravermelho (RAYTEC RANGER ST).

Para os meses de Novembro e Dezembro a temperatura e a umidade relativa do ar foram mensuradas por meio de um *datalogger* (modelo U12-013, HOBO®). A temperatura do globo negro foi mensurada por um termopar inserido dentro do globo conectado a um dos canais analógicos do *datalogger*.

3.5 Medidas das Temperaturas Corporais

As temperaturas corporais das aves foram mensuradas continuamente durante todo o período de coleta (aproximadamente duas horas por ave em cada dia de coleta), sendo monitoradas: a temperatura da epiderme, com o sensor inserido abaixo da asa (Tepi, °C); a temperatura da pata (Tpata, °C); a temperatura retal (Tretal, °C); a temperatura do ar expirado (Texp, °C), com o sensor conectado dentro da máscara respiratória. A temperatura na interface da camada de penas foi medida a cada 20 minutos com um termômetro de infravermelho (Fluke 568).

Para a determinação das temperaturas corporais Tepi, Tpata, Tretal e Texp foram utilizados os seguintes equipamentos:

1. Máscara facial: Foi desenvolvida no Laboratório de Bioclimatologia, isolando o bico das aves, e permitindo a inserção do sensor de temperatura nasal e a conexão com o espirômetro. A máscara desenvolvida era feita de látex, por ser um material leve, e que acarretasse na menor perturbação possível aos animais;
2. Um sensor de temperatura nasal (modelo MLT415/AL, ADInstruments);
3. Um sensor de temperatura retal (Modelo MLT1404, ADInstruments);
4. Dois sensores de temperaturas da superfície corporal (Modelo MLT22/A, ADInstruments);
5. Sistema de aquisição de dados (Modelo PowerLab 16/30 eLabChart Pro, ADInstruments);
6. Terminal para termistores (Modelo ThermistorPod ML309, ADInstruments);
7. Computador.

3.6 Transferência de Calor Sensível

A importância de avaliarmos a temperatura superficial (das penas) dos animais é devido à obtenção do fluxo de calor sensível entre os frangos e o meio

circundante. Porém, para aves é importante considerarmos a importância e a contribuição das diferentes regiões corporais para a transferência de calor sensível (YAHAV et al., 2009); essa distinção é necessária desde os primeiros dias de vida (NASCIMENTO et al., 2014). Podemos considerar nos frangos de corte a presença de regiões corporais conservativas de calor (regiões cobertas por penas) e regiões não conservativas (regiões desprovidas de penas, como patas, crista e barbela), conforme classificado por Shinder et al. (2007).

Portanto, podemos obter o fluxo sensível de frangos de corte distinguindo-se regiões cobertas por penas e outras desprovidas de cobertura, a partir do proposto por Nascimento et al. (2014) e estudar o impacto de uma maior ou menor temperatura superficial no balanço de calor sensível entre os meses da pesquisa e com as classes de peso corporal, isto é, com o ganho de peso pelas aves. Estudamos o fluxo de calor sensível para duas diferentes regiões corporais dos frangos de corte: o corpo, considerando a cobertura de penas; e o fluxo de calor sensível para as patas. Para isso, além das medidas das temperaturas corporais, realizamos algumas medidas morfométricas em todos os animais durante os dias de coleta, com o auxílio de um paquímetro digital (Mitutoyo®): diâmetro da pata (mm); comprimento da pata (mm); espessura da camada de penas (mm).

A transferência de calor foi calculada para os dois meses (Julho e Dezembro), para cada uma das seis classes de peso.

3.6.1 Transferência de Calor Sensível no Corpo

Calculamos o fluxo sensível para o corpo das aves, considerando as mesmas como esferas e a transferência de calor ocorrendo por radiação de ondas longas e por convecção pela eq. (1):

$$G_s = \frac{\rho \cdot c_p}{r_o} (T_{sup} - T_o) \quad (1)$$

em que: G_s é a transferência de calor sensível entre os frangos e o ambiente ($W \cdot m^{-2}$), ρ é a densidade do ar ($g \cdot m^{-3}$), c_p é o calor específico do ar ($J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$), r_o é a resistência da camada limite à transferência de calor sensível ($m \cdot s^{-1}$), T_{sup} é a

temperature superficial das penas dos animais (K) e T_o é a temperature operativa (K) (uma combinação entre a temperatura do ar e a temperatura radiante média).

A resistência da camada limite ao fluxo sensível foi calculada considerando a ocorrência dos fluxos por radiação de ondas longas e convecção paralelamente, conforme descrito pela eq. 2:

$$r_o = \frac{r_h r_l}{r_h + r_l} \quad (2)$$

em que: r_h é a resistência da camada limite a transferência de calor por convecção ($s\ m^{-1}$) e r_l é a resistência à camada limite ao fluxo por radiação de ondas longas ($s\ m^{-1}$). Essas resistências foram calculadas pelas eq. 3 e 4:

$$r_h = \frac{\rho\ c_p d_b}{k\ Nu} \quad (3)$$

$$r_l = \frac{\rho\ c_p}{\varepsilon_s \sigma (T_{sup} + \overline{T_R}) (T_{sup}^2 + \overline{T_R}^2)} \quad (4)$$

em que: d_b é o diâmetro médio do corpo dos frangos (m), calculado pela equação proposta por Mitchell (1930), k é a condutividade térmica do ar ($W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$), Nu é o número adimensional de Nusselt, ε_s é a emissividade de tecidos biológicos (STEKETEE, 1973), σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67051 \times 10^{-8}$, $W\ m^{-2}\ K^{-4}$) e $\overline{T_R}$ é a temperatura radiante média (K).

A temperatura operativa (T_o , K) foi calculada pela eq. 5:

$$T_o = \frac{r_h \overline{T_R} + r_l T_{ar}}{r_l + r_h} \quad (5)$$

em que T_{ar} é a temperatura do ar (K).

Os números adimensionais para a transferência de calor por convecção no corpo das aves foram calculados considerando as aves com a forma geométrica de esfera (Tabela 3).

Tabela 3. Números adimensionais para o cálculo do fluxo de calor sensível por convecção para esferas.

Número	Equação
Nusselt (Nu) – convecção natural	$2 + \frac{\left\{0.589 (Gr Pr)^{\frac{1}{4}}\right\}}{\left\{1 + \left(\frac{0.469}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right\}^{\frac{4}{9}}}$
Nusselt (Nu) – convecção forçada	$2 + \left\{0.4 \left(Re^{\frac{1}{2}}\right) + \left(0.06 Re^{\frac{2}{3}}\right)\right\} (Pr^{0.4})$
Grashof (Gr)	$\frac{g d_b^3 (T_{sup} - T_{ar})}{\nu^2 T_{ar}}$
Reynolds (Re)	$V d_b \nu^{-1}$
Prandtl (Pr)	$\rho c_p \nu k^{-1}$

em que ν é a viscosidade cinemática do ar ($m^2 s^{-1}$), d_b é o diâmetro do corpo (m), V é a velocidade do vento ($m s^{-1}$) e g é a aceleração da gravidade ($m s^{-2}$).

Todos os parâmetros foram calculados à temperatura do ar (T_{ar}).

3.6.2 Transferência de Calor Sensível nas Patas

A transferência de calor nas patas dos frangos de corte foi estimada considerando-as como superfícies estendidas, isto é, envolvendo a transferência de calor por condução no interior de um sólido e a transferência de calor por convecção e radiação nas suas fronteiras. Calculamos a transferência de calor considerando as patas como aletas piniformes, com uma área de seção transversal.

As nossas suposições para a determinação do modelo foram:

- a transferência de calor ocorre de maneira unidimensional;
- regime estacionário;
- a condutividade térmica das patas é considerada constante, $0,40 W m^{-1} K^{-1}$;
- não há geração de calor no interior das patas;
- a taxa na qual a energia passa para o fluido por convecção e radiação de ondas longas em qualquer ponto na superfície das patas da ave será igualada a taxa na qual a energia atinge aquele ponto devido à condução;

- a temperatura é uniforme ao longo da espessura dos membros;
- os coeficientes de transferência de calor por convecção (h_c , $W m^{-2} K^{-1}$) e radiação (h_r , $W m^{-2} K^{-1}$) são uniformes ao longo da superfície.

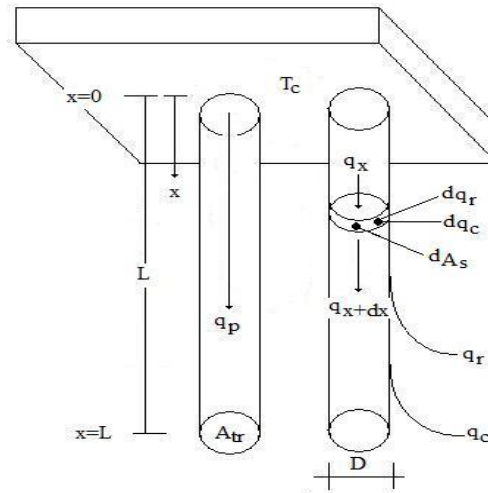


Figura 6 - Balanço de energia em uma superfície estendida, considerando as patas das aves aletas piniformes de seção transversal

Aplicando a exigência de conservação de energia no elemento diferencial (Figura 6), obtemos:

$$q_x = q_{x+dx} + dq_c + dq_r \quad (6)$$

Expandindo q_{x+dx} em uma série de Taylor teremos:

$$q_x = q_x + \frac{dq_x}{dx} dx + dq_c + dq_r$$

$$-kA_{tr} \frac{dT}{dx} = -kA_{tr} \frac{dT}{dx} - k \frac{d}{dx} \left(A_{tr} \frac{dT}{dx} \right) dx + h_c dA_s (T_p - T_\infty) + h_r dA_s (T_p - \overline{T_R})$$

em que: T_{pata} é a temperatura da pata ($^{\circ}C$); T_∞ é a temperatura da camada limite ($^{\circ}C$); $\overline{T_R}$ é a temperatura radiante média ($^{\circ}C$).

Dividindo por k , dx e A_{tr} e multiplicando por -1 , temos:

$$\frac{d}{dx} \left(A_{tr} \frac{dT}{dx} \right) - \frac{h_c}{k} \frac{dA_s}{dx} (T_{pata} - T_\infty) - \frac{h_r}{k} \frac{dA_s}{dx} (T_{pata} - \overline{T_R}) = 0 \quad (7)$$

em que: A_{tr} é a área da seção transversal, considerada constante, ou seja, que o raio da pata não varia com seu comprimento (x , m); sabendo que A_s (m^2) é a área da

superfície que é dada pelo produto do perímetro pelo comprimento ($A_s = Px$), consequentemente $dA_{tr}/dx = 0$ (a variação da área da seção transversal não varia com x) e $dA_s/dx = P$ (a variação da área de superfície da pata varia com a variação do perímetro da mesma), assim a equação 7 será:

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{h_c}{k} \frac{P}{A_{tr}} (T_p - T_\infty) - \frac{h_r}{k} \frac{P}{A_{tr}} (T_p - T_{viz}) = 0 \quad (8)$$

O perímetro da pata (m) é calculado por: πD_p , onde D_p é o diâmetro da pata (m). A área da seção transversal da aleta (m^2) é dada por: $\pi \left(\frac{D_p}{2}\right)^2$. Os coeficientes de transferência de calor por convecção e radiação de ondas longas, respectivamente h_c e h_r , são calculados por:

$$h_c = \frac{kNu_p}{C_p} \quad (9)$$

$$h_r = \varepsilon\sigma(T_{pata} + \overline{T_R})(T_{pata}^2 + \overline{T_R}^2) \quad (10)$$

em que: Nu_p é o número adimensional de Nusselt da pata; C_p é o comprimento da pata (m).

Para simplificar a forma dessa equação, transformamos a variável dependente definindo um excesso de temperatura θ :

$$\theta = T(x) - T_\infty$$

como T_∞ é uma constante, logo: $\frac{d\theta}{dx} = \frac{dT}{dx}$.

Consideramos neste caso $T_\infty = \overline{T_R} = T_{ar}$, portanto podemos definir um coeficiente de transferência de calor, h_{c-r} , que combina os coeficientes por convecção e radiação (eq. 9 e 10). Assim:

$$\begin{aligned} \frac{d^2T}{dx^2} - \frac{h_{c-r}}{k} \frac{P}{A_{tr}} (T_p - T_\infty) &= 0 \\ \frac{d^2T}{dx^2} - m^2\theta &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

em que: $m^2 = (h_{c-r}P/kA_{tr})$. A equação 11 é uma equação diferencial ordinária (EDO) de segunda ordem, linear e homogênea com coeficientes constantes. Portanto a solução geral da EDO da equação 11 é definida por:

$$y = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx} \quad (12)$$

Para determinar as constantes C_1 e C_2 da equação 12 e encontrar uma solução particular as condições de contorno apropriadas será, em termos de excesso de temperatura (θ):

[1] consideramos que no início da pata a sua temperatura é igual a sua temperatura interna, no caso, a temperatura retal:

$$\theta(x=0) = \theta_b = T_c - T_\infty \Rightarrow \theta_b = C_1 e^{m0} + C_2 e^{-m0} \Rightarrow \theta_b = C_1 + C_2$$

[2] consideramos que no final do comprimento a sua temperatura é igual a temperatura da pata:

$$\theta(x=L) = \theta_L = T_L - T_\infty \Rightarrow \theta_L = C_1 e^{mL} + C_2 e^{-mL}$$

Podemos encontrar o valor para C_1 e C_2 adotando-se um sistema matricial:

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ e^{mL} & e^{-mL} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \theta_b \\ \theta_L \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = (e^{-mL} - e^{mL})^{-1} \begin{bmatrix} e^{-mL} & -1 \\ -e^{mL} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_b \\ \theta_L \end{bmatrix}$$

Assim:

$$C_1 = \frac{\theta_b e^{-mL} - \theta_L}{e^{-mL} - e^{mL}} \quad e \quad C_2 = \frac{-\theta_b e^{mL} + \theta_L}{e^{-mL} - e^{mL}}$$

Substituindo dentro da equação 12 temos uma solução particular dessa equação que pode ser usada para estimar a distribuição de temperaturas nos membros inferiores do animal:

$$\theta(x) = \frac{(\theta_b e^{-mL} - \theta_L) e^{xm} + (\theta_L + \theta_b e^{mL}) e^{-xm}}{e^{-mL} - e^{mL}}$$

Após algumas manipulações:

$$\theta(x) = \frac{-\theta_b(e^{m(L-x)} - e^{-m(L-x)}) - \theta_L(e^{xm} - e^{-xm})}{-(e^{mL} - e^{-mL})} \quad (13)$$

Sabendo que $\sinh x = (e^x - e^{-x})/2$, podemos exprimir a equação 6 em termos do seno hiperbólico:

$$\theta(x) = \frac{\theta_b \sinh m(L-x) + \theta_L \sinh mx}{\sinh mL} \Rightarrow \theta(x) = \theta_b \frac{(\theta_L/\theta_b) \sinh mx + \sinh m(L-x)}{\sinh mL}$$

A taxa na qual o calor deixa a pata do animal para o ambiente pode ser avaliada aplicando a Lei de Fourier em $x=0$, assim:

$$q_p|_{x=0} = -k_p A_p \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = -k_p A_p \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=0}$$

$$q_p|_{x=0} = -k_p A_p \theta_b \frac{d}{dx} \left[\frac{(\theta_L/\theta_b) \sinh mx + \sinh m(L-x)}{\sinh mL} \right]$$

Derivando com respeito a x , temos:

$$q_p|_{x=0} = -k_p A_p m \theta_b \left[\frac{(\theta_L/\theta_b) \cosh mx + \cosh m(L-x)}{\sinh mL} \right]$$

Substituindo $x=0$, a equação da taxa (W) será:

$$q_p = -k_p A_p m \theta_b \left[\frac{(\theta_L/\theta_b) + \cosh mL - 1}{\sinh mL} \right] \quad (14)$$

Enquanto o fluxo de calor ($W \text{ m}^{-2}$) deixando a pata do animal será:

$$q''_p = -k_p m \theta_b \left[\frac{(\theta_L/\theta_b) + \cosh mL - 1}{\sinh mL} \right] \quad (15)$$

Os números adimensionais para o cálculo do coeficiente de convecção nas patas são calculados considerando-as com a forma geométrica de cilindros verticais (Tabela 4).

Tabela 4. Números adimensionais para o cálculo do fluxo de calor sensível por convecção para cilindros verticais.

Número	Equação
Nusselt (Nu) – convecção natural ($Gr \leq 10^{10}$)	$0,65 Gr^{\frac{1}{4}} Pr^{\frac{1}{3}}$
Nusselt (Nu) – convecção natural ($Gr > 10^{10}$)	$0,123 Gr^{\frac{1}{3}} Pr^{\frac{1}{3}}$
Nusselt (Nu) – convecção forçada	$0,0296 Re^{\frac{4}{5}} Pr^{\frac{1}{3}}$
Grashof (Gr)	$\frac{g d_p^3 (T_{pata} - T_{ar})}{\nu^2 T_{ar}}$
Reynolds (Re)	$V d_b \nu^{-1}$
Prandtl (Pr)	$\rho c_p \nu k^{-1}$

em que ν é a viscosidade cinemática do ar ($m^2 s^{-1}$), d_p é o diâmetro da pata (m), V é a velocidade do vento ($m s^{-1}$) e g é a aceleração da gravidade ($m s^{-2}$).

Todos os parâmetros foram calculados à temperatura do ar (T_{ar}).

3.7 Condutividade térmica da capa de penas

Para a determinação da condutividade térmica da cobertura de penas (k_{cpenas} , $W m^{-1} K^{-1}$), consideramos as seguintes suposições:

- modelamos o corpo das aves como uma esfera;
- a transferência de calor ocorrendo de forma unidimensional, na direção radial;
- não há geração de energia dentro da capa;
- fluxo de calor por condução dentro da capa;
- regime estacionário.

Ao modelarmos as aves como esferas, consideramos a presença de dois raios no corpo dos animais: um considerando desde a porção central do corpo até a pele (r_1); outro considerando desde a porção central do corpo até a cobertura de penas (r_2). A diferença entre r_1 e r_2 é a espessura da camada de penas, mensurada ao longo dos dias de coleta (Figura 7). Adicionalmente a isso, mensuramos as temperaturas da epiderme e da camada de penas.

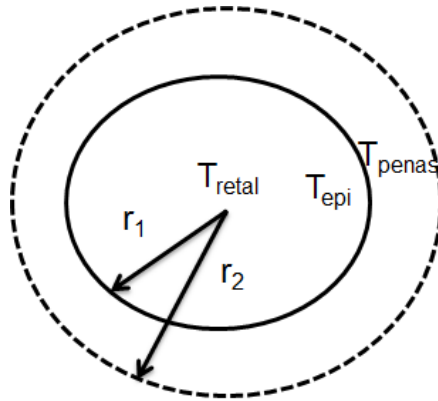


Figura 7 – Modelo esférico para a determinação da condutividade térmica da capa de cobertura em frangos de corte

A equação geral que descreve a transferência de calor por condução sem geração de calor de forma unidimensional para esferas é descrito pela equação 14, uma EDO linear e homogênea:

$$\frac{dT}{dr} \left(r^2 \frac{dT}{dr} \right) = 0$$

A solução geral da EDO da equação 14 nos fornece a distribuição de temperatura na direção radial, e é definida por:

$$T(r) = -\frac{c_1}{r} + c_2 \quad (16)$$

Para determinar as constantes C_1 e C_2 da equação 16 e encontrar uma solução particular, determinamos as seguintes condições de contorno:

[1] consideramos que a temperatura em r_1 é igual à temperatura da epiderme:

$$T(r_1) = T_{\text{epi}} = -\frac{c_1}{r} + c_2$$

[2] consideramos que a temperatura em r_2 é igual à temperatura da camada de penas:

$$T(r_2) = T_{\text{penas}} = -\frac{c_1}{r} + c_2$$

Podemos encontrar o valor para C_1 e C_2 adotando-se um sistema matricial:

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{r_1} & 1 \\ -\frac{1}{r_2} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} T_{\text{epi}} \\ T_{\text{penas}} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right)^{-1} \begin{bmatrix} \frac{1}{r_2} & -1 \\ \frac{1}{r_1} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{\text{epi}} \\ T_{\text{penas}} \end{bmatrix}$$

Assim:

$$C_1 = \frac{T_{\text{epi}} - T_{\text{penas}}}{\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}} \text{ e } C_2 = \frac{r_1 T_{\text{epi}} - r_2 T_{\text{penas}}}{r_1 - r_2}$$

Substituindo dentro da equação 16 temos uma solução particular dessa equação que pode ser usada para estimar a distribuição de temperatura na camada de penas das aves:

$$T(r) = -\frac{r_2 r_1 (T_{\text{epi}} - T_{\text{penas}})}{r(r_1 - r_2)} + \frac{r_1 T_{\text{epi}} - r_2 T_{\text{penas}}}{r_1 - r_2} \quad (17)$$

O fluxo de calor por condução (W m^{-2}) quando $r=r_2$ pode ser dado por:

$$q''|_{r=r_2} = -k_{\text{cpenas}} \frac{dT}{dr} = \frac{d}{dr} \left[-\frac{r_2 r_1 (T_{\text{epi}} - T_{\text{penas}})}{r(r_1 - r_2)} + \frac{r_1 T_{\text{epi}} - r_2 T_{\text{penas}}}{r_1 - r_2} \right]$$

$$q''_{\text{penas}} = \frac{k_{\text{cpenas}} r_1 (T_{\text{epi}} - T_{\text{penas}})}{r_2 (r_2 - r_1)} \quad (18)$$

O fluxo de calor por condução que ocorre dentro da camada de penas é igual ao fluxo de calor sensível na interface entre as penas e a camada limite, por se tratar de um regime estacionário. Baseado nisso, temos:

$$q''|_{r=r_2} = q''_{\text{c-r}}$$

Portanto, a condutividade térmica da camada de penas dos frangos de corte (k_{cpenas} , $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) pode ser estimada igualando-se o fluxo na camada de penas (eq. (18)) com o fluxo que ocorre na interface entre as penas e a camada limite (eq. (1)), isto é, com o fluxo sensível por convecção e radiação de ondas longas. Portanto:

$$k_{cpenas} = \frac{(T_{penas} - T_o)r_2(r_2 - r_1)}{r_2r_1(T_{epi} - T_{penas})} \quad (19)$$

3.8 Resistência da capa de penas à transferência de calor

A resistência da camada de penas (r_{cpenas} , $s\ m^{-1}$) à transferência de calor pode ser calculada pela relação entre sua espessura e a condutividade térmica, portanto calculamos o valor da mesma para os dois meses da pesquisa, para cada uma das classes de peso dos frangos de corte:

$$r_{cpenas} = \frac{\rho c_p E}{k_{cpenas}} \quad (20)$$

em que: E é a espessura da camada de penas, m.

3.9 Análise Estatística

A análise de variância foi baseada no método dos quadrados mínimos (Harvey, 1960) utilizando o software estatístico SAS (versão 9.2). A comparação das médias ajustadas foi feita pelo teste de Tukey ($P \leq 0,05$). Os seguintes modelos estatísticos foram utilizados:

$$Y_{ijkl} = \mu + M_i + D_j(M_i) + H_k + M_i * H_k + H_k * D_j(M_i) + e_{ijkl}$$

Em que:

Y_{ijklmn} = m-ésima observação da temperatura e da umidade relativa;

M_i = efeito fixo do i-ésimo mês (i = julho, dezembro);

$D_j(M_i)$ = efeito fixo do j-ésimo dia de coleta (j = 1, 2, 3, 4, 5, 6) dentro do i-ésimo mês;

H_k = efeito fixo do k-ésimo horário de coleta (k = das 08:00h às 10:00h; das 10:00h às 12:00h; das 12:00h às 14:00h; das 14:00h às 16:00h; das 16:00h às 18:00h; das 18:00h às 20:00h);

$M_i * H_k$ = efeito da interação do i-ésimo mês com o k-ésimo horário de coleta;

$H_k * D_j(M_i)$ = efeito da interação do j-ésimo dia dentro do i-ésimo mês com o k-ésimo horário de coleta;

e_{ijklmn} = resíduo, incluindo o erro aleatório;

μ = média paramétrica.

$$Y_{ijklmn} = \mu + M_i + E_j(M_i) + P_k + I_{ik} + H_l + A_m * E_j(M_i) + e_{ijklmn}$$

Em que:

Y_{ijklmn} = n-ésima observação das temperaturas corporais (temperatura retal, temperatura da epiderme, temperatura da pata, temperatura do ar expirado e temperatura das penas) no i-ésimo mês de coleta (i = julho ou dezembro);

M_i = efeito fixo do i-ésimo mês (i = julho, dezembro);

$E_j(M_i)$ = efeito da j-ésima replicação do quadrado latino (j = 1, 2) dentro do i-ésimo mês;

P_k = efeito fixo da k-ésima classe de peso vivo (k = 1, 2, 3, 4, 5 e 6, sendo respectivamente, classe 1 – até 500 g de peso vivo; classe 2 – entre 501 g e 1000 g de peso vivo; classe 3 – entre 1001 g e 1500 g de peso vivo; classe 4 – entre 1501 g e 2000 g de peso vivo; classe 5 – entre 2001 g e 2500 g de peso vivo; classe 6 – acima de 2501 g de peso vivo);

I_{ik} = efeito da interação entre o i-ésimo mês com a k-ésima classe de peso vivo;

H_l = efeito do l-ésimo horário de coleta (l = das 08:00h às 10:00h; das 10:00h às 12:00h; das 12:00h às 14:00h; das 14:00h às 16:00h; das 16:00h às 18:00h; das 18:00h às 20:00h);

$A_m * E_j(M_i)$ = efeito da interação da m-ésima ave (m = 1, 2, 3, 4, 5 e 6) com o j-ésimo experimento dentro do i-ésimo mês;

e_{ijklmn} = resíduo, incluindo o erro aleatório;

μ = média paramétrica.

