ALENCAR MIGLIAVACCA

**Balanço de massa, energia e exergia na produção intensiva de
frangos de corte**

São Paulo

2017

ALENCAR MIGLIAVACCA

**Balanço de massa, energia e exergia na produção intensiva de
frangos de corte**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de doutor em Ciências

São Paulo
2017

ALENCAR MIGLIAVACCA

**Balanço de massa, energia e exergia na produção intensiva de
frangos de corte**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Ciências

Área de concentração:
Engenharia Mecânica de Energia e Fluidos

Orientador
Prof. Dr. Jurandir Itizo Yanagihara

São Paulo

2017

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'MIGLIAVACCA', is written over a horizontal line. The signature is stylized with loops and a long horizontal stroke.

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Migliavacca, Alencar

Balanço de massa, energia e exergia na produção intensiva de frangos de corte / A. Migliavacca -- versão corr. -- São Paulo, 2017.
185 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Análise Exergética 2.Balanço de Massa 3.Balanço de Energia
4.Frangos de Corte 5.Aviários I.Universidade de São Paulo. Escola
Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

Dedico este trabalho à minha mãe, Zoleide
Migliavacca, pela força e fé insuperáveis, e
à minha esposa, Olvani Martins da Silva
com a qual compartilho todas as minhas
angústias, desejos, sonhos e realizações.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido saúde, serenidade e paz em mais esta etapa de minha carreira profissional. Ao aceitar o desafio na busca deste sonho, estava convicto das dificuldades a serem superadas por explorar uma área diferente da minha formação anterior. Sem fé Nele, nada seria possível.

Ao professor Dr. Jurandir Itizo Yanagihara, pelo voto de confiança, ao me acolher no meio do doutorado. Pela orientação sempre competente, correta e precisa, indicando-me o caminho a ser percorrido durante todo o período. Suas sugestões e orientações foram fundamentais para o bom andamento do trabalho e para meu crescimento profissional. Sua dimensão humana e sapiência, aliadas aos bons conselhos, possibilitaram-me muito crescimento pessoal. Seguindo seus exemplos, certamente estarei no caminho correto para um futuro promissor. Muito obrigado!

Ao professor Dr. Silvio de Oliveira Junior, pela acolhida e disponibilidade em todos os momentos solicitados. Por todo conhecimento compartilhado em tão pouco tempo e pelo incentivo permanente ao estudo. Obrigado pelo voto de confiança.

À minha esposa, Olvani Martins da Silva, com a qual compartilho minhas angústias, desejos, sonhos e realizações. Pelo amor, carinho e cuidado demonstrados cotidianamente, os quais foram fundamentais para o alcance deste grande objetivo em minha vida. Contigo aprendi o significado de família, de humildade, de respeito e cumplicidade. Contigo sou mais forte. Contigo construo e realizo todos os sonhos e projetos de vida. Te amo!

À minha mãe, Zoleide, mulher simples, guerreira, forte e única que, apesar de todas as dificuldades, me impulsionou para o caminho do bem e de uma educação exemplar. Enfrentou discriminações sociais sofridas inúmeras vezes, para dar condições e permitir o acesso de seus filhos à educação. Sim mãe, filho de Zeladora também pode ser Doutor e este título é tanto Seu quanto Meu. Serei eternamente grato.

Ao meu irmão Adilson, minha cunhada Andreia e ao afilhado Kauã, pelos bons momentos proporcionados e, principalmente, pela compreensão quando da minha ausência durante o período do doutorado.

Aos amigos e colegas de doutorado: Júlio Barcellos da Silva (pelo aprendizado na língua inglesa e forte parceria durante as disciplinas), Werther Serralheiro (pela

culinária japonesa), Eduardo Suzuki e Claudio José Weber (pelas discussões e aprendizado), Marcos Pisching (pela perseverança), Edson Watanabe (pelas mensagens de conforto e incentivo) e Elenira Vilela (pela formação política) que auxiliaram em minha formação humana e técnica e, junto comigo, aceitaram o desafio da capacitação. Seus conhecimentos, incentivo e motivação foram primordiais para a conclusão do trabalho. Ao amigo Henri Carlo Belan e família, pela acolhida durante as aulas do DINTER na capital catarinense e, enfim, à colega e amiga Saionara Greggio, pela correção ortográfica do texto.

Aos amigos do Laboratório de Engenharia Térmica e Ambiental (LETE), Tomas Mora Chandia, Flávio Galeazzo, Esther Siroky, Faggioni, Daniel Flórez-Orrego, José Luis Ramires Duque, Yamid Carranza Sanchez, Pablo Silva Ortiz, Felipe Person Malta, Paulo e Marcello Galvão, pela convivência e acolhida.

Aos amigos Carlos Eduardo Keutenedjian Mady e Ovandir Bazan pelas sugestões e dicas ao aprimoramento do trabalho. Sua amizade me engrandece. Em especial ao grande amigo iraniano Ali Allahiarzadeh Bidgoli, com o qual compartilhei muitos momentos de estudos. Desta convivência, construiu-se uma sólida amizade. Suas crenças, atitudes e exemplos me tornam uma pessoa melhor.

Ao Instituto Federal de Santa Catarina, que através dos programas de incentivo à capacitação de seus docentes, proporcionou-me dois anos de afastamento integral para uma formação de excelência e, através do Governo Federal, vem transformando as comunidades nas quais se insere, bem como à CAPES, pelo auxílio financeiro.

Aos amigos do Instituto Federal de Santa Catarina, pela convivência e aprendizado diário. Sua amizade permitiu ampliar meus horizontes buscando alçar voos mais altos.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA - Suínos e Aves), pela ótima receptividade e troca de informações. Fico lisonjeado em poder compartilhar meu trabalho com pesquisadores tão renomados.

Ao amigo James Luis Berto, pelos contatos proporcionados e a todos que, de uma forma ou outra, colaboraram para a realização deste trabalho.

“O conhecimento liberta,
ao nos empoderar para as escolhas.
Mas o conhecimento também aprisiona,
ao elucidar que muitas escolhas
são impossíveis.”
Alencar Migliavacca

“Conheça todas as teorias,
Domine todas as técnicas,
Mas ao tocar uma alma humana,
Seja apenas outra alma humana.”
Carl Jung

RESUMO

MIGLIAVACCA, Alencar. **Balanço de massa, energia e exergia na produção intensiva de frangos de corte**. 2017. 185 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

A produção brasileira de frangos de corte evidenciou-se com o sistema de produção integrada, ao elevar a eficiência e a qualidade na conversão de proteína animal. Contudo, devido à rápida evolução tecnológica com crescente demanda energética e a diversificação dos sistemas de produção em diferentes microclimas, elucidar os processos de conversão de massa e energia tornou-se uma tarefa desafiadora neste sistema de produção. Constantemente, pesquisadores, produtores e agroindústria buscam processos mais rentáveis, reduzindo a demanda em mão de obra e o impacto ambiental. No entanto, nunca foi feita uma avaliação integrada do sistema produtivo de frangos de corte, considerando-se os aspectos quantitativos, energéticos e ambientais. Deste modo, o objetivo deste trabalho é promover um detalhado balanço de massa e energia, além de avaliar por meio da análise exergética, a qualidade das conversões de energia no processo produtivo de frangos de corte. Com o levantamento de insumos, produtos e rejeitos diretos, vinculados ao ciclo de produção, foram quantificadas as vazões mássicas para os diferentes processos do ciclo e, aplicando-se a avaliação exergética, obteve-se um diagnóstico completo da quantidade e qualidade energética envolvidas. Considerando o cenário adotado, em termos mássicos, as maiores demandas identificadas para os insumos foram a água (69,2%) e a ração (24,9%). Na saída do processo, os Gases de Efeito Estufa (GEE)/particulados extraídos através da ventilação (39,4%), os gases de combustão da lenha (25,6%) e a cama (14,2%) formam os principais rejeitos. A massa de frangos representa 20% das saídas. Foi identificado que a relação entre o consumo de água e ração é função da temperatura. Em termos energéticos, as maiores contribuições identificadas para os insumos foram a ração (77,7%) acompanhada do material absorvente (9,7%) e da lenha (9,6%). Na saída do processo lideram as energias associadas aos frangos (33,2%) e da cama gerada (32,1%). O rendimento energético obtido para galpões convencionais foi de 27%. Os processos que mais destroem exergia dentro do ciclo produtivo são a formação da cama de frangos a partir das excretas (51,5% em

convencionais e 48,2% em climatizados) e a combustão da lenha para aquecimento (21,9% em convencionais e 20,5% em climatizados). Além disso, foi estimado o rendimento de Segunda Lei para o ciclo próximo de 26%. Foram introduzidos os índices energético e exergético de produção permitindo a comparação entre diferentes sistemas. Como principal resíduo, a cama de frangos gerada no ciclo, quando reutilizada como insumo para aquecimento do próprio aviário na forma de briquetes, pode elevar as eficiências. Comparando-se as demandas médias para as duas formas de aquecimento, foi constatado que o uso do GLP é mais favorável ao ambiente se comparado à lenha, devido à forma direta de transferência de calor aos frangos. É aconselhável, em dias quentes, elevar a velocidade do ar, utilizando o resfriamento evaporativo somente em casos de elevada temperatura ambiente, pois a introdução de água eleva a exergia dissipada no ciclo.

Palavras-chave: Análise Exergética. Balanço de Massa. Balanço de Energia. Frangos de Corte. Aviários.

ABSTRACT

MIGLIAVACCA, Alencar. **Mass, energy and exergy balance in the intensive production of broilers**. 2017. 185 f. Thesis (Doctorate) - Polytechnic School of the University of São Paulo, São Paulo, 2017.

Brazilian production of broilers has been highlighted with the implantation of the integrated production system, which improved the efficiency and quality in animal protein conversion. However, due to the rapid technological evolution with the increasing energy demand and the diversification of production systems in different microclimates, elucidating mass and energy conversion processes has become a challenging task regarding this production system. Constantly, researchers, producers and agribusiness look for more profitable processes, reducing the labour demand and environmental impact. However, an integrated evaluation of the productive system of broilers, considering the quantitative, energy and environmental aspects has never been carried out. Thus, this study aims at promoting a detailed mass and energy balance and to evaluate the quality of the energy conversions in the productive process of broilers by means of exergy analysis. With the survey of inputs, products and direct wastes, linked to the production cycle, the mass flow rates for the different processes of the cycle were quantified and a complete diagnosis of the quantity and quality energetic involved was obtained applying the exergy evaluation. Considering the scenario adopted, in mass terms, the greatest demands identified for the inputs were water (69.2%) and feed (24.9%). At the exit of the process, the greenhouse gases/dust extracted through ventilation (39.4%), the firewood combustion gases (25.6%) and the litter poultry generated (14.2%) are the main outputs. The broilers mass was quantified in 20%. The relation between water and feed consumption has shown to be the temperature. Regarding energy, the largest contribution identified for the inputs was feed (77.7%) followed by the absorbent (9.7%) and firewood (9.6%). At the exit of the process lead the energy associated with the broilers (33.2%) and the poultry litter generated (32.1%). The energy performance obtained for conventional shed was 27%. The processes of the largest exergy destroyed within the productive cycle are the litter poultry converted from excreta (51.5% in conventional and 48.2% in air conditioning) and the combustion of wood for heating (21.9% in conventional and 20.5% in air conditioning). In addition, the second law performance for the cycle was estimated in

about 26%. The energy and exergy production index was introduced allowing for the comparison among different systems. As the main residue, the litter poultry generated in the cycle when reused as an input for heating the aviary itself in the form of briquettes, can increase these efficiencies. The use of LPG is more environmentally friendly compared to wood, considering the average demands for the two forms of heating, due to the direct form of heat transfer to the broilers. It is advisable, on hot days, to raise the air speed using the evaporative cooling only in cases of high ambient temperature, as the introduction of water raises the exergy dissipated in the cycle.

Key-words: Exergy Analysis. Mass Balance. Energy Balance. Broilers. Aviaries.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Balanço Energético apresentado no sistema de produção de frangos de corte.....	5
Figura 2 - Características construtivas dos galpões convencionais para criação intensiva de frangos de corte. Extraídas de Abreu e Abreu (2000).	13
Figura 3 - Sistemas de aquecimento mais utilizados nos aviários convencionais brasileiros. Fonte: Funck e Fonseca (2008).....	14
Figura 4 - Detalhes do sistema automático de comedouros tubulares e bebedouros <i>nipple</i> , cortinas e sistema de ventilação para aviários convencionais. Fonte: www.aveplast.com.br . Acesso: jan/2017.	15
Figura 5 - Sistema de exaustão em aviários climatizados (à esquerda) e sistema de resfriamento evaporativo com o uso de painéis de resfriamento adiabático (à direita). Fonte: Cobb-Vantress (2009).	21
Figura 6 - Valores médios da temperatura nas partes do corpo em função da idade das aves.	25
Figura 7 - Utilização da energia em animais monogástricos e um exemplo das perdas na dieta.	30
Figura 8 - Relação entre o consumo de água (ml) e de ração (g) para frangos de corte.....	33
Figura 9 - Consumo de água por frango em função da idade, em dias, no decorrer do ciclo produtivo.	34
Figura 10 - Processo de resfriamento evaporativo: (a) diagrama esquemático do processo e (b) representação na carta psicrométrica. Fonte: Adaptado de Moran e Shapiro (2011)	38
Figura 11 - Produção de calor metabólico (W/m^2) como função da massa do frango (g) e devido coeficiente de correlação. Fonte: Adaptada de Nascimento et al. (2017).	44
Figura 12 - Curvas ajustadas para temperatura do ar e CTR dentro de aviários com e sem a presença de forro, nas épocas 1 e 2 , comparativamente ao exterior, em função das horas do dia. Retirado de Abreu et al. (2007).....	46

- Figura 13 - Comparativo do desempenho de aves comerciais mistas produzidas nos anos de 1957, 1978 e 2005. À esquerda, mudanças relacionadas à idade das aves em cada linha e mudanças relacionadas ao melhoramento genético em cada coluna. À direita, massa corporal absoluta de aves para cada situação ao final do ciclo produtivo (superior) e massa corporal relativa ao ano de 2005 (inferior). Adaptada de Zuidhof et al. (2014).47
- Figura 14 - Fluxograma de desenvolvimento do projeto. Passos anteriores à definição do VC apresentam informações gerais sobre o processo produtivo. A rotina computacional permite dados de entrada para diferentes linhagens e características construtivas e, após os testes de hipóteses, foram lançadas as proposições de adequações construtivas e de manejo.59
- Figura 15 - Fluxograma inicial na realização dos balanços de massa e energia do sistema produtivo para os diversos tipos de galpões avícolas em um ciclo de produção.....60
- Figura 16 - Mudanças de estado de um sistema de um estado qualquer até o estado morto absoluto.72
- Figura 17 - Fluxograma de massa para um lote produzido. À esquerda, os insumos demandados, ao centro, os principais processos analisados e, à direita, os produtos e rejeitos gerados. Fluxos em azul indicam água líquida ou vapor. Demais fluxos indicam as massas secas (sólidas ou gasosas).....77
- Figura 18 - Consumo de ração (g) em função do tempo de vida (dias) de frangos de corte machos, mistos e fêmeas para as linhagens COBB 500 e ROSS 308 de acordo com padrões de desempenho.....81
- Figura 19 - Estimativas para CA acumulada de cada linhagem e gênero estudados, com respectivas curvas de crescimento. Fonte: Adaptado de Cobb-Vantress (2012) e Aviagen (2012).89
- Figura 20 - Temperatura do ar expirado de frangos de corte da linhagem COBB em função da temperatura do ar. Extraído de Nascimento (2015).90
- Figura 21 - Balanço hídrico nas aves com separação da água vaporizada através das excretas e transpiração, bem como através do trato respiratório.90
- Figura 22 - Entradas e saídas de energia em cada VC considerado. O ar atmosférico (exceto para combustão) foi tratado como ar úmido com separação para cada componente. Todos os fluxos foram identificados por cores, sendo a água nas fases líquida e de vapor, indicada na cor azul.98