4 Resultados e Discussão

A correlação entre a temperatura do ar e a temperatura do globo negro para os dados da pesquisa foi significativa ($P < 0,0001$), sendo observado um coeficiente de correlação igual 0,98.

As variáveis meteorológicas diferiram entre os meses e os dias de coleta ($P < 0,05$). Apenas a pressão parcial de vapor não diferiu entre os horários de coleta ($P > 0,05$), mas a diferença entre a temperatura e a umidade relativa do ar entre as 8:00 h e as 20:00 h não acarretaria numa diferença significativa com relação à transferência de calor entre os animais e o ambiente. Também observamos que para todas as três variáveis, houve uma diferença entre os dias de coleta dentro de cada mês de coleta (Tabela 5).

Tabela 5 – Quadrados médios da temperatura do ar (Tar) e da umidade relativa do ar (UR)

Fonte de Variação	Graus de liberdade	Tar	UR
Mês	1	762,56*	182,09*
Dia(Mês)	10	42,68*	683,31*
Horário de coleta	5	19,88*	80,11*
Mês*Horário	5	0,46 ^{NS}	18,93 ^{NS}
Dia(Mês)*Horário	50	0,31 ^{NS}	15,94 ^{NS}
Resíduo	57	0,40	29,31
R ²	-	0,98	0,84
Coeficiente de variação (CV)	-	2,35	8,32

*significativo ($P \leq 0,05$); ^{NS} não significativo ($P > 0,05$)

A temperatura do ar foi maior para o mês de Dezembro, em aproximadamente 5°C, em comparação com o mês de Julho (Tabela 6). A umidade relativa em média manteve-se ligeiramente superior durante o mês de Dezembro ($P < 0,05$), mas variou entre 63 e 66%. Porém, sabemos que valores similares de umidade relativa podem refletir diferentes valores para as pressões de saturação e parcial de vapor à temperatura do ar. Por isso, calculamos as médias gerais da pressão parcial de vapor e observamos que esta foi maior durante as coletas em Dezembro em relação a Julho, o que pode ser explicado pela maior pressão de saturação do vapor devido à maior temperatura do ar, já que podemos calcular a pressão parcial de vapor com base na umidade relativa e na pressão de saturação de vapor.

Tabela 6 – Médias gerais ($\pm$ EP), valores máximos (máx) e mínimos (mín) da temperatura do ar, umidade relativa do ar e pressão parcial de vapor

Mês	Temperatura do ar ($^{\circ}$ C)			Umidade Relativa (%)			Pressão parcial de vapor (kPa)		
	Média	Máx	Mín	Média	Máx	Mín	Média	Máx	Mín
Julho	24,2 $\pm$ 0,18 ^b	26,6	21,0	63 $\pm$ 1,2 ^b	89	48	1,91 $\pm$ 0,03 ^b	2,36	1,48
Dezembro	29,3 $\pm$ 0,17 ^a	32,5	26,2	66 $\pm$ 1,0 ^a	86	47	2,72 $\pm$ 0,06 ^a	3,83	1,81

Os dados ambientais (temperatura e umidade relativa do ar) para cada horário e mês de coleta são apresentados na Figura 8. Para cada mês foram plotados os dados compreendendo os dias onde verificamos diferenças significativas ($P < 0,05$) para as variáveis. Para o mês de Julho, observamos os maiores valores ($P < 0,05$) para a temperatura e a umidade relativa do ar nos dias de coleta 4 e 5, entre os dias 9 e 10 e 16 e 17 de julho (Figura 8a).

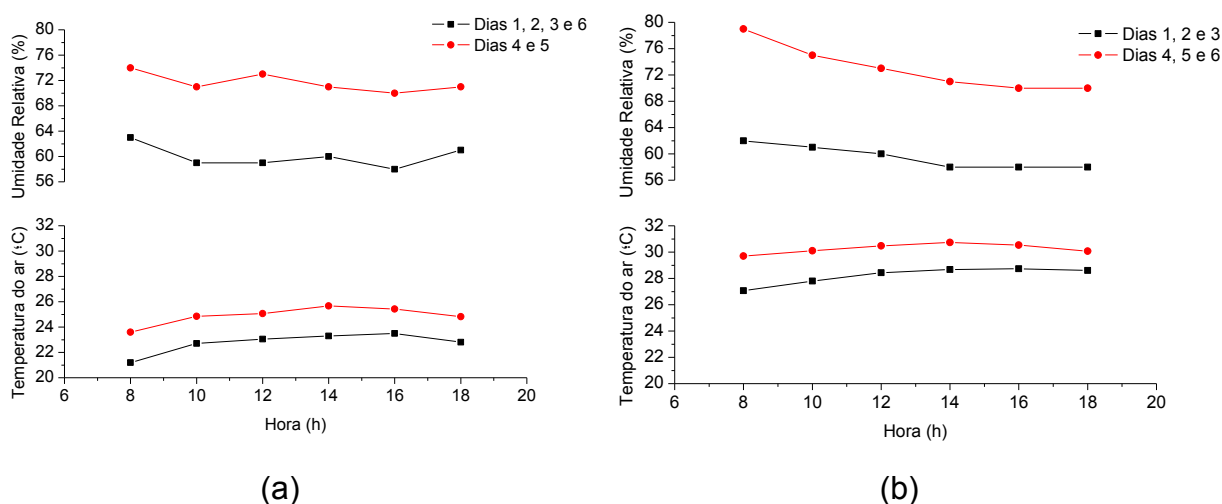


Figura 8 – (a) Temperatura e umidade relativa do ar durante os horários de coleta (das 8:00h às 20:00h) na câmara climática durante o mês de Julho de 2012, para os intervalos entre os dias 1, 2, 3 e 6 (corresponde aos dias 18/ 19 de junho; 25/ 26 de junho; 2/ 3 de julho; 23/ 24 de julho) e entre os dias 4 e 5 (corresponde aos dias 9/ 10 de julho; 16/ 17 de julho); (b) Temperatura e umidade relativa do ar durante os horários de coleta (das 8:00h às 20:00h) na câmara climática durante o mês de Dezembro de 2012, para os intervalos entre os dias 1, 2 e 3 (corresponde aos dias 3/ 4 de novembro; 10/ 11 de novembro; 17/ 18 de novembro) e entre os dias 4, 5 e 6 (corresponde aos dias 24/ 25 de novembro; 1/ 2 de dezembro; 8/ 9 de dezembro).

Para o mês de Dezembro, observamos valores superiores ($P<0,05$) para a temperatura e a umidade relativa do ar nos 3 últimos dias de coleta, entre os dias 24 e 25 de novembro e 1 e 2 e 8 e 9 de dezembro (Figura 8b).

A partir do quadro da análise de variância para as temperaturas corporais mensuradas ao longo da pesquisa (Tabela 7), podemos observar que houve diferença significativa ($P<0,05$) entre os períodos de coleta (Julho e Dezembro) para todas as variáveis, exceto para a temperatura retal.

Todas as variáveis diferiram significativamente ($P<0,05$) em relação às classes de peso, o que mostra que as temperaturas além de serem influenciadas pelas condições ambientais, também foram influenciados pela massa corporal. Os diferentes horários de coleta não tiveram efeito significativo sobre nenhuma das variáveis fisiológicas avaliadas durante os experimentos ($P>0,05$). Esses resultados podem ser explicados pela pequena variação dos parâmetros ambientais entre os horários em cada um dos dias de coleta, conforme podemos observar na Figura 8.

Tabela 7 – Quadrados médios da temperatura do ar expirado (Texp); temperatura retal (Tretal); temperatura da epiderme (Tepi); temperatura da superfície corporal (Tsup) e temperatura da pata (Tpata) de frangos de corte da linhagem Cobb

Fonte de Variação	Graus de liberdade	Texp	Tretal	Tepi	Tsup	Tpata
Mês	1	104,85*	0,32 ^{NS}	1,38*	92,09*	67,34*
Experimento (mês)	2	2,50*	0,05 ^{NS}	0,42 ^{NS}	0,64 ^{NS}	8,73*
Classe de peso	5	8,21*	1,26*	5,30*	39,77*	8,96*
Mês*classe de peso	5	2,56*	0,17 ^{NS}	0,30 ^{NS}	3,70*	2,99 ^{NS}
Horário de coleta	5	0,70 ^{NS}	0,19 ^{NS}	0,25 ^{NS}	1,97 ^{NS}	2,85 ^{NS}
Ave*experimento (mês)	20	0,49 ^{NS}	0,11 ^{NS}	0,20 ^{NS}	2,26*	1,58 ^{NS}
Resíduo	88	0,76	0,11	0,32	1,26	2,00
R ²	-	0,79	0,57	0,61	0,78	0,52
Coeficiente de variação (CV)	-	2,55	0,80	1,39	3,35	3,84

*significativo ($P\leq 0,05$); ^{NS} não significativo ($P>0,05$)

Para todas as temperaturas corporais avaliadas ao longo da pesquisa, os animais apresentaram valores superiores no mês de Dezembro em relação ao mês de Julho ($P<0,05$, Tabela 8). Além disso, observamos que a temperatura do ar expirado, a temperatura da epiderme e a temperatura retal aumentam com o

aumento no peso vivo dos frangos, onde os menores valores foram observados nas aves com até 500 g de peso vivo, independentemente das condições ambientais ($P < 0,05$).

A temperatura superficial das penas mostrou uma relação inversa, pois os maiores valores foram observados nos frangos com peso vivo de até 1000 g ($P < 0,05$). A temperatura das penas foi menor para as aves com peso vivo entre 1001 g e 1500 g em relação às com até 1000 g de peso vivo, diminuindo até os frangos atingirem 2500 g de peso vivo, seguido de um ligeiro aumento nesta variável para as aves com maior peso vivo ($P < 0,05$) e as aves entre 1001 g e 1500 g, não diferindo entre si para os frangos de corte até 2000 g ($P > 0,05$) e diferindo entre os animais entre 2001 g e 2500 g e acima deste peso ($P < 0,05$, Tabela 8).

Tabela 8 – Médias aritméticas e estimadas pelo método dos quadrados mínimos ($\pm$ EP) para a temperatura do ar expirado (Texp), temperatura retal (Tretal), temperatura da epiderme (Tepi), temperatura das penas (Tsup) e temperatura da pata (Tpata) de acordo com os meses, as diferentes classes de peso e horários de coleta

Média	N	Texp (°C)	Tretal (°C)	Tepi (°C)	Tsup (°C)	Tpata (°C)
Geral	127	34,2 $\pm$ 0,14	41,8 $\pm$ 0,04	40,5 $\pm$ 0,04	33,5 $\pm$ 0,18	36,8 $\pm$ 1,71
Mês						
Jul.	57	33,0 $\pm$ 0,17 ^b	41,8 $\pm$ 0,06 ^a	40,6 $\pm$ 0,07 ^b	32,0 $\pm$ 0,21 ^b	35,6 $\pm$ 0,27 ^b
Dez.	70	35,4 $\pm$ 0,11 ^a	41,9 $\pm$ 0,04 ^a	40,9 $\pm$ 0,11 ^a	34,2 $\pm$ 0,14 ^a	37,5 $\pm$ 0,18 ^a
Peso						
< 500 g	34	34,1 $\pm$ 0,16 ^c	41,5 $\pm$ 0,06 ^c	39,9 $\pm$ 0,10 ^{bc}	35,0 $\pm$ 0,20 ^a	37,2 $\pm$ 0,25 ^{ab}
500 g a 1000 g	27	33,7 $\pm$ 0,20 ^c	41,6 $\pm$ 0,08 ^{bc}	40,4 $\pm$ 0,13 ^b	34,6 $\pm$ 0,26 ^a	36,5 $\pm$ 0,32 ^{abc}
1000 g a 1500 g	16	33,9 $\pm$ 0,23 ^c	41,9 $\pm$ 0,09 ^a	40,8 $\pm$ 0,15 ^a	33,2 $\pm$ 0,30 ^b	35,7 $\pm$ 0,37 ^c
1500 g a 2000 g	15	33,8 $\pm$ 0,24 ^c	41,8 $\pm$ 0,09 ^{ab}	41,0 $\pm$ 0,16 ^a	31,8 $\pm$ 0,31 ^c	35,9 $\pm$ 0,39 ^{bc}
2000 g a 2500 g	18	34,1 $\pm$ 0,24 ^b	42,0 $\pm$ 0,09 ^a	40,9 $\pm$ 0,16 ^a	31,4 $\pm$ 0,32 ^c	36,2 $\pm$ 0,40 ^{abc}
> 2500 g	17	35,6 $\pm$ 0,23 ^a	42,2 $\pm$ 0,09 ^a	41,4 $\pm$ 0,15 ^a	32,4 $\pm$ 0,29 ^b	37,6 $\pm$ 0,37 ^a
Horário						
08:00 h	23	33,9 $\pm$ 0,19 ^a	41,7 $\pm$ 0,07 ^a	40,6 $\pm$ 0,12 ^a	32,6 $\pm$ 0,24 ^a	36,3 $\pm$ 0,30 ^a
10:00 h	21	34,2 $\pm$ 0,21 ^a	41,8 $\pm$ 0,08 ^a	40,9 $\pm$ 0,13 ^a	33,1 $\pm$ 0,27 ^a	37,0 $\pm$ 0,34 ^a
12:00 h	21	34,2 $\pm$ 0,21 ^a	41,8 $\pm$ 0,08 ^a	40,8 $\pm$ 0,13 ^a	33,3 $\pm$ 0,27 ^a	37,0 $\pm$ 0,34 ^a
14:00 h	21	34,3 $\pm$ 0,21 ^a	41,9 $\pm$ 0,08 ^a	40,7 $\pm$ 0,13 ^a	33,2 $\pm$ 0,27 ^a	36,1 $\pm$ 0,33 ^a
16:00 h	20	34,3 $\pm$ 0,21 ^a	41,9 $\pm$ 0,08 ^a	40,8 $\pm$ 0,14 ^a	33,4 $\pm$ 0,27 ^a	36,5 $\pm$ 0,34 ^a
18:00 h	21	34,4 $\pm$ 0,20 ^a	42,0 $\pm$ 0,08 ^a	40,7 $\pm$ 0,13 ^a	32,8 $\pm$ 0,26 ^a	36,3 $\pm$ 0,32 ^a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula superescrita nas colunas dentro de cada efeito não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 0,05$)

Os maiores valores ($P < 0,05$) para a temperatura da pata foram observados entre as aves mais leves (até 500 g) e as mais pesadas (acima de 2501 g). Não

houve diferença significativa entre os horários de coleta ($P>0,05$) para nenhuma das temperaturas corporais, pois as variáveis ambientais mantiveram-se estáveis durante cada um dos dias de coleta.

A interação entre os meses e as classes de peso, observamos que a temperatura do ar expirado para as aves mensuradas em Dezembro foi superior às de Julho em todas as classes de peso corporal (Figura 9). A exceção foi verificada para os animais com peso vivo superior a 2501 g (classe de peso corporal 6), onde os frangos de corte não diferiram em relação à temperatura do ar expirado entre os meses de Julho e Dezembro ($P>0,05$).

Esses resultados indicam a maior sensibilidade das aves às condições ambientais e também demonstram a maior importância das perdas evaporativas pela respiração para aves no final do ciclo de criação. Salt (1964) afirmou que quando as aves são expostas a condições ambientais acima da zona de termoneutralidade aumentam a perda evaporativa pela respiração; o que pode explicar o porquê os frangos de corte durante o mês de Julho não diferiram a temperatura do ar expirado quando atingiram peso vivo superior a 2500 g, pois a temperatura do ar foi de aproximadamente 25°C, o que se encontra acima do recomendado para frangos de corte nessa fase do ciclo de criação (MACARI & FURLAN, 2001).

A temperatura do ar expirado foi em média, aproximadamente entre 6°C e 7°C superior a temperatura do ar para o mês de Dezembro, e aproximadamente entre 8°C e 9°C superior à temperatura do ar para o mês de Julho. Os resultados demonstram também a importância da manutenção de um gradiente entre ambas as temperaturas (do ar expirado e do ambiente) para que o mecanismo evaporativo de perda de calor se mantenha efetivo mesmo frente a temperaturas mais elevadas.

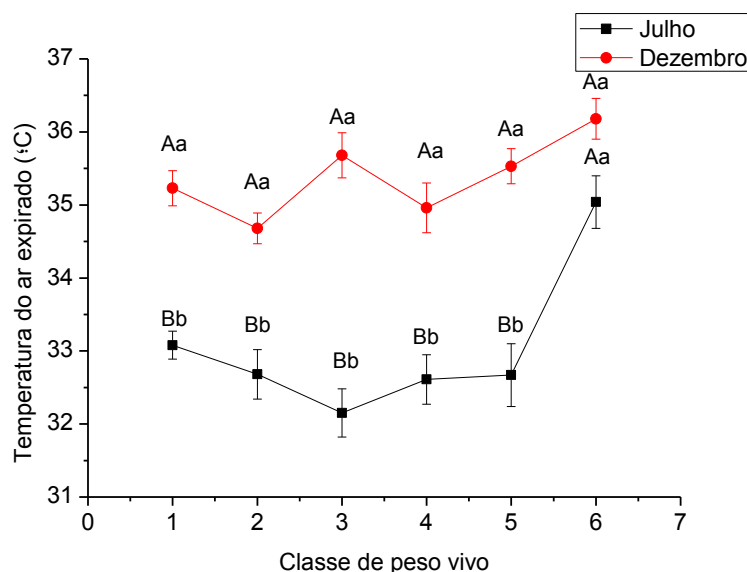


Figura 9 – Médias estimadas pelo método dos quadrados mínimos da temperatura do ar expirado ($\pm$ EP) de frangos de corte da linhagem Cobb de acordo com a classe de peso corporal nos meses de julho e dezembro: Classe 1 – até 500g; Classe 2 – entre 501 g e 1000 g; Classe 3 – entre 1001 g e 1500 g; Classe 4 – entre 1501 g e 2000 g; Classe 5 – entre 2001 g e 2500 g; Classe 6 – acima de 2501 g. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem para cada um dos meses da pesquisa e pela mesma letra minúscula entre os meses de Julho e Dezembro não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 0,05$)

Menuam & Richards (1975) mensuraram vários pontos da traqueia e dos sacos aéreos foram medidos por uma sonda inserida via cânula traqueal nas aves anestesiadas, mantidas em câmara climática em elevadas temperaturas do ar, inclusive próxima dos 50°C, para estudar o perfil de temperatura ao longo do sistema respiratório das aves. Os autores observaram que o trato respiratório superior (cavidade bucal e traqueia) tem maior participação nas perdas evaporativas do que a porção inferior, representada pelos sacos aéreos.

A pouca contribuição dos sacos para as perdas evaporativas na superfície respiratória também pode ser devido a sua temperatura ser equivalente ou superior a temperatura retal (representada como a temperatura do núcleo corporal, mas que por vezes pode ser ligeiramente inferior a outras temperaturas mais profundas do corpo, como a temperatura dos pulmões, por exemplo), o que indicaria que existe um pequeno diferencial de temperatura entre as superfícies, diminuindo a ocorrência de transferência de calor. Além disso, os autores observaram para uma temperatura do ar igual a 43°C, a temperatura média do ar expirado das aves igual a 41,3°C e a

temperatura cloacal também 43°C. Esses resultados demonstram que as aves tentam manter um diferencial de temperatura (mínimo) entre o interior do corpo e o ar expirado, como últimos mecanismos para manutenção da homeotermia.

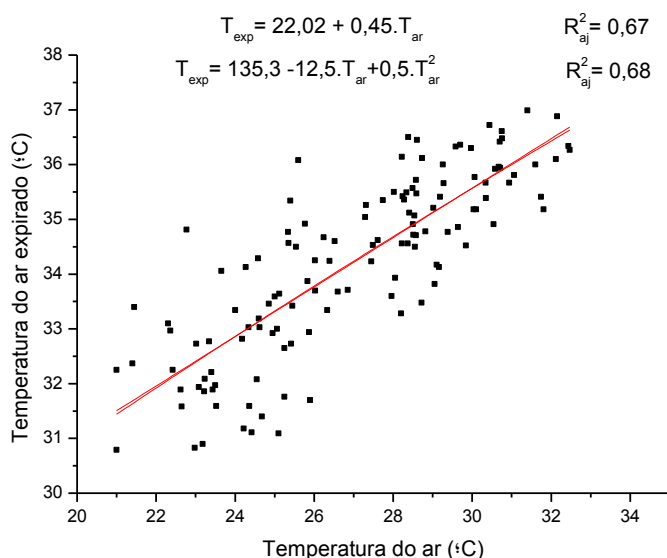


Figura 10 – Temperatura do ar expirado de frangos de corte da linhagem Cobb em função da temperatura do ar

Ao longo da pesquisa, pudemos relacionar a variação da temperatura do ar expirado em função da temperatura do ar (Figura 10), com um coeficiente de correlação igual a 0,82 ($P < 0,05$). Observamos um ajuste linear ($R_{aj}^2 = 0,67$) entre as variáveis, com a temperatura do ar expirado sendo crescente com o aumento da temperatura do ar. O seguinte modelo foi ajustado para a estimativa da temperatura do ar expirado (T_{exp}) de frangos de corte, em função da temperatura do ar.

$$T_{exp} = 22,02 + 0,45.T_{ar} \quad R_{aj}^2 = 0,67$$

A temperatura retal foi a única variável fisiológica mensurada ao longo da pesquisa que não diferiu significativamente entre os meses de coleta ($P > 0,05$, Tabela 7). Para ambos os meses a temperatura retal está de acordo com o observado por Nascimento et al. (2012), que relataram valores entre 39,5° e 42°C

para frangos de corte expostos a uma condição de conforto em câmara climática durante todo o ciclo de criação.

Porém observou-se uma menor temperatura retal para as aves nas classes de peso 1 e 2 (menor que 500 g e entre 501 g e 1000 g de peso vivo), aumentando de maneira crescente com o aumento no ganho de peso dos frangos. Esses resultados podem ter uma relação com a temperatura do ar durante as coletas para os meses de Julho e Dezembro, pois em ambas as coletas seu valor registrado foi menor do que o indicado para frangos de corte nesta fase do ciclo de vida (MACARI & FURLAN, 2001).

A interação entre os meses e as classes de peso vivo (Figura 11), mostra que para o mês de Julho os frangos de corte apresentaram uma temperatura retal crescente ($P < 0,05$), variando entre 41,40°C até os 1000 g de peso vivo e 42,26°C acima dos 2501 g. Para o mês de Dezembro a temperatura retal não diferiu entre as classes de peso vivo ($P > 0,05$), apresentando valores crescentes entre as classes 1 e 3 do peso vivo (frangos abaixo de 500g, entre 501 g e 1000 g e entre 1001 g e 1500 g), de 41,64°C a 42,07°C, e decrescendo para o peso vivo entre 1501 g e 2000 g e entre 2001 g e 2500 g, aumentando novamente para os frangos com peso vivo superior a 2501 g. no entanto, ao compararmos os meses dentro de cada uma das classes de peso corporal, não observamos diferenças significativas para os valores de temperatura retal ($P > 0,05$).

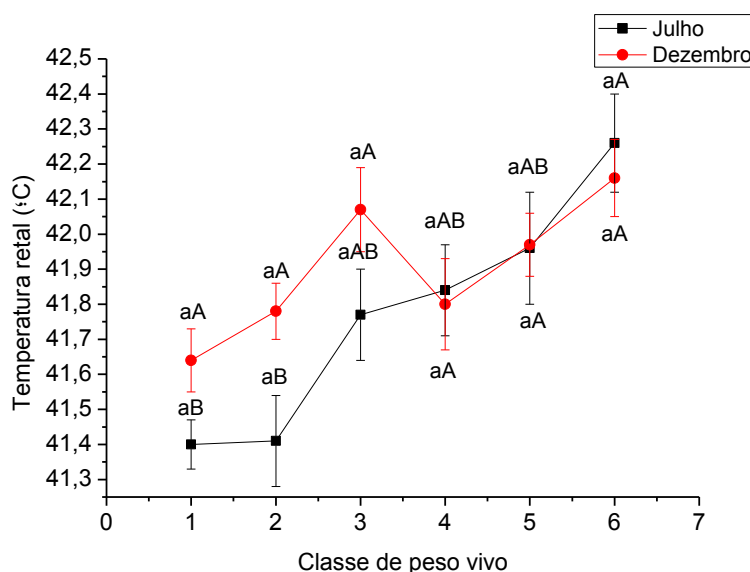


Figura 11 - Médias estimadas pelo método dos quadrados mínimos da temperatura retal ($\pm$ EP) de frangos de corte da linhagem Cobb de acordo com a classe de peso corporal nos meses de julho e dezembro: Classe 1 – até 500g; Classe 2 – entre 501 g e 1000 g; Classe 3 – entre 1001 g e 1500 g; Classe 4 – entre 1501 g e 2000 g; Classe 5 – entre 2001 g e 2500 g; Classe 6 – acima de 2501 g. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem para cada um dos meses da pesquisa e pela mesma letra minúscula entre os meses de Julho e Dezembro não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 0,05$)

Durante o mês de Dezembro, portanto, observamos temperaturas retais acima de 42°C (Figura 11), o que indica que as aves estavam em condição de estresse térmico (NASCIMENTO et al., 2012). Para o mês de Julho, esse valor só foi observado para as aves com o maior peso vivo (acima de 2501 g), o que indica que a temperatura do ar durante essa fase do ciclo de vida dos animais estava superior a ideal (MACARI & FURLAN, 2001).