Figura 23 - Estimativa para o consumo de água por frangos da linhagem Cobb 500, em lotes de machos (M), mistos (MF) e fêmeas (F), considerando ciclos de 30 dias e de 42 dias.....	134
Figura 24 - Contribuições energéticas dos insumos, produtos e rejeitos do processo produtivo, considerando o cenário padrão adotado para galpões convencionais.	145
Figura 25 - Temperatura média do ar nos galpões para diferentes temperaturas do ambiente externo utilizando a) aquecimento à lenha e b) aquecimento à GLP	152
Figura 26 - Possível redução na temperatura efetiva para diferentes combinações da temperatura ambiente, umidade relativa e velocidade do ar sobre as aves. Adaptada de Cobb-Vantress (2009).	154
Figura 27 - Exergia destruída no processo de arrefecimento dos galpões durante a fase final do ciclo produtivo em diferentes condições do ar atmosférico demandado para renovação de ar.....	160
Figura 28 - Comparativo da Exergia destruída nos processos analisados para galpões convencionais (à esquerda) e climatizados (à direita) considerando o cenário proposto.	162
Figura 29 - Eficiência de segunda lei e Exergia destruída em galpões convencionais por ciclo de produção considerando diferentes períodos.....	163

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores ideais de temperatura ambiente e umidade do ar para diferentes fases de criação.....	23
Tabela 2 - Composição de diferentes tipos de ração de frangos apresentada na literatura em percentuais mássicos e Energia metabolizável.	31
Tabela 3 – Média do consumo de ração para frangos machos para diferentes densidades de criação.....	32
Tabela 4 - Percentual de umidade encontrada em espécies arbóreas utilizadas como insumo para o aquecimento de galpões avícolas no sul do Brasil a partir da quantidade de amostras analisadas.	40
Tabela 5 - PCS de algumas espécies arbóreas utilizadas no aquecimento de aviários.	41
Tabela 6 - Influência da idade das aves, da densidade de criação e da altura da cama na umidade da cama de frangos gerada.....	50
Tabela 7 - Geração de amônia pela cama de frangos com diferentes alturas e densidades de aves.....	55
Tabela 8 - Concentração de alguns gases oriundos da produção avícola e suas consequências para a saúde dos seres humanos.....	56
Tabela 9 - Concentração em ppm de amônia (NH ₃) e dióxido de carbono (CO ₂) na produção de frangos de corte, obtida em diferentes períodos de crescimento...	56
Tabela 10 - Equacionamento dos fluxos de massa para insumos, produtos e rejeitos do processo.	79
Tabela 11 - Estimativa do tipo de ventilação praticado em diferentes fases de criação.	85
Tabela 12 - Estimativa do PCI a partir da composição elementar extraída de diferentes trabalhos.	100
Tabela 13 - Subdivisões da massa de ar renovado para cada fase do ciclo.....	101
Tabela 14 - Estimativa da potência instalada e demanda energética dos processos.	103
Tabela 15 - Composição elementar e valor do PCI adotados para a lenha.	109
Tabela 16 - Cálculo dos calores específicos de elementos envolvidos no processo de combustão.	110

Tabela 17 – Poder calorífico da cama de frangos gerada a partir da composição elementar.....	116
Tabela 18 - Resultados fornecidos pelo modelo considerando o cenário proposto (10,8 aves/m ² , mortalidade de 3,5%, ciclo de 42 dias, ambiente de referência a P ₀ , T ₀ e ϕ_0).	132
Tabela 19 - Balanço hídrico nas aves de corte, para diferentes temperaturas e umidades relativas do ar atmosférico em lotes de 42 dias com 10,8 aves/m ² . Em negrito o ambiente de referência proposto.	135
Tabela 20 - Estimativa da cama de frangos gerada em um ciclo de produção de 42 dias para as linhagens e gêneros propostos no estudo.....	138
Tabela 21 - Aplicação do modelo desenvolvido no cenário padrão obtendo as saídas de massa.	139
Tabela 22 - Concentração de gases no ar úmido de saída, obtida pelo modelo desenvolvido e para o cenário proposto em um ciclo de criação. Considera apenas os gases gerados pela respiração e decomposição da cama sem contabilizar os gases de combustão.	140
Tabela 23 - Gases resultantes da respiração e da decomposição microbiana da cama, respectivamente para as fases inicial, de crescimento e final do ciclo produtivo.....	141
Tabela 24 - PCI e entalpias específicas associadas aos insumos, produtos e rejeitos do processo. As entalpias associadas à água líquida consideraram sua dependência com a temperatura: para a água de consumo (T = 20 °C), para os pintainhos e os frangos (T = 41 °C) e para os demais (T=T ₀).....	142
Tabela 25 - Contribuições energéticas dos principais insumos, produtos e rejeitos para o processo produtivo em um ciclo de 42 dias, utilizando aves mistas da linhagem Cobb e aquecimento à lenha.....	144
Tabela 26 - Resultados do balanço de massa e comparação entre os combustíveis amplamente utilizados no aquecimento dos galpões avícolas brasileiros. Faixa utilizada para a demanda térmica nos diferentes tamanhos de galpões com a) GLP: 400kg a 600kg e b) Lenha: 2500 kg a 12000 kg.....	147
Tabela 27 - Balanço de Energia para a faixa de consumo estimada na promoção do aquecimento.	149
Tabela 28 - Balanço de exergia para a faixa de consumo estimada na promoção do aquecimento.	151

Tabela 29 - Estado do ar úmido e demanda de água para diferentes condições de entrada do ar atmosférico, considerando a fase final do ciclo com uso de resfriamento evaporativo.	155
Tabela 30 - Balanço de energia no ar renovado durante a fase final. Considera 200 aspersores de médio fluxo por 2h/dia, 4h/dia e 8h/dia para o ambiente em 25°C, 30°C e 35°C respectivamente.....	157
Tabela 31 - Entradas e saídas exergéticas para o processo de arrefecimento na fase final. Considera 200 aspersores de médio fluxo utilizados por 2h/dia, 4h/dia e 8h/dia para o ambiente com temperaturas em 25°C, 30°C e 35°C respectivamente.	159
Tabela 32 - Exergia destruída nos processos de combustão, desenvolvimento das aves, ar renovado nas fases inicial, crescimento e final, formação da cama a partir das excretas, bem como no ciclo completo para galpões convencionais e climatizados, considerando aves mistas Cobb com 42 dias.	161
Tabela 33 - Exergia destruída por ciclo/por ave criada e eficiência de segunda lei para um ciclo de produção para diferentes densidades de criação em galpões convencionais e climatizados.	163
Tabela 34 - Exergia destruída e eficiência de segunda lei em um ciclo de produção considerando a diferença na energia elétrica demandada por galpões convencionais e climatizados para 13000 aves mistas da linhagem Cobb em ciclo de 42 dias.	164
Tabela 35 - Exergia destruída e eficiência de segunda lei para cada ciclo criado em galpões convencionais considerando o gênero das aves nas duas linhagens estudadas.	165
Tabela 36 - Disponibilidade exergética da cama de frangos em um ciclo de produção comparada às demandas exergéticas dos insumos utilizados no aquecimento dos galpões.	166

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Conversão Alimentar
CTR	Carga Térmica de Radiação
EB	Energia Bruta
ED	Energia Digestível
EM	Energia Metabolizável
EMn	Energia Metabolizável corrigida
FAO	Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
hab	Habitante
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MS	Massa seca
NPK	Nitrogênio-Fósforo-Potássio
PC	Poder Calorífico
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
ppm	Partes por milhão
TU	Teor de Umidade
UBABEF	União Brasileira de Avicultores
UR	Umidade relativa
ZCT	Zona de Conforto Térmico

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>A – ASH</i>	cinzas (%)
<i>A</i>	área (m ²)
<i>B</i>	exergia (kJ)
<i>b</i>	exergia por unidade de massa (kJ/kg)
<i>C</i>	carbono (%)
<i>c</i>	calor específico (kJ/kg-K)
<i>CTR</i>	carga térmica radiante (W/m ²)
<i>d</i>	tempo do ciclo (dias), diferencial, variação
<i>E</i>	energia (kJ)
<i>EB</i>	energia bruta (kJ/kg)
<i>EM</i>	energia metabolizável (kJ/kg)
<i>EMn</i>	energia metabolizável corrigida (kJ/kg)
<i>FC</i>	carbono fixo (%)
<i>g</i>	aceleração gravitacional (m/s ²)
<i>H</i>	entalpia (kJ)
<i>HP</i>	produção de calor (kW)
<i>h</i>	entalpia específica (kJ/kg)
<i>i</i>	taxa (%)
<i>LW</i>	peso vivo (g)
<i>m</i>	massa (kg)
<i>MS</i>	massa seca (%)
<i>MN</i>	massa natural (%)

n	número de elementos (-)
ntd	número de trocas diárias (-)
N	nitrogênio (%)
O	oxigênio (%)
P	pressão (kPa)
PC	poder calorífico (kJ/kg)
PCI	poder calorífico inferior (kJ/kg)
PCS	poder calorífico superior (kJ/kg)
$\dot{Q}$	taxa de transferência de calor (kW)
R	constante universal dos gases perfeitos (kJ/kmol.K) (kJ/kg.K)
S	enxofre (%)
S	entropia (kJ/K)
s	entropia específica (kJ/kgK)
TRM	temperatura radiante média (K)
T_i	temperatura interna (K)
U	coeficiente global de transferência de calor
UR	umidade relativa (%)
VC	volume de controle (-)
VM	matéria volátil (%)
V, v	velocidade (m/s)
∇	volume (m ³)
X, x	fração molar da substância na mistura (-)
z	cota (m)

LETRAS GREGAS

η	rendimento (%)
β	relação entre exergia química e poder calorífico inferior (-)
μ	potencial químico (kJ)
ρ	massa específica (kg/m ³)
x	ciclo de vida das aves (dias)
ϕ	fluxo de ar (m ³ /s)

SUBSCRITOS

0	estado de referência
00	estado de referência para a exergia química
a	ar seco
ar	ar úmido
abs	Material absorvente
b	Exergético
c	Cinética
$cama$	Cama
$carc$	Carcaças
$ciclos$	Ciclos
$comb$	combustível, combustão
$cresc$	Crescimento

<i>d</i>	Dias
<i>e</i>	Entrada
<i>en</i>	energético, energia
<i>exa</i>	Exaustores
<i>exc</i>	Excretas
<i>exp</i>	Expirado
<i>f</i>	física, frangos
<i>gc</i>	gases de combustão
<i>glp</i>	gás liquefeito de petróleo
<i>gn</i>	globo negro
<i>ger</i>	gerado, gerada
<i>i</i>	i-ézimo elemento
<i>in</i>	Inicial
<i>insp</i>	Inspirado
<i>l</i>	Lenha
<i>liq</i>	Líquido
<i>ld</i>	lenha por dia
<i>meio</i>	Meio
<i>mort</i>	Mortalidade
<i>p</i>	potencial, pressão constante, pintainhos
<i>P</i>	produtos de uma reação
<i>q</i>	Química
<i>rac</i>	Ração
<i>R</i>	Reagentes
<i>s</i>	Saída
<i>sat</i>	Saturação
<i>sist</i>	Sistema
<i>Tp</i>	total de pintainhos
<i>Tf</i>	total de frangos
<i>Tab</i>	total de material absorvente
<i>Tcarc</i>	total de carcaças
<i>Th20</i>	total de água
<i>TI</i>	total de lenha
<i>Trac</i>	total de ração
<i>v</i>	Vapor
<i>VC</i>	volume de controle
<i>w</i>	Água

SUMÁRIO

RESUMO	IX
ABSTRACT	XI
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABELAS	XVI
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	XIX
LISTA DE SÍMBOLOS	XIX
LETRAS GREGAS	XX
SUBSCRITOS.....	XX
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E O ESTADO DA ARTE.....	3
1.2 OBJETIVOS E QUESTÃO DE PESQUISA	8
1.2.1 Objetivo geral.....	8
1.2.2 Objetivos específicos	9
1.3 ESTRUTURA DA TESE.....	9
2 SISTEMA DE PRODUÇÃO, INSUMOS, PRODUTOS E REJEITOS DIRETOS	10
2.1 O PROCESSO PRODUTIVO DE FRANGOS DE CORTE	10
2.1.1 A avicultura de corte brasileira no contexto mundial	10
2.1.2 Instalações e equipamentos do sistema produtivo.....	12
2.1.3 Manejo adotado na produção de frangos de corte.....	18
2.1.4 O metabolismo dos frangos.....	23
2.2 INSUMOS, PRODUTOS E REJEITOS DO PROCESSO PRODUTIVO.....	25
2.2.1 Quantificação e características do material absorvente.....	25
2.2.2 Pintainhos e padrões de crescimento.....	28
2.2.3 Rações fornecidas e a conversão alimentar.....	29
2.2.4 Uso e consumo da água no ciclo de produção	33
2.2.5 Renovação do ar e principais características no ciclo produtivo	35
2.2.6 Dendroenergia e o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)	38
2.2.7 Demanda e consumo de energia elétrica para um ciclo de produção	42
2.2.8 Metabolismo dos frangos e a Carga Térmica Radiante (CTR).....	43
2.2.9 Os frangos e objetivos de desempenho.....	46
2.2.10 A cama de frangos: quantidade e características	48
2.2.11 Taxas de mortalidade e carcaças rejeitadas.....	52

2.2.12 Geração de gases, poeiras e resíduos da combustão	53
3 MATERIAIS E MÉTODOS	57
3.1 DESCRIÇÃO DO MODELO	57
3.2 ANÁLISE TERMODINÂMICA	61
3.2.1 Conservação da massa	61
3.2.2 Primeira lei da termodinâmica e análise energética.....	61
3.2.3 Segunda lei da termodinâmica e análise exergética	66
3.3 EQUACIONAMENTO DOS BALANÇOS DE MASSA	75
3.3.1 Estimativa para a massa dos insumos.....	80
3.3.2 Balanço de massa no processo de crescimento dos frangos.....	87
3.3.3 Balanço de massa no processo de arrefecimento e ventilação	91
3.3.4 Balanço de massa no processo de combustão.....	92
3.3.5 Balanço de massa na cama de frangos gerada	93
3.3.6 Estimativa para a massa dos produtos e dos rejeitos	94
3.4 EQUACIONAMENTO DO BALANÇO DE ENERGIA PARA O CICLO	97
3.4.1 As entalpias associadas aos insumos	100
3.4.2 Balanço de energia no processo de desenvolvimento dos frangos	104
3.4.3 Balanço de energia na formação da cama de frangos	106
3.4.4 Balanço de energia para o ar renovado na fase inicial	107
3.4.5 Balanço de energia para o ar renovado na fase de crescimento	112
3.4.6 Balanço de energia para o ar renovado na fase final	114
3.4.7 Estimativa para a entalpia dos produtos e rejeitos	115
3.5 EQUACIONAMENTO DA EXERGIA DESTRUÍDA NOS PROCESSOS	118
3.5.1 Estimativa da exergia associada aos insumos	119
3.5.2 Cálculo da exergia destruída no desenvolvimento dos frangos e formação da cama a partir das excretas	121
3.5.3 Cálculo da exergia destruída para aquecimento na fase inicial	123
3.5.4 Cálculo da exergia destruída para ambiência na fase de crescimento.....	126
3.5.5 Cálculo da exergia destruída no arrefecimento na fase final	126
3.5.6 Estimativa da exergia associada aos produtos e rejeitos	128
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	130
4.1 BALANÇOS DE MASSA PARA O CICLO PRODUTIVO	131
4.2 BALANÇOS DE ENERGIA PARA O CICLO PRODUTIVO	140
4.3 AVALIAÇÃO EXERGÉTICA NO AQUECIMENTO DOS AVIÁRIOS	146
4.4 AVALIAÇÃO EXERGÉTICA NO ARREFECIMENTO DOS AVIÁRIOS	153

4.5 ANÁLISE EM AVIÁRIOS CONVENCIONAIS E CLIMATIZADOS	160
4.6 PROPOSIÇÕES E ADEQUAÇÕES AO CICLO PRODUTIVO.....	165
5 CONCLUSÕES E CONTINUIDADE DO TRABALHO.....	169
6 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	172

1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios do século é garantir o acesso mundial à alimentação. Apesar dos constantes avanços tecnológicos e inúmeras inovações na ciência e tecnologia, aproximadamente 800 milhões de pessoas no mundo, atualmente, ainda sofrem com a falta de alimentos (FAO-ONU, 2016). No Brasil, os estabelecimentos agropecuários são os principais responsáveis pela produção de alimentos e as pequenas propriedades rurais da agricultura familiar possuem papel fundamental na erradicação da fome, ao disponibilizarem boa parte da oferta interna (IBGE, 2009).

Apesar das políticas públicas recentemente implantadas, a demanda histórica do campo ainda é elevada. Há anos a falta de incentivos aos pequenos produtores rurais vem inviabilizando a manutenção da atividade agropecuária, principalmente nas propriedades de pequeno porte, administradas pelos produtores e seus familiares. A restrita quantidade territorial, falta de maquinários, ausência de incentivo para aquisição de insumos e o baixo poder de negociação diante do mercado de *comodities*, forçou a diversificação da produção como forma de manutenção familiar e complemento às receitas da propriedade rural (MIRANDA; MARTINS, 2015).

Esse contexto, aliado às boas condições climáticas, permitiu a inserção do sistema de produção intensiva nas pequenas propriedades rurais, onde se destaca a criação de frangos. Atualmente, um terço da proteína animal consumida no mundo é proveniente carne de frango, caracterizando-a como uma das formas mais rápidas e de menor custo de produção. De acordo com Oliveira e Monteiro (2013):

A produção de frangos é uma atividade fundamental para o desenvolvimento econômico do Brasil e de forma mais efetiva para o desenvolvimento das regiões onde estão inseridas. Por ser uma cadeia complexa que envolve relações e inter-relações com outras atividades (milho, farelo de soja, vitaminas, minerais, sanidade animal, transporte, máquinas e equipamentos, genética avançada, etc), apresenta um grande efeito multiplicador da renda e de emprego (OLIVEIRA; MONTEIRO, 2013, p.1).

A região sul do Brasil é a maior produtora de frangos de corte do país com forte destaque internacional e, tal condição, torna a atividade um dos processos mais formatados na produção intensiva (IBGE, 2016). Em contrapartida, ainda existe um elevado custo energético para produção, que poderia ser melhorado se as quantidades mássicas dos insumos demandados, as transformações energéticas e

irreversibilidades ocorridas em cada ciclo produtivo recebessem uma atenção especial (FUNCK; FONSECA, 2008).

Para aperfeiçoar os processos, reduzir os custos e elevar a qualidade dos produtos é incontestável a implantação permanente de novas tecnologias, as quais elevam a demanda por energia. Entretanto, o acesso a novas tecnologias e incentivos é um privilégio inacessível para a maioria dos agricultores, que são forçados a utilizar mão de obra familiar e exaustivo trabalho braçal em suas atividades cotidianas. Isto, sem citar o êxodo rural e o desinteresse dos mais jovens pela vida no campo (MIRANDA; MARTINS, 2015).

Em relação à demanda energética, após a crise mundial do petróleo nos anos 70, intensificou-se a substituição de fontes de energia convencionais, diversificando a matriz energética brasileira através de pequenas usinas de geração alternativa, que minimizam impactos ao meio ambiente e possuem menor valor de implantação. Nesta perspectiva, as energias provindas da biomassa tornaram-se alternativas interessantes ao aliar o bem-estar das pessoas com fontes renováveis e limpas para conversão de energia elétrica, mecânica ou térmica. Descentralizar a geração de energia elétrica a partir destas fontes, em microcentrais geradoras localizadas próximo aos centros de consumo, tornou-se uma possibilidade incontestável para a expansão da matriz energética brasileira (DO VALE et al., 2007).

A produção intensiva de frangos de corte é grande geradora de resíduos de biomassa que, quando não utilizados, deixam de gerar substancial energia demandada pelos próprios estabelecimentos agropecuários. Este descuido com os resíduos, além de proporcionar elevada agressão ao meio ambiente, deixa de transformá-los em insumos que, por sua vez, poderiam elevar os lucros ou equilibrar o orçamento das propriedades. Um exemplo é a reutilização da cama de frangos para geração de energia elétrica e térmica através de biodigestores ou da queima direta na forma de peletes ou briquetes, para aquecimento dos espaços criatórios (BALDIN, 2013).

Quantificar os insumos e os rejeitos da produção, mesmo com toda diversidade dos galpões brasileiros, é a base para propor modificações no processo produtivo. Mas a avaliação das transformações energéticas deve considerar, além da quantidade transformada, também a qualidade e disponibilidade desta energia. Uma forma de analisar estas perdas nos processos de conversão é a Análise Exérgica, uma técnica que utiliza o conceito de Exergia na busca da máxima conversão em

trabalho útil. Consiste em uma excelente ferramenta para estas análises uma vez que possibilita o diagnóstico das irreversibilidades, indica as maiores perdas na disponibilidade energética e permite indicar possíveis melhorias nos processos de conversão (KRAHL; PINTO CABRAL, 2010). Com este diagnóstico é possível propor melhorias para redução de impactos ambientais e melhorar o desempenho produtivo e a qualidade de vida dos avicultores.

A avaliação exergetica nunca foi realizada em sistemas produtivos de frangos de corte em pequena ou grande escala, tampouco considerando a realidade brasileira. O presente trabalho aplica esta ferramenta ao sistema intensivo de produção, considerando o contexto brasileiro com foco na região sul do país. A partir de um detalhado balanço de massa e correspondente balanço de energia, o diagnóstico pode identificar as principais irreversibilidades nas conversões energéticas que, por sua vez, indicam os principais gargalos na melhoria nas instalações, equipamentos e manejo.

1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E O ESTADO DA ARTE

Este capítulo apresenta a síntese de alguns estudos de avaliação de processos na atividade agropecuária, baseados nas Leis da Termodinâmica. A ênfase é a produção intensiva de frangos de corte, mas também destacam-se estudos para quantificar a energia associada a insumos, produtos e rejeitos em outros processos produtivos do meio rural.

A preocupação com o meio ambiente tem instigado o aprimoramento de técnicas de avaliação dos sistemas na busca da sustentabilidade. Deste modo, o princípio da conservação da energia tornou-se uma boa ferramenta de diagnóstico, no intuito de impulsionar novas tecnologias. Sua função é apurar a energia investida em determinado sistema de produção, indicando as demandas e a eficiência dos processos, bem como as entradas e saídas energéticas de determinado sistema (CAMPOS; CAMPOS, 2004).

A partir de estudos realizados no Brasil e em outras partes do mundo, Campos e Campos (2004) listaram alguns balanços energéticos aplicados ao setor agrícola, caracterizando-os como indicadores de sustentabilidade para os sistemas agropecuários. Suas conclusões com o trabalho apontam que:

(...) os dados relacionados a consumo e eficiência energética constituem poderosas ferramentas de diagnóstico de sistemas produtivos agrícolas. (...) Porém, no Brasil os pesquisadores têm demonstrado pouco interesse no desenvolvimento de trabalhos de balanço de energia como meio de avaliar processos produtivos. (...) A utilização de balanços de energia pode constituir-se importante instrumento para definição de novas técnicas e manejos agropecuários (...) (CAMPOS; CAMPOS, 2004, p. 1983).

Neste sentido, como aplicação da eficiência energética em sistemas produtivos agropecuários, Angonese et al. (2006) quantificaram/caracterizaram as principais entradas e saídas de energia para a fase terminal (120 dias) na criação intensiva de suínos. Os resultados apontaram a ração, com 95,3% do total da energia direta investida, como maior custo energético do sistema. Na energia de saída, os suínos para abate corresponderam a 56,8% e a produção de dejetos foi indicada a retornar para o sistema como geração de biogás (13%) e biofertilizante (30,1%).

Relativo ao processo produtivo de frangos de corte, um dos trabalhos mais significativos, no Brasil, foi realizado em oito lotes de criação da cidade de Sertãozinho – SP, onde Santos e Lucas Junior (2004) avaliaram o fluxo de energia em galpões comerciais. A massa e o Poder Calorífico Inferior (PCI) de cada componente, direta ou indiretamente envolvidos no processo produtivo foram quantificados e, posteriormente, foram realizados os cálculos de eficiência energética.

O resultado apontou um rendimento de 28% com uma entrada energética média de 2453 GJ por lote produzido, da qual, 51,2% corresponderam à energia indireta. Do total de energia direta investida, 10,2% foi atribuído à maravalha, 0,3% foi atribuído às aves, 86,5% à ração, 0,8% à eletricidade e 2,1% ao GLP.

Segundo os autores, a entrada energética associada à água, ao combustível e à atividade humana foram desprezíveis, com percentuais somando menos de 0,14%. Mas isso pode ser justificado ao considerarem a energia associada à água como energia elétrica de bombeamento, sem qualquer relação com sua entalpia. Além disso, o estudo não considerou o ar atmosférico demandado no processo.

Do total de produtos e rejeitos, 46,8% da energia foi associada à cama de frangos, 52,5% aos frangos vendidos e 0,7% esteve associada às aves mortas/descartadas. Como forma de incorporação energética ao sistema, foram indicadas a compostagem para os frangos descartados e a produção de biogás para os rejeitos da cama (SANTOS; LUCAS JUNIOR, 2004).

A Figura 1 mostra a análise energética realizada no sistema de produção apresentado.

Figura 1 - Balanço Energético apresentado no sistema de produção de frangos de corte.

Fonte: Santos e Lucas Junior (2004).

Recentemente, estudos foram realizados em relação à capacidade energética dos resíduos do processo produtivo, principalmente a partir da geração da cama de frangos. Dentre eles pode-se citar Baldin (2013), que investigou, técnica e economicamente, as possibilidades de aproveitamento energético da cama gerada nos aviários do sudoeste do Paraná. Considerando o processo de biodigestão anaeróbica, o objetivo era atender as necessidades térmicas e elétricas do aviário.

Bratti (2013) caracterizou a cama de frangos gerada na região de Dois Vizinhos – PR, sua decomposição e aplicação na produção de milho e aveia preta. Fukayama (2008) avaliou a produção deste insumo em quatro lotes de criação na cidade de São Carlos – SP, além do seu uso na produção de biogás e biofertilizante aplicado ao cultivo de milho. Por sua vez, Vieira (2011) caracterizou os diferentes tipos de cama utilizados na avicultura do estado de Minas Gerais.

Pesquisas focadas nos padrões de qualidade da produção, na redução de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e na qualidade do ar mediram os principais poluentes, além de indicar formas de cogeração energética para o processo de produção, elevando os padrões de sustentabilidade. Carvalho et al. (2011) avaliaram as condições da cama e do ar para frangos de um dia de vida em diferentes tipos de alojamentos no estado de São Paulo e quantificaram a emissão de gases/umidade da cama encontrados nos galpões.

Outros autores quantificaram e caracterizaram os insumos a partir das demandas do sistema produtivo, como é o caso de Bueno e Rossi (2006) avaliando

o consumo de energia elétrica e eficiência energética em galpões comerciais de Rio Claro – SP; Ferreira e Turco (2003) com o mesmo estudo em dois ciclos de criação em Jardinópolis – SP; Dagostini et al. (2004) determinando a composição química e os valores energéticos de diferentes alimentos para os frangos; Menezes (2013) a partir da avaliação do poder calorífico e análise imediata de maravalha utilizada como material absorvente na região oeste do Paraná.

Paixão et al. (2009) avaliaram o poder calorífico e consumo de espécies arbóreas utilizadas em Dois Vizinhos – PR, para aquecimento em aviários e Nascimento (2011) realizou uma análise energética em um aviário dark-house, simulando o balanço energético do sistema a partir de geração solar e eólica como suprimento parcial ou total de energia. Além destes, um balanço energético foi realizado por Funck e Fonseca (2008), comparando diferentes tipos de aquecimento (gás liquefeito de petróleo e lenha) na região oeste do Paraná e avaliando o gasto com energia e o desempenho dos frangos em relação à opção utilizada.

As contribuições destes autores indicaram quantidades de ração, água, energia elétrica e características dos animais, calculando suas capacidades energéticas e contribuições para o ciclo de produção. Portanto, são importantes no avanço das pesquisas e tomadas de decisão. No entanto, análises focadas na avaliação energética permitem quantificar a energia transformada mas não permite mensurar a degradação da energia em cada processo analisado.

Apesar de todo o exposto em relação à avaliação energética, uma avaliação de processos psicrométricos aplicados à agricultura, realizada por Leal, Cortez e Nebra (2000), aponta que a eficiência energética é utilizada de maneira errônea para otimização, sendo pouco eficaz na identificação da real capacidade de um sistema realizar trabalho. Os autores indicam a avaliação exergética como a forma mais consistente para o diagnóstico dos processos no meio rural do ponto de vista termodinâmico. Ela fornece as eficiências reais, os impactos ambientais e a sustentabilidade dos sistemas de energia por exprimir quantitativamente a degradação qualitativa do uso da energia.

A mensuração quantitativa somente é possível se identificadas as perdas inerentes aos sistemas, as quais podem ser elucidadas pela Segunda Lei da Termodinâmica com o conceito de Exergia. Ideias sobre a utilização da Exergia para contabilizar os recursos naturais e as perdas nestes processos foram propostas por Wall em 1977 seguido por Szargut que, em 1978, propôs o índice de custos

cumulativos¹. Oliveira Junior (2013) também relata o índice de renovabilidade exergética que leva em conta a exergia associada aos produtos e a exergia investida para determinada conversão energética. Estes trabalhos mostraram que sistemas sustentáveis devem manter o potencial de suas fontes na realização de trabalho. Se a taxa de consumo exergético de um sistema é muito maior do que pode ser regenerado, não há sustentabilidade (WALL; GONG, 2001a).

Relativo ao uso da exergia, Dincer, Hussain e Al-Zaharnah (2005) aplicaram simultaneamente a avaliação energética e exergética no setor agrícola da Arábia Saudita a partir do consumo de óleo diesel em tratores e máquinas agrícolas, além da energia elétrica em bombas. Os recursos naturais (combustíveis fósseis) e demandas (energia elétrica) foram quantificados e discutidos para o setor considerado. A eficiência exergética demonstrou-se levemente inferior à eficiência energética, justificada devido à presença de irreversibilidades. Pelo pequeno potencial hídrico, os autores indicam a melhor forma de uso de energias renováveis no setor agrícola através do bombeamento de água por fonte solar.

O setor agrícola da Turquia foi avaliado através da eficiência energética e exergética por Utlu e Hepbasli (2006). O estudo considerou o uso de combustíveis e eletricidade, que são as principais fontes de energia do setor para veículos agrícolas e bombeamento de água. Durante o período analisado, a eficiência de uso da energia obtida variou entre 29,1% a 41,1%, enquanto a eficiência de utilização da exergia total foi encontrada entre 27,9% e 37,4%.

Outra aplicação da avaliação exergética no sistema agrícola foi realizada por Chen et al. (2009) para a agricultura chinesa, a partir de recortes na pecuária, silvicultura e setor de pesca. Foram analisados e discutidos os principais insumos, rejeitos e disponibilidades de recursos naturais renováveis ou não renováveis e, por fim, publicada uma ferramenta para avaliação das economias ecológicas.

Ahamed et al. (2011) apontam que a análise exergética permite distinguir entre as fontes de energia de alta qualidade e de baixa qualidade e aplicaram a mesma avaliação ao setor agrícola da Malásia. Utilizaram o consumo de gasolina, diesel e óleo combustível como base energética do setor e compararam o rendimento energético e exergético com os obtidos para o mesmo setor em outros países. A

¹ Expressa a soma da exergia dos recursos naturais consumidos em todos os passos de um processo de produção.

média encontrada para a eficiência exergética no setor entre 1991 e 2009 foi de 22%.

Esses são os trabalhos mais próximos da atividade agropecuária com diagnóstico baseado em exergia dos quais se tem conhecimento. Percebe-se que, apesar de considerada uma excelente ferramenta de análise para processos de conversão de energia, aplicada em diversos setores da sociedade, a avaliação exergética ainda é pouco utilizada na análise de sistemas produtivos da agropecuária. Não foi encontrado nenhum diagnóstico aplicado ao processo produtivo de frangos de corte utilizando este tipo de avaliação.

Vale citar que o uso da avaliação termodinâmica a este ou outros sistemas de produção da pecuária intensiva ainda é muito incipiente. Em geral, quando realizados, estes estudos são apresentados à luz da Primeira Lei da Termodinâmica que, apesar de ser uma importante ferramenta na avaliação dos sistemas, não permite a avaliação qualitativa da degradação da energia. Assim, há um enorme campo de pesquisas a ser explorado através da Exergia, o que demonstra o ineditismo e relevância deste trabalho.