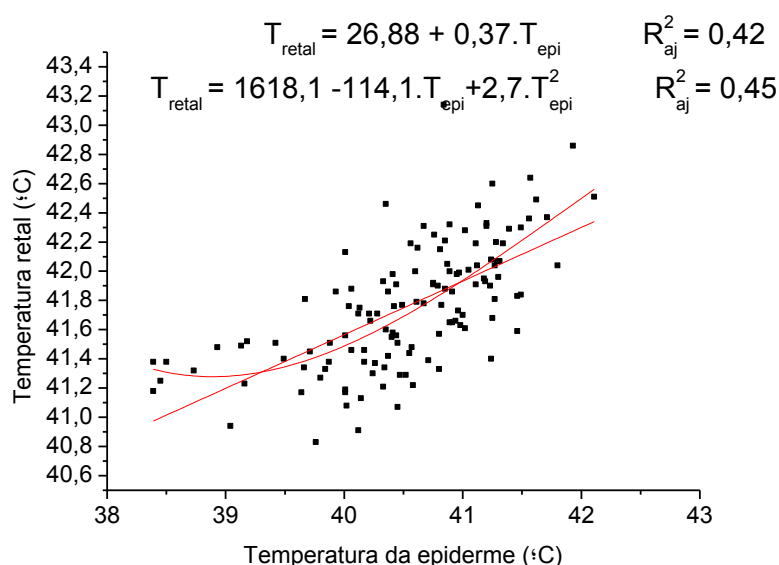


Figura 12 – Temperatura retal de frangos de corte da linhagem Cobb em função da temperatura da epiderme

A maior correlação da temperatura retal foi com a temperatura da epiderme (Figura 12, $r = 0,65$), e podemos estimá-la a partir desta mensuração, conforme o modelo de regressão abaixo:

$$T_{\text{retal}} = 26,88 + 0,37.T_{\text{epi}} \quad R^2_{\text{aj}} = 0,42$$

A temperatura da epiderme dos frangos foi maior no mês de Dezembro em comparação com o mês de Julho (Tabela 8, $P < 0,05$). A temperatura da epiderme foi menor para as aves com peso vivo até 1000 g (Tabela 8), e o maior valor foi observado para as aves acima de 2501 g, não diferindo entre os meses de coleta a partir de 1001 g de peso vivo ($P > 0,05$).

Os meses diferem entre si apenas entre as aves com até 500 g de peso vivo, indicando que os pintos de corte são sensíveis a variação dos parâmetros ambientais nos primeiros dias de vida (Figura 11). Como no mês de Julho registramos uma menor temperatura do ar, conseqüentemente, verificou-se uma menor temperatura da epiderme para as aves. Os resultados observados para a temperatura da epiderme está em concordância com os dados de Yahav et al. (1997), que relataram temperaturas entre 38,3° e 39,7°C antes de submeterem frangos com 8 semanas de vida a condições de estresse por calor e por frio. Os

autores supracitados observaram após uma exposição aguda ao calor (temperatura do ar de aproximadamente 35°C) frangos com temperatura da epiderme em média de 43°C.

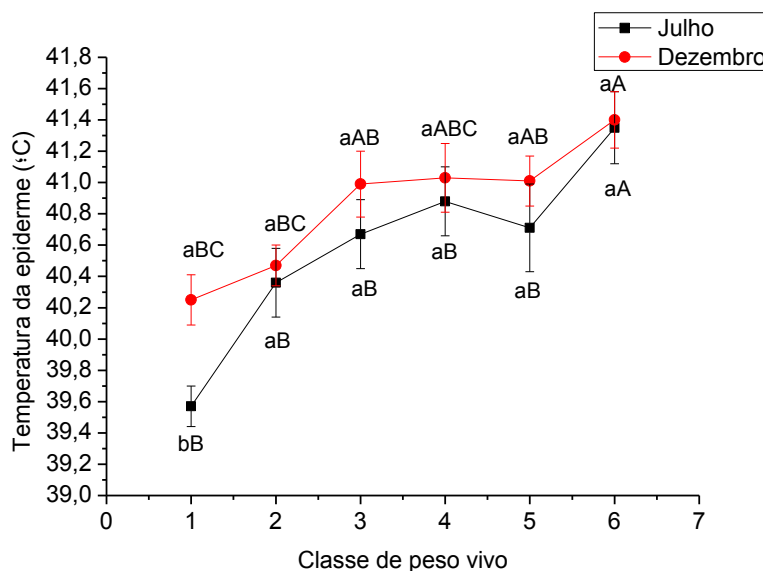


Figura 13 - Médias da temperatura da epiderme ($\pm$ EP) de frangos de corte da linhagem Cobb de acordo com a classe de peso corporal nos meses de julho e dezembro: Classe 1 – até 500g; Classe 2 – entre 501g e 1000g; Classe 3 – entre 1001g e 1500g; Classe 4 – entre 1501g e 2000g; Classe 5 – entre 2001g e 2500g; Classe 6 – acima de 2501g. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem para cada um dos meses da pesquisa e pela mesma letra minúscula entre os meses de Julho e Dezembro não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 0,05$)

Yahav et al. (1997) também ressaltam que sob uma temperatura do ar acima de 25°C, os frangos apresentam um aumento significativo nas temperaturas da epiderme e cloacal, assim como observamos nessa pesquisa. É importante informar que os autores mediram a temperatura da epiderme na mesma região que nós (abaixo da asa), porém utilizaram um termômetro inserido subcutaneamente abaixo da asa. A temperatura da epiderme durante o mês de Dezembro foi maior (Tabela 8, $P < 0,05$), o que pode estar relacionado com a vasodilatação periférica com o intuito de facilitar a dissipação de calor (WOLFENSON et al., 1981; YAHAV et al., 1997). Ao estudarmos a variação da temperatura da epiderme em relação a temperatura retal, verificamos uma diferença de aproximadamente 1°C para as aves com peso vivo maior que 2501 g. O mesmo pode ser determinado nos dados de Yahav et al.

(1997), que também mensuraram uma diferença próxima de 1°C entre a temperatura interna e a pele.

A temperatura da epiderme apresentou uma maior correlação com a temperatura retal ($r = 0,65$), portanto, para os dados da pesquisa, podemos estimar a temperatura da epiderme a partir da temperatura retal e da temperatura do ar, conforme o modelo de regressão:

$$T_{\text{epi}} = 0,06 \cdot T_{\text{ar}} + T_{\text{retal}} \quad R_{\text{aj}}^2 = 0,46$$

A temperatura superficial das penas dos animais foi em média 2°C superior no mês de Dezembro em relação ao mês de Julho ($P < 0,05$, Tabela 8). Também verificamos que essa variável é influenciada pelo peso vivo dos frangos, onde observamos valores decrescentes entre os animais com até 1000 g de peso vivo em relação às aves entre 1001 g e 1500 g. Temperaturas significativamente menores ($P < 0,05$) foram mensuradas para as aves com peso vivo entre 1501 g e 2000 g e entre 2001 g e 2500 g; seguido por um posterior aumento na temperatura das penas quando os animais estão acima de 2501 g.

Podemos estudar a interação entre as classes de peso vivo e os meses do estudo (Figura 14). Verificamos que para o mês de Julho, os frangos de corte apresentam a temperatura das penas decrescente em função do peso corporal; já para o mês de Dezembro, observamos diferença significativa ($P < 0,05$) apenas entre os animais nas classes 1 e 2 (até 500 g e entre 501 g e 1000 g de peso vivo, respectivamente) e os animais nas classes 4 e 5 (entre 1501 g a 2000 g e entre 2001 g e 2500 g de peso vivo, respectivamente).

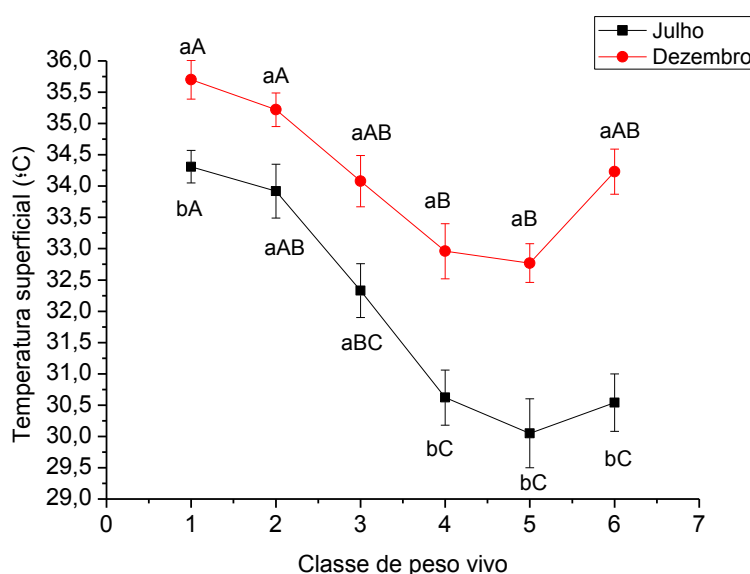


Figura 14 - Médias estimadas pelo método dos quadrados mínimos da temperatura superficial das penas ($\pm$ EP) de frangos de corte da linhagem Cobb de acordo com a classe de peso corporal nos meses de julho e dezembro: Classe 1 – até 500g; Classe 2 – entre 501g e 1000g; Classe 3 – entre 1001g e 1500g; Classe 4 – entre 1501g e 2000g; Classe 5 – entre 2001g e 2500g; Classe 6 – acima de 2501g. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem para cada um dos meses da pesquisa e pela mesma letra minúscula entre os meses de Julho e Dezembro não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P > 0,05$)

A temperatura da pata foi a única variável estudada em que a interação entre mês de coleta e classes de peso corporais não foi significativa ($P > 0,05$), porém os efeitos isolados foram significativos ($P < 0,05$), onde as aves apresentaram uma maior temperatura em Dezembro em relação a Julho; e as maiores temperaturas foram observadas para as aves nas classes 1, 2 e 6 (respectivamente até 500 g; entre 501 g e 1000 g e acima de 2501 g de peso vivo).

A pata é considerada um importante órgão vasomotor, fundamental para as trocas de calor sensíveis de frangos de corte (SHINDER et al., 2007). Ou seja, é uma região que apresenta elevada sensibilidade frente às variações ambientais. A pata das aves é uma região com elevada vascularização. Devido a isso, existem artérias que ficam próximas a veias de calibre semelhante, portanto, ocorrem trocas por condução entre elas, por meio de anastomoses arteriovenosas. O sangue arterial mais aquecido transmite energia térmica para as veias. Numa situação de

estresse térmico pelo frio, a temperatura da pata diminui e, sob estresse por calor, aumenta (NASCIMENTO, 2010).

Quando os animais são expostos a condições de temperaturas mais amenas como as observadas em Julho, essa região sofre uma rápida constrição dos vasos periféricos, diminuindo o fluxo sanguíneo, numa tentativa de evitar ao máximo as perdas sensíveis. Por outro lado, em condições de elevadas temperaturas, como observado em Dezembro, a pata sofre vasodilatação, para maximizar essas trocas (NASCIMENTO, 2010).

A partir das temperaturas da superfície das penas e das patas, modelamos a transferência de calor sensível para o corpo coberto por penas e para as patas. O fluxo de calor sensível total diminuiu linearmente com o aumento do peso das aves (Figura 15), levando-se em consideração o somatório entre os fluxos do corpo e das patas, para ambos os meses da pesquisa. Esses resultados indicam que os frangos de corte diminuem o fluxo de calor sensível independentemente das condições ambientais.

Porem, no mês de Dezembro essa diminuição no fluxo de calor sensível é mais acentuada, mesmo para as aves com menor peso vivo (Classe 1). No final do ciclo, onde os frangos apresentaram peso corporal superior a 2501 g, observamos uma concordância com os demais resultados relatados: uma menor capacidade de perda de calor via mecanismos sensíveis está intrinsicamente relacionada com as maiores temperaturas do ar expirado, retal e da epiderme em ambos os experimentos (Julho e Dezembro).

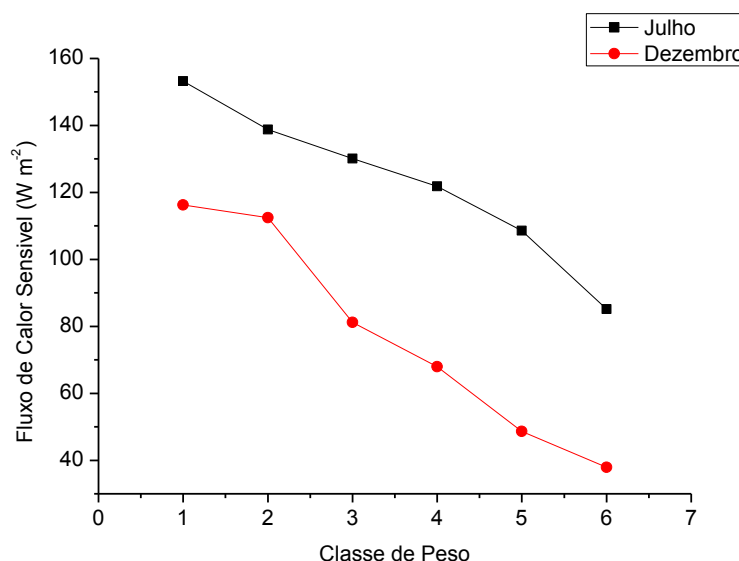


Figura 15 - Médias da transferência de calor sensível de frangos de corte da linhagem Cobb de acordo com a classe de peso corporal nos meses de julho e dezembro: Classe 1 – até 500g; Classe 2 – entre 501g e 1000g; Classe 3 – entre 1001g e 1500g; Classe 4 – entre 1501g e 2000g; Classe 5 – entre 2001g e 2500g; Classe 6 – acima de 2501g.

Ao compararmos a perda de calor sensível entre o corpo e as patas, observamos a mesma tendência linear tanto para a região do corpo coberta por penas quanto para as patas, desprovidas de cobertura (Figura 16). Em valores absolutos, as perdas de calor sensível pelas patas são maiores quanto menor for o peso vivo das aves, porém, se olharmos atentamente, podemos observar que proporcionalmente ela assume uma maior importância com o aumento do ganho de peso, que relaciona-se intrinsecamente com mudanças na cobertura de penas no corpo.

Por exemplo, para as aves com peso vivo acima de 2501 g (Classe 6), no mês de Dezembro, as perdas pelo corpo coberto por penas foi de aproximadamente 4 W m^{-2} , enquanto que a transferência pelas patas foi de aproximadamente 34 W m^{-2} , sendo quase 10 vezes maior, ou representando 90% das perdas, mostrando a importância dessa região para a tentativa de manutenção do equilíbrio térmico (Figura 16); enquanto que para a Classe 1 (com peso vivo até 500 g), aproximadamente 54% das perdas foram no corpo coberto por penas (63 W m^{-2}) e 46% nas patas (52 W m^{-2}).

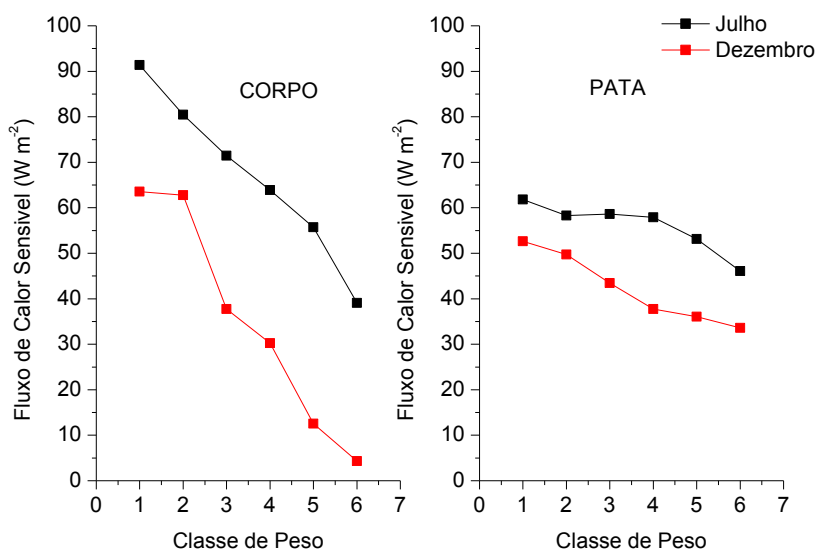


Figura 16 - Médias da transferência de calor sensível para o corpo e as patas de frangos de corte da linhagem Cobb de acordo com a classe de peso corporal nos meses de julho e dezembro: Classe 1 – até 500g; Classe 2 – entre 501g e 1000g; Classe 3 – entre 1001g e 1500g; Classe 4 – entre 1501g e 2000g; Classe 5 – entre 2001g e 2500g; Classe 6 – acima de 2501g.

Outro ponto importante a se destacar a partir dos resultados da Figura 16 é que os frangos de corte apresentam uma maior perda de calor sensível quanto menor for o peso corporal. Os frangos de corte adquirem a maturidade do sistema termorregulatório ao redor do 10º dia de vida (MORAES et al., 2003), o que relaciona-se com a menor capacidade de manutenção do equilíbrio térmico e do calor corporal e com um aumento das perdas superficiais em condições fora da termoneutralidade, como observado nos dois experimentos.

Portanto, torna-se fundamental o fornecimento de fontes de calor adicionais nas instalações no estágio inicial do ciclo de vida dos frangos de corte, evitando-se a perda excessiva de calor pelos pintos e que os animais não precisem desviar energia para a manutenção da temperatura corporal, corroborando com Aerts et al. (2000), que ressalta sobre a importância do controle do microclima dentro das instalações e que também relacionou que as condições ambientais afetam diretamente o desempenho e fluxo de calor em frangos de corte. Podemos relacionar esses resultados anteriores com a condutividade térmica da capa de cobertura (Figura 17), onde podemos observar que ela é similar para os frangos de

corte com até 1000 g de peso vivo (Classes 1 e 2), e distinguindo-se nas demais classes, sendo menor durante o mês de Dezembro em comparação a Julho.

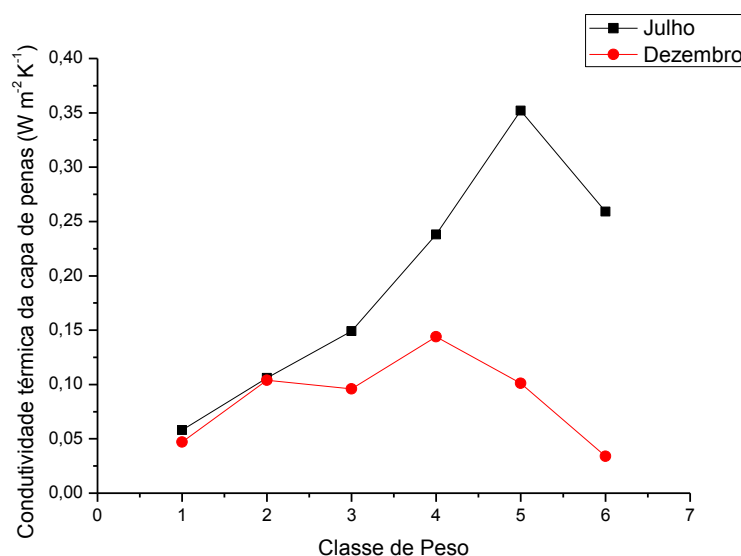


Figura 17 - Médias da condutividade térmica da camada de penas de frangos de corte da linhagem Cobb de acordo com a classe de peso corporal nos meses de julho e dezembro: Classe 1 – até 500g; Classe 2 – entre 501g e 1000g; Classe 3 – entre 1001g e 1500g; Classe 4 – entre 1501g e 2000g; Classe 5 – entre 2001g e 2500g; Classe 6 – acima de 2501g.

Com isso, a associação entre um maior diferencial de temperatura entre a superfície das penas e a temperatura do ar e uma maior condutividade térmica da camada de penas acarreta em maiores perdas na superfície corporal no mês de Julho em comparação a Dezembro. Essas observações vão de encontro ao descrito por Wolf & Walsberg (2000), que afirmam que a combinação entre condições ambientais e propriedades das penas, tais como a condutividade térmica relaciona-se com a capacidade de perda de calor sensível via convecção e radiação de ondas longas da superfície corporal para o ambiente.

Adicionalmente, determinamos a resistência da camada de penas à transferência de calor sensível (Figura 18). Observamos para o mês de Julho um ligeiro aumento da resistência conforme o peso dos frangos, variando entre 62 s m⁻¹ para as aves com peso vivo até 500 g (Classe 1) e 214 s m⁻¹ para as aves com peso vivo superior a 2501 g (Classe 6). Os resultados corroboram os valores descritos por Özkan et al. (2002), que calcularam a resistência da camada de penas para frangos de corte com empenamento normal e para aves com gene do pescoço pelado, que

apresentam uma menor cobertura de penas. Os autores supracitados também mediram as temperaturas da epiderme e da camada de penas, e calcularam a resistência conforme proposto por Prijono (1991), que considerou as temperaturas: operativa, do ar, radiante média, da camada de penas e as resistências à transferência de calor sensível por radiação de ondas longas e por convecção. As medidas foram feitas nos animais aos 14, 21, 28 e 42 dias de vida, cujos pesos médios eram respectivamente iguais a 363, 660, 1037, 1523 e 2018 g. As resistências calculadas por eles para os frangos de corte com empenamento normal foram similares ao observado na nossa pesquisa: 76, 169, 317 e 292 $s\ m^{-1}$, respectivamente para cada um dos dias avaliados, e as temperaturas as quais os animais estavam expostos era de aproximadamente 20°C.

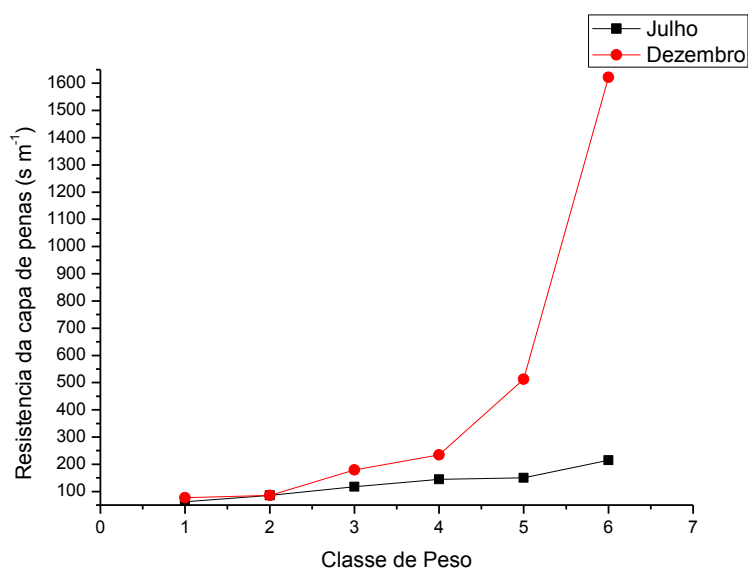


Figura 18 - Médias da resistência da camada de penas de frangos de corte da linhagem Cobb de acordo com a classe de peso corporal nos meses de julho e dezembro: Classe 1 – até 500g; Classe 2 – entre 501g e 1000g; Classe 3 – entre 1001g e 1500g; Classe 4 – entre 1501g e 2000g; Classe 5 – entre 2001g e 2500g; Classe 6 – acima de 2501g.

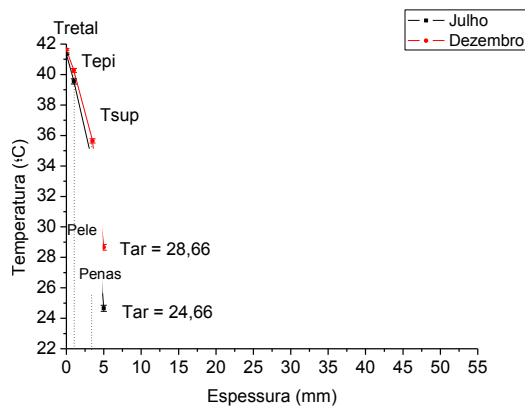
No caso das aves no mês de Julho, a resistência apresentou pouca variação, pois o aumento da espessura da camada de penas foi acompanhado pelo aumento na condutividade térmica da capa (Figuras 17 e 18). Em contrapartida, durante o mês de Dezembro, a resistência da camada de penas aumenta em uma tendência exponencial, atingindo seu máximo valor para as aves com maior peso corporal

(Classe 6). Nesta condição, as aves apresentaram uma menor condutividade térmica da capa, que associada com uma maior espessura da mesma, acarretou num aumento significativo do seu valor.

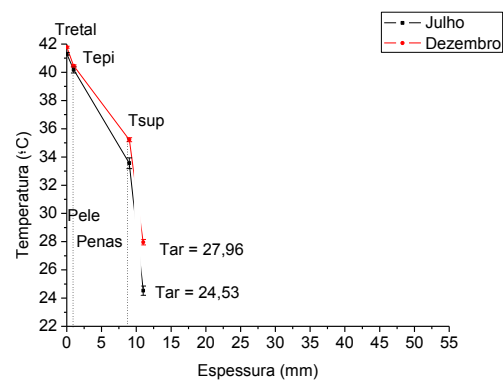
Este resultado corrobora nossas observações anteriores, onde os frangos de corte com peso vivo maior que 2501 g no mês de Dezembro apresentam uma diminuição significativa da transferência de calor sensível, que relaciona-se portanto, com a dificuldade de dissipar calor pela capa de cobertura e a tentativa de maximizá-la através das regiões desprovidas de penas, no caso, as patas. Wathes & Clark (1981) observaram que a resistência térmica aumenta significativamente com o empenamento das aves, isto é, quanto maior a cobertura de penas das aves, maior a resistência da capa à transferência de calor.