1.2 OBJETIVOS E QUESTÃO DE PESQUISA

A produção intensiva de frangos de corte possui métodos formatados a partir de estudos quantitativos nos âmbitos ambiental, econômico e de sustentabilidade, mas que não contemplam balanços detalhados de massa e análises qualitativas dos processos de conversão de energia a partir da aplicação simultânea de ambas, Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é aplicar a avaliação exergética ao sistema produtivo de frangos de corte, através de detalhados balanços de massa e energia, como diagnóstico propositivo de adequações estruturais, tecnológicas e de manejo, visando à sustentabilidade a partir do reaproveitamento de resíduos e da redução de impactos ambientais.

1.2.2 Objetivos específicos

- Pesquisar as características, peculiaridades e entraves do sistema produtivo de frangos de corte, com foco no sistema brasileiro e ênfase no sul do país;
- Levantar quantidades, funcionalidades e características dos insumos, produtos e rejeitos vinculados ao processo produtivo apresentando um detalhado balanço de massa;
- Apresentar uma análise dos principais processos de conversão de energia em um ciclo de produção;
- Aplicar a análise exergética ao sistema produtivo diagnosticando as principais irreversibilidades e rejeitos além de compará-la a outras formas de análise já publicadas;
- Propor adequações ao sistema de produção aliando fontes renováveis de energia às sobras energéticas do processo, para minimizar os impactos ambientais.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

A seção 2 é composta por duas partes que merecem destaque. A primeira abrange conceitos importantes do sistema produtivo de frangos de corte em relação às características construtivas, formas de manejo, fisiologia das aves, bem como orientações indicadas para melhor desempenho produtivo. Na segunda parte apresentam-se os insumos, produtos e rejeitos e são caracterizadas e quantificadas as entradas e saídas do processo produtivo, cujos dados relevantes são aplicados no trabalho.

A seção 3 apresenta as ferramentas e o conjunto de equações utilizadas, além do método e fluxograma de desenvolvimento do trabalho. Foram incluídos um detalhado balanço de massa, um balanço de energia e o cálculo da exergia destruída em cada processo. A seção 4 expõe os resultados e, ao compará-los a outros estudos destaca-se o ineditismo do trabalho. Foram realizados balanços de massa e energia bem como análise exergética dos processos identificáveis no ciclo, apontando as principais irreversibilidades ocorridas no sistema. Com isso, foi possível analisar possibilidades de adequação estrutural e de manejo para as conversões de energia em cada processo. Diferentes tipologias construtivas e padrões tecnológicos foram analisados e, a partir da exergia destruída em cada uma, foram propostas sugestões e adequações ao sistema produtivo.

2 SISTEMA DE PRODUÇÃO, INSUMOS, PRODUTOS E REJEITOS DIRETOS

2.1 O PROCESSO PRODUTIVO DE FRANGOS DE CORTE

Esta seção apresenta uma discussão sobre o processo produtivo de frangos de corte com ênfase no modelo brasileiro. Primeiramente, situa-se a avicultura brasileira no âmbito mundial, seguindo com características e funcionalidades estruturais dos ambientes criatórios para o sistema integrado e, ao final, o levantamento das principais instruções de manejo e conhecimentos sobre a fisiologia das aves.

2.1.1 A avicultura de corte brasileira no contexto mundial

A avicultura brasileira sempre se destacou em relação a outros países produtores devido ao diferencial de clima e tipologia de aviários, apresentando resultados vantajosos no desempenho, bem-estar das aves, qualidade do ar e sanidade dos lotes (ABREU; ABREU, 2011).

De acordo com Nääs (2008), devido às recentes mudanças de visão da sociedade, acentuou-se a preocupação com os valores éticos em relação aos animais de produção (carne e ovos) e o mercado consumidor passou a considerar o bem-estar e a sustentabilidade nos processos (NÄÄS, 2008).

O mesmo autor sugere que o conceito de bem-estar animal deve perpassar por cinco liberdades necessariamente atendidas: liberdade psicológica (isenção de medo, estresse ou ansiedade), liberdade comportamental (capacidade de expressar seu comportamento normal), liberdade fisiológica (isenta de fome ou sede), liberdade sanitária (isenta de dor, doença ou injúria) e liberdade ambiental (viver em ambiente confortável e adequado).

No entanto, com a importância das exportações, o agronegócio e empresas que compõem a cadeia produtiva têm disseminado o errôneo conceito de bem-estar das aves com foco econômico e produtivo, priorizando estes elementos a fim de obter o melhor retorno em produção e Conversão Alimentar (CA). Em geral, os investimentos econômicos, de pesquisa e tecnologia são realizados sem muita atenção aos impactos ambientais gerados pelo sistema produtivo e melhoria tecnológica das pequenas propriedades. Neste contexto, é necessário avaliar se a produção realizada nas escalas atuais realmente atende ao conceito de bem-estar e, do ponto de vista dos recursos naturais, se é sustentável manter a produção nestas

taxas. Mais além, muitas regras de manejo e bem-estar podem ser lançadas pelo mercado internacional para criar barreiras comerciais, fazendo o Brasil adequar-se a certas normas específicas de produção.

Atualmente, mais de 30% da proteína consumida no mundo têm sua origem na carne de frango. Além de ser uma das alternativas mais rápidas e de menor custo de produção de proteína animal, caracteriza-se como um dos principais suprimentos alimentares e nutricionais de diversos países. O relatório anual de 2015 da Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA) indica que o consumo per capita/ano de carne de frango no território brasileiro aumentou de 29,91 kg/hab em 2000 para 42,78 kg/hab em 2014 e, por sua vez, a produção aumentou de 5,98 milhões de toneladas para 12,69 milhões no mesmo período, sendo absorvida em 67,7% pelo mercado interno (ABPA, 2015).

Graças ao modelo de produção integrada, utilizado nos últimos cinquenta anos, o país conquistou um espaço significativo na produção mundial de carne, passando de 1,4% em 1961 para 10,5% em 2003 (MIELE; GIROTTO, 2005) e atingindo 15,36% da produção mundial em 2012, ano em que foi reconhecido como o maior exportador e terceiro maior produtor mundial de frangos, superado apenas pelos Estados Unidos e a China. Em 2015 sua contribuição mundial foi de 14,75%, mantendo seu status do ano anterior (ABPA, 2015).

No terceiro trimestre de 2015, o número de frangos abatidos chegou a 1,51 bilhões, atingindo um novo recorde da série histórica iniciada em 1997. A região sul respondeu por 59,8% desta produção distribuídos nos três estados, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, os quais são considerados os maiores produtores do Brasil (IBGE, 2016).

A criação de frangos de corte é uma das mais importantes atividades desenvolvidas dentro dos processos de produção intensiva. Seu progresso possibilitou grande potencial à indústria avícola no sentido de suprir a demanda de seus consumidores com uma proteína saudável e a um baixo custo. Um ciclo completo de criação desde o recebimento dos pintainhos até a entrega dos frangos para as agroindústrias, dentro dos parâmetros especificados, ocorre em menos de dois meses (FURLAN, 2006). Dependendo do objetivo de produção e o mercado consumidor, um lote pode ser finalizado em até 30 dias.

O sistema brasileiro de integração avícola, iniciado na década de 60, tem grande responsabilidade nestes números. Nesse sistema, a empresa integradora se

encarrega do fornecimento de matéria-prima (pintainhos), insumos (rações, vacinas e medicamentos) e assistência técnica (veterinários e técnicos agrícolas), ficando o avicultor integrado, responsável pela construção das instalações, aquisição dos equipamentos e insumos e pelo cuidado dispensado ao aviário, seguindo normas pré-estabelecidas pela empresa integradora.

Apesar de todos estes resultados, persistem vários entraves para avanços e melhorias no sistema de produção. A falta de recursos humanos e financeiros dos pequenos avicultores e o rápido avanço tecnológico que poucos conseguem acompanhar ainda são tópicos questionáveis na atual conjuntura brasileira. A tendência do agronegócio é reduzir o número de integrados e aumentar o tamanho das granjas extinguindo os pequenos produtores. Diante disto, maiores investimentos, novas pesquisas, adaptações aos galpões avícolas existentes e uso de tecnologias sociais devem ser constantemente sugeridos para melhorar a condição de trabalho dos pequenos avicultores e mitigar a agressão ao ambiente.

2.1.2 Instalações e equipamentos do sistema produtivo

O tipo de edificação é definido a partir de estudos detalhados de microclima regional onde o sistema produtivo é implantado. Neste trabalho, mesmo considerando outras realidades climáticas, maior ênfase é dado ao clima subtropical brasileiro encontrado na região sul, grande polo produtor de frangos de corte através do modelo integrado. Os ambientes criatórios passaram a ser valorizados com este sistema de produção que, aliado à importância da proteína do frango e a formação de uma ampla cadeia produtiva, desenvolveu-se fortemente nos últimos anos.

Durante as décadas de 1970 e 1980, com escassa tecnologia, o manejo de cortinas, o sombreamento e a ventilação natural eram considerados fundamentais para ambiência das aves. Estes cuidados estão presentes ainda hoje em alguns galpões da região sul do Brasil, principalmente, nos que ainda não conseguiram adequar-se às novas tecnologias.

A Figura 2 mostra, à esquerda, a orientação (Leste-Oeste) indicada para a construção dos aviários, evitando a incidência direta de luz solar nos frangos pelas laterais. Ao centro, um exemplo da posição de plantas caducifólias, utilizadas em

latitudes negativas e, à direita, o uso de quebra-ventos, principalmente quando ainda se faz necessária a ventilação pelo manejo de cortinas.

Figura 2 - Características construtivas dos galpões convencionais para criação intensiva de frangos de corte. Extraídas de Abreu e Abreu (2000).

Segundo Abreu e Abreu (2011), as características construtivas dos aviários devem ser pensadas para minimizar os efeitos adversos das condições meteorológicas sobre as aves e, dentre elas, devem ser consideradas a localização, a orientação solar, o pé-direito, os beirais, o telhado, o lanternim, o quebra-ventos, os sombreiros e características dos materiais utilizados. No entanto, com o avanço das pesquisas em genética e a inserção de galpões climatizados, aperfeiçoando a ambiência, permitiu-se a modificação ou até mesmo extinção de alguns destes itens nas construções, uma vez que o isolamento da ave ao meio externo é muito mais efetivo.

Indica-se para os galpões, telhado com inclinação entre 20° a 30°, cobertura reflexiva e bom isolamento térmico, beirais mínimos de 1,25 m e pé direito compatível com a largura do galpão. Para climas quentes com largura de 12 m, indica-se um pé direito de 4,2 m - 4,9 m de altura e comprimentos que levem em conta a produção, terraplenagens e nivelamento do terreno. Tamanhos de 100 m a 125 m têm se mostrado eficientes no manejo das aves e apresentam bom conforto térmico. O piso deve ser lavável e impermeável, geralmente com espessura entre 6 cm e 8 cm de concreto (AVILA et al., 2003).

Sistemas de aquecimento, ventilação e nebulização necessitam reduzir ao máximo as flutuações de temperatura durante as 24 horas do dia. Para isto, as extremidades do galpão são fechadas com madeira, fibra de vidro ou alvenaria e as laterais com telas e cortinas, as quais seguem determinadas regras de manejo.

Para auxiliar na ventilação natural, são instalados ventiladores de pressão positiva transversalmente/longitudinalmente ou exaustores de pressão negativa em

uma das extremidades do galpão. Tais escolhas dependem do nível de automatização e tecnologia utilizada na edificação.

O sistema de aquecimento, fortemente influenciado pelo isolamento térmico do telhado, deve fornecer em média $0,05 \text{ kWh/m}^3$ para climas temperados e $0,1 \text{ kWh/m}^3$ para climas com temperaturas mais baixas (COBB-VANTRESS, 2009). A Figura 3 mostra, à esquerda, o sistema de fornalhas à lenha e, à direita, o sistema de aquecimento à GLP direcionados para as aves, como sendo os principais sistemas de aquecimento utilizados no Brasil.

Figura 3 - Sistemas de aquecimento mais utilizados nos aviários convencionais brasileiros. Fonte: Funck e Fonseca (2008).

O sistema de aquecimento é utilizado, geralmente, na fase inicial de criação e as formas de transferência de calor podem ocorrer de forma indireta através do aquecimento do ar (em fornalha situada dentro do galpão ou fora do galpão com posterior distribuição do ar aquecido) ou de forma direta irradiada por campânulas que podem ser elétricas ou a gás (distribuídas uniformemente) na região do pinteiro. Outras formas são citadas na literatura, como o aquecimento elétrico ou o aquecimento sob o piso que transfere energia para a cama de frangos pela circulação de água aquecida sob o piso (AVILA et al., 2003). No entanto, estes sistemas não são utilizados nos aviários brasileiros devido ao alto custo de implantação e manutenção.

Os bebedouros podem ser do tipo pendular ou *nipple*. Os pendulares, apesar de apresentarem vantagens nos custos de implantação, apresentam problemas associados à qualidade da cama e da água, já que agentes contaminantes podem ser introduzidos pelos frangos no sistema, obrigando sua limpeza diária. Os

sistemas do tipo *nipple* são mais caros, em contrapartida apresentam menor risco de contaminação da água e menor tempo despendido no manejo.

O sistema de comedouros pode ser tubular ou de corrente. Indica-se um comedouro automático para cada 60 ou 70 aves e o número de linhas de comedouros é dado em função da largura do galpão. Em larguras de até 12,8 m são utilizadas duas linhas, três linhas em larguras de 13 m a 15 m e quatro linhas em 16 m a 20 m. Já os comedouros de corrente devem dispor 2,5 cm de espaço por ave e requerem maior manutenção e cautela com desperdício de ração. Geralmente são utilizados dois silos externos para armazenamento, equivalendo a 5 dias de consumo do galpão (COBB-VANTRESS, 2009). Na Figura 4 é possível visualizar o sistema de bebedouros, comedouros automáticos, sistema de cortinas e iluminação, bem como o preparo da área do pinteiro para o recebimento dos pintainhos.

Figura 4 - Detalhes do sistema automático de comedouros e bebedouros *nipple*, cortinas e sistema de ventilação para aviários convencionais. Fonte: www.aveplast.com.br. Acesso: jan/2017.

Os galpões devem conter sistema de iluminação que forneça condições de visibilidade às aves em períodos noturnos. Recomenda-se o uso de 25 lux (lúmen/m²), medido à altura da ave, para estimular o ganho de peso precoce. Após o sétimo dia de idade, recomenda-se diminuir a intensidade da luz gradativamente para 5-10 lux (COBB-VANTRESS, 2009).

Além dos cuidados internos aos aviários, é importante verificar as condições externas. Poeiras e gases eliminados não devem incidir em habitações e/ou na

vizinhança de tal forma a preservar a saúde do produtor e familiares. Para isto, é indicado o uso de biofiltros naturais ou artificiais² (ABREU; ABREU, 2011).

A diversificação nos modelos dos galpões e o rápido avanço tecnológico instigaram a necessidade de padronização na definição dos sistemas produtivos. Nela, levou-se em consideração a capacidade de produção, custos e nível tecnológico. Dentre estes sistemas, destacam-se o convencional, o semi-climatizado, o climatizado, o Dark-house, Brown-house, Blue-house e os aviários gigantes, cada um com seu grau de tecnologia associada, custo de implantação e retorno de produção (ABREU; ABREU, 2011). A classificação escolhida para os galpões de criação foi definida como:

O **Sistema Convencional**, que possui comedouro tubular, bebedouro pendular e sem forro. Não possui controle artificial da temperatura. O condicionamento térmico é natural com cortina de ráfia amarela, azul ou branca. **Sistema Semi-climatizado**, que possui comedouro tubular ou automático, bebedouro pendular ou nipple e ventiladores em pressão positiva. Pode ou não ter forro. Cortina de ráfia amarela, azul ou branca. **Sistema Climatizado**, cujo controle das condições térmicas ambientais é maior que os anteriores. Possui comedouro automático, bebedouro *nipple* e ventiladores em pressão positiva ou exaustores em pressão negativa. Sistema de resfriamento pode ser por nebulização ou *pad-cooling*. Pode ter ou não forro ou defletores e gerador de energia, dependendo da densidade populacional de aves. Cortina de ráfia amarela, azul, branca ou reflexiva. **Sistema Dark-house**, o qual possui comedouro automático, bebedouro *nipple* e exaustores em pressão negativa. O sistema de resfriamento pode ser por nebulização ou *pad-cooling*. Possui forro de polietileno preto de um lado e preto ou claro do outro lado. Alguns produtores utilizam defletores na entrada e saída do ar. Nesse sistema o controle da intensidade de luz é imprescindível e realizado por meio de *dimmer*. O uso de geradores de energia é indispensável. A cortina tem que ser bem vedada para não permitir entrada de ar, com vistas à maior eficiência do sistema de exaustão, sendo em polietileno preto de um lado e reflexiva do outro. Objetiva-se com esse sistema maior controle da iluminação e das condições térmicas ambientais no interior do aviário. **Sistema Brown-house**, assemelha-se ao dark-house, no entanto, o controle de luz natural na entrada e saída do ar não é eficiente e pode ser realizado por meio de armadilhas de luz confeccionadas com tijolos, telhas, madeira ou ferro. Possui comedouro automático, bebedouro nipple e exaustores em pressão negativa. O sistema de resfriamento pode ser por nebulização ou *pad-cooling*. Possui forro de polietileno preto de um lado e preto ou claro do outro lado. Alguns produtores utilizam defletores no forro. O uso de geradores de energia é indispensável. A cortina tem que ser bem vedada para não permitir entrada de ar, com vistas à maior eficiência do sistema de exaustão, sendo em polietileno preto de um lado e reflexiva do outro. **Blue-House e Green-house**, ambos os sistemas *blue* e *Green-house* utilizam a teoria da cor proporcionando maior produtividade das aves, por meio do

² Filtros artificiais capturam o pó fino contendo compostos que causam odor em fibras finas através de mecanismos físicos. Os biofiltros são materiais (material poroso ou carvão ativado) que proliferam micro-organismos e podem degradar os compostos químicos presentes no ar extraído do galpão.

controle da intensidade de luz e cor da cortina. Os sistemas são os mesmos, exceto a cor da cortina e do forro. Nos sistemas *blue e Green house*, a cortina e o forro são azuis ou verdes de um lado e reflexivos do outro, respectivamente. Possuem comedouro automático, bebedouro *nipple* e exaustores em pressão negativa. O sistema de resfriamento pode ser por nebulização ou *pad-cooling*. Alguns produtores utilizam defletores no forro. Necessitam de controle de luz natural por meio de light-trap na entrada e saída do ar. O uso de geradores de energia é indispensável. **Aviários gigantes:** o que muda nesse sistema é o tamanho do aviário. São estruturas gigantes de 150 m de comprimento, podendo alcançar 155 m, por 30 a 32 m de largura. Maior atenção deve ser dada ao dimensionamento de equipamentos, principalmente os de ventilação (pressão negativa) (ABREU; ABREU, 2011, p.8).

Os galpões abertos ainda correspondem à maioria dos aviários brasileiros. Neles, o manejo das cortinas é fundamental para a manutenção de um ambiente agradável com mínima flutuação de temperatura. Na parte superior elas devem se sobrepor a uma superfície sólida contendo uma mini-cortina e na base, fixa-se a uma mini-parede (elementos fundamentais para bom isolamento térmico evitando qualquer entrada de ar no nível do piso). Elas permanecem fechadas nos primeiros dias de vida das aves e abertas em dias mais quentes, devido à amônia (NH_3) frequentemente encontrada em grande quantidade a partir dos dejetos, calor e umidade (COBB-VANTRESS, 2009).

Para que todos os cuidados aliados às tecnologias de arrefecimento, iluminação e automação existentes funcionem de forma efetiva, é necessário o fornecimento de energia elétrica de forma contínua e segura. No entanto, no Brasil, a instabilidade da rede elétrica na área rural e o tempo para manutenção e reparos tornam esta atividade um fator de risco, com inúmeros casos de alta mortalidade de frangos. A descontinuidade no fornecimento de energia elétrica impede a manutenção do conforto térmico das aves com variações bruscas de temperatura e consequentes perdas na produção.

Na região sul do país, as cooperativas e agroindústrias indicam que os produtores reduzam este risco mediante investimentos em unidades de geração independentes que, geralmente, são asseguradas através de grupos geradores a diesel ou pela tomada de força de um trator (NASCIMENTO, 2011). Nesta perspectiva, o mercado oferece equipamentos com diversas escalas de potência, atendendo a demanda de pequenos, médios e grandes aviários.

A seu favor, este sistema de prevenção conta com a disponibilidade do produto no mercado e o fato de ser a única solução economicamente acessível até o

momento. Em seu desfavor, apresenta forte ruído, necessita de abastecimento com combustível não renovável e é um investimento ocioso durante todo o tempo não demandado. O fato de ser um equipamento mecânico exige constantes manutenções, sendo acionado “no vazio”, para manter o sistema funcional (BRASIL FOODS, 2009).

Como alternativa, é possível adotar a geração de energia solar com menores custos de implantação, menos poluentes durante o funcionamento e com a possibilidade de retorno financeiro através da microgeração distribuída. Ainda assim, para garantir a estabilidade elétrica do sistema é necessária a utilização de acumuladores de carga que garantam o fornecimento em momentos de indisponibilidade elétrica por parte das concessionárias, o que ainda requer muito avanço tecnológico e redução de custos.

2.1.3 Manejo adotado na produção de frangos de corte

A produção intensiva de frangos de corte respeita princípios de biossegurança³, dentre os quais, destaca-se a prática de alojamento “todos dentro todos fora”, em que os aviários são ocupados no momento da criação e totalmente desocupados no momento do abate. Isto permite realizar a higienização, desinfecção e reparos na instalação para alojamento de novos lotes (AVILA et al., 2003).

A primeira etapa de higienização, chamada de limpeza seca, engloba a retirada de todos os utensílios de uso do aviário, retirada de matéria orgânica do galpão e, por fim, a passagem da vassoura de fogo sobre a cama para redução das penas. A limpeza úmida, segunda etapa da higienização, consiste na lavagem dos equipamentos e da estrutura com água limpa antes de realizar a desinfecção.

A etapa de desinfecção destrói os micro-organismos através de agentes físicos (calor, radiação) e químicos (bactericidas e germicidas), fazendo rodízio de diferentes princípios ativos para evitar amostras microbianas resistentes aos

³O programa de biossegurança é composto por cuidados aplicados em todas as etapas da criação que objetivam diminuir o risco de infecções, aumentar a higiene nos plantéis, garantir a saúde do consumidor final do produto e reduzir a contaminação do ecossistema. Deve ser cumprido por todos os setores que compõem o sistema produtivo.

produtos aplicados. Após limpeza e desinfecção, o vazio sanitário⁴ permite a destruição de organismos não atingidos pelas etapas anteriores (JAENISCH et al., 2004). Com todos estes cuidados, os programas de biossegurança permanecem efetivos para sanidade dos plantéis.

Para acolhimento das aves, dispõe-se uma quantidade de material absorvente cujo objetivo é o isolamento térmico entre elas e o piso bem como absorção de umidade e excretas. Além de ser constituída de material absorvente, leve e atóxico (COBB-VANTRESS, 2009), sua função é dispor uma superfície macia que evite formação de calos no peito e lesões nos joelhos e coxim-plantar das aves (CARVALHO et al., 2011). Podem ser utilizados vários materiais de subprodutos industriais e restos de cultivos agrícolas, como maravalha, sabugos de milho triturado ou cascas de arroz e café (VIEIRA, 2011).

Devido à constante substituição da cama, a produção avícola gera milhões de toneladas anuais de resíduos e o principal uso destes resíduos ainda ocorre na forma *in natura* nas áreas agrícolas, mas este uso sem critérios técnicos pode acarretar grandes perdas dos nutrientes e contaminação dos solos (BENITES et al., 2010).

Existe a indicação de que a cama pode ser reutilizada até seis vezes sem que haja diferenças significativas nos índices de mortalidade, ganho de peso, consumo de ração, eficiência alimentar e qualidade das carcaças (SANTOS; LUCAS JR; SAKOMURA, 2005). Manejos mais recentes, adotam até 12 reusos com a mesma cama, no entanto, a reutilização pode elevar os níveis de amônia liberada de quantidades recomendadas e aceitáveis, 20 partes por milhão (ppm), para 60 ppm a 100 ppm (CARVALHO et al., 2011).

O programa de manejo com as aves depende de linhagem, clima, gênero e critérios adotados pelas empresas comercializadoras. Os cuidados devem iniciar antes mesmo das aves chegarem ao aviário, com a checagem de aquecedores, ventiladores e termostatos bem como a aferição de temperatura e umidade com 48 horas de antecedência. Na chegada das aves faz-se necessária nova avaliação do sistema de ventilação mínima, bebedouros e comedouros.

Segundo manuais de manejo, a densidade de aves nos galpões caracteriza-se como fator importante no seu bem-estar e considera clima, tipo de aviário, peso de

⁴ Período de tempo entre a limpeza/desinfecção e a chegada do novo lote, em que os galpões permanecem vazios com o intuito de reduzir a carga microbiana.

abate e regulamentação. Em alguns países o mesmo lote pode produzir aves com metas de peso diferentes em que, ao ser atingida a meta de peso mais baixa, uma parte do lote é retirada para atender o segmento de mercado, ampliando-se o espaço para os frangos remanescentes. Em países mais quentes, empresas comercializadoras indicam a densidade em torno de 30 kg/m² como a ideal para o bem-estar animal (COBB-VANTRESS, 2009).

Vale ressaltar que, ao serem atendidas as cinco liberdades para prática de bem-estar animal, a densidade praticada atualmente torna questionáveis as liberdades comportamentais e ambientais. No entanto, desenvolvedores das linhagens defendem tal densidade e afirmam que, ao permanecerem tranquilas e com pouca movimentação dentro da Zona de Conforto Térmico (ZCT), as aves podem expressar o máximo de seu potencial genético para conversão de proteína.

No início de cada ciclo, o produtor recebe os pintainhos com massa entre 30 a 50 gramas. As aves são acondicionadas em pinteiros que reduzem a área de circulação e as aproximam das fontes de calor, alimentação e água evitando mudanças drásticas de temperatura em seu entorno. Na ausência dos círculos, o aquecimento é restrito a parte do galpão que é aberta gradativamente até a ocupação total do mesmo.

Dependendo da programação da empresa integradora, os frangos são entregues com 30 a 49 dias e massas individuais entre 2 kg a 3,6 kg. Estudos realizados com base de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) apontam que a média de massa do frango de corte brasileiro foi de 2,162 kg em 2012 (AVISITE, 2012).

Para Abreu e Abreu (2011), na fase inicial do lote os pintainhos necessitam de um ambiente com temperatura média de 33 °C, valor situado dentro da ZCT. Esta etapa exige do produtor a disponibilidade de um sistema de aquecimento, geralmente realizado com queima de lenha associada a um equipamento que distribui o calor através de convecção térmica.

O diagnóstico bioclimático em diferentes regiões brasileiras aponta a necessidade de estudos detalhados do microclima local para definição das principais características construtivas e tecnológicas implantadas. No geral, percebe-se a necessidade de aquecimento do galpão nas duas primeiras semanas de alojamento, sendo que, a partir da quarta semana, é necessário promover o resfriamento do mesmo. Todas estas adequações resultam das mudanças no sistema

termorregulador das aves. Na medida em que a ave passa para a fase de frango, sua homeostase se modifica e a temperatura ideal para o seu desenvolvimento fica próxima de 20 °C (ABREU; ABREU, 2011).

Desta forma, para manter o equilíbrio térmico e a renovação de ar, os produtores podem utilizar a ventilação com cortinas e ventiladores/exaustores. Quando a ventilação não é suficiente, faz-se uso de nebulizadores/painéis evaporativos para melhor adequação da temperatura e umidade dos galpões.

A ventilação natural é realizada com aberturas parciais das cortinas, preferencialmente no lado oposto à incidência do vento. Sua altura determina a quantidade e velocidade do ar que cruza o galpão, sendo máxima na região das aves quando as duas cortinas laterais encontram-se totalmente baixadas. Quando ineficiente, faz-se uso de ventiladores ou exaustores, nebulizadores, aspersores ou painéis de resfriamento adiabático (BUENO; ROSSI, 2006). A Figura 5 mostra estes sistemas, geralmente implantados em galpões com maior tecnologia embarcada.

Figura 5 - Sistema de exaustão em aviários climatizados (à esquerda) e sistema de resfriamento evaporativo com o uso de painéis de resfriamento adiabático (à direita). Fonte: Cobb-Vantress (2009).

A ventilação adequada é necessária para permitir a renovabilidade do ar, a umidade correta da cama e a manutenção do nível de oxigênio. Ela elimina os gases gerados no processo, já que influenciam negativamente o ambiente criatório e seus arredores e, portanto, precisam ser extraídos do ambiente. Também permite o controle da umidade relativa e atendimento das necessidades metabólicas das aves (COBB-VANTRESS, 2009; AVILA et al., 2003).

Por outro lado, atualmente os gases gerados no galpão são extraídos sem nenhum tipo de tratamento, o que causa danos à saúde dos humanos e impactos ambientais. A falta de pesquisas e desenvolvimento tecnológico para este fim reforça a prevalência dos investimentos em resultados financeiros e de produção em

detrimento aos cuidados com a saúde e o meio ambiente, uma vez que, retirar os gases do interior do galpão não resolve os danos ao ambiente e os impactos na circunvizinhança. Em relação à ventilação, Baldin (2013) afirma que

Com os equipamentos de ventilação busca-se, na estação de menor temperatura (inverno), a ventilação mínima dos aviários, ou seja, aplica-se a taxa mínima de troca de ar nos galpões para garantir os níveis mínimos de oxigênio e remoção de amônia e outros gases presentes no aviário devido à decomposição das fezes das aves. Para o verão, busca-se uma ventilação máxima nos galpões com sistemas de ventilação tipo túnel. Com isso, amenizam-se as flutuações de temperatura e mantêm-se os níveis de conforto ambiental para as aves dentro de padrões aceitáveis. Em associação com a ventilação máxima, utilizam-se sistemas de resfriamento evaporativo nos dias de maior temperatura. Essa ventilação máxima pode atingir velocidades de até 2,5 m/s no aviário, removendo o calor e poluentes (BALDIN, 2013, p. 12).

Outro fator importante no desempenho das aves é o período que a iluminação artificial do galpão fica ligada. Também denominada “programa de luz”. Seu objetivo é regular o consumo de ração pelas aves, principalmente nas épocas mais quentes em que as mesmas devem ser estimuladas à alimentação no período da noite, quando as temperaturas são mais amenas. Segundo Liboni et al. (2013),

Atualmente, os programas de luz podem ser classificados em luz constante, intermitente e crescente. O programa de luz constante é constituído de um fotoperíodo constante durante toda a vida da ave. Já o programa intermitente apresenta ciclos repetidos de luz e escuro dentro de um período de 24 horas. Por último, o programa de luz crescente fornece uma série de foto esquemas, nos quais o fotoperíodo é aumentado com o aumento da idade da ave (LIBONI et al., 2013).

Durante muito tempo a indústria utilizou o sistema com fotoperíodo (período em que o galpão permanece iluminado) de 23 a 24 horas diárias. Estes programas contínuos propiciam as condições ideais para o máximo consumo e ganho de peso, mas o uso de programas intermitentes apresentam maior produtividade e menor incidência de morte súbita.

Os cuidados com manejo, citados neste tópico, são aplicados dependendo do sistema de integração, objetivo de produção, microclima regional e tecnologia implantada, caracterizando-se uma ideia geral do manejo utilizado na ampla diversidade de galpões espalhados pelo Brasil, de forma que, para atender demandas pontuais, deve ser adequado às diferentes realidades.

2.1.4 O metabolismo dos frangos

Frangos de corte tornaram-se os animais com uma das maiores eficiências na conversão alimentar e ganho de peso apesar de sofrerem diversas mudanças fisiológicas no decorrer do ciclo de criação, dentre eles, citam-se o desenvolvimento do sistema termorregulador e o empenamento. Com isso, um dos principais desafios atuais está na ambiência dos galpões, principalmente em países com grande amplitude térmica como o Brasil onde as variáveis ambientais afetam diretamente o sistema de produção. Altas temperaturas reduzem o consumo de ração/água e baixas temperaturas aumentam a conversão alimentar, uma vez que, fora da ZCT, o custo energético dos ajustes fisiológicos aumenta, afetando o metabolismo e a produção (FURLAN, 2006).