Turnpenny et al. (2000) ao descrever um modelo para a estimativa do equilíbrio térmico de frangos de corte, adotaram como valor da resistência da camada de penas à transferência de calor o valor igual a 100 s m^{-1} . Os autores relataram porém que este valor varia conforme a idade do animal, com valor igual a 100 s m^{-1} (para aves aos 30 dias de vida) e entre 300 a 500 s m^{-1} (para frangos de corte aos 45 dias de vida), o que está intimamente associado a mudanças na cobertura de penas. Acrescentamos que a resistência da camada de penas à transferência de calor depende da temperatura a qual as aves estão expostas, além da idade e da cobertura de penas.

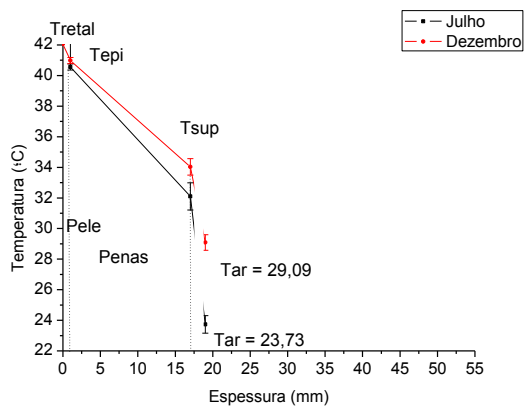
Podemos analisar o perfil de temperatura para todas as classes de peso corporal estipuladas na pesquisa, considerando desde o interior do organismo (temperatura retal) e como ela varia em relação às demais (temperatura da epiderme e temperatura superficial das penas) até a temperatura do ar para ambos os meses (Figura 19).



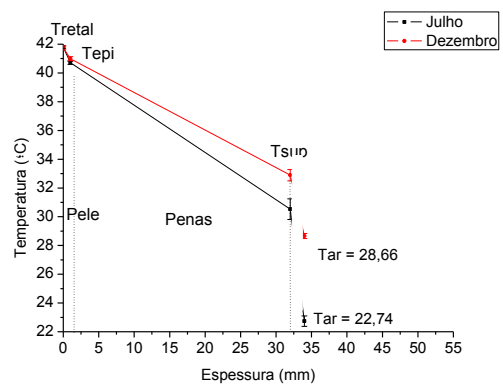
(a)



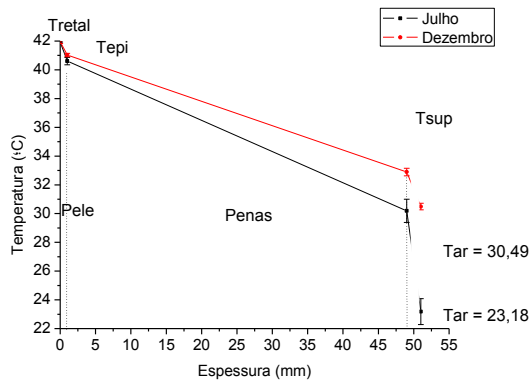
(b)



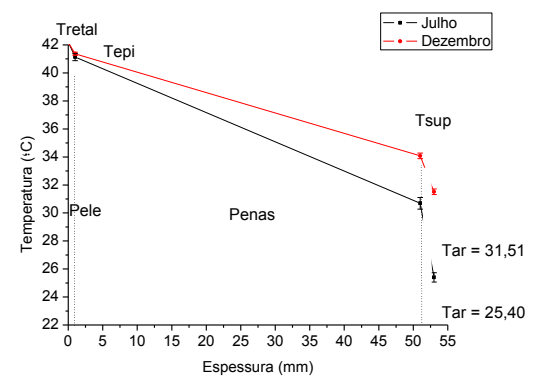
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 19 - Perfil de temperaturas corporais: temperatura retal (Tretal), temperatura da epiderme (Tepi), temperatura superficial das penas (Tsup) e temperatura do ar para frangos de corte da linhagem Cobb em função da espessura das camadas de pele e de penas – (a) com peso vivo até 500 g; (b) com peso vivo entre 501 e 1000 g; (c) com peso vivo entre 1001 g e 1500 g; (d) com peso vivo entre 1501 g e 2000 g; (e) com peso vivo entre 2001 g e 2500 g; (f) com peso vivo superior a 2501 g.

Observamos uma maior diferença entre as temperaturas retal e da epiderme para as aves com até 500 g e entre 501 g e 1000 g. Essa diferença diminui com o aumento do peso corporal dos animais, e observa-se uma menor diferença entre as temperaturas retal e da epiderme a partir de 1001 g de peso vivo. Essas temperaturas estão relacionadas com outras variáveis, como por exemplo, a produção de calor pelo metabolismo e o fluxo sanguíneo do interior do organismo até a superfície corporal.

A camada de penas aumenta com o ganho de peso vivo dos frangos. Portanto, se considerarmos que ocorra no interior da camada de penas a transferência de calor por condução, notamos que a resistência dessa camada aumenta com o aumento da espessura das penas, considerando sua resistência como a relação entre espessura e a condutividade, o que acarretou na diminuição das perdas de calor pelos mecanismos sensíveis por radiação de ondas longas e convecção na interface entre a superfície e o ar em ambos os meses. Esses resultados ainda foram significativamente menores durante o mês de Dezembro, pois além de uma maior resistência a transferência de calor na camada de penas e menor condutividade térmica da capa de cobertura, observamos um menor gradiente de temperatura entre a superfície dos frangos e o ar.

5 Conclusões

A metodologia desenvolvida para a mensuração contínua das temperaturas corporais de frangos de corte mostrou-se promissora, destacando-se a possibilidade de mensuração das aves expostas a condições não controladas de ambiente.

Frangos de corte apresentam diferenças nas temperaturas corporais quando expostos a condições ambientais distintas. Aves expostas a temperaturas do ar mais elevadas apresentam maior temperatura cloacal, da epiderme, da pata e do ar expirado, e os animais são mais sensíveis nos primeiros dias de vida, ou seja, quanto menor for o peso vivo.

Os frangos de corte diminuem a capacidade de perdas de calor por radiação de ondas longas e convecção com o aumento do peso vivo, com o aumento da camada de penas e com a condição ambiente ao qual estão expostas, que

consequentemente está relacionado a uma maior resistência da transferência de calor no interior da camada de penas, além de um menor gradiente de temperatura entre a superfície corporal e o ar.

Os frangos de corte aumentam proporcionalmente a perda de calor pelas regiões desprovidas de penas com o aumento do peso vivo, devido a dificuldade de perda na superfície corporal.

6 Implicações Futuras

Como continuidade deste trabalho, apontamos como passos futuros a modelagem das patas das aves considerando a perfusão sanguínea, que poderia acrescentar avanços significativos e nos responder com maior precisão a real contribuição das regiões desprovidas de penas para o equilíbrio térmico de frangos de corte, uma vez que essas regiões são altamente vascularizadas.

Adicionalmente, como esses parâmetros (perfusão sanguínea) não são descritos para animais de interesse zootécnico, no caso específico desse trabalho, para frangos de corte, torna-se necessário o desenvolvimento de metodologias para a mensuração da perfusão sanguínea.

7 Referências

AERTS, J-M.; BERCKMANS, D.; SAEVELS, P.; DECUYPERE, E.; BUYSE, J. Modelling the static and dynamic responses of total heat production of broiler chickens to step changes in air temperature and light intensity. **British Poultry Science**, 41: 651-659, 2000.

BRODY, S. **Bioenergetics and growth**. Reinhold, New York, 1 ed., 1945.

HARVEY, W R. **Least-squares analysis of data with unequal subclass numbers**. USDA publication no. 20-8. USDA, Beltville, 1960.

HAYNE, H. ROVEE-COLLIER, C.; GARGANO, D. Ambient Temperature Effects on Energetic Relations in Growing Chicks. **Physiology & Behavior**, V. 37, p. 203-212, 1986.

DA SILVA, R. G.; MAIA, A. S. C. Basic Physical Mechanisms. In:_____. (Ed.) 1. **Principles of animal biometeorology**. New York: Springer, 2013.

LACY, M.P.; CZARICK, M. Tunnel-ventilated broiler houses: Broiler performance operating cost. **Journal of Applied Poultry Research**. v.1, p. 104–109, 1992.

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

MALHEIROS, R.D.; MORAES, V.M.B.; BRUNO, L.D.G.; MALHEIROS, E.B.; FURLAN, R.L.; MACARI, M. Environmental temperature and cloacal and surface temperatures of broiler chicks in first week post-hatch. **Journal of Applied Poultry Science**, Stanford, v.9, p. 111-117, 2000.

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.

MITCHELL, H.H. The surface area of single comb white leghorn chickens. **Journal of Nutrition**, 2:437–449, 1930.

MORAES, V.M.B.; MALHEIROS, R.D.; BRUGGEMAN, V.; COLLIN, A.; TONA, K.; VAN AS, P.; ONAGBESAN, O.M.; BUYSE, J.; DECUYPERE, E.; MACARI, M. Effect of thermal conditioning during embryonic development on aspects of physiological responses of broilers to heat stress. **Journal of Thermal Biology**, 28:133-140, 2003.

NASCIMENTO, S.T. **Determinação do balanço de calor em frangos de corte por meio das temperaturas corporais**. 2010. Dissertação (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

NASCIMENTO, S.T.; SILVA, I.J.O.; MOURÃO, G.B.; CASTRO, A.C. Bands of respiratory rate and cloacal temperature for different broiler chicken strains. **Brazilian Journal of Animal Science**, 41, p.1318-1324, 2012.

NASCIMENTO, S.T.; SILVA, I.J.O.; MAIA, A.S.C.; CASTRO, A.C.; VIEIRA, F.M.C. Mean surface temperature prediction models for broiler chickens – a study of sensible heat flow. **International Journal of Biometeorology**, 58(2), p. 195-201, 2014.

ÖZKAN, S.; SMITH, W.K.; BATH, H.M. The development of thermal resistance of the feather coat in broilers with different feathering genotypes and feeding regimes, **British Poultry Science**, 43:3, 472-481, 2002.

RICHARDS, S.A. The significance of changes in the temperature of the skin and body core of the chicken in the regulation of heat loss. **Journal of Physiology**, Cambridge, v. 216, p. 1-10, 1971.

SALT, G.W. Respiratory Evaporation in Birds. *Biology Review*, 39, pp. 113-136, 1964.

SAS Institute. User's guide: statistics, 2nd edn. SAS Institute, Cary, 2009.

SHINDER, D.; RUSAL, M.; TANNY, J.; DRUYAN, S.; YAHAV, S. Thermoregulatory responses of chicks (*Gallus domesticus*) to low ambient temperatures at an early age. **Poultry Science**, Champaign, n. 86, p. 2200-2209, 2007.

STEKETEE, J. Spectral emissivity of skin and pericardium. **Physical Medical Biology**, 18:686–696, 1973.

TURNPENNY, J. R.; WATHES, C.M.; CLARK, J.A.; McARHTUR, A.J. Thermal balance of livestock, 2. Application of a parsimonious model. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.101, p. 29-52, 2000.

WATHES, C.M.; CLARK, J.A. Sensible heat transfer from the fowl: boundary-layer resistance of a modern fowl. **British Poultry Science**, 22:161–173, 1981.

WOLF, B.O.; WALSBERG, G.E. The role of the plumage in heat transfer processes in birds. **Integrative and Comparative Biology**, v. 40, p. 575-584, 2000.

WOLFENSON, D.; FREI, Y. F.; SNAPIR, N.; BERMAN, A. Heat stress effects on capillary blood flow and its redistribution in the laying hen. *Pflugers Arch.* 390:86–93, 1981.

YAHAV, S.; STRASCHNOW, A.; PLAVNIK, I.; HURWITZ, S. Blood system response of chickens to changes in environmental temperature. *Poultry Science*, 76: 627-633, 1997.

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

YALÇIN, S.; OZKAN, S.; TURKMUT, L.; SIEGEL, P. B. Responses to heat stress in commercial and local broiler stocks. I. Performance traits. **British Poultry Science**, v. 42, p. 149–152, 2001.

CHAPTER 3 – HEAT PRODUCTION AND EVAPORATION OF POULTRY

ABSTRACT – The respiratory system is important to the supply of oxygen to the body tissues and to supply the metabolic requirements and it is related with the metabolic heat production. Still there are not many non-invasive techniques under uncontrolled environmental conditions described in literature for the settlement of respiratory functions and heat production of broilers. Two methodologies were proposed: one to broiler chicks in the first days of life, to the measurement of heat production and total evaporation; and another to broiler chickens with live weight higher than 250 g, to the measurement of heat production and respiratory functions. Also for broiler chickens a hood was developed for the measurements. Two trials were executed: for broiler chicks, a 6 x 6 latin square was used, and 6 chicks were evaluated in six days of the rearing period in 6 different schedules. Chicks were evaluated inside a heat exchanger with a continuous flow of 150 mL min^{-1} . The metabolic heat production and total evaporation were measured. Both variables were influenced by the live weight of chicks, varying between the evaluation days ($P < 0.05$), but evaporation plays a minor role in the thermoregulation of these animals. In the second trial, for broilers, a 12 x 12 latin square was used, and 12 birds were evaluated in 12 days of the rearing period in 12 different schedules through the day. The metabolic heat production and respiratory functions were measured (tidal volume, minute volume, ventilation and respiratory rate). All the variables varied between the evaluation days, which were strongly influenced by the live weight of broilers ($P < 0.05$). The methodologies developed were effective to the measurement of metabolic heat production and evaporation of broiler chickens. The most valuable result of this work was the evidence of a reliable technique to measure respiratory evaporation of broiler chickens, considering the animals exposed to environmental conditions and not under controlled environments as respiratory chambers.

Keywords: indirect calorimetry, latent heat loss, metabolism, respiratory functions

1. Introduction

Farm raised broiler chickens have a very rapid growth rate, and undergo many physiological changes during the rearing period in a very short period of time (Nascimento et al., 2014). These physiological changes include heat production and the importance of latent heat losses to the maintenance of thermal equilibrium. As they grow, respiratory evaporation becomes significantly more important to thermoregulation, mainly in high temperatures.

The main function of the respiratory system is the gas exchange, carrying oxygen to the tissues and removing carbon dioxide from them and supplying the metabolic requirements of the animals (Powell, 2000). Furthermore the respiratory system is essential to the thermoregulation because the loss of water is a way to the maintenance of body temperature in conditions of high air temperature (Brackenbury et al., 1981).

When there is an increase of the air temperature, consequently it is observed a lower temperature gradient with the body temperature, and birds like broiler chickens, quails and turkeys raise their respiratory evaporation to increase the loss of heat to the environment. Thus, the increase of respiratory evaporation to the maintenance of body temperature results in an energy expenditure greater than the sensible flow, and consequently we can observe changes in the acid-basic equilibrium of blood and in the content of water of the body.

Heat production occurs by converting the chemical energy from food into heat (Schmidt-Nielsen, 2002; Randall et al., 2008). Studies about the thermal equilibrium of animals become more accurate when the rate of heat production is considered (energy per unit of time), with the animals exposed to different environmental conditions (Randall et al., 2008).

The amount of heat produced is intrinsically related to the oxygen consumption. Therefore, it is possible to measure heat production from oxygen consumed and carbon dioxide produced in respiration (Randall et al., 2008).

As described by Ferraninni (1988), indirect calorimetry is the method by which the type and rate of substrate utilization, and energy metabolism are estimated in vivo starting from gas exchange measurements. This technique provides unique

information, is noninvasive, and can be advantageously combined with other experimental methods to investigate numerous aspects, like thermogenesis.

Chambers, hoods and respiratory masks can be used in indirect calorimetry, but the use of masks possibilitates the measurement of animals in situations close to rearing conditions (Nienaber et al., 2008), which becomes an important alternative.

Some techniques are described in the literature to the settlement of the heat production and the respiratory evaporation of poultry, but all used in controlled environments (chambers). Two-compartment metabolic chambers are described to calculate separately the cutaneous and respiratory losses of small birds (Wolf & Walsberg, 1996). However, the measurements must be done in the dark to avoid the animals to shake inside the chamber (Hoffman et al., 2007). Other technique is the intubation of birds using an endotracheal tube connected to a pneumotachograph (Nightingale, 1977) but this can be considered an invasive technique. Crawford & Lasiewski (1968) described an equation to calculate the total evaporative heat loss of nonpasserine birds according to the body mass, but considering an air temperature of 25°C.

Masks can be developed to the settlement of heat production and respiratory evaporation and connected to a spirometer can be used to the study of respiratory functions of poultry in similar conditions of facilities (tidal volume, respiratory frequency, temperature of exhaled air). The use of masks coupled to gas analyzers enables the measurement of oxygen consumed and carbon dioxide produced, and it is possible to measure the metabolic heat production. Nascimento et al. (2011) developed a respiratory mask to the measurement of heat production of broiler chickens and laying hens in different environmental conditions linked to other physiological variables. But previous experiments showed that a mask isolating only the beak of broilers is not appropriate because it causes discomfort and the leakage of the expired air (Maia et al., 2014). Therefore we developed a plastic and transparent hood to envelop the head and neck of the birds.

The objectives of this study were:

- To develop a methodology to the measurement of metabolic heat production and total evaporation of broiler chicks in the first days of life;

- To develop a methodology to the measurement of metabolic heat production, respiratory evaporation and respiratory functions (tidal volume, ventilation, minute volume, respiratory rate) of broiler chickens from 9 days of life up to the slaughter age with the birds exposed to uncontrolled environmental conditions.

2. Materials and Methods

We developed two distinct methodologies to measure the metabolic heat production, the respiratory evaporation and the respiratory functions of poultry: one for broiler chicks in the first seven days of life; the other one, to broiler chickens with live weight higher than 200g (from nine days of life up to the slaughter age, 43 days of the rearing period).

2.1. Broiler Chicks

The metabolic heat production was obtained from six broiler chicks from the first until the sixth day of the rearing period. A latin square experimental design (6 chicks, 6 days and 6 schedules) was used (Table 1). Six day-old chicks from Cobb strain were evaluated in the first six days of the rearing period in six different schedules: from 8:00h to 09:40h; from 09:40h to 11:20h; from 11:20h to 13:00h; from 13:00h to 14:40h; from 14:40h to 16:20h; from 16:20h to 18:00h.

Table 1 – Latin square design used in the experimental procedure (6 chicks, 6 days in 6 schedules)

	Chick 1	Chick 2	Chick 3	Chick 4	Chick 5	Chick 6
Day 1	08:00h	16:20h	14:40h	11:20h	13:00h	09:40h
Day 2	16:20h	14:40h	13:00h	09:40h	11:20h	08:00h
Day 3	11:20h	09:40h	08:00h	14:40h	16:20h	13:00h
Day 4	09:40h	08:00h	16:20h	13:00h	14:40h	11:20h
Day 5	14:40h	13:00h	11:20h	08:00h	09:40h	16:20h
Day 6	13:00h	11:20h	09:40h	16:20h	08:00h	14:40h

The data collection was made using the System of Physiological Measurements from the Biometeorology Laboratory from the Faculty of Agrarian and Veterinary Sciences, FCAV/ UNESP, Brazil (Figure 1). The chicks were put inside a

stainless steel heat exchanger (Figure 2). The heat exchanger was 20 cm length; 10 cm height and 10 cm width, black painted on the inside and with acrylic on top, designed to equilibrate the temperature inside of it with the outside air temperature. To all the measurements we used a controlled inlet flow of 150 mL min^{-1} .

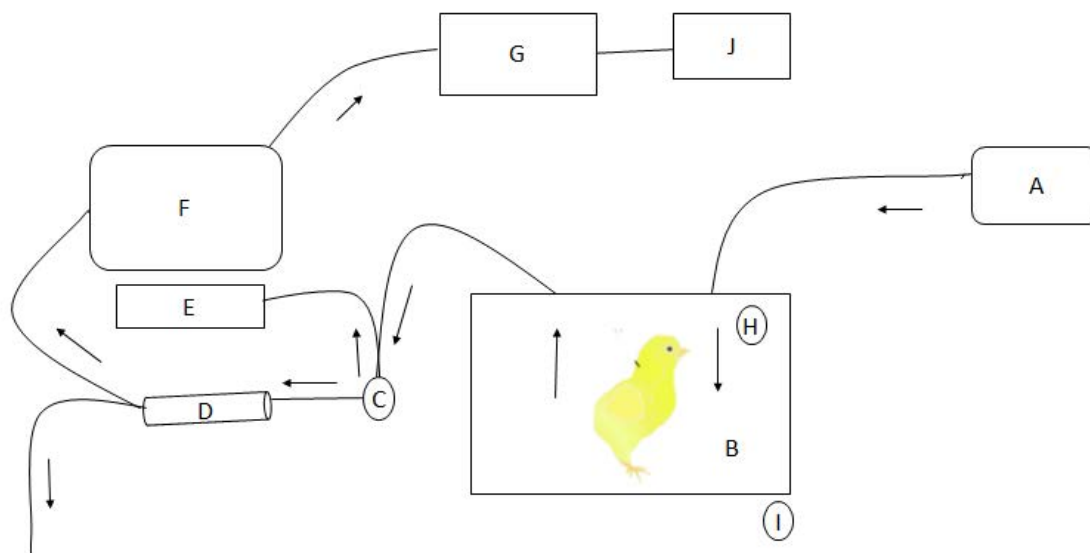


Figure 1 – System of Physiological Measurements for broiler chicks: A – flow meter and pump (SS4 Subsamplers, Sable Systems), and a flow of 150 mL min^{-1} was directed to the heat exchanger; B – heat exchanger (20 cm x 10 cm x 10 cm), made of stainless steel; C – flow head (MLT1L, ADInstruments); D – chamber to the mixing of gases; E – spirometer (ML141, ADInstruments); F – Oxygen, Carbon Dioxide and Water Vapour Analyzers (FMS-1201-05, Sable Systems); G – System of data acquisition (PowerLab 16/30 and LabChart Pro, ADInstruments); H – temperature sensor, measuring the temperature inside the heat exchanger (MLT415/AL, ADInstruments); I – temperature sensor, measuring the temperature outside the heat exchanger (MLT22/A, ADInstruments); J – Computer.

The temperature of the feathers was measured before placing the chicks inside the heat exchanger with an infrared thermometer (Model 568, Fluke). The heat exchanger was made of stainless steel and temperature sensors were used to control the temperature in the inside and in the outside. The air going out the heat exchanger was directed to a flow head, and from the flow head, a sample of the air was directed to a Spirometer and it was possible to measure the respiratory rate of birds (resp min^{-1}); other sample of the air was directed to a chamber to the mixing of gases, and from this to the gas analyzers, and the portions of oxygen, carbon dioxide

and water vapour in the exhaled air of chicks were continuously measured. Data was collected in a System of Data Acquisition, connected to a computer.

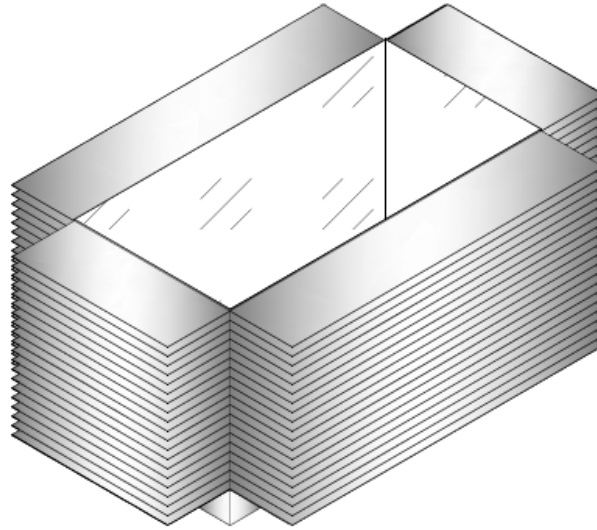


Figure 2 – Stainless steel heat exchanger developed for physiological measurements of broiler chicks

The metabolic heat production was obtained as a function of the portions of consumed oxygen and produced carbon dioxide, of the flow inside the heat exchanger and the surface area of chicks as proposed by Nascimento et al. (2011):

$$q_{\text{met}} = \frac{F\{(0.7633 \Delta O_2 QO_2) + (0.2358 \Delta CO_2 QCO_2)\}}{A_s}$$

where: q_{met} is the metabolic heat production, $W \text{ m}^{-2}$; F is the flow inside the heat exchanger (0.0025 L s^{-1}); ΔO_2 is the proportion from the difference between the atmospheric oxygen and the oxygen going out of the heat exchanger, dimensionless; QO_2 is the caloric coefficient of oxygen, $J \text{ L}^{-1}$; ΔCO_2 is the proportion from the difference between the carbon dioxide going out of the heat exchanger and the atmospheric carbon dioxide, dimensionless; QCO_2 is the caloric coefficient of carbon dioxide, $J \text{ L}^{-1}$. The caloric coefficient of oxygen and carbon dioxide depends on the respiratory quotient; A_s is the surface area of birds, $A_s = 0.000819 (LW^{0.705})$, m^2 (Mitchell, 1930), and LW is the live weight of chicks, g.

The total evaporation of the chicks (q_e , $W \text{ m}^{-2}$), composed by the sum of surface and respiratory evaporations, was calculated as:

$$q_e = \frac{\lambda \left(\frac{F}{1000} \right) (\varphi_C - \varphi_A)}{A_s}$$

where: λ is the latent heat of water vaporization, J g⁻¹; φ_A is the absolute humidity of the atmosphere, g m⁻³; φ_C is the absolute humidity of the air going out of the heat exchanger, g m⁻³. The absolute humidities are expressed as:

$$\varphi_A = \frac{2166.87 P_p \{T_{air}\}}{T_{air}}$$

where: $P_p \{T_{air}\}$ is the partial pressure of the water vapour at air temperature, kPa; T_{air} is the air temperature, K.

$$\varphi_E = \frac{2166.87 P_s \{T_{he}\}}{T_{he}}$$

where $P_s \{T_{he}\}$ is the saturation pressure of air going out of the heat exchanger, kPa; T_{he} (K) is the temperature inside the heat exchanger, K.

Data were analyzed by the least squares method (Harvey, 1960) using the Statistical Analysis System (SAS Institute, 2000) as a time optimization tool. The model was:

$$Y_{ijkl} = \mu + C_i + D_j + S_k + e_{ijk}$$

where: Y_{ijkl} is the l -th observation of the metabolic heat production and total evaporation of the i -th chick in the j -th day of the rearing period in the k -th schedule; C_i is the fixed effect of the i -th chick ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$); D_j is the fixed effect of the j -th day of the rearing period ($j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$); S_k is the fixed effect of the k -th schedule ($k = 1$, from 8:00h to 09:40h; 2 , from 09:40h to 11:20h; 3 , from 11:20h to 13:00h; 4 , from 13:00h to 14:40h; 5 , from 14:40h to 16:20h; 6 , from 16:20h to 18:00h); e_{ijk} is the random error.

The adjusted means of qualitative effects were compared by Tukey post-hoc test ($P \leq 0.05$), and for quantitative effects were used the deployment of the degrees of freedom in orthogonal polynomials ($P \leq 0.05$), as described by Sampaio (2002).

2.2 Broiler Chickens

The metabolic heat production and respiratory functions (ventilation, tidal volume, minute volume and respiratory rate) were obtained from 12 broiler chickens in twelve days of the rearing period (8th, 12th, 15th, 18th, 21st, 24th, 27th, 30th, 33rd, 36th, 39th and 42nd day of life). A latin square experimental design (12 chickens, 12 days and 12 schedules) was used (Table 2). Twelve broiler chickens from Cobb strain were evaluated in 12 days of the rearing period in 12 different schedules: from 8:00h to 08:50h; from 08:50h to 09:40h; from 09:40h to 10:30h; from 10:30h to 11:20h; from 11:20h to 12:10h; from 12:10h to 13:00h; from 13:00h to 13:50h; from 13:50h to 14:40h; from 14:40h to 15:30h; from 15:30h to 16:20h; from 16:20h to 17:10h; from 17:10h to 18:00h.

Table 2 – Latin square design used in the experimental procedure (12 chickens, (C), 12 days (D) in 12 schedules)

	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	C 7	C 8	C 9	C 10	C 11	C 12
D1	11:20	17:10	12:10	13:00	14:40	09:40	10:30	16:20	08:00	13:50	08:50	15:30
D2	12:10	13:00	08:00	13:50	15:30	10:30	11:20	17:10	08:50	14:40	09:40	16:20
D3	17:10	08:00	13:00	08:50	10:30	15:30	16:20	12:10	13:50	09:40	14:40	11:20
D4	16:20	12:10	17:10	08:00	09:40	14:40	15:30	11:20	13:00	08:50	13:50	10:30
D5	09:40	15:30	10:30	16:20	13:00	08:00	08:50	14:40	11:20	17:10	12:10	13:50
D6	10:30	16:20	11:20	17:10	13:50	08:50	09:40	15:30	12:10	13:00	08:00	14:40
D7	13:50	09:40	14:40	10:30	12:10	17:10	13:00	08:50	15:30	11:20	16:20	08:00
D8	14:40	10:30	15:30	11:20	08:00	13:00	13:50	09:40	16:20	12:10	17:10	08:50
D9	13:00	08:50	13:50	09:40	11:20	16:20	17:10	08:00	14:40	10:30	15:30	12:10
D10	08:50	14:40	09:40	15:30	17:10	12:10	08:00	13:50	10:30	16:20	11:20	13:00
D11	08:00	13:50	08:50	14:40	16:20	11:20	12:10	13:00	09:40	15:30	10:30	17:10
D12	15:30	11:20	16:20	12:10	08:50	13:50	14:40	10:30	17:10	08:00	13:00	09:40

For broiler chickens the respiratory evaporation plays a major role to the thermoregulation. Furthermore, the settlement of a non-invasive methodology to measure respiratory functions of chickens is fundamental. The data collection was made using the System of Physiological Measurements from the Biometeorology Laboratory from the Faculty of Agrarian and Veterinary Sciences, FCAV/ UNESP,

Brazil (Figure 3). Therefore, it is possible to measure continuously the respiratory gases (oxygen; carbon dioxide; water vapour) linked to the respiratory functions (tidal volume, minute volume, ventilation and respiratory rate). The temperature of the feathers was measured before the measurements with an infrared thermometer (Model 568, Fluke).

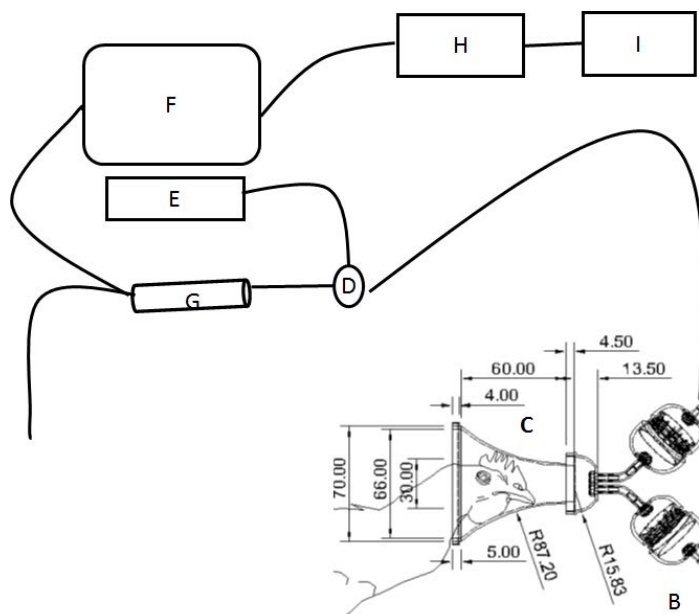


Figure 3 – System of Physiological Measurements for broiler chickens: B – valves to the inlet of atmospheric air and outlet of expired air of chickens; C – hood, made of plastic and sealed with a rubber sheet; D – flow head (MLT10L, ADInstruments); E – spirometer (ML141, ADInstruments); F – Oxygen, Carbon Dioxide and Water Vapour Analyzers (FMS-1201-05, Sable Systems); G – chamber to the mixing of gases; H – System of data acquisition (PowerLab 16/30 and LabChart Pro, ADInstruments); I –Computer

2.2.1 Development of the hood and valves

We developed a hood to the measurements of physiological variables in broiler chickens. But many tests and previous measurements had to be done until we have the ideal methodology to measure the consumed oxygen and the produced carbon dioxide, and consequently the metabolic heat production and the respiratory functions, tidal volume, respiratory flow, water vapour pressure and respiratory rate. The first attempt of a broiler respiratory mask was made to isolate only the beak of the birds (Figure 4). But after some tests, it was observed a leakage of air. These animals have a small tidal volume, so any leakage of air implies in considerable

losses to the respiratory measurements. Also, some broilers felt uncomfortable with the bands used to fasten the mask.



Figure 4 – First attempt of a broiler respiratory mask

Before knowing the problem with the measurements was the leakage of air, several valves were tested. Therefore, our preliminary tests suggest that a hood would be a better design for broilers that are one kg or larger in weight. Since the hood covers the head and neck of the bird, it should be made of plastic that is clear and transparent in order to permit vision (Figure 5). A rubber sheet was used to seal the hood around the neck.

Three valve sizes were tried with different diameters (2.0 mm, 10 mm and 26.6 mm). Broilers do not have diaphragms and their tidal volume is approximately 20 mL, consequently the smaller the valve, the greater the work that the broilers have to do to let the expired air to go through the system. After some tests, the valves with a diameter of 26.6 mm showed the best results.

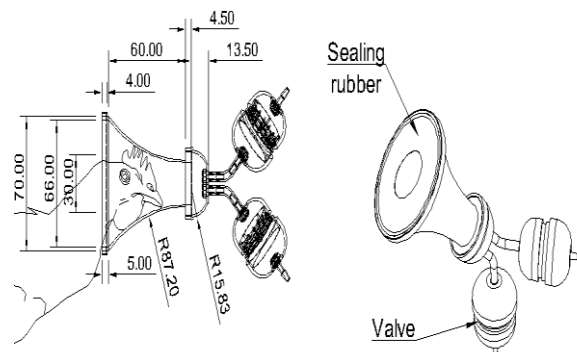


Figure 5 – Prototype of the hood developed for physiological measurements of broiler chickens

2.2.2 Physiological measurements

The metabolic heat production was obtained as a function of the portions of consumed oxygen and of produced carbon dioxide and of the respiratory ventilation as proposed by Nascimento et al. (2011):

$$q_{\text{met}} = \frac{V\{(0.7633 \Delta O_2 QO_2) + (0.2358 \Delta CO_2 QCO_2)\}}{A_s}$$

where: q_{met} is the metabolic heat production, $W \text{ m}^{-2}$; V is the ventilation of broilers, $L \text{ s}^{-1}$; ΔO_2 is the proportion from the difference between the atmospheric oxygen and the oxygen in the exhaled air of chickens, dimensionless; QO_2 is the caloric coefficient of oxygen, $J \text{ L}^{-1}$; ΔCO_2 is the proportion from the difference between the carbon dioxide in the exhaled air of chickens and the atmospheric carbon dioxide, dimensionless; QCO_2 is the caloric coefficient of carbon dioxide, $J \text{ L}^{-1}$. The caloric coefficient of oxygen and carbon dioxide depends on the respiratory quotient; A_s is the surface area of birds, $A_s = 0.000819 (LW^{0.705})$, m^2 (Mitchell, 1930), and LW is the live weight of chicks, g.

The respiratory evaporation of the chicks (q_R , $W \text{ m}^{-2}$) was calculated, expressed as:

$$q_R = \frac{\lambda \left(\frac{V}{1000} \right) (\varphi_E - \varphi_A)}{A_s}$$

where: λ is the latent heat of water vaporization, $J \text{ g}^{-1}$; V is the respiratory ventilation, $L \text{ s}^{-1}$; φ_E is the absolute humidity of the exhaled air, g m^{-3} , calculated as:

$$\varphi_E = \frac{2166.87 P_s \{T_{\text{exh}}\}}{T_{\text{exh}}}$$

where $P_s \{T_{\text{exh}}\}$ is the saturation pressure of the exhaled air, kPa; T_{exh} (K) is the temperature of the exhaled air, K, calculated as (Nascimento, 2014):

$$T_{\text{exh}} = 22.02 + 0.45 T_{\text{air}}$$

Data were analyzed by the least squares method (Harvey, 1960) using the Statistical Analysis System (SAS Institute, 2000) as a time optimization tool and the adjusted means were compared by Tukey post-hoc test ($P \leq 0.05$). The model was:

$$Y_{ijkl} = \mu + C_i + D_j + S_k + e_{ijk}$$

where: Y_{ijkl} is the l -th observation of the metabolic heat production, respiratory evaporation, ventilation, tidal volume, minute volume and respiratory rate of the i -th chicken in the j -th day of the rearing period in the k -th schedule; C_i is the fixed effect of the i -th chicken ($i = 1, \dots, 12$); D_j is the fixed effect of the j -th day of the rearing period ($j = 1, \dots, 12$); S_k is the fixed effect of the k -th schedule ($k = 1$, from 8:00h to 08:50h; 2, from 08:50h to 09:40h; 3, from 09:40h to 10:30h; 4, from 10:30h to 11:20h; 5, from 11:20h to 12:10h; 6, from 12:10h to 13:00h; 7, from 13:00h to 13:50h; 8, from 13:50h to 14:40h; 9, from 14:40h to 15:30h; 10, from 15:30h to 16:20h; 11, from 16:20h to 17:10h; 12, from 17:10h to 18:00h); e_{ijk} is the random error.

3 Results and Discussion

3.1 Broiler Chicks

The average air temperature inside the heat exchanger was 26.47°C ($\pm 0.15^\circ\text{C}$) to all the six days of the trial. The average of the temperature of the feathers was 31.90°C ($\pm 0.18^\circ\text{C}$). The averages of the temperature inside the heat exchanger, the temperature of the feathers and the live weight of the chicks during the six days of the trial are described in Table 3.

Table 3 – Averages ($\pm$ SE) of the temperature inside the heat exchanger (T_{he}), the temperature of the feathers (T_{feather}) and live weight of Cobb chicks in the first six days of the rearing period

Day of the rearing period	T_{he} ($^\circ\text{C}$)	T_{feather} ($^\circ\text{C}$)	Live weight (g)
1 st	26.60 $\pm$ 0.24	31.27 $\pm$ 0.40	55.0 $\pm$ 0.005
2 nd	25.97 $\pm$ 0.24	31.27 $\pm$ 0.40	63.5 $\pm$ 0.028
3 rd	26.13 $\pm$ 0.24	31.85 $\pm$ 0.40	76.8 $\pm$ 0.036
4 th	26.40 $\pm$ 0.24	31.92 $\pm$ 0.40	92.3 $\pm$ 0.058
5 th	27.72 $\pm$ 0.24	33.37 $\pm$ 0.40	109.5 $\pm$ 0.067
6 th	26.03 $\pm$ 0.24	31.75 $\pm$ 0.40	133.2 $\pm$ 0.103

The metabolic heat production and the total evaporation of the broiler chicks differed significantly only between the days ($P<0.05$), and no significant difference was observed for the birds and the schedules ($P>0.05$), as shown in Table 4.

Table 4 – Mean squares of the metabolic heat production (q_{met}) and total evaporation (q_e) of Cobb broiler chicks

Source of Variation	Degrees of freedom	q_{met}	q_e
Chicks	5	44.40 ^{NS}	0.19 ^{NS}
Schedules	5	24.20 ^{NS}	0.23 ^{NS}
Days	5	108.90*	3.62*
Residual	20	24.03	0.21
Contrast for days			
Linear	1	434.37*	2.90*
Quadratic	1	6.03 ^{NS}	11.78*
Cubic	1	2.28 ^{NS}	0.65 ^{NS}
R^2	-	0.66	0.83
Coefficient of Variation (CV)	-	7.82	19.88

*significant ($P\leq 0.05$); ^{NS} non-significant ($P>0.05$)

The metabolic heat production of the chicks was significantly lower in the first day of the rearing period ($P<0.05$) in comparison with all the other days (Figure 6), considering the amount of energy (J) per second (s) related to the body surface area (m^2). Collin et al. (2003) described for broiler chicks with an average live weight of 136 g a heat production of approximately 70 W m^{-2} . The birds were measured inside a respiratory cell in a controlled temperature of 29°C , considered by the authors as a thermoneutral condition. Similar results were found by Kita et al. (1993) for broilers from 71.4 g live weight (7th day of the rearing period) and with an average daily gain of 6.4 g considering a 10 days-trial. The authors measured an average heat production of 67.46 W m^{-2} and the birds were in individual metabolic cages with an average controlled temperature of 29°C .

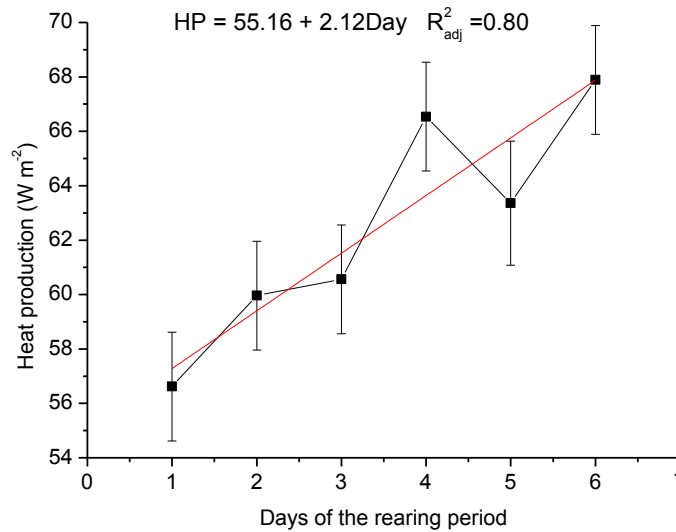


Figure 6 – Averages of the metabolic heat production (W m^{-2}) estimated by the least squares method of Cobb chicks in the first six days of the rearing period.

Although the total evaporation differed between the six days of the trial (Figure 7, $P < 0.05$), these losses indicate a small contribution of this mechanism to the maintenance of the animals' thermal equilibrium to all the days. The birds were measured in an average temperature of 26.5°C , lower than the thermoneutral condition of 29°C (Collin et al., 2003). Thus, they try to maintain their body temperature warm and to avoid losing heat to the environment, and they lose heat in the feather – air interface mostly by long wave radiation and convection. The mean respiratory evaporation was 2.29 W m^{-2} , concluding it is a small contribution to heat losses in comparison with an average heat production of 62.69 W m^{-2} .

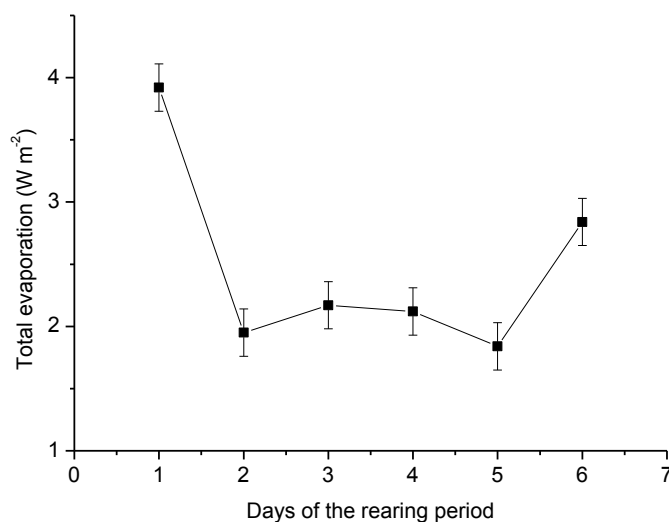


Figure 7 – Total evaporation of Cobb chicks in the first six days of the rearing period estimated by the least squares method.

3.2 Broiler Chickens

For broiler chickens the average air temperature during the 12-days trial was 24.08°C, and it varied between 23° and 26°C (Figure 8).

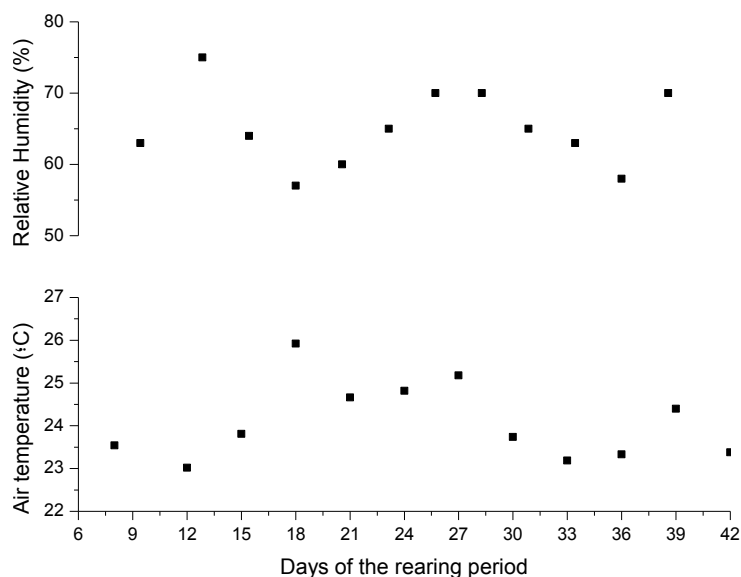


Figure 8 – Relative humidity and air temperature inside the climatic chamber estimated by the least squares method in the 12 days-trial for Cobb broiler chickens correspondent to the 8th, 12th, 15th, 18th, 21st, 24th, 27th, 30th, 33rd, 36th, 39th and 42nd day of the rearing period

The live weight of broilers during the trial increased linearly as expected (Figure 9) and the birds had live weight approximately 250 g in the 8th day of life and approximately 2800 g in the 42nd day of the rearing period.

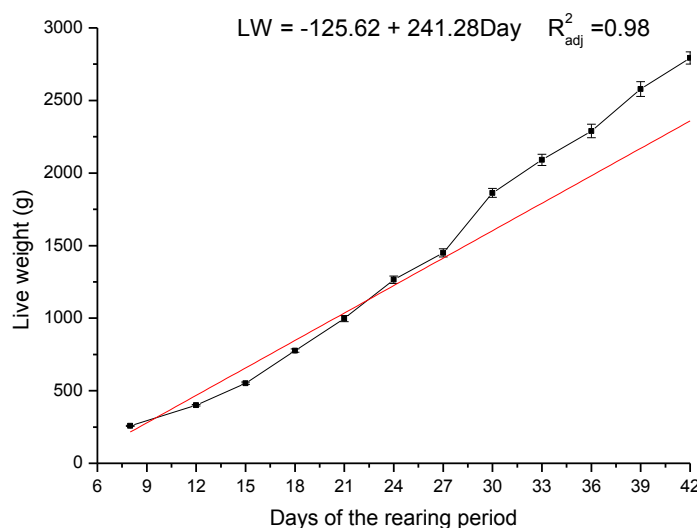


Figure 9 – Live weight (g) of Cobb broiler chickens estimated by the least squares method in the 12 days-trial for Cobb broiler chickens correspondent to the 8th, 12th, 15th, 18th, 21st, 24th, 27th, 30th, 33rd, 36th, 39th and 42nd day of the rearing period

The metabolic heat production, the respiratory evaporation and the respiratory functions of broiler chickens (ventilation, tidal volume, minute volume and respiratory rate) differed between the days ($P < 0.05$), which is intrinsically related to the live weight of broilers (Table 5).

Table 5 – Mean squares of the metabolic heat production (q_{met}), respiratory evaporation (q_R), ventilation (V), tidal volume (TV), minute volume (MV) and respiratory rate (RR) of Cobb broiler chickens

Source of Variation	Degrees of freedom	q_{met}	q_R	V	TV	MV	RR
Broilers	11	499.00 ^{NS}	0.20 ^{NS}	0.000005 ^{NS}	0.00007 ^{NS}	0.020 ^{NS}	423.24*
Schedules	11	316.60 ^{NS}	0.53*	0.000004 ^{NS}	0.00004 ^{NS}	0.014 ^{NS}	126.76*
Days	11	11858.3*	1.66*	0.0005*	0.0013*	1.88*	998.95*
Residual	110	333.34	0.15	0.000003	0.00003	0.013	97.64
R^2	-	0.81	0.60	0.94	0.82	0.94	0.62
Coefficient of Variation (CV)	-	16.10	23.59	16.16	39.34	16.16	16.92

*significant ($P \leq 0.05$); ^{NS} non-significant ($P > 0.05$)

The metabolic heat production increased from 8th to the 42nd day of the rearing period (Figure 10). The higher heat production was observed to broilers at 42 days of age, related to the higher live weight. If we consider the heat production as the amount of energy produced per time as a function of the surface body area, our results are in agreement to what was expected. At 42 days of age broilers had the higher live weight and surface area, the higher ventilation and the higher consumption of oxygen and production of carbon dioxide.

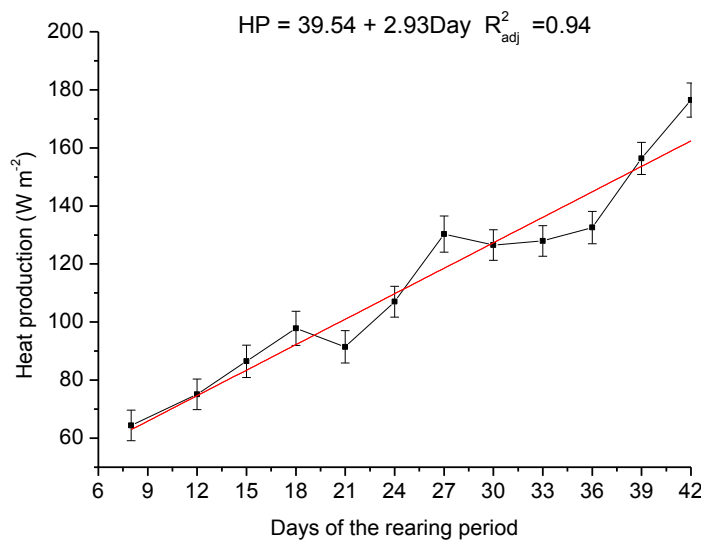


Figure 10 - Metabolic heat production (W m^{-2}) estimated by the least squares method of Cobb broiler chickens in the 12 days-trial for Cobb broiler chickens correspondent to the 8th, 12th, 15th, 18th, 21st, 24th, 27th, 30th, 33rd, 36th, 39th and 42nd day of the rearing period

Therefore, we can correlate the heat production with the live weight of chicks and broilers during all the trial (Figure 11). It was observed an increasing linear fit between live weight and heat production and it can be calculated by the following equation:

$$\text{HP} = 60.65 + 0.04\text{LW} \quad R_{adj}^2 = 0.79$$

where: HP is the heat production, W m^{-2} ; LW is the live weight, g.