Nesta perspectiva, compreender o metabolismo das aves torna-se fundamental para melhorar seu bem-estar e o desempenho na produção. As aves são seres homeotérmicos que, por regular a temperatura corporal, destinam 80% da energia ingerida para manutenção térmica e apenas 20% para crescimento e desenvolvimento. Sua temperatura interna média é de 41,1°C necessitando de ambientes com temperaturas dentro da ZCT, para melhor desempenho produtivo (ABREU; ABREU, 2011). A Tabela 1 indica as temperaturas e umidades relativas consideradas para a ZCT das aves em diferentes fases da vida.

Tabela 1 - Valores ideais de temperatura ambiente e umidade do ar para diferentes fases de criação.

<i>Idade (Semanas)</i>	<i>Temperatura ambiente (°C)</i>	<i>Umidade do ar (%)</i>
1	32 – 35	60 – 70
2	29 – 32	60 – 70
3	26 – 29	60 – 70
4	23 – 26	60 – 70
5	20 – 23	60 – 70
6	20	60 – 70
7	20	60 – 70

Fonte: Abreu e Abreu (2011)

A ZCT é a faixa de temperatura em que a ave apresenta menor taxa metabólica, mantendo a homeotermia com menor gasto energético e otimizando a produção dentro do tempo especificado. Um dos fatores que mais afeta esta faixa de temperaturas é a idade do animal. Com seu desenvolvimento, consequente maturação do sistema termorregulador e o aumento da atividade energética, a

temperatura ideal se reduz de 35 °C, com um dia de idade, para 24 °C com quatro semanas de idade e para 21 a 22 °C, com seis semanas de idade (FURLAN, 2006).

Segundo Furlan (2006) o controle interno de temperatura das aves ocorre a partir de duas populações neuronais no hipotálamo. Uma delas é responsável pela transferência de calor para o ambiente, quando a temperatura corporal aumenta, e a outra é responsável por evitá-la, quando a temperatura corporal diminui. Assim, quando as atividades dos neurônios responsivos à maior e à menor transferência de calor se equilibram, a temperatura será mantida estável.

É importante que as aves sejam mantidas em ambientes que permitam o balanço térmico, já que não se adaptam bem a extremas temperaturas (CURTIS, 1983). Desta forma, o ambiente é considerado confortável, quando a produção de calor a partir do metabolismo pode ser transferida para o ambiente sem qualquer dificuldade e o ambiente permita as interações de calor entre a ave e o meio com certa facilidade (ABREU; ABREU, 2011).

No início do ciclo de produção, o sistema termorregulador é imaturo, o que torna as aves sensíveis às baixas temperaturas. Disto resulta a necessidade de uma fonte adicional de calor que reduz o gasto energético da ave para manutenção da homeotermia. Por outro lado, aves adultas submetidas a condições de temperatura elevada, compensam sua menor perda de calor por convecção e radiação ao ambiente através de processos fisiológicos como aumento dos movimentos respiratórios e aumento de ritmo cardíaco (NASCIMENTO, 2015). Processos comportamentais de manter as asas afastadas também auxiliam na transferência de calor por condução e consequente redução da temperatura corporal (SANTOS, 2009).

As interações térmicas com o meio podem ocorrer através de radiação, convecção e condução a partir da variação da superfície corporal em contato com o meio. Isso causa mudanças das anastomoses arteriovenosas, principalmente nas regiões sem penas e contribui para o fluxo total de sangue na periferia (FURLAN, 2006), já que, fisiologicamente, a taxa de transferência de calor das aves é influenciada pelo fluxo sanguíneo superficial ocorrido na epiderme, logo abaixo da camada de plumagem (ABREU et al., 2012).

Quando a temperatura ambiente atinge e ultrapassa a temperatura crítica superior na ZCT, o mecanismo principal de trocas térmicas passa a ser o trato respiratório (SANTOS, 2009), devido à necessidade de aumentar as trocas térmicas

via resfriamento evaporativo. Nessa condição, as aves elevam a frequência respiratória acentuadamente, com consequências em seu volume respiratório. Outras perdas entálpicas também podem ocorrer por meio da eliminação de excretas (fezes e urina) (ABREU; ABREU, 2011).

Estudos realizados por Abreu et al. (2012) quantificaram a distribuição da temperatura superficial das aves, identificando temperaturas médias diferentes em diferentes partes do corpo. No estudo, as temperaturas das superfícies corporais apresentaram comportamento semelhante ao da temperatura ambiente, com maiores valores na cloaca e menores valores nas patas. A Figura 6 demonstra os resultados do estudo.

Figura 6 - Valores médios da temperatura nas partes do corpo em função da idade das aves.
Fonte: Abreu et al. (2012).

Devido ao curto período de vida no processo de criação e às várias adaptações necessárias para o sistema produtivo, percebe-se a dificuldade em se manter a ambiência para frangos de corte devido à sensibilidade em relação às condições ambiente, principalmente em regiões com extremos de temperatura entre as estações do ano e grande amplitude térmica para as diferentes horas do dia e, para proposições de melhorias, é necessário conhecer e quantificar as principais entradas e saídas do processo produtivo.

2.2 INSUMOS, PRODUTOS E REJEITOS DO PROCESSO PRODUTIVO

2.2.1 Quantificação e características do material absorvente

A escolha do material para cama dos frangos deve considerar disponibilidade e preço regionais, possibilidade de reuso e geração de impactos ambientais,

capacidade de absorção das excretas e redução de lesões nas carcaças das aves, propiciando conforto e isolamento térmico. Vários materiais foram estudados em diferentes regiões brasileiras para justificar as escolhas feitas neste trabalho.

Em um estudo avaliativo de três tipos de cama (casca de arroz, bagaço de cana-de-açúcar e maravalha de madeira), todas com 0,10 m de altura, Araújo, Oliveira e Braga (2007), com experimentos realizados na região Nordeste do Brasil, não observaram variações significativas no consumo de ração, ganho de peso, e conversão alimentar, concluindo que os materiais absorventes pesquisados não influenciam no desempenho dos frangos e apontando-os como tecnicamente viáveis para o uso.

Outros estudos, como Santos et al. (2000), comparando quatro tipos de materiais (cepilho de madeira, casca de arroz, casca de café e sabugo de milho triturado), na Região Sudeste brasileira, e Ávila et al. (2008) comparando a maravalha a outros sete materiais, na região sul do Brasil, obtiveram os mesmos resultados.

O presente trabalho considerou o uso de maravalha como material mais difundido e cuja escolha baseou-se nos estudos de Garcia et al. (2012a). Os autores aplicaram uma análise de critérios múltiplos na seleção do material absorvente mais apropriado, partindo da avaliação de seis diferentes tratamentos para a cama e optaram pela maravalha devido à sua disponibilidade, baixo custo, capacidade de absorção e possibilidade de reuso. Complementando seu estudo, outros materiais como bagaço de cana e capim Napier picado apresentaram maior compactação, fato que pode resultar em maior quantidade de lesões no peito e coxim-plantar das aves (GARCIA et al., 2012b).

Dessa forma, qualidades como bom desempenho em conforto para as aves aliado ao bom poder de retenção de umidade, capacidade de reuso e disponibilidade, tornam a maravalha (cepilho de madeira) um dos materiais mais indicados e utilizados na avicultura de corte do Brasil. Na região, sul onde é derivada do trabalho com plainas nas madeiras, a maravalha compõe-se de aparas de madeira com mais de 2,5 mm e, geralmente, de Pinus. No entanto, diferentes espécies com características próprias, podem ser utilizadas, possuindo propriedades conforme o local, clima, temperatura e outros fatores.

Com o objetivo de caracterizar o poder calorífico e a análise imediata de resíduos de madeiras, Menezes (2013) avaliou dois tipos de maravalhas (Pinus-

Sp e *Araucária-Angustifolia*), encontrando para o *Pinus*, os valores de 17230 kJ/kg para o Poder Calorífico Superior (PCS) e 16910 kJ/kg para o Poder Calorífico Inferior (PCI) com, 11,30% de Teor de Umidade (TU), 4,42% de cinzas e 91,15% de carbono fixo. Para a *Araucária*, as mesmas propriedades foram quantificadas em 17320 kJ/kg, 17000 kJ/kg, 11,34%, 2,24% e 95,58% respectivamente. Por sua vez, o Teor de Voláteis (TV) foi quantificado em 4,42% para o *Pinus* e 2,24% para a *Araucária* (MENEZES, 2013).

Do Vale et al. (2007) determinou as características energéticas de maravalha de *Cedrorana* (*Cedrelinga catenaeformis* Duke) obtida em madeiras da região central brasileira. Os resultados apontaram um PCS de 20645 kJ/kg, pouco acima do encontrado para a madeira da mesma espécie. Sua densidade média estimada foi de 115 kg/m³, e a Umidade Relativa (UR) calculada foi de 17,10% em base úmida, além de um percentual de 0,34% de cinzas. Todas estas características realizadas nas condições de coleta.

Em termos quantitativos, Santos e Lucas Junior (2004), analisando a eficiência energética de um galpão convencional de 1200 m² para frangos de corte, identificaram a quantidade de 13443,5 kg em matéria natural (MN) de maravalha com coeficiente médio energético de 17365 kJ/kg e fração de matéria seca em 52,29%. Esta umidade é considerada muito alta, pois muitos autores indicam que, nestes padrões, haveria o empastamento e compactação da cama, elevando os níveis de gases gerados bem como a incidência de lesões nas carcaças. Considera-se ideal uma umidade entre 20% e 30%.

Em relação à composição elementar, Protásio et al. (2012) realizaram estudos com amostras de maravalha na região Centro-oeste, apontando teores médios de 48,2% C, 6,36% H, 45,04% O, 0,07% N e 0,084% S para maravalha de eucalipto. Também foram encontrados 49% C, 6,65% H, 43,76% O, 0,09% N e 0,114% S na maravalha de *pinus* e 50% C, 6,26% H, 42,34% O, 0,27% N e 0,122% S nas amostras de cedro, todas apontando menos de 1% de cinzas. Neste estudo, a média dos valores para o PCS das amostras foi estimada em 19803,4 kJ/kg.

De uma forma mais ampla, Moulin et al. (2011) realizaram a quantificação e qualificação de amostras de maravalha oriunda de processamento misto de madeiras na mesma região para fins energéticos. Uma média para o PCS foi encontrada para as diversas amostras estudadas e indicou 19629,28 kJ/kg, com um Teor de Umidade médio de 12,31%. Em relação à densidade encontrada, houve

uma variação desde 52,52 kg/m³ até 94,90 kg/m³. Por fim, a análise elementar, identificou uma média de 47,63% de C, 6,01% de H, 45,58% de O, 0,16% de N₂, e 0,97% de teor de cinzas considerando todas as amostras (MOULIN et al., 2011).

A variabilidade na densidade do material ocorre pelas diferenças na granulometria e teor de umidade. Como exemplos, podem se citar os valores de 85 kg/m³ com 23% de TU (BRATTI, 2013), além de empresas comercializadoras que, sob consulta, indicam menor teor de umidade (5%) e densidade (55 kg/m³) para maravalha nova.

2.2.2 Pintainhos e padrões de crescimento

Ao chegarem aos galpões de criação, os pintainhos possuem massa que varia de 0,039 kg a 0,051 kg, com dependência na linhagem e tempo de vida no momento do alojamento. Na literatura, encontram-se dados para massas de 0,042 kg a 0,046 kg (GOMES et al., 2008; ALMEIDA et al., 2006) e 0,042 kg a 0,056 kg (AVIAGEN, 2012). Alguns pesquisadores classificaram os pintainhos em leves (0,037 kg a 0,038 kg) e pesados (0,05 kg a 0,051 kg), com o intuito de relacionar a superfície da ave com seu peso (ABREU et al., 2012).

As variações encontradas resultam de diferenças nas linhagens, sexo ou de estudos que consideram o primeiro dia de vida das aves como o dia de alojamento dos pintainhos na granja, desconsiderando o período entre a eclosão e o alojamento. Este tempo causa diferenças nos resultados em termos de desempenho, uma vez que as aves apresentam elevadas taxas de crescimento, principalmente na primeira semana de vida. Outro fator que interfere decisivamente na massa do pintainho é a idade das matrizes que, apesar de não trazer diferenças no tempo de eclosão, produz ovos e, conseqüentemente, pintainhos com pesos que aumentam proporcionalmente à idade (ALMEIDA et al., 2006).

Nos padrões atuais, o melhoramento genético permite o crescimento das aves a taxas de 2,5 g/h (FUNCK; FONSECA, 2008) chegando até 2,7 g/h. Navarro (2004) apud Almeida (2006) afirma que na primeira semana de vida da ave a sua massa inicial pode quadruplicar ou quintuplicar e ressalta que ganhos de 0,01 kg de massa na primeira semana de idade resultam em 0,05 kg a 0,07 kg de massa no final do ciclo de produção.

Em seus estudos, Santos e Lucas Junior (2004) encontraram a média de 0,046 kg por ave na pesagem de chegada ao galpão, e a análise de potencial energético do pintainho resultou o valor de PCI em 21947 kJ/kg com porcentagem de Matéria Seca (MS) de 24,97%. Este foi o único trabalho encontrado que busca quantificações desta natureza e, neste sentido, a mensuração do poder calorífico ou a análise elementar/proximal dos pintainhos e das aves adultas é um tema muito incipiente, com pouca pesquisa realizada e que necessita ser amplamente explorada.

2.2.3 Rações fornecidas e a conversão alimentar

A ração representa a maior parte dos custos da produção avícola e na sua composição, os grãos compreendem elevados percentuais, influenciando diretamente na qualidade do insumo. Dentre eles, o milho (~60% da composição) é responsável por 65% da energia metabolizável e 22% da proteína (CARVALHO et al., 2004).

De acordo com Sakomura e Rostagno (2007), boa parte do conteúdo energético das rações é absorvida pelas aves para manutenção da homeotermia e para conversão em proteína. Quando moléculas orgânicas são oxidadas, parte da energia liberada em forma de calor é utilizada no metabolismo das aves. A energia transformada pela oxidação total da matéria orgânica é chamada de Energia Bruta (EB) e pode ser encontrada com o uso de uma bomba calorimétrica.

A diferença entre a EB dos alimentos e a EB das fezes é denominada Energia Digestível (ED), mas, devido à dificuldade de separar a urina das fezes, para aves, utiliza-se a Energia Metabolizável (EM). Esta última é calculada como a diferença entre a EB dos alimentos e a EB das excretas e dos gases de digestão que por sua vez, são desprezados, devido ao seu baixo valor. Além disso, um fator de correção pode ser adequado devido às perdas de energia fecal metabólica e urinária endógena, identificando a Energia Metabolizável Corrigida (EMn) (SAKOMURA; ROSTAGNO, 2007).

A Figura 7 mostra um esquema da utilização da energia por animais monogástricos com as respectivas perdas de energia na dieta. Neste estudo, adota-

se o uso somente da EB, pela sua correlação com o PCI, por serem encontrados de forma idêntica em bomba calorimétrica.

Figura 7 - Utilização da energia em animais monogástricos e um exemplo das perdas na dieta.
Fonte: Extraído de Sakomura e Rostagno (2007)

A composição da ração varia de acordo com o tipo de criação, das fases do ciclo e da região em que se encontra o sistema produtivo, onde as mudanças visam suprir eficientemente as necessidades de conversão alimentar e metas de produção dentro do tempo especificado, da disponibilidade de insumos e considerando a complexidade do metabolismo das aves. Devido a estes fatores, a dieta padrão adotada no sul do Brasil tem utilizado uma fórmula com base no milho e farelo de soja (AVILA et al., 2003).

A Tabela 2 sintetiza algumas composições encontradas na literatura para as rações disponibilizadas em cada fase de criação. Foram levantados os percentuais citados para cada componente e, por fim, estimada sua média (excluindo-se os valores faltantes) na formulação final. Destaca-se que outros trabalhos apresentam as composições específicas das rações utilizadas em seus experimentos, mas que não diferiram significativamente das composições apresentadas, o que permite utilizá-las como referência neste estudo.

Tabela 2 - Composição de diferentes tipos de ração de frangos apresentada na literatura em percentuais mássicos e Energia metabolizável.

<i>Ingredientes da Ração</i>	<i>Fase Inicial</i>	<i>Fase de Crescimento</i>	<i>Fase Final</i>	<i>Autor</i>	<i>Média Inicial</i>	<i>Média Crescimento</i>	<i>Média Final</i>	<i>Média Ciclo</i>
<i>Milho (%)</i>	56,33	57,50	-	Liboni et al, 2013	57,49	60,84	65,45	61,26
	60,70	63,30	68,30	Fukayama, 2008				
	54,00	60,00	65,00	Moraes et al, 2008				
	59,66	62,56	66,56	Silva, 2011				
	56,77	-	61,93	Oliveira, 2002				
<i>Farelo de Soja (%)</i>	36,16	31,76	-	Liboni et al, 2013	35,10	29,17	25,51	29,93
	30,80	22,30	17,50	Fukayama, 2008				
	38,00	32,00	27,00	Moraes et al, 2008				
	34,23	30,62	26,78	Silva, 2011				
	36,33	-	30,77	Oliveira, 2002				
<i>Farinha de Carne (%)</i>	-	-	-	Liboni et al, 2013	5,20	4,70	3,85	4,58
	6,20	5,80	4,60	Fukayama, 2008				
	4,20	3,60	3,10	Moraes et al, 2008				
	-	-	-	Silva, 2011				
	-	-	-	Oliveira, 2002				
<i>Óleo de Soja (%)</i>	2,61	6,00	-	Liboni et al, 2013	2,53	4,03	3,46	3,34
	-	-	-	Fukayama, 2008				
	2,40	3,00	3,60	Moraes et al, 2008				
	2,05	3,10	3,12	Silva, 2011				
	3,04	-	3,67	Oliveira, 2002				
<i>Fosfato Bicálcico (%)</i>	1,80	1,70	-	Liboni et al, 2013	1,81	1,68	1,57	1,68
	-	-	-	Fukayama, 2008				
	-	-	-	Moraes et al, 2008				
	1,80	1,65	1,51	Silva, 2011				
	1,82	-	1,63	Oliveira, 2002				
<i>Sal (%)</i>	0,51	0,50	-	Liboni et al, 2013	0,46	0,44	0,42	0,44
	0,43	0,37	0,38	Fukayama, 2008				
	0,40	0,40	0,40	Moraes et al, 2008				
	0,49	0,47	0,44	Silva, 2011				
	0,45	-	0,45	Oliveira, 2002				
<i>Suplemento (%)</i>	0,50	0,50	-	Liboni et al, 2013	0,33	0,34	0,29	0,32
	0,50	0,50	0,50	Fukayama, 2008				
	0,25	0,20	0,20	Moraes et al, 2008				
	0,15	0,15	0,15	Silva, 2011				
	0,30	-	0,30	Oliveira, 2002				
<i>Energia Metabolizável (kJ/kg)</i>	12349	13345	-	Liboni et al, 2013	12485	13184	13347	13005
	12386	13395	13801	Fukayama, 2008				
	12558	13018	13395	Moraes et al, 2008				
	12558	12977	13186	Silva, 2011				
	12575	-	13006	Oliveira, 2002				

Carvalho et al. (2004) submeteram amostras de milho a diferentes períodos e tipos de secagem apresentando um valor de EB entre 16325 kJ/kg e 16748 kJ/kg com uma fração média de MS de 85,78%. Perceberam também que a massa dos grãos reduziu com o tempo de estocagem e isso diminui, por consequência, a EM. No entanto, a EB e a análise proximal não foram significativamente influenciadas pela temperatura de secagem e pelo tempo de armazenamento (CARVALHO et al., 2004).

D'Agostini et al. (2004) realizaram experimentos para determinar a composição química e valores energéticos do milho e outros alimentos para as aves e apontaram uma EB próxima de 17120 kJ/kg para os componentes com maior

representatividade na ração. Por sua vez, Santos et al. (2004) determinaram o valor da EB de rações, indicando os valores de 15806 kJ/kg para fase inicial (92,5% de MS), 17468,2 kJ/kg para a fase de crescimento (93,29% de MS) e 17091 kJ/kg para a fase final de criação (92,06% de MS).

Estudos de Lana et al. (2001) avaliaram os efeitos da criação em três diferentes densidade e dois programas de alimentação no desempenho produtivo de frangos de corte mistos, em ciclos de 42 dias, com massa média final de 2,40 kg. Verificaram os consumos de ração, cujos resultados estão sintetizados na Tabela 3. Os valores obtidos são médias tomadas de dois programas de alimentação com Conversão Alimentar (CA) média de 1,88.

Valores próximos destes são encontrados em outros estudos e em manuais de objetivos de desempenho divulgados por empresas fornecedoras de aves (ROSS, 2012; COBB, 2012). Algumas diferenças aparecem se considerado o gênero das aves, uma vez que frangos machos possuem maior massa final e, consequentemente maior consumo de ração. Isto é constatado em experimentos com frangos machos, identificando consumos entre 5000 g e 5100g em ciclos de 42 dias (GOMES et al., 2008)(LIBONI et al., 2013)). Para os lotes de fêmeas, as médias de consumo são inferiores, como mostrado em Araújo, Oliveira e Braga (2007).

Tabela 3 – Média do consumo de ração para frangos machos para diferentes densidades de criação.

<i>Período (dias)</i>	<i>Consumo médio (g)</i>	<i>Fase</i>
1 – 7	169,8	Inicial
8 – 14	389,2	Inicial
15 – 21	654,6	Inicial
22 – 28	935,7	Crescimento
29 – 35	1150,9	Crescimento
36 – 42	1225,1	Terminal
1 – 42	4525,3	

Fonte: Adaptado de Lana et al (2001).

Dados de manuais publicados por fornecedores de frangos, a partir dos objetivos de performance de cada linhagem, permitem observar a estimativa do consumo de ração com o avanço do ciclo de criação e, mesmo que estes dados ainda não se confirmem na prática, a orientação indica onde a conversão alimentar deve chegar partindo da genética desenvolvida (COBB-VANTRESS, 2009; ROSS, 2012).

2.2.4 Uso e consumo da água no ciclo de produção

A água é elemento essencial para manutenção dos seres vivos, desempenhando importante papel na manutenção da homeostase, uma vez que possui propriedades físico-químicas que permitem a transferência de entalpia através das perdas evaporativas. Considerada um nutriente barato e de composição estável, sua restrição ou simples alterações de composição geram impactos fortes no desempenho produtivo (PALHARES; KUNZ, 2011). Nos galpões, ela é utilizada para consumo dos frangos, nos sistemas de resfriamento evaporativo, limpeza e higienização.

Experimentos mostram que a quantidade de água ingerida pelas aves dentro da ZCT apresenta uma relação com o consumo de ração, na proporção de 1,5 – 2,5 $L_{\text{água}}/kg_{\text{ração}}$ podendo ser influenciada pela temperatura ambiente e pela natureza da dieta. Seu fornecimento em temperaturas próximas a 18°C tem se demonstrado ideal para as aves, sendo sempre indicadas as temperaturas menores que 24°C (KUNZ et al., 2011). Estudos realizados por Viola (2003), durante as três primeiras semanas de criação e com diferentes tratamentos de restrição, indicam a relação linear entre consumo de ração e de água, conforme mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Relação entre o consumo de água (ml) e de ração (g) para frangos de corte.
Fonte: Extraído de Viola (2003)

Evidenciou-se que o consumo de água determina o consumo de ração quando sua restrição impacta diretamente no desempenho produtivo.

Segundo Ávila et al. (2003) o consumo de água aumenta com o crescimento das aves e varia de 32 ml diários por frango até 214 ml diários por frango, quando visitam os bebedouros mais de uma vez a cada minuto. A temperatura também determina variações no consumo uma vez que se constata a elevação de 5% a 6% no consumo para cada 1°C de elevação na temperatura entre 20°C e 38°C (COBB-VANTRESS, 2009).

Para Kunz et al. (2011), cada frango consome, em média, 5180 mL de água durante os 42 dias de confinamento com diferenças significativas entre linhagem e sexo. Devido ao aumento linear do consumo com o ganho de massa, existem outras formas para a verificação, como multiplicar a idade do frango em dias por 5,28 ml para obter a quantidade de água demandada diariamente por cada ave (PALHARES; KUNZ, 2011). Esta estimativa é mostrada na Figura 9 na qual a curva de tendência indica a equação com melhor grau de acurácia.

Figura 9 - Consumo de água por frango em função da idade, em dias, no decorrer do ciclo produtivo.
Fonte: Adaptado de Kunz et al (2011)

A água de consumo é perdida pelas aves através da respiração, da excreção pelas fezes (que podem representar de 20% a 30% do volume de água consumido), pela urina, que é a mais significativa, e pela transpiração/difusão que é menor devido à ausência de glândulas sudoríparas. Além disso, deve-se considerar a água formada pelo processo metabólico de formação dos tecidos. Toda esta massa sairá do galpão através do aumento da umidade do ar extraído pelas renovações de ar.

Além do consumo, em dias quentes, a água também é utilizada em nebulizadores e aspersores. Quando a temperatura ambiente aumenta, o

arrefecimento por ventilação é suplementado pelos sistemas de resfriamento evaporativo que podem reduzir a temperatura em até 10°C, uma vez que, para vaporizar, a água retira calor do ar (OSORIO SARAZ et al., 2011).

No processo de resfriamento evaporativo, água é adicionada ao ar insaturado e absorve calor para vaporização. Caracteriza-se como um processo de saturação adiabática em que a temperatura do ar reduz enquanto sua umidade aumenta. A menor temperatura que pode ser obtida é a temperatura de bulbo úmido do ar externo (FARMAHINI-FARAHANI; DELFANI; ESMAEELIAN, 2012).

Sistemas de resfriamento evaporativo são fundamentais na fase final de criação, especialmente em regiões de elevadas temperaturas e baixas umidades do ar atmosférico. No entanto, eles são ativados somente quando os sistemas de ventilação são ineficientes para permitir o conforto térmico das aves e, para isto, podem ser utilizados nebulizadores ou painéis evaporativos.

Por um lado, os sistemas de nebulização, geralmente utilizados em galpões abertos e associados à ventilação positiva, são compostos por linhas de suprimento de água associadas a aspersores. Seus fluxos podem variar de 5,5 L/h até 7,5 L/h e o consumo total depende da pressão de operação, demandando de 600 L/h a 900 L/h para 120 bicos aspersores durante funcionamento. Por outro lado, os painéis evaporativos são geralmente associados à ventilação negativa em galpões fechados, demandando cerca de 1800 L/h em dois painéis. Tais dados de consumo são muito dependentes das condições externas e dimensões/tecnologias implantadas nos galpões. Citados aqui, servem como uma estimativa para aviários de 1200 m².

Desta forma, para fins quantitativos, a massa de água entra no galpão na fase líquida (para consumo e resfriamento evaporativo) e na fase gasosa (umidade do ar e ventilação), saindo na forma de vapor junto ao ar úmido extraído do espaço criatório.

2.2.5 Renovação do ar e principais características no ciclo produtivo

A ventilação no interior dos galpões é fundamental para a saúde e bem-estar das aves. Na fase inicial, a ventilação mínima deve garantir a renovação e qualidade do ar, o fornecimento de oxigênio e a retirada de gases nocivos (gerados pela

respiração e decomposição microbiana da excreta), nos quais se destacam o CO_2 e o NH_3 . Também regula a umidade da cama e do ar. Na fase adulta, acrescenta-se a função de extrair a carga térmica incidente pela radiação e o calor gerado pelo metabolismo das aves, uma vez que a ZCT possui faixas de temperatura decrescentes com o avanço do ciclo.

Estudos realizados por Carvalho (2010), com diferentes sistemas de ventilação mínima na fase inicial do ciclo, apontam sua forte influência no conforto térmico e qualidade do ar, indicando que a eficiência do sistema de ventilação é função do volume de ar renovado. Neste sentido, é possível realizar uma estimativa da massa de ar necessária ao conforto dos frangos independentemente do sistema de ventilação utilizado (ventiladores, exaustores ou manejo de cortina), a partir da quantidade de renovações completas de ar nas diferentes fases do ciclo.

Na fase inicial de criação, o fluxo mínimo de ar é ocasionado por ventiladores ou exaustores e deve permitir a renovação completa do ar do aviário a cada 5 minutos a 8 minutos. Já na fase final do ciclo, além da ventilação mínima, é necessário um fluxo de ar na altura das aves para extrair a elevada carga térmica do ambiente interno do galpão, resultado do metabolismo dos frangos e absorção de parte da Carga Térmica da Radiação (CTR) incidente. Nesta fase é aconselhável a troca total de todo o ar em tempos menores do que 1 min (COBB-VANTRESS, 2009).

Para Cengel e Boles (2005) o ar atmosférico, na faixa de temperaturas aplicáveis ao conforto térmico (-10°C até 50°C), pode ser tratado como um gás perfeito com um calor específico de $1,005 \text{ kJ/kgK}$ e estimativa de erro menor que 0,2%. Isto é facilmente demonstrado utilizando-se o conceito de pressão reduzida e temperatura reduzida de seus constituintes, onde o fator de compressibilidade tende ao valor unitário e ratifica tal comportamento.

O ar atmosférico é composto pelo ar seco, cujos componentes principais são o Nitrogênio ($\approx 79\%$ do volume), o Oxigênio ($\approx 21\%$ do volume) e uma quantidade de vapor d'água. Nesta composição, o vapor ocupa parte da composição total reduzindo proporcionalmente a contribuição dos demais elementos. Este vapor apresenta comportamento de gás ideal nas condições ambiente e sua entalpia é função da temperatura, com valor muito próximo da entalpia de vapor saturado na dada temperatura.

A relação entre a pressão parcial de vapor P_v e a pressão de saturação do vapor à mesma temperatura $P_{sat(T)}$ define a umidade relativa (ϕ) do ar. Para gases ideais, conforme pode ser visto na Equação (1), esta umidade relativa também pode ser definida em função dos volumes específicos, onde v_v é o volume específico do vapor na mistura e v_{sat} indica o volume específico de saturação do vapor à mesma temperatura.

$$\phi = \frac{P_v}{P_{sat(T)}} = \frac{v_{sat}}{v_v} \quad (1)$$

Por sua vez, a pressão de vapor pode ser encontrada pela Equação (2), em que, P_a indica a pressão de ar seco no ar do ambiente analisado P_0 , e P_v é a pressão parcial do vapor para a temperatura desejada T .

$$P_a = P_0 - P_v \quad (2)$$

Outra forma de medir a umidade do ar pode ser feita utilizando-se a umidade absoluta (ω), definida como a razão entre a massa de vapor de água m_v e a massa de ar seco m_a na Equação (3). Também pode ser encontrada pela razão entre a pressão de vapor P_v e a pressão de ar seco P_a .

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = 0,622 \frac{P_v}{P_a} \quad (3)$$

Com isto, a massa total de ar m_{ar} (massa de ar seco + massa de vapor) considera suas constantes universais R_i , suas pressões parciais P_i (i = ar seco, vapor), volume V_{ar} e temperatura T , de acordo com as Equações (4-6).

$$P_a V_{ar} = m_a R_a T \quad (4)$$

$$P_v V_{ar} = m_v R_v T \quad (5)$$

$$m_{ar} = m_a + m_v \quad (6)$$

O conteúdo de umidade presente no ar atmosférico aliado à temperatura do ambiente são fatores importantes no condicionamento térmico dos galpões. Em locais de elevada temperatura e baixa umidade do ar, alternativas como ventiladores, orientação, sombreamento dos galpões e tipos de cobertura são insuficientes para manter as condições do ambiente dentro da ZCT. Nestas condições, a implantação de sistemas de resfriamento evaporativo complementares aos sistemas de ventilação, apresentam ótimos resultados. A Figura 10 ilustra o processo citado, bem como as devidas modificações na carta psicrométrica.

Figura 10 - Processo de resfriamento evaporativo: (a) diagrama esquemático do processo e (b) representação na carta psicrométrica. Fonte: Adaptado de Moran e Shapiro (2011)

Este tipo de arrefecimento ocorre pela aspersão de água líquida no ar do galpão ou pela passagem forçada do ar através de um painel constantemente umedecido. Em ambos os processos, a evaporação da água líquida retira calor do ar reduzindo sua temperatura.