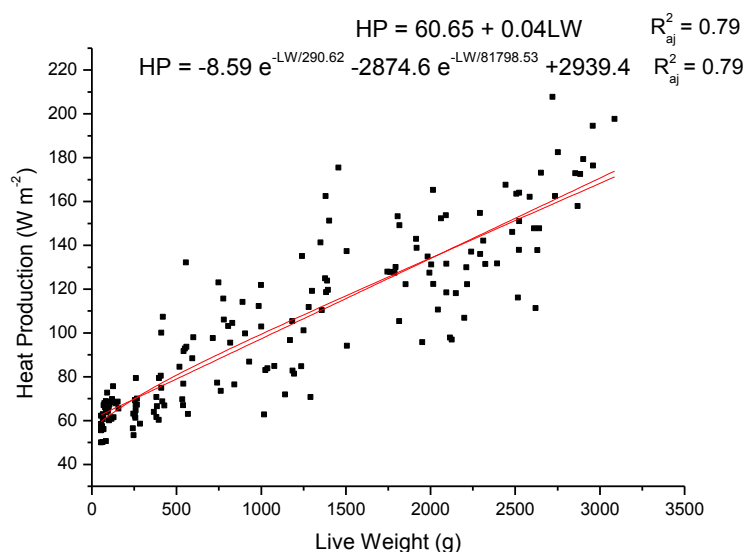


Figure 11 - Metabolic heat production (W m^{-2}) as a function of the live weight of Cobb broiler chickens

In the literature, there are some equations described to estimate the heat production of broiler chickens as a function of the live weight. Chepete & Xin (2002) proposed an equation for broilers fed ad libitum considering a thermoneutral environment, ranging between 19° and 30°C . But the equation is based on data collected up to 30 years before and this can underestimate or overvalue the metabolic heat production of broilers, mainly when we consider the intense animal breeding and better feed conversion and higher feed intake and performance of broilers in comparison with the birds reared 30 years ago.

When we compare the heat production of broilers based on Chepete & Xin (2002) equation with our data (Figure 12) it is possible to observe for broilers with live weight higher than 1200 g, the equation seems to underestimate the real heat production of the birds. Also, we can compare the heat production with the metabolizable energy of the diet. The metabolizable energy is the difference between the crude energy and the energy loss through feces, urine and gases from digestion, and it is directed to the maintenance or weight gain.

In the trial broilers were fed two different diets, one from 1 to 21 days of age and the other from 21 to 42 days of life, and the metabolizable energies were 3005 and 3150 kcal kg^{-1} , respectively. The daily feed intake was considered as described in the Cobb broiler management guide (Cobb, 2013).

First, it is possible to confirm that the equation proposed by Chepete & Xin (2002) really underestimates the heat production of broilers (Figure 13). Our results are close to the predicted by the feed intake, and one possible explanation why they are not the same results (comparing feed intake and indirect calorimetry) is because we did not measure feed intake of broilers, so it is just an approach. For broiler chicks (with live weight between 50 and 200 g) the heat production measured through indirect calorimetry is almost 50% smaller than what is expected. As we did not measure daily feed intake of chicks, this could result in this difference. Also, the chicks remained for 100 minutes inside the heat exchanger per day and this can have influenced their feed intake and, consequently, their heat production.

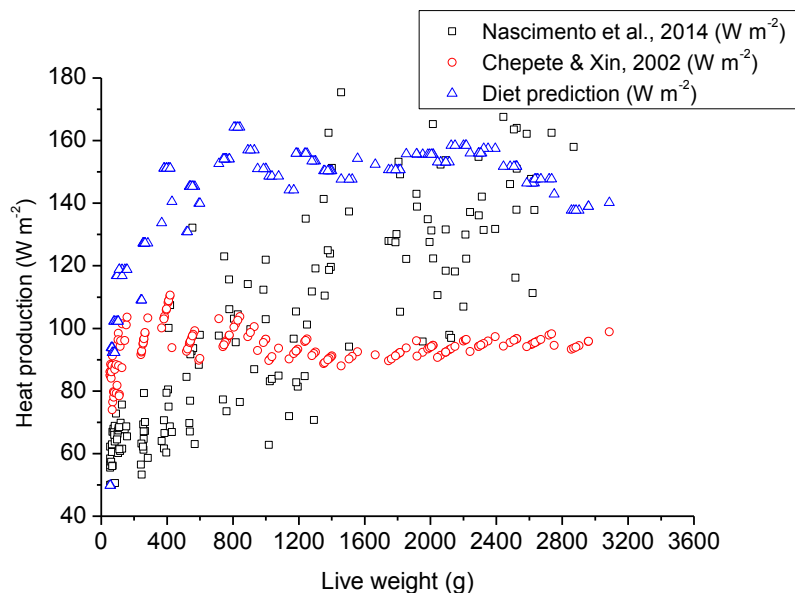


Figure 12 – Heat production (W m^{-2}) of Cobb broiler chickens measured in the trial (Nascimento et al., 2014) in comparison with literature data (Chepete & Xin) and predicted by the diet intake

The respiratory evaporation of broilers was small in comparison with the metabolic heat production (Figure 13) for all the 12 days of the trial, and this can be attributed to the air temperature of the climatic chamber (approximately 24°C) and consequently the no observation of broilers panting. However, these are great results, because they indicate our System developed for physiological measurements can be used to the assessment of this variable in birds under non-controlled environmental conditions and it is a non-invasive technique. Thus, the respiratory evaporation little contributed to the heat loss of broilers considering the air

temperature of the trial. Birds start panting during acute and severe hyperthermia (Barnas et al., 1981), which was not the case in our trial. Richards (1977) used gravimetry to measure the water loss of the hens and observed a latent heat loss between 5.1 and 43.4 W m⁻² for temperatures of 0°C and 38°C, respectively. For an air temperature of 25°C he observed a latent heat loss of 21.5 W m⁻², for laying hens with an average live weight of 2.28 kg.

Hutchinson (1954) *apud* Turnpenny (2000) described an almost linear relationship between body temperature and the evaporative heat flux from the respiratory tract of poultry considering a constant ambient vapour pressure. According to his data, when the vapour pressure rises, the evaporative heat flux at a given body temperature falls. But it is important to point out we measured only the respiratory evaporation, and these authors considered both cutaneous and respiratory latent heat losses. Even considering the cutaneous latent heat loss is small for domestic fowl, our results are only referred to the respiratory loss, being more precise than their previous data.

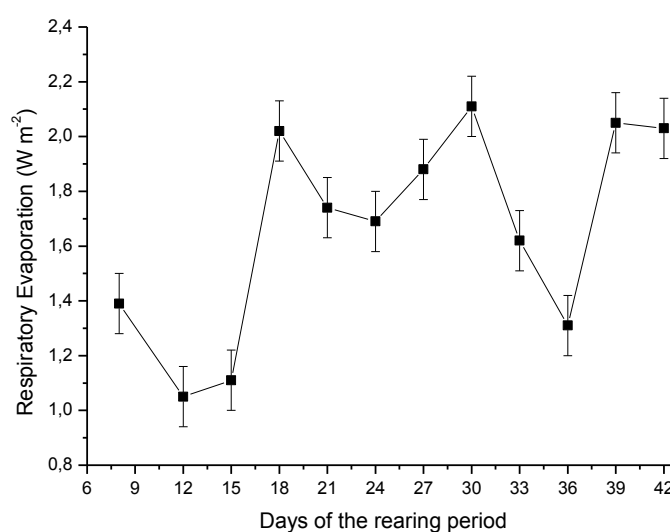


Figure 13 - Respiratory evaporation (W m⁻²) of Cobb broiler chickens estimated by the least squares method in the 12 days-trial for Cobb broiler chickens correspondent to the 8th, 12th, 15th, 18th, 21st, 24th, 27th, 30th, 33rd, 36th, 39th and 42nd day of the rearing period

Wolf & Walsberg (1996) described a two-compartment metabolic chamber to measure separately the cutaneous and respiratory losses of small birds. However,

the measurements must be done in the dark to avoid the animals to shake inside the chamber (Hoffman et al., 2007). Instead, our methodology can be used without any environmental changes and under uncontrolled conditions.

The ventilation, considered as the product of the volume per breath (Powell, 2000) showed a linear relationship with the live weight (Figure 14). Besides live weight, ventilation depends on the respiratory rate, and we can observe the higher ventilation in the 42nd day of the rearing period linked to the lower respiratory rate and the lower ventilation (8th day of life) with the highest respiratory rate (Figure 15). Ventilation, thus, can increase by deeper or faster respiratory rate (Powell, 2000).

The same was observed for minute volume (Figure 15): it increased in accordance to the live weight of broilers, in a linear relationship. King & Payne measured in 1964 a minute volume of approximately 800 mL min⁻¹ for male broilers with an average live weight of 4 kg, using a float spirometer coupled to a kymograph. The average respiratory rate was 17 resp min⁻¹.

Kassim & Sykes (1982) used whole body pletismography to determine tidal volume, ventilation and minute volume of laying hens with 2.2 kg of live weight under control (20°C) and exposed to hot climates (30°C, 35°C and 40°C). The authors described a minute volume of 574 mL min⁻¹ at 20°C of air temperature, with an average of 23 resp min⁻¹ and an average tidal volume of 25.6 mL resp⁻¹. They highlighted an interesting discussion about the different techniques to the measurement of respiratory functions of birds: the cannulation of the trachea connected to spirometers, valves or pneumotachographs tends to diminish the normal rate of panting and increases tidal volume by imposing a resistance and by creating an abnormally high dead-space volume. Besides, animals must be anesthetized. This observation can also be used to explain the greater heat losses through respiration than expected; the body plethysmograph can measure respiratory volumes without any interference with the respiratory tract. But the pletismograph involves the restraint of birds inside an enclosed box that according to Kassim & Sykes (1982) would produce a different microclimate from that of the climate chamber since air movement would be reduced and humidity increased. Therefore, our methodology can be useful as an attempt to solve these issues: with the hood,

the broilers do not need to be anesthetized and can be measured without changing microclimate conditions, and we can apply it in different environmental conditions.

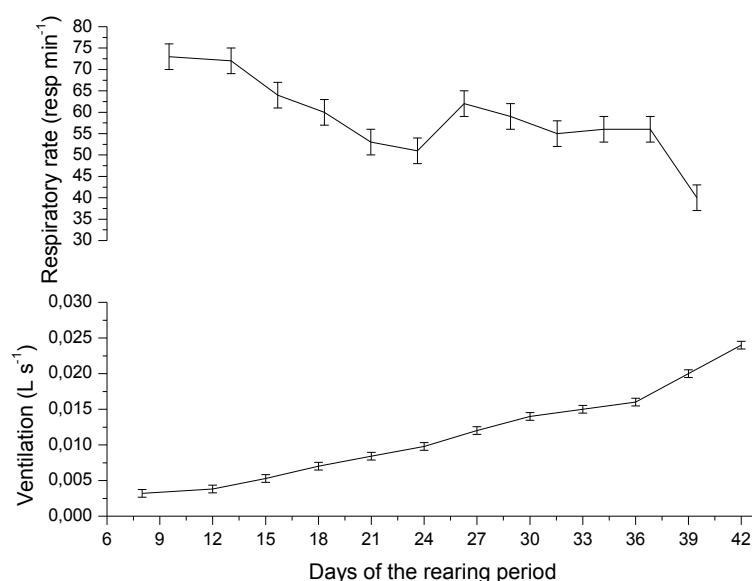


Figure 14 - Respiratory Rate and Ventilation of Cobb broilers in the 12 days-trial for Cobb broiler chickens correspondent to the 8th, 12th, 15th, 18th, 21st, 24th, 27th, 30th, 33rd, 36th, 39th and 42nd day of the rearing period

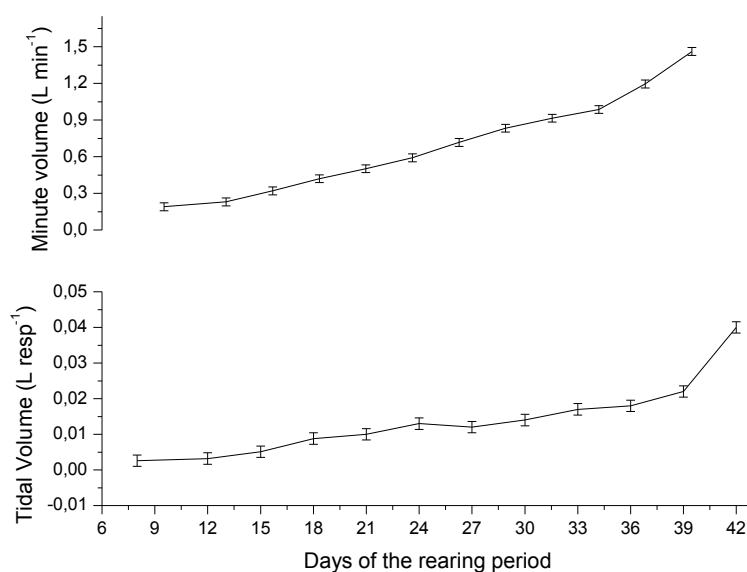


Figure 15 - Minute ventilation of Cobb broilers in the 8th, 12nd, 15th and 18th day of the rearing period

Frappel et al. (2001) reconstructed allometric equations for respiratory variables in birds for several species. A comparison with their equations (Figure 16) showed our results for minute volume was higher than the predicted as a function of

the live weight. But this variable is dependent on the respiratory rate of broilers. For tidal volume, the results of this trial were lower than the predicted by the authors. However, it is important to consider the equation of Frappel et al. (2001) was proposed based on a variety of measuring techniques, including mask pneumotachography and volumetric and barometric plethysmography. The studies also varied in measurement conditions, for example, hour, illumination level and nutritional state.

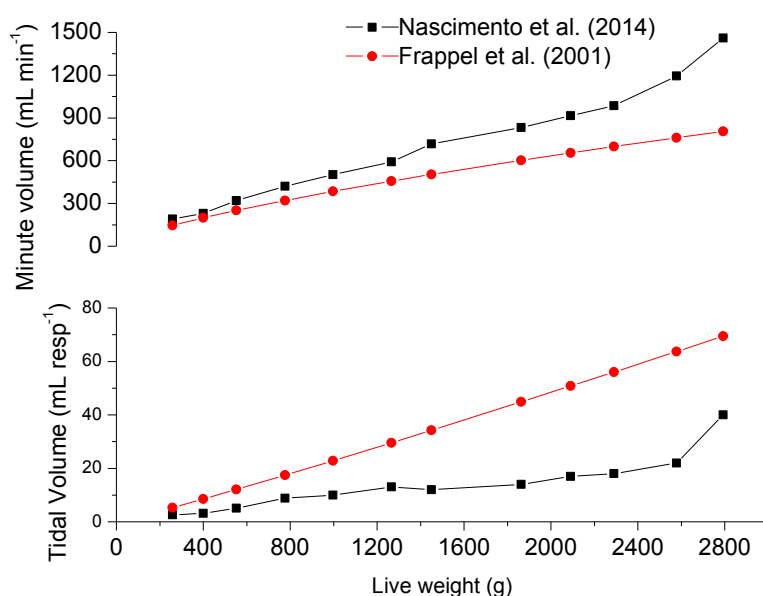


Figure 16 – Minute volume and tidal volume of Cobb broiler chickens as a function of the live weight

The tidal volume depends on the respiratory rate (Figure 17). Therefore, the higher the respiratory rate, lower is the tidal volume. Kassim & Sykes (1982) described a similar relationship between these two variables for laying hens.

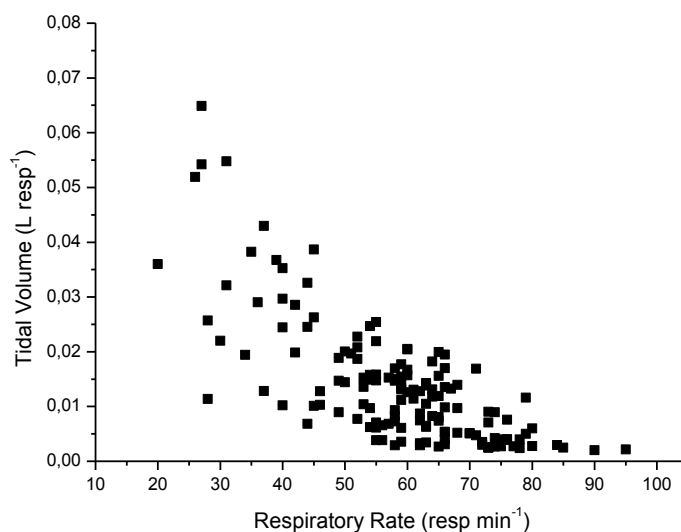


Figure 17 – Tidal volume of Cobb broiler chickens as a function of the respiratory rate

4 Conclusions

The methodologies developed were effective to the measurement of metabolic heat production and evaporation of broiler chickens.

The heat production of broiler chicks increases in accordance with the live weight and total evaporation plays a minor role in the thermoregulation.

For broiler chickens, heat production and respiratory functions are closely related to the live weight. The use of a hood during the measurements is more appropriate than a mask to avoid discomfort and leakage of air.

We can consider as the most valuable result of our work the evidence of a reliable technique to measure respiratory evaporation of broiler chickens, considering the animals exposed to environmental conditions and not under controlled environments as respiratory chambers.

5 References

BARNAS, G.M.; HEMPLEMAN, S.C.; HARINATH, P.; BAPTISTE, J.W. Respiratory system mechanical behavior in the chicken. **Respiratory Physiology**, v. 84, p. 145-157, 1991.

BRACKENBURY, J.H.; GLEESON, M.; AVERY, P. Respiration in exercising fowl. I. oxygen consumption, respiratory rate and respired gases. **Journal of Experimental Biology**, v. 93, p. 317-325, 1981.

CHEPETE, J.H.; XIN, H. Heat and moisture production of poultry and their housing systems: Literature review. **ASHRAE Transactions**, v. 108, 2: 448-466, 2002.

COBB-VANTRESS: Broiler Management Guide. Disponível em: <<http://cobb-vantress.com/docs/default-source/guides/cobb-broiler-management-guide---english.pdf>>. Acesso em 10 de outubro de 2014.

COLLIN, A.; BUYSE, J.; VAN AS, P.; DARRAS, V.M.; MALHEIROS, R.D.; MORAES, V.M.B.; REYNS, G.E.; TAOUIS, M.; DECUYPERE, E. Cold-induced enhancement of avian uncoupling protein expression, heat production, and triiodothyronine concentrations in broiler chicks. **General and Comparative Endocrinology**, 130, p. 70-77, 2003.

CRAWFORD Jr., E.C.; LASIEWSKI, R.C. Oxygen Consumption and Respiratory Evaporation of the Emu and Rhea. **The Condor**, V. 70, 4: 333-339, 1968.

FERRANINNI, E. The Theoretical Bases of Indirect Calorimetry: A Review. **Metabolism**, v. 37, 3: 287-301, 1988.

FRAPPELL, P.B.; HINDS, D.S.; BOGGS, D.F. Scaling of Respiratory Variables and the Breathing Pattern in Birds: An Allometric and Phylogenetic Approach. **Physiological and Biochemical Zoology**, v.74, 1:75–89, 2001.

HARVEY, W R. **Least-squares analysis of data with unequal subclass numbers**. USDA publication no. 20-8. USDA, Beltville, 1960.

HOFFMAN, T.C.M.; WALSBERG, G.E.; DENARDO, D.F. Cloacal evaporation: n important and previously undescribed mechanism for avian thermoregulation. **Journal of Experimental Biology**, v.210, p.741-749, 2007.

KASSIM, H.; SYKES, A.H. The respiratory responses of the fowl to hot climates. **Journal of Experimental Biology**, v.97, p. 301-309, 1982.

KING, A.S.; PAYNE, D.C. Normal breathing and the effects of posture in *Gallus domesticus*. **Journal of Physiology**, v. 174, p. 340-34, 1964.

KITA, K.; MURAMATSU, T.; OKUMURA, J. Effect of dietary protein and energy intakes on whole-body protein turnover and its contribution to heat production in chicks. **British Journal of Nutrition**, v. 69, p. 681-688, 1993.

MAIA, A.S.C.; GEBREMEDHIN, K.G.; NASCIMENTO, S. T.; CARVALHO, M.D.; SIMAO, B.R.; CAMERRO, L.Z.; CHIQUITELLI NETO, M. Development of Facial Masks for Indirect Calorimetric Studies for Livestock. In: 2014 ASABE and CSBE/SCGAB Annual International Meeting, 2014, Montreal.

MITCHELL, H.H. The surface area of single comb white leghorn chickens. **Journal of Nutrition**, 2:437–449, 1930.

NASCIMENTO S.T., MAIA A.S.C., LEITE L.G. Respiratory flow and metabolism settlement in poultry. In: 19º International Congress of Biometeorology, Auckland, New Zealand. 2011.

NASCIMENTO, S.T.; SILVA, I.J.O.; MAIA, A.S.C.; CASTRO, A.C.; VIEIRA, F.M.C. Mean surface temperature prediction models for broiler chickens – a study of sensible heat flow. **International Journal of Biometeorology**, 58(2), p. 195-201, 2014a.

NIENABER, J.A.; DESHAZER, J.A.; XIN, H.; HILLMAN, P.E.; YEN, J.T.; FERRELL, C.F. Measuring energetics of biological processes. In: Livestock energetics and thermal environmental management. ASABE, St. Joseph, MI, p.73-112, 2009.

NIGHTINGALE, T.E. Comparison of cardiopulmonary parameters in awake and anesthetized chickens. **Poultry Science**, v.56, p. 147-153, 1977.

POWELL. F.L. Respiration. In: **Sturkie's Avian Physiology**, 5 ed., G. Casey Whittow (editor). Elsevier, Amsterdam, p. 233-263, 2000.

RANDALL, D.; BURGGREN, W.; FRENCH, K. **Eckert, fisiologia animal: mecanismos e adaptações**. Rio de Janeiro, Guanabara Koogan, 4 ed., 729 p., 2008.

RICHARDS, S.A. The influence of loss of plumage on temperature regulation in laying hens. **Journal of Agricultural Science**, v. 89, p. 393-398, 1977.

SAS Institute. User's guide: statistics, 2nd edn. SAS Institute, Cary, 2009.

SCHMIDT-NIELSEN, K. S. **Fisiologia Animal**. Santos, 5ª ed. Ed. Santos, 2002.

TURNPENNY, J. R.; WATHES, C.M.; CLARK, J.A.; McARTHUR, A.J. Thermal balance of livestock, 2. Application of a parsimonious model. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.101, p. 29-52, 2000.

WOLF, B.O.; WALSBURG, G.E. Respiratory and cutaneous evaporative water loss at high environmental temperatures in a small bird. **The Journal of Experimental Biology**, v. 199, p. 451-457, 1996.

CHAPTER 4 - A MODEL OF HEAT TRANSFER THROUGH FEATHER LAYERS OF BROILER CHICKENS

ABSTRACT – Broilers acquire thermoregulatory maturity at approximately ten days post-hatching and undergo physiological changes during the rearing period. During this process, the birds have high sensitivity to low air temperatures especially at early age. Many times, supplemental radiant heat is provided to keep the body temperature of the chicks warm. As they grow, their sensitivity changes to high air temperatures coupled to an increase in feathering, and it is necessary to provide cooling systems inside facilities to keep the thermal equilibrium. However, it would be necessary to adjust the operation of the heating and cooling sources based on the changing physiological responses of the broilers. Therefore, it becomes imperative to develop a mechanistic model that accounts for environmental conditions and physiological responses of the broilers to allow monitoring these processes. Also, it is important to determine the supplemental heat necessary to keep chicks warm under different air temperatures. This study discusses the development of a mathematical model that predicts skin and feather temperatures. The model considers two layers: (1) skin, and (2) feathers. The heat transfer through the fat and skin layers is a one-dimensional steady-state condition where heat flows by conduction from the core to the skin surface. The model includes metabolic heat generation and assumes the core temperature to be the same as arterial blood temperature. At the feather-air interface, heat is lost to the environment by convection and long-wave radiation. Heat generation inside the plumage is included due to the radiant heat source provided. The model was validated against experimental data collected from twenty four Cobb broiler chickens during all the rearing period. The feather temperatures estimated by the model were very close with measured values within 95% confidence interval. This model is a good predictor for the feather coat temperature. The model can be used as a decision tool to determine the supplemental heat required by young chicks for optimum growth and to determine the ideal air temperature and improvement of cooling systems for broilers to avoid heat stress.

Keywords: Mathematical modeling, Poultry, Bio-heat equation

1. Introduction

Species of birds present different degrees of functional maturity at hatching, mainly related to the cold defense mechanisms (Ricklefs, 1979). Thus, the avian species are classified as precocial, semi-precocial and altricial, which indicate a higher degree of chicks independence at hatching, respectively. The independence of chicks can be observed by the presence of feathers and the ability to thermoregulate and feed themselves (Hill, 1993).

Broiler chickens (*Gallus gallus domesticus*) are classified as precocial birds because of the presence of insulation, shivering and behavioral responses to cold stress more advanced in comparison with altricial neonates (Choi et al., 1993).

Therefore, broiler chicks can thermoregulate under mild cold stress situations, but using a higher proportion of crude energy to the maintenance of body temperature and consequently decreasing growth (DeShazer et al., 2009).

Farm raised broiler chickens usually have a very rapid growth rate, and reach slaughter weight at around six weeks of life. Therefore, they undergo many physiological changes during the rearing period in a very short period of time (Nascimento et al., 2014).

Broilers increase their body weight approximately five times in the first days of life, from around 40g post-hatching to 200g in the eighth day of the rearing period; then, broilers increase their body weight more than ten times until slaughter age (around 42 days of life), with an average live weight of 2500 g (Cobb®, 2012). This significant weight increase at early age can be correlated to metabolic heat production. At post hatching it is expected a higher metabolic heat production in comparison with the other days of the rearing period, because of a higher proportion in body area and volume (Da Silva, 2000).

The feather of birds is mainly to protect the skin (Leeson & Walsh, 2004) and to avoid an excessive heat flow by convection and radiation from the skin surface to the environment (Wolf & Walsberg, 2000). The feather structure changes throughout the rearing period; day-old chicks present feathers (named also as plumules) and a “fluffy” structure that provides insulation (Leeson & Walsh, 2004).

Broilers acquire the thermoregulatory maturity over the first days after hatch (Dawson & Whittow, 2000), at approximately 10 days post-hatching (Moraes et al., 2003) and have a high sensitivity to low temperatures at early age. Many times, supplemental radiant heat is provided using lamps, gas hoods, radiant heaters, etc. to keep the body temperature of the chicks warm (Big Dutchman®, 2014). However, it would be necessary to adjust the operation of the heating source based on the changing physiological responses of the broilers.

As broilers grow, their sensitivity changes to high air temperatures, and it is necessary the actuation of climatisation systems, by the use of cooling fans, fogging systems and evaporative cooling.

Several investigators reported empirical and mechanistic models (Bouchillon et al., 1970; Wathes & Clark, 1981; Kettlewell & Moran, 1992; Turnpenny et al., 2000a; Turnpenny et al., 2000b; Yanagi Jr. et al., 2001) that predict the thermal equilibrium of broiler chickens and laying hens, but these models lack sensitivity analysis for chicks. Turnpenny et al. (2000b) conclude that an important limitation to the validation of the models is the scarce experimental data available on partition of heat loss, metabolic heat production and body insulation, most of them obtained over 40 years ago.

Yanagi Jr. et al. (2001) developed a mechanistic transient mathematical model to study the rise on body temperature of laying hens after a 50 minutes exposure to a hot environmental condition and the effectiveness of wetting body surface, but it considers the radiant heat exchange between bird and environment as negligible.

Wathes & Clark (1981) studied the sensible heat flow by convection and long-wave radiation of broilers during the rearing period. Although their discussion evolves thermal insulation and the clustering behavior of birds, the metabolic heat production and its partitioning by heat losses is not considered.

Therefore, it becomes imperative to develop a mechanistic model that accounts for environmental conditions and physiological responses of the broilers chicks and chickens to allow monitoring the heating process post-hatching and the cooling systems.

2.Objectives

The objectives of this study were:

- 1) To develop a mechanistic model that predicts the temperature at the skin surface and the temperature profile through the feathers of broiler chickens during all the rearing period;
- 2) To validate the model against experimental values;
- 3) To estimate the supplemental heat necessary to maintain body temperature of chicks in the first days of life;
- 4) To estimate the skin and surface temperatures of broilers under different environmental conditions.

3. Material and methods

3.1 Assumptions

The model (Figure 1) considers two layers: (1) skin, and (2) feathers. The assumptions of the model are:

- 1) The heat transfer through the skin layer is a one-dimensional steady-state condition where heat flows by conduction from the core to the skin surface.
- 2) The model includes metabolic heat production and assumes the core temperature to be the same as arterial blood temperature.
- 3) At the feather-air interface heat is lost to the environment by convection and long-wave radiation.
- 4) Heat generation inside the feather is included due to the radiant heat source provided.

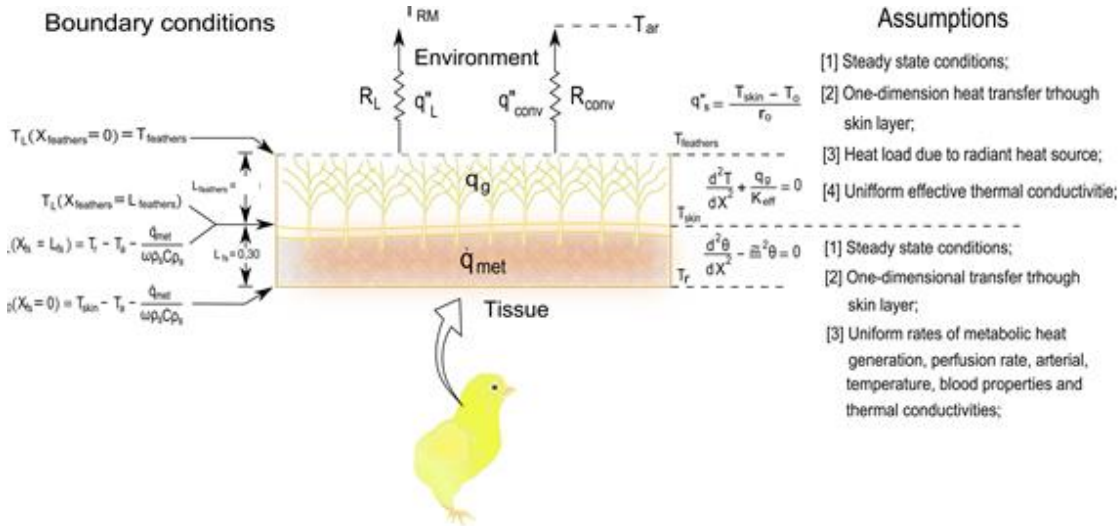


Figure 1 – Assumptions of the model

3.2 Analytical Model Development

Two mediums were considered in this model: skin and air-feather layer. In the skin layer, the bio-heat equation (Pennes, 1948) was solved considering the following assumptions: steady state, one-dimensional heat transfer through skin layer, and uniform rate of metabolic heat generation ($\dot{q}_{met}$, W m^{-3}), blood perfusion ratio, arterial temperature, blood properties, and thermal conductivity.

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{\dot{q}_{met} + \omega \rho_b c_b (T_{art} - T)}{k_s} = 0 \quad (1)$$

where: $\omega \rho_b c_b (T_{art} - T)$ is a heat source due to a perfusion process. Pennes (1948) proposed the term perfusion by supposing that blood flowing in the capillaries within any small tissue volume enters at arterial temperature (T_{art} , °C) and comes out at local tissue temperature (T , °C); ω ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-3}$) is the perfusion rate, that is the flow of a volume of blood through the tissue; ρ_b (kg m^{-3}) and c_b ($\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$) are the density and the specific heat of blood, respectively. In order to simplify this equation, we can define the excess temperature, θ , as:

$$\theta = T - T_{art} - \frac{\dot{q}_{met}}{\omega \rho_b c_b} \quad (2)$$

where: $\tilde{m}^2 = (\omega \rho_b c_b) / k_s$. If T_{art} , $\dot{q}_{met}$ and ω are constant values, equation 1 can be rewritten as:

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - \tilde{m}^2\theta = 0 \quad (3)$$

The equation 3 is a second order ordinary differential equation, linear and homogeneous with constant coefficients and the following general solution is:

$$\theta(x_s) = C_1 e^{\tilde{m}x_s} + C_2 e^{-\tilde{m}x_s} \quad (4)$$

where: x_s is the spatial coordinate inside the skin layer, that was defined between 0 and L_s (thickness of the skin layer, in meters).

In order to determine constants C_1 and C_2 in equation 4 and then finding a solution, two appropriate boundary conditions were established. For the present case and considering an excess temperature θ , the boundary conditions were:

$$\begin{aligned} [1] \quad \theta(x_s = 0) &\rightarrow \theta_c = T_R - T_{art} - \frac{\dot{q}_{met}}{\omega \rho_b c_b} \\ [2] \quad \theta(x_s = L_s) &\rightarrow \theta_L = T_S - T_{art} - \frac{\dot{q}_{met}}{\omega \rho_b c_b} \end{aligned}$$

where: $x_s = 0$ corresponds to the boundary between the body and skin layer; $x_s = L_s$ corresponds to the boundary between the skin and air-coat layer.

In this case T_R and T_S ($^{\circ}\text{C}$) are the rectal and skin surface temperatures. After some manipulation we have finally the temperature distribution within skin layer as:

$$\theta(x_s) = \theta_c \frac{(\theta_L / \theta_c) \sinh \tilde{m}x_s + \sinh \tilde{m}(L_s - x_s)}{\sinh \tilde{m}L_s} \quad (5)$$

The heat flux (W m^{-2}) from the skin to the air-coat layer can be evaluated by applying Fourier's Law under $x_s = L_s$, then:

$$q_s'' \Big|_{x_s = L_s} = -k_s \frac{d\theta}{dx} \Big|_{x_s = L_s} = -k_s \theta_c \frac{d}{dx} \left[\frac{(\theta_L / \theta_c) \sinh \tilde{m}x_s + \sinh \tilde{m}(L_s - x_s)}{\sinh \tilde{m}L_s} \right]$$

The respective derivative with respect to x_s leaves to:

$$q_s'' = -k_s \tilde{m} \theta_c \left[\frac{(\theta_L / \theta_c) \cosh \tilde{m} L_s - 1}{\sinh \tilde{m} L_s} \right] \quad (6)$$

In the air-feather layer, the heat equation with an internal heat source was solved considering the following assumptions: steady state, one-dimensional heat transfer through air-feather layer, heat load due to radiant heat source, uniform thermal conductivity, and heat exchange by convection and radiation in the interface of air-coat layer and environment.

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{\dot{q}_g}{k_{eff}} = 0 \quad (7)$$

where: $\dot{q}_g$ ($W \text{ m}^{-3}$) is the total volumetric heat absorption; k_{eff} ($W \text{ m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) is the effective thermal conductivity of air-feather layer that was determined according to Nascimento (2014), considering birds as spheres, steady state, one-dimensional heat transfer, no heat generation inside the feather layer and the flux is due to conduction and in the air-feather interface the heat flux occurs by long wave radiation and convection. Thus, we consider two radius in the body of broilers: one from the center of the body to the skin (r_1); one from the center of the body to the feather layer (r_2). The difference between r_1 e r_2 is the feather coat thickness.

$$k_{eff} = \frac{(T_f - T_o) r_2 (r_2 - r_1)}{r_2 r_1 (T_s - T_f)} \quad (8)$$

where: T_f is the feather temperature, K; and T_o is the operative temperature, K.

The general solution of the equation 7 is the following:

$$T(x_f) = -\frac{\dot{q}_g x_f^2}{2k_{eff}} + C_1 x_f + C_2 \quad (9)$$

In order to determine constants C_1 and C_2 in equation 9 and then finding a solution, two appropriate boundary conditions were established:

$$[1] T(x_f = 0) = T_s$$

$$[2] T(x_f = L_f) = T_f$$

where: $x_f = L_f$ corresponds to the boundary between the air-feather layer and environment; $x_f = 0$ corresponds to the boundary between the skin and air-feather layer. In this case T_f ($^{\circ}\text{C}$) is air-feather interface temperature. After some manipulation we have finally the temperature distribution within air-coat layer as:

$$T(x_f) = -\frac{\dot{q}_g x_f^2}{2k_{eff}} + \frac{\dot{q}_g L_f x_f}{2k_{eff}} + \frac{x_f}{L_f} (T_f - T_s) + T_s \quad (10)$$

The heat flux (W m^{-2}) from the air-feather layer to environment can be evaluated by applying Fourier's Law under $x_f = L_f$, then:

$$q_f'' \Big|_{x_f = L_f} = -k_{eff} \frac{dT}{dx} \Big|_{x_f = L_f} = -k_{eff} \frac{d}{dx} \left[-\frac{\dot{q}_g x_f^2}{2k_{eff}} + \frac{\dot{q}_g L_f x_f}{2k_{eff}} + \frac{x_f}{L_f} (T_f - T_s) + T_s \right]$$

The respective derivative with respect to x_f leaves to:

$$q_f'' = \frac{k_{eff}}{L_f} (T_s - T_f) + 0.5 \dot{q}_g L_f \quad (11)$$

For the air-feather interface ($x_f = 0$), we assumed that there is a heat flux (W m^{-2}), through long-wave radiation and convection, while conduction was considered negligible

$$q_{c-r}'' = \frac{(T_f - T_o)}{r_o} \quad (12)$$

where: T_o is the operative temperature ($^{\circ}\text{C}$) ; r_o is the operative resistance ($^{\circ}\text{C m}^2 \text{W}^{-1}$) that were obtained according to DaSilva and Maia (2013):

$$T_o = \frac{r_c T_{MR} + r_r T_{air}}{r_r + r_c} \quad (13)$$

$$r_o = \frac{r_c r_r}{r_c + r_r} \quad (14)$$

where: T_{MR} and T_{air} are mean radiant and air temperature ($^{\circ}\text{C}$); while r_c and r_r are thermal resistance of air-coat interface by convection and long-wave radiation ($^{\circ}\text{C m}^2 \text{W}^{-1}$),

$$r_c = \frac{d_b}{k_{air} N_U} \quad (15)$$

$$r_r = \frac{1}{\varepsilon_f \sigma (T_f + T_{MR})(T_f^2 + T_{MR}^2)} \quad (16)$$

where: d_b is the diameter of the animal; ε_f is the animals' surface emissivity; σ is the Stefan-Boltzmann constant ($5.6697 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$). N_U is the Nusselt Number was estimated using the procedure described by Silva and Maia (2013). For N_U , the airflow was considered perpendicular to the animal, which was considered a sphere for this purpose.

The skin temperature can be calculated considering that the heat flow at $x_s = L_s$ is the same heat flow at $x_f = 0$

$$\begin{aligned} -k_s \frac{d\theta}{dx} \Big|_{x_s = L_s} &= -k_{eff} \frac{dT}{dx} \Big|_{x_f = 0} \\ -k_s \frac{d}{dx} \left[\theta_c \frac{(\theta_L / \theta_c) \sinh \tilde{m} x_s + \sinh \tilde{m} (L_s - x_s)}{\sinh \tilde{m} L_s} \right] &= -k_{eff} \frac{d}{dx} \left[-\frac{\dot{q}_g x_f^2}{2k_{eff}} + \frac{\dot{q}_g L_f x_f}{2k_{eff}} + \frac{x_f}{L_f} (T_f - T_s) + T_s \right] \end{aligned}$$

After some mathematical manipulations is possible to show that:

$$T_s = \frac{-k_s \tilde{m} L_f \left[-\theta_c - (T_{art} + \frac{\dot{q}_{met}}{\omega \rho_b c_b}) \cosh \tilde{m} L_s \right] + \sinh \tilde{m} L_s (0.5 L_f^2 \dot{q}_g + k_{eff} T_f)}{k_{eff} \sinh \tilde{m} L_s + k_s \tilde{m} L_f \cosh \tilde{m} L_s} \quad (17)$$

The air-coat interface temperature can be calculated considering that the heat flow at $x_f = L_f$ is the same q_{c-r}''

$$-k_{eff} \frac{dT}{dx} \Big|_{x_f = 0} = q_{c-r}''$$

$$-k_{eff} \frac{d}{dx} \left[-\frac{\dot{q}_g x_f^2}{2k_{eff}} + \frac{\dot{q}_g L_f x_f}{2k_{eff}} + \frac{x_f}{L_f} (T_f - T_s) + T_s \right] = \frac{(T_f - T_o)}{r_o}$$

After some mathematical manipulations is possible to show that:

$$T_f = \frac{0.5\dot{q}_g L_f r_o + (r_o k_{eff} T_s / L_f)}{[(r_o k_{eff} / L_f) + 1]} + T_o \quad (18)$$

For calculating q_g , we assumed the procedure described by Gebremedhin et al. (1997) and Jiang et al., (2005),

$$\dot{q}_g = \alpha_f (2/3\pi) N_f D_f (Y + Z) \quad (19)$$

According to Jiang et al. (2005) the quantities Y and Z in equation 19 are radiant energy fluxes that flow inward (Y) and outward (Z) and were calculated, respectively:

$$Y = C_1 e^{\beta x_f} + C_2 e^{-\beta x_f}$$

and

$$Z = C_1 \alpha_1 e^{\beta x_f} + C_2 \alpha_2 e^{-\beta x_f}$$

being

$$\alpha_1 = \frac{\alpha_f + \rho_f + \sqrt{\alpha_f^2 + 2\alpha_f \rho_f}}{\rho_f}$$

$$\alpha_2 = \frac{\alpha_f + \rho_f - \sqrt{\alpha_f^2 + 2\alpha_f \rho_f}}{\rho_f}$$

$$\beta = (2/3\pi) N_f D_f \sqrt{\alpha_f^2 + 2\alpha_f \rho_f}$$

$$C_1 = \frac{(1 - \rho_f) Y_i}{1 - \rho_f \alpha_1 + \frac{\alpha_1 - \rho_s}{\rho_s - \alpha_2} (1 - \rho_f \alpha_2) e^{2\beta L_f}}$$

$$C_2 = \frac{\alpha_1 - \rho_s}{\rho_s - \alpha_2} C_1 e^{2\beta L_f}$$

where: α_f and ρ_f are coat absorptivity and reflectivity; ρ_s is the skin reflectivity; while Y_i ($W \ m^{-2}$) is the irradiance provided by source radiation. In this case, $\dot{q}_g$ was not

constant along the air-coat layer. Therefore, the air-feather layer was separated in m layers, being n the layers total number, consequently $m = 1, \dots, n$ and $\dot{q}_g$ was assumed constant over them; as a result, the following alterations in eq. 17 and 18 are necessary:

$$T_s = \frac{-k_s \tilde{m} \left[-\theta_C - (T_{art} + \frac{\dot{q}_{met}}{\omega \rho_b c_b}) \cosh \tilde{m} L_s \right] + \sinh \tilde{m} L_s \{ [0.5 \dot{q}_{g(m=n)} (L_f / n)] + [k_{eff} T_{f(m=1)} / (L_f / n)] \}}{[(k_{eff} \sinh \tilde{m} L_s) / (L_f / n)] + k_s \tilde{m} \cosh \tilde{m} L_s}$$

$$T_f = \frac{0.5 \dot{q}_{g(m=1)} (L_f / n) r_O + [r_O k_{eff} T_{f(m=n-1)} / (L_f / n)]}{[r_O k_{eff} / (L_f / n)] + 1} + T_O$$

while the temperature in each layer inside of coat can be given by:

$$T_{f(m=1, \dots, n-1)} = \frac{0.25 L_f^2 (\dot{q}_{g(m=n-m)} + \dot{q}_{g(m=n-m-1)})}{n^2 k_{eff}} + \frac{(T_{f(m=m+1)} + T_{f(m=m-1)})}{2}$$

An iterative process was used to estimate T_s , T_f and $T_{f(m=1, \dots, n-1)}$ as follows:

- (1) Give an initial value for T_s , T_f and $T_{f(m=1, \dots, n-1)}$.
- (2) Solve all equations by using these initial value, then a new value T_s , T_f and $T_{f(m=1, \dots, n-1)}$ are found.
- (3) The new values are compared to the initial one. If there has a difference, the calculations are carried out again with the new T_s , T_f and $T_{f(m=1, \dots, n-1)}$ and so on, until the results converge.

3.3 Validation of the model

To validate the model, data was collected from twenty four Cobb broiler chickens. The chickens were reared in the climatic chamber of the Biometeorology Laboratory from the Faculty of Agrarian and Veterinary Sciences, FCAV/ UNESP, Jaboticabal - SP, Brazil. The data collection was made using the System of Physiological Measurements developed by the Laboratory. There was no incidence of solar radiation inside the facility.

A 6 x 6 latin square experimental design was used (six broilers in six days in six schedules). The latin square was replicated during July and December. Thus, we measured twelve birds in each environmental condition and 24 broilers throughout the trial.

Broilers were measured at the 8th, 15th, 22nd, 29th, 36th e 43rd days of life. The following schedules were adopted in the trial: from 8:00h to 10:00h; from 10:00h to 12:00h; from 12:00h to 14:00h; from 14:00h to 16:00h; from 16:00h to 18:00h; from 18:00h to 20:00h. Each broiler was evaluated for two hours.

Broilers were separated into six classes in accordance with the live weight: Class 1 – up to 500g; Class 2 – between 501g and 1000g; Class 3 – between 1001g and 1500g; Class 4 – between 1501g and 2000g; Class 5 – between 2001g and 2500g; Classe 6 – above 2501g.

The body temperatures of broilers were continuously measured during the sampling days: skin temperature (T_s , °C); rectal temperature (T_r , °C); feather temperature (T_f , °C). The air temperature inside the climatic chamber was measured every 10 minutes using a datalogger (U12-013, HOBO).

Therefore, in the model was used some physical properties from literature (Table 1) and some physiological and environmental variables measured during the trial in July (Table 2) and December (Table 3).

Table 1 – Physical properties used in the model

Thermo-physical properties of skin	Symbol	Values	Source
Thermal conductivity	k_s	$0.2 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Ferreira and Yanagihara (2009)
Perfusion	ω	$0.000362 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-3}$	Ferreira and Yanagihara (2009)
Density of blood	ρ_b	1085 kg m^{-3}	Ferreira and Yanagihara (2009)
Specific heat of blood	c_b	$3680 \text{ J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Ferreira and Yanagihara (2009)
Thickness	L_s	3.0 mm	-
Metabolic heat generation	q_{met}	368 W m^{-3}	Incropera et al. (2007)
Radiative Properties			
Absorptivity of feather	α_f	0.52	Silva and Maia (2013)
Reflectance of feather	ρ_f	0.45	Silva and Maia (2013)
Absorptivity of skin	α_s	0.43	Silva and Maia (2013)
Reflectance of skin	ρ_s	0.53	Silva and Maia (2013)
Emissivity of animal surface	ε_f	0.98	Silva and Maia (2013)

Table 2 – Physiological and environmental variables used in the model in the month of July for the six live weight classes (LW): skin temperature (T_s); rectal temperature (T_r); feathers temperature (T_f), air temperature (T_{air}), black globe temperature (T_{bg}); body surface area (A_s), effective conductivity of feathers (k_{eff}) and thickness of the feather layer (L_f)

LW Class*	T_s (°C)	T_r (°C)	T_f (°C)	T_{air} (°C)	T_{bg} (°C)	d_b (m)	A_s (m ²)	k_{eff} (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	L_f (mm)
1	39.55	41.36	34.21	24.66	25.16	0.081	0.042	0.058	3.5
2	40.17	41.31	33.56	24.53	25.03	0.12	0.084	0.106	9.0
3	40.56	41.71	32.10	23.73	24.23	0.14	0.117	0.149	15.0
4	40.71	41.80	30.53	22.74	23.24	0.16	0.159	0.238	30.0
5	40.61	41.94	30.19	23.18	23.68	0.17	0.197	0.352	45.0
6	41.13	42.21	30.69	25.40	25.90	0.18	0.225	0.259	60.0

*Class 1 – up to 500g; Class 2 – between 501g and 1000g; Class 3 – between 1001g and 1500g; Class 4 – between 1501g and 2000g; Class 5 – between 2001g and 2500g; Class 6 – above 2501g

Table 3 – Physiological and environmental variables used in the model in the month of December for the six live weight classes (LW): skin temperature (T_s); rectal temperature (T_r); feathers temperature (T_f), air temperature (T_{air}), black globe temperature (T_{bg}); body surface area (A_s), effective conductivity of feathers (k_{eff}) and thickness of the feather layer (L_f)

LW Class*	T_s (°C)	T_r (°C)	T_f (°C)	T_{air} (°C)	T_{bg} (°C)	d_b (m)	A_s (m ²)	k_{eff} (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	L_f (mm)
1	40.27	41.64	35.65	28.66	29.16	0.082	0.039	0.047	3.5
2	40.46	41.78	35.22	27.96	28.46	0.12	0.085	0.104	9.0
3	40.98	42.06	34.03	29.09	29.59	0.14	0.130	0.096	15.0
4	40.99	41.75	32.89	28.66	29.16	0.15	0.151	0.144	30.0
5	41.03	41.97	32.89	30.49	30.99	0.17	0.184	0.101	45.0
6	41.37	42.18	34.08	31.51	32.01	0.18	0.217	0.034	60.0

*Class 1 – up to 500g; Class 2 – between 501g and 1000g; Class 3 – between 1001g and 1500g; Class 4 – between 1501g and 2000g; Class 5 – between 2001g and 2500g; Class 6 – above 2501g

The measured data (Tables 2 and 3) was compared with the estimated values by the model. A confidence interval ($\alpha=0.05$) was calculated to each variable for July and December in all the live weight classes.

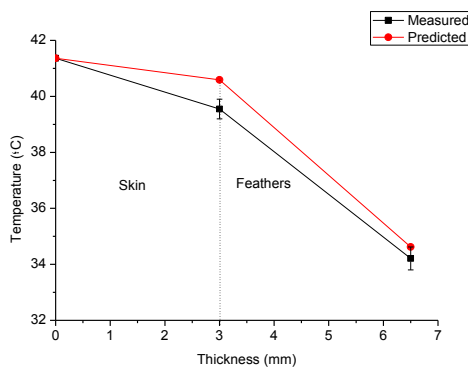
4. Results and Discussion

The measured and predicted temperatures by the model were calculated to broiler chickens during all the rearing period (Figures 2 to 7). It is possible to observe that all the predicted feather temperatures are in accordance with the confidence interval for the measured values ($P < 0.05$), to all the live weight classes. Our model is a good predictor for the feather coat temperature, and this can be due to the use of a thermal conductivity of feathers that was calculated considering the air temperature and the thickness of the feather coat during boilers' growth.

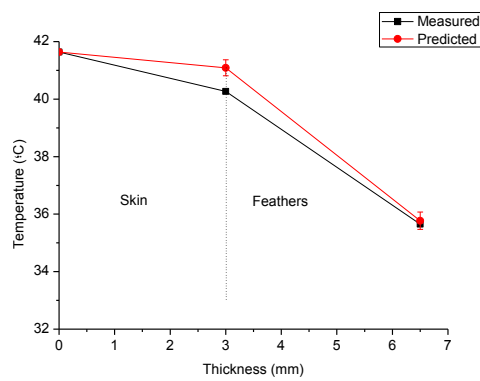
Thus, for broilers it is not adequate to consider a unique thermal conductivity to all the rearing period. The feather structure changes throughout the rearing period; day-old chicks present feathers (named also as plumules) and a "fluffy" structure that provides insulation (Leeson & Walsh, 2004). With aging, the feathering rate increases linearly (McDougald & Keshavarz, 1984). Besides, feathering is also influenced by environmental conditions, mainly air temperature (Leeson & Walsh, 2004). Therefore, for heat transfer purposes we need to consider these aspects that will affect thermal conductivity and consequently the sensible heat transfer through the feather coat. As shown in Tables 2 and 3, thermal conductivity was smaller during December in comparison with July.

Davis & Bikerbak (1974) and Kowalski (1978) described a methodology to determine the thermal conductivity of the air-coat layer, but its application for poultry is not adequate, because it considers the number of hair, the hair diameter, the thermal conductivities of the hairs and the air and the angle of the hairs. However the feathers are not uniformly distributed in the body surface of broilers (Leeson & Walsh, 2004).

It is important to note that even that we have used radiative properties of cattle in this study (Da Silva & Maia, 2013), the results are optimistic. No radiative properties for feathers of chickens are available in the literature.

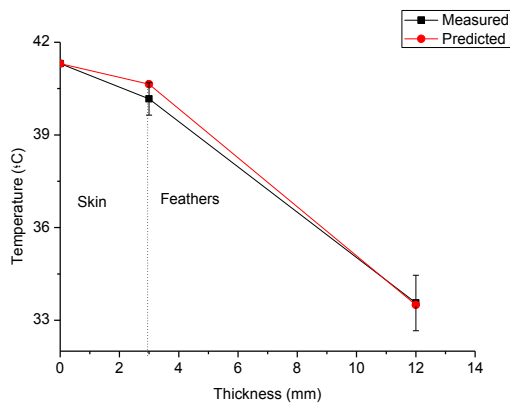


(a)

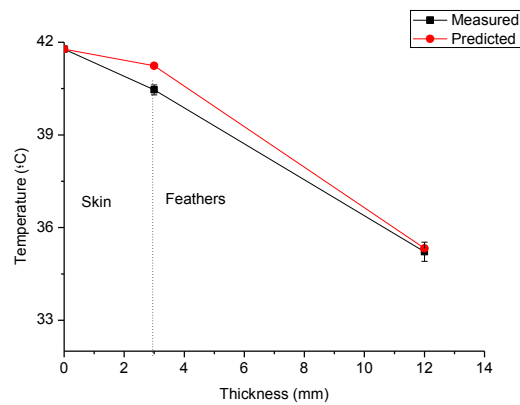


(b)

Figure 2 – Measured and predicted values for skin and feather temperature of Cobb broiler chickens up to 500 g of live weight (Live weight class 1) – (a) in July; (b) in December

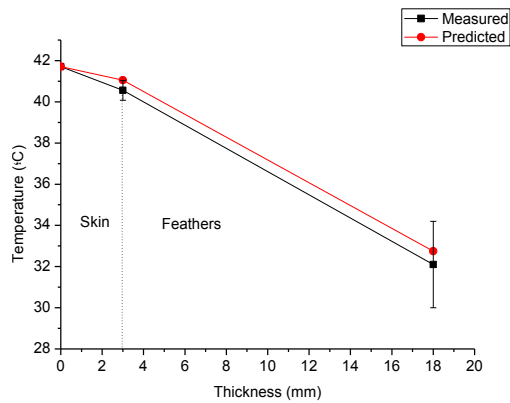


(a)

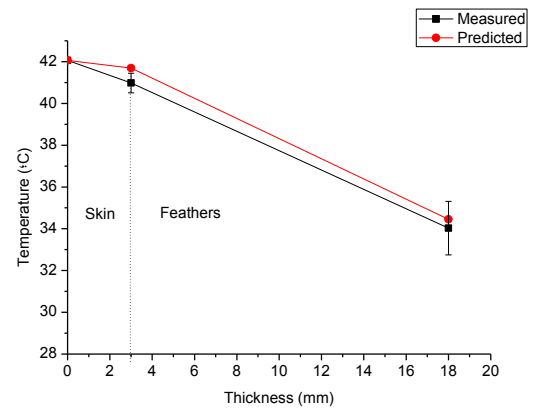


(b)

Figure 3 – Measured and predicted values for skin and feather temperature of Cobb broiler chickens between 501 g and 1000 g of live weight (Live weight class 2) – (a) in July; (b) in December

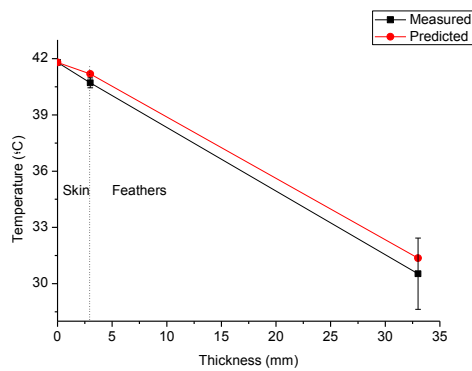


(a)

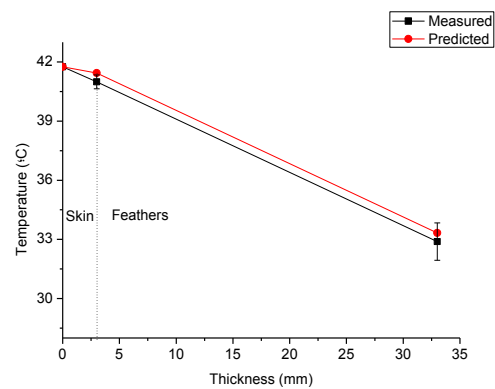


(b)

Figure 4 – Measured and predicted values for skin and feather temperature of Cobb broiler chickens between 1001 g and 1500 g of live weight (Live weight class 3) – (a) in July; (b) in December



(a)



(b)

Figure 5 – Measured and predicted values for skin and feather temperature of Cobb broiler chickens between 1501 g and 2000 g of live weight (Live weight class 4) – (a) in July; (b) in December

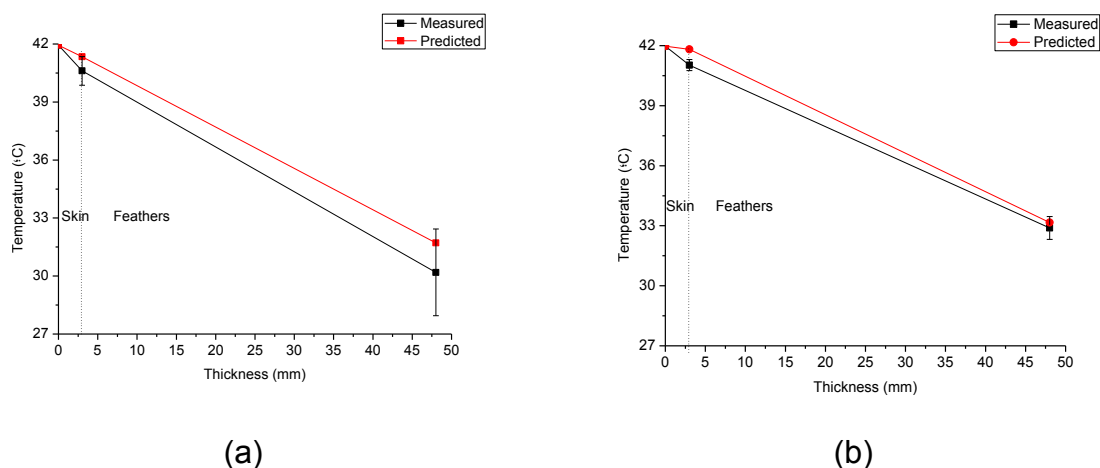


Figure 6 – Measured and predicted values for skin and feather temperature of Cobb broiler chickens between 2001 g and 2500 g of live weight (Live weight class 5) – (a) in July; (b) in December

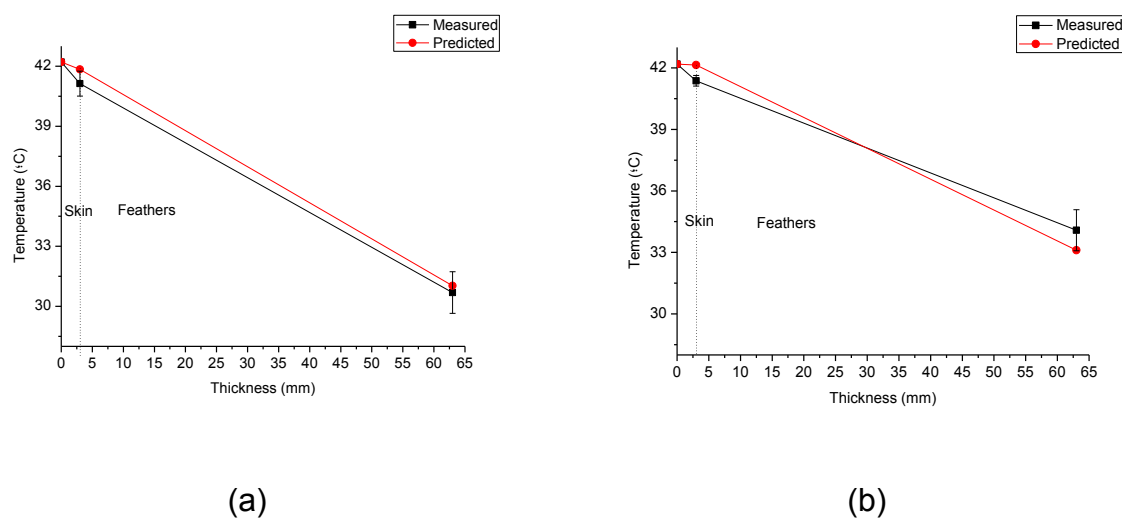


Figure 7 – Measured and predicted values for skin and feather temperature of Cobb broiler chickens above 2501 g of live weight (Live weight class 6) – (a) in July; (b) in December

The skin temperature in all the live weight classes (figures 2 to 7) was not in accordance with the confidence interval for the measured values ($P > 0.05$), independently of the month (July or December). The predicted values were higher than the measured ones. However it is possible to observe that the values approximate with the increase of live weight. The difference between the measured and predicted values is higher for the broilers up to 500 g (Class 1) and between 501 g and 1000 g of live weight (Class 2). We considered for all the rearing period the

same thickness of the skin layer (3 mm) and the same physical properties, like metabolic heat generation (Table 1). These properties are not described in the literature for broilers and we used values described for humans (Ferreira & Yanagihara, 2009). Therefore it becomes imperative the settlement of these properties for broilers and it will bring important contributions to the model. Nevertheless, we observed the same temperature profile between the measured and predicted values.

In the comparison between measured and predicted data it is possible to observe that the temperature of feather is in accordance ($P < 0.05$) with the confidence interval (Figure 8), and for skin temperature is not in accordance ($P > 0.05$), Figure 9. We need to improve the model with the inclusion of physical properties measured in broilers during all the rearing period.

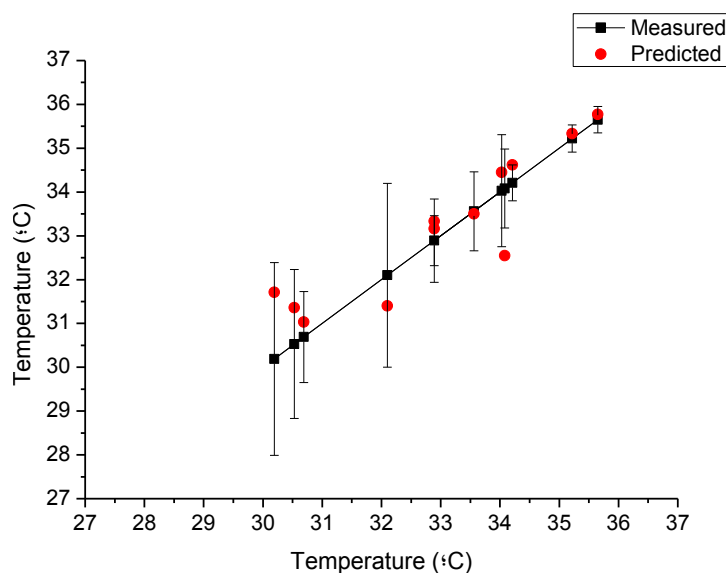


Figure 8 – Comparison between measured and predicted feather temperature for Cobb broiler chickens

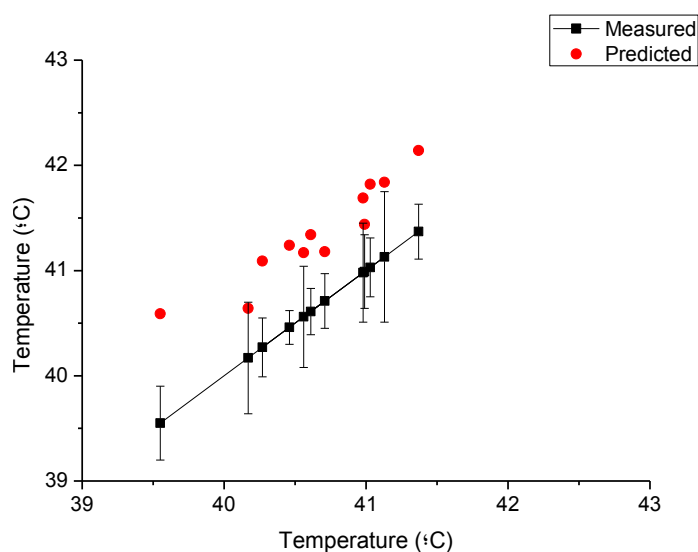


Figure 9 – Comparison between measured and predicted skin temperature for Cobb broiler chickens

From this, we simulated some situations, like the inclusion of a heating source for broilers with the same conditions of broilers in live weight class 1 (Figures 2a and 2b). The supply of 100 W, 200 W, 300 W or 400 W caused a little increase in the feather temperature (Figure 10). If we increase the number of feathers per area, the heat generation inside the feather layer also increases, and we observe higher surface temperatures.

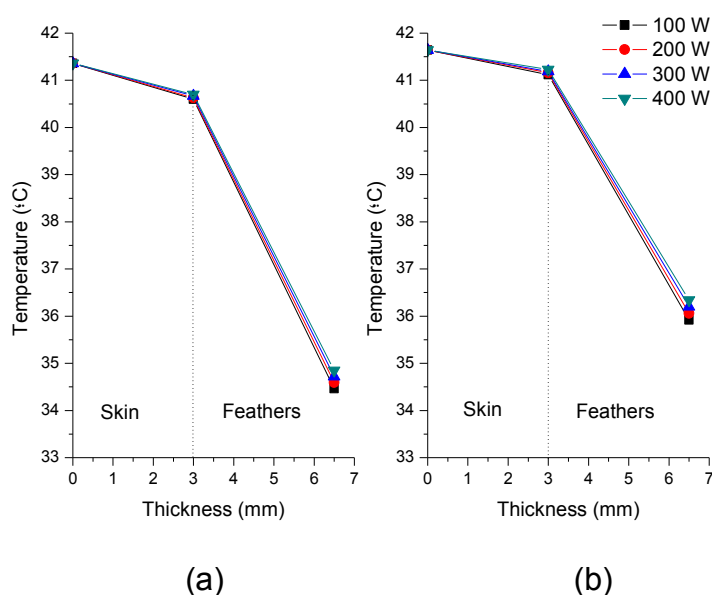


Figure 10 – Temperature profile of broiler chickens up to 500 g of live weight with the supply of a heat source (100 W, 200 W, 300 W and 400 W) – (a) in July; (b) in December

If we simulate different air temperatures and the inclusion of a heat source for broilers up to 500 g of live weight in July (Figure 11) and in December (Figure 12), it is possible to see that the inclusion of heat source must be coupled to an adequate air temperature. The temperature of the feathers will increase with these two alterations: changes in the air temperature and the supply of heat source. This can be very useful for the development and improvement of heating systems inside poultry facilities.

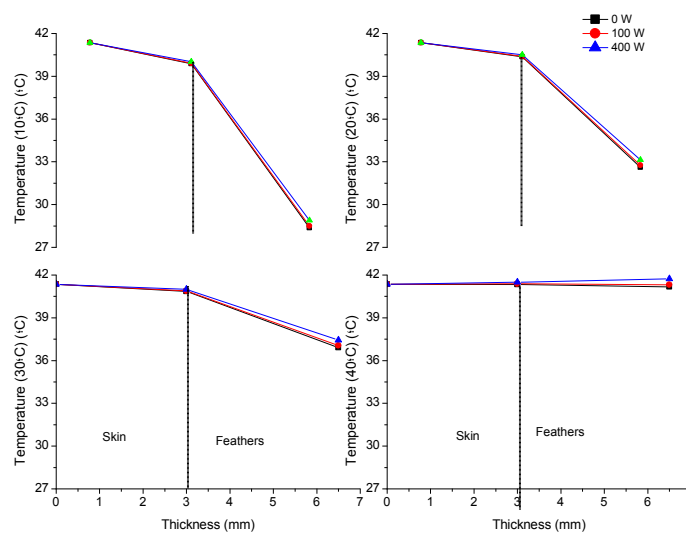


Figure 11 - Temperature profile of broiler chickens up to 500 g of live weight with the supply of a heat source (0 W, 100 W and 400 W in July simulating an air temperature of 10°C, 20°C, 30°C and 40°C, respectively

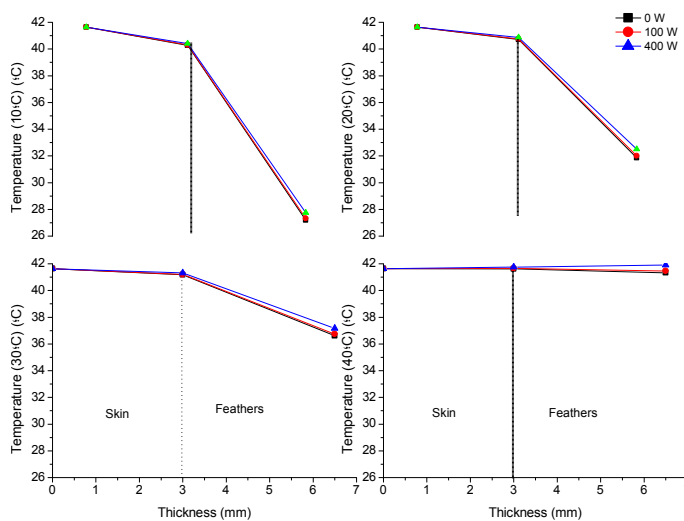


Figure 12 - Temperature profile of broiler chickens up to 500 g of live weight with the supply of a heat source (0 W, 100 W and 400 W in December simulating an air temperature of 10°C, 20°C, 30°C and 40°C, respectively

We can simulate for broilers above 2501 g of live weight how the air temperature affects the feather temperature (Figures 13a and 13b), and consequently will impact on the heat transfer through convection and long wave radiation in the air-feather interface. This can be useful for the improvement of cooling systems inside poultry houses, considering both environmental and physiological variables.

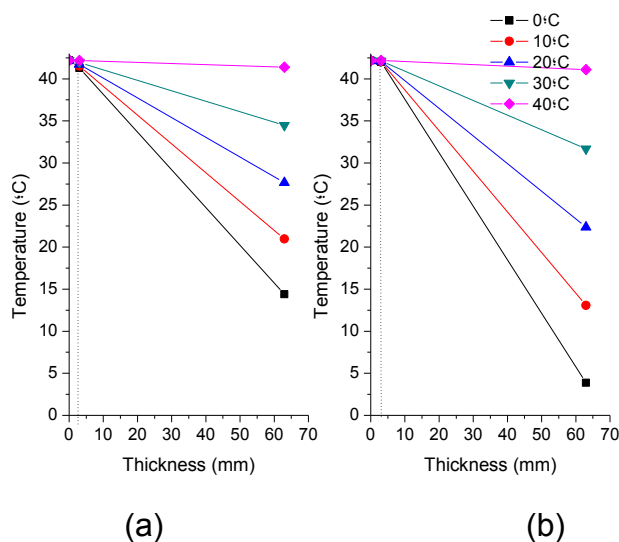


Figure 13 - Temperature profile of broiler chickens above 2501 g – (a) in July; (b) in December simulating an air temperature of 0°C, 10°C, 20°C, 30°C and 40°C

5. Conclusions

The following conclusions can be drawn from the study:

- (1) A mechanistic model was developed that predicts the temperature at the skin surface and the temperature profile through the feather layer of broiler chickens.
- (2) The model was validated against an experimental data and the results for feather temperature agreed within 95% confidence interval.
- (3) The model can be used as a decision tool to determine the supplemental heat required by young chicks for optimum growth and to determine the ideal air temperature and improvement of cooling systems for broilers to avoid heat stress.

6. Future Implications

The next steps of this study involve:

- [1] To consider birds with a spherical geometric;
- [2] To improve the model considering the heat transfer through the skin layer as three-dimensional in a transient-state condition;
- [3] To consider a metabolic heat flow in accordance with live weight and environmental conditions;
- [4] To measure the skin properties and radiative properties of feathers.

7. References

BIG DUTCHMAN: Heating systems. Disponível em: <http://www.bigdutchman.co.za/pdf/Heating_systems_poultry_e.pdf>. Acesso em: 05 de setembro de 2014.

BOUCHILLON, C.W.; REECE, F.N; DEATON, J.W. Mathematical modeling of thermal homeostasis in a chicken. **Transactions of ASAE**, v.13, n.5, p. 648-652, 1970.

COBB-VANTRESS: Broiler Management Guide. Disponível em: <<http://cobb-vantress.com/docs/default-source/guides/cobb-broiler-management-guide---english.pdf>>. Acesso em 10 de outubro de 2014.

CHOI, I.H.; RICKLEFS, R.E.; RUSSELL, E.S. Biology Skeletal Muscle Growth, Enzyme Activities, and the Development of Thermogenesis: A Comparison between Altricial and Precocial Birds. **Physiological Zoology**, v. 66, 4: 455-473, 1993.

DA SILVA, R.G. **Introdução à Bioclimatologia Animal**. São Paulo: Nobel, 2000. 286 p.

DA SILVA, R. G.; MAIA, A. S. C. Basic Physical Mechanisms. In:_. (Ed.) 1. **Principles of animal biometeorology**. New York: Springer, 2013.

DAVIS, L. B.; BIRKEBAK, R. C. On the transfer of energy in layers of fur. **Biophysical Journal**, v.14, p.249-268, 1974.

DAWSON, W.R.; WHITTOW, G.C. Regulation of body temperature. In: **Avian Physiology** (P. D. Sturkie, ed.), 5th edition, Springer-Verlag, New York, 2000.

DESHAZER, J.A.; YEN, J.T. Energetics of biological processes. In: **Livestock energetics and thermal environmental management**. ASABE, St. Joseph, MI, p.49-72, 2009.

FERREIRA, M. S.; YANAGIHARA, J.I. A transient three-dimensional heat transfer model of the human body. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 36, 718-724, 2009.

GEBREMEDHIN, K.G., NI, H., HILLMAN, P.E. Temperature profile and heat flux through irradiated fur layer. In: INTERNATIONAL LIVESTOCK ENVIRONMENT SYMPOSIUM, 5, 1997, Bloomington, MN. **Proceedings...** Bloomington, v.1, p.226-233, 1997.

HILL, W. L. Importance of prenatal nutrition to the development of a precocial chick. **Developmental Psychobiology**, 26(5): 237-249, 1993.

INCROPERA, F.P.; DeWITT, D.P. Fundamentos de transferência de calor e de massa. John Wiley & Sons, Inc., 6ed., 2008, 697p.

JIANG, M.; GEBREMEDHIN, K.G.; ALBRIGHT, L.D. Simulation of skin temperature and sensible and latent heat losses through fur layers. **Transactions of the ASAE**. Vol. 48(2): 767-775, 2005.

KETTLEWELL, P.J.; MORAN, P. A study of heat production and heat loss in crated broiler chickens: a mathematical model for a single bird. *British Poultry Science*, 33:2, 239-252, 1992.

KOWALSKI, G. J.; MITCHELL, J. W. An analytical and experimental investigation of heat transfer mechanism within fibrous media. **Transactions of ASME**, 79-WA/HT-40:1-7.

LEESON, S.; WALSH, T. Feathering in commercial poultry I. Feather growth and composition. **World's Poultry Science Journal**, v. 60, p. 42-51, 2004.

McDOUGALD, L.R.; KESHAVERZ, K. The effect of polyether ionophore anticoccidial drugs on feather growth in genetically slow-feathering broilers. **Poultry Science**, 63:1322-1326, 1984.

MORAES, V.M.B.; MALHEIROS, R.D.; BRUGGEMAN, V.; COLLIN, A.; TONA, K.; VAN AS, P.; ONAGBESAN, O.M.; BUYSE, J.; DECUYPERE, E.; MACARI, M. Effect of thermal conditioning during embryonic development on aspects of physiological responses of broilers to heat stress. **Journal of Thermal Biology**, 28:133-140, 2003.

NASCIMENTO, S.T.; SILVA, I.J.O.; MAIA, A.S.C.; CASTRO, A.C.; VIEIRA, F.M.C. Mean surface temperature prediction models for broiler chickens – a study of sensible heat flow. **International Journal of Biometeorology**, 58(2), p. 195-201, 2014.

PENNES, H.H. Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm. **Journal of Applied Physiology**, 1(2), p. 93-122, 1948.

RICKLEFS, R.E. Adaptation, constraint and compromise in avian postnatal development. **Biology Review**, v. 54, p. 269-290, 1979.

TURNPENNY, J.R.; McARHTUR, A.J.; CLARK, J. A.; WATHES, C.M. Thermal balance of livestock, 1. A parsimonious model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.101, p. 15-27, 2000a.

TURNPENNY, J. R.; WATHES, C.M.; CLARK, J.A.; McARHTUR, A.J. Thermal balance of livestock, 2. Application of a parsimonious model. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.101, p. 29-52, 2000b.

WATHES, C.M.; CLARK, J.A. Sensible heat transfer from the fowl: Radiative and convective heat losses from a flock of broiler chickens. **British Poultry Science**, Abingdon, v.22, n.2, p.185–196, 1981.

WOLF, B.O.; WALSBERG, G.E. The role of the plumage in heat transfer processes in birds. **Integrative and Comparative Biology**, v. 40, p. 575-584, 2000.

YANAGI, T.; Jr., XIN, H.; GATES, R.S. Modeling partial surface evaporative cooling of chickens. In: ASAE Annual International Meeting, paper no. 01-3011, St Joseph: ASAE, 2001.