2.2.6 Dendroenergia⁵ e o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)

Em todos os estados brasileiros, as temperaturas médias são inferiores às aquelas compreendidas pela ZCT das aves nos primeiros dias de vida, o que obriga os avicultores a promoverem o aquecimento dos galpões durante a fase inicial de criação (ABREU; ABREU, 2011). O aquecimento pode ser realizado com

⁵ Caracteriza-se como a energia extraída da combustão de biocombustíveis da madeira. Inclui a lenha, subprodutos da atividade madeireira e o carvão.

campânulas elétricas, campânulas a gás, ou ainda por combustão direta de lenha através de tambores de aquecimento internos ou externos com distribuidores do ar aquecido. Dependendo da região, ainda podem ser utilizadas combinações destas formas.

Para Abreu et al (1998), apud Funck e Fonseca (2008), o aumento do valor do GLP forçou o sistema produtivo a procurar alternativas de fornecimento de calor às aves. Sistemas de aquecimento à lenha, automáticos ou manuais foram propostos a partir de energias renováveis obtidas pelo próprio produtor através de reflorestamentos.

Nesta perspectiva, estudos realizados com diferentes tipos de aquecimento voltado ao inverno do sul brasileiro apontam a forma conjugada de combustão em tambores e campânulas como a melhor opção para bem-estar térmico e desempenho produtivo dos frangos de corte (CORDEIRO et al., 2010). O período de solicitação dos equipamentos depende do microclima, mas, geralmente é necessário durante as duas primeiras semanas de criação, quando a temperatura ambiente é inferior à faixa compreendida pela ZCT das aves.

A preferência pelo uso da lenha no aquecimento dos galpões foi constatada em pesquisa a 98 galpões de 44 granjas no oeste paranaense. Identificou-se mais de 68% dos galpões aquecidos com fornos à lenha e complementados por GLP. Adicionados a eles, 13,2% dos galpões utilizam exclusivamente a lenha (MADALENA; OLIVEIRA; ROCHADELLI, 2013). O consumo médio constatado para esta tecnologia varia de 10 m³ a 20 m³ por lote produzido em cada aviário dependendo da estação do ano, microclima, dimensões do galpão e características do insumo.

Esta faixa de valores compreende a constatação de outros autores como Funck e Fonseca (2008) com 20 m³ por lote, Nascimento (2011) com 12 m³ por lote e Miele et al. (2010) apresentando média de 15,7 m³ para galpões convencionais e 31 m³ para os climatizados. De um modo geral, no sul do Brasil, são gastos 1 m³/dia, contabilizados para as duas primeiras semanas de alojamento.

A partir de uma análise elementar, constatou-se que a biomassa da madeira apresenta em sua composição a quantidade de 47% a 54% de Carbono (C), 5,6% a 7% de Hidrogênio (H), 40% a 44% de Oxigênio (O), com 0,1% a 0,5% de Nitrogênio (N₂) (SILVA, 2013). Outros estudos apontam 49,31% a 50,07% de C, 6,6% a 6,64% de H, 41,07% a 42,11% de O, 0,39% a 0,52% de N₂ e 1,18% a 1,77% de cinzas com

madeira de cafeeiros (LEITE et al., 2014) e 50,3% de C, 6% de H, 43% de O e 0,4% de cinzas para a lenha seca (SARDINHA; MACEDO; MACEDO, 2002). Por sua vez, Marri et al. (1982), estudando diferentes tipos de madeira seca, encontraram os valores de 51,8% de C, 6,3% de H, 41,3 de O, e 0,5% de cinzas.

Em Portugal, Sardinha, Macedo e Macedo (2002) publicaram a composição da madeira seca como sendo 50,3% de Carbono, 6% de Hidrogênio e 43% de Oxigênio, somados a 0,4% de cinzas com um PCS indicado de 20930 kJ/kg. Valores que convergem com os trabalhos de Marri et al. (1982) nos quais são divulgados, 51,8%, 6,3%, 41,3% e 0,5% respectivamente para Carbono, Hidrogênio, Oxigênio e cinzas. Na Tabela 4 encontram-se os resultados obtidos por Madalena, Oliveira e Rochadelli (2013) sobre os principais tipos de madeira utilizados como combustível na região sul do Brasil e seus respectivos percentuais de umidade.

Tabela 4 - Percentual de umidade encontrada em espécies arbóreas utilizadas como insumo para o aquecimento de galpões avícolas no sul do Brasil a partir da quantidade de amostras analisadas.

<i>Biocombustível</i>	<i>Total das Amostras 1°, 2°, 3° e 4°</i>	<i>Umidade (%)</i>		
		<i>Mínima</i>	<i>Máxima</i>	<i>Média</i>
<i>Eucalipto</i>	103	10,04	43,84	26,94
<i>Angico</i>	5	14,94	52,99	22,95
<i>Uva Japão</i>	3	11,64	27,42	19,53
<i>Canela</i>	2	14,67	42,54	28,60
<i>Goiabeira</i>	2	11,22	15,75	13,50
<i>Grevilha</i>	2	13,34	17,26	15,30
<i>Peroba</i>	1	11,98	12,26	12,12
<i>Sansão</i>	1	14,54	14,67	14,61
<i>Jambolão</i>	1	28,65	32,10	30,40

Fonte: Madalena, Oliveira e Rochadelli (2013)

No entanto, quando extraídas de reflorestamento, outras variedades são bastante difundidas para queima direta, tais como, a madeira de Pinus, Eucalipto, Cedrorana, Cinamomo e Angico.

Durante o processo de combustão, o rendimento energético da madeira depende de sua constituição química e teor de umidade. O poder calorífico será maior quanto mais alto seu teor de lignina e extrativos, já o enxofre e as cinzas são considerados impurezas não desejáveis.

Quirino et al. (2005) elaboraram, a partir de um vasto levantamento bibliográfico, tabelas com enorme variedade de madeiras, indicando o PCS e a densidade de 240 espécies arbóreas. Dentre elas, foram destacados os valores para algumas espécies utilizadas em galpões de aves no sul do Brasil. Os resultados

indicam média de 19808 kJ/kg para todas as espécies pesquisadas, e alguns deles, para espécies mais utilizadas na região sul, são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - PCS de algumas espécies arbóreas utilizadas no aquecimento de aviários.

<i>Nome Comum</i>	<i>PCS (kJ/kg)</i>
Angico	22286,3
Bracatinga	19397,9
Cedrorana	19883,5
Cinamomo	19121,6
Eucalipto	19225,6
Grevilha	19159,3
Pinheiro do Paraná	20042,6
Pinus	20092,8

Fonte: Adaptado de Quirino et al. (2005).

A caracterização da madeira como combustível foi realizada por vários autores, identificando seu poder calorífico e consequente potencial como insumo. Valores de PCS foram encontrados com valores de 19600 kJ/kg para a grimpia de Araucária, 18220 kJ/kg para o pó de Pinus (GABARDO et al., 2011), 19200 kJ/kg para lenha mista com massa específica de 450 kg/m³ (FUNCK; FONSECA, 2008), 19561 kJ/kg para o PCS e 18067 kcal/kg para o PCI da madeira de cafeeiro (LEITE et al., 2014).

Outros autores ainda indicam 18477 kJ/kg para o PCS e 17121 kJ/kg para o PCI da bracatinga seca em estufa (STURION; TOMASELLI, 1990). Segundo alguns manuais de empresas de caldeiras indicam PCI de 15400 kJ/kg (ALFA LAVAL, [s.d.]) e 15907 kcal/kg (ARAUTERM, [s.d.]) para lenhas com 12% de água.

Em outro estudo, Quirino et al. (2005) não encontraram correlação entre o PCS e a densidade básica das espécies estudadas, mas Sardinha, Macedo e Macedo (2002) afirmam que as madeiras mais densas são melhores combustíveis, apresentando um maior poder calorífico por unidade de volume apesar de apresentarem também maior resistência à combustão, consequência da menor condutibilidade térmica.

Em estudo comparativo para o aquecimento a partir das espécies Uva Japão e Eucalipto, Paixão et al. (2009) constataram que a Uva Japão apresentou melhor desempenho, com menor consumo de lenha e maior eficiência no aquecimento. Estes resultados estão relacionados com as diferenças no Poder Calorífico e podem estar relacionados ao TU constatado por Madalena, Oliveira e Rochadelli (2013) para as duas espécies.

Brand et al. (2012), em estudos realizados com toras de Pinus (*Pinus Taeda*) e Eucaliptos (*Eucalyptus Dunnii*) no sul do Brasil, indicaram que o TU é fortemente influenciado pelo tempo de estocagem do material, cujo valor é elevado para o material recém-coletado e diminui até o quarto mês de estocagem. Constata uma redução da umidade de forma mais acentuada nos meses de verão, devido à menor Umidade Relativa (UR) do ar, variando de 65% para 25% em base úmida para o período relatado.

A mesma autora constata extremos de 18812 kJ/kg e 20323 kJ/kg para o PCS, das espécies no decorrer do tempo de estocagem. Estes dados apontam a dependência do PC em relação ao TU e este em relação ao tempo de estocagem.

Outro insumo fundamental no processo de aquecimento, o GLP é muito utilizado como combustível suplementar. Ele é composto pelos hidrocarbonetos propano e butano em proporções variadas, somados a pequenas quantidades de outros hidrocarbonetos e, como combustível, apresenta vantagens devido ao seu alto PCI e baixo risco de toxicidade.

As campânulas a gás consomem em torno de 535 kg de GLP por lote criado em um aviário convencional, o qual apresenta poder calorífico de 46400 kJ/kg (SANTOS, 2001; SANTOS; LUCAS JUNIOR, 2004). Este valor converge com manuais de caldeiras que indicam 46151 kJ/kg (ALFA LAVAL, [s.d.]), 46883 kJ/kg (ARAUTERM, [s.d.]) e com estudos publicados por outros autores 47234 kJ/kg (FUNCK; FONSECA, 2008).

2.2.7 Demanda e consumo de energia elétrica para um ciclo de produção

A energia elétrica demandada é dependente da tecnologia presente nos galpões. Aviários com maiores recursos tecnológicos, automaticamente apresentam maior dependência elétrica. Constatações em aviários convencionais na cidade de Chapecó - SC indicam a presença de, em média, 16 ventiladores elétricos de 0,5 CV, duas bombas de água 2 CV (consumo e aspersores/nebulizadores), quatro alimentadores de 0,5 CV cada, um motor distribuidor de ração de 2 CV e trinta lâmpadas de 25 W, totalizando uma potência instalada próxima de 12,8 kW. Estes valores corroboram com os encontrados por Santos e Lucas Junior (2004) para o

mesmo tipo de aviário, em que, os equipamentos listados indicam potência instalada de 14,26 kW e com Nascimento (2011) com 13 kW.

Segundo Silva et al. (2011), em uma semana típica de funcionamento do alojamento, o consumo de energia nestes galpões atinge o valor médio de 55 kWh/dia, apontando um consumo médio de 2222,8 kWh por ciclo e um valor de 0,101 kWh por ave alojada. Valores próximos a estes também foram encontrados por Bueno e Rossi (2006) com valores entre 0,07 kWh/ave e 0,17 kWh/ave e por Ferreira e Turco (2003) com valores próximos de 0,12 kWh/ave a 0,20 kWh/ave por lote produzido.

Grandes diferenças entre os valores de consumo são atribuídas às diferentes estações do ano em que foram realizadas as pesquisas. Pequenas divergências entre os dados ocorrem principalmente pela diversificação da quantidade de equipamentos dentro dos galpões, os quais foram se modernizando em níveis diferentes de acordo com a necessidade e capacidade de investimento dos produtores.

A média de consumo de energia elétrica em aviários convencionais, obtida no Brasil, a partir de estudos em cada estado brasileiro, indica 2300 kWh por lote criado (MIELE et al., 2010) e o valor energético da unidade de energia elétrica é indicado como sendo 3600 kJ/kWh.

Se considerados os aviários mais avançados tecnologicamente, como o modelo Dark-house, a quantidade de equipamentos elétricos é bastante superior e a dependência de energia elétrica aumenta substancialmente, chegando aos patamares de 12956 kWh (MIELE et al., 2010) ou até 13560 kWh (NASCIMENTO, 2011) por ciclo de produção.

2.2.8 Metabolismo dos frangos e a Carga Térmica Radiante⁶ (CTR)

O calor metabólico produzido pelas aves foi estimado por Nascimento et al. (2017) e mostrado na Equação (7), na qual foi quantificada a produção de calor (HP) em W/m^2 pelas aves em função do peso vivo (LW) em gramas durante o período de crescimento. O estudo baseou-se no consumo de O_2 e produção de CO_2 através da

⁶ A Carga Térmica radiante é um índice de (des)conforto ambiental e indica a radiação total incidente em um corpo, provinda do espaço circundante. Mas a quantidade absorvida por este corpo, dependerá de outros fatores como coeficiente de absortividade ou fator de forma.

respiração e apontam um padrão linear de crescimento da atividade metabólica, com um coeficiente de correlação $R^2 = 0,79$. Resultados são mostrados na Figura 11.

Figura 11 - Produção de calor metabólico (W/m^2) como função da massa do frango (g) e devido coeficiente de correlação. Fonte: Adaptada de Nascimento et al. (2017).

O mesmo trabalho cita a Equação (8), desenvolvida por Mitchel em 1930, como estimativa possível para o crescimento da superfície das aves utilizando o Sistema Internacional de Unidades (SI). Tais resultados foram obtidos com aves da linhagem COBB, mas serão generalizadas para as demais linhagens deste estudo.

$$HP = 60,65 + 0,04LW \quad (7)$$

$$A = 0,000819(LW)^{0,705} \quad (8)$$

Desta maneira, a Equação (7) fornece a produção de calor por unidade de área do corpo da ave e a Equação (8) nos fornece o crescimento desta área em função do peso vivo, ambas como funções do tempo de vida da ave.

Furtado et al (2006) utilizaram a Equação (9), proposta por Esmay em 1969, para calcular a CTR, em que $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ indica a constante de Stefan-Boltzmann. A partir de valores mensuráveis da temperatura de globo negro (T_{gn}), da temperatura do ar (T_{ar}) e da velocidade do vento (V), encontra-se a chamada Temperatura Radiante Média (TRM) pela Equação (10).

$$CTR = \varepsilon \sigma (TRM)^4 \quad (9)$$

$$TRM = 100 \left[2,51 V^{1/2} (T_{gn} - T_{ar}) + \left(\frac{T_{gn}}{100} \right)^4 \right]^{1/4} \quad (10)$$

Em países de clima tropical como o Brasil, a intensa radiação solar e elevadas temperaturas no verão exigem ajustes na orientação, dimensões, paisagismo e características construtivas, bem como materiais com bom isolamento térmico. O uso de telhados reflexivos e de forro na altura do pé direito, também melhoram as condições térmicas no aviário pela formação de uma camada de ar junto à cobertura, a qual reduz a radiação incidente nas aves (ABREU et al., 2007).

Devido a elevados custos na implantação dos isolantes, as coberturas mais utilizadas em galpões de criação intensiva são de alumínio, de cerâmica e de amianto, e sua baixa capacidade de isolamento térmico faz com que elevem muito a temperatura quando submetidas à radiação solar. Uma alternativa possível é a utilização de pintura branca na parte superior do telhado, a qual reduz o poder de absorção da radiação e a temperatura do ambiente abaixo dela (FIORELLI et al., 2010). O uso de coberturas reduz em até 30% a radiação incidente nos animais, se comparado ao ar livre.

Fiorelli et al. (2010) avaliaram a influência de diferentes materiais de cobertura no conforto térmico de instalações avícolas considerando também a CTR. Os valores encontrados ficaram na faixa de 452,67 W/m² medidos às 10 h até 556,63 W/m² medidos às 14 h, apontando o melhor isolamento com telha cerâmica. Outros trabalhos citam valores de 515,4 W/m² (ROSA, 1984), 487,6 W/m² (MORAES, 1998), e 475,2 W/m² (NAAS et al., 2001) para o interior dos galpões.

Sarmiento et al. (2005) demonstraram que o telhado de amianto com pintura branca possibilita uma redução média de 9°C na temperatura da parte posterior da telha, mas aponta que isto não afeta significativamente os índices de conforto térmico na altura das aves. Os valores da CTR nas diferentes horas do dia apontaram, para o interior do galpão, valores compreendidos entre 429,4 W/m² a 492,3 W/m² contra 514,9 W/m² a 788,2 W/m² registrados externamente.

Em estudos de temperatura para duas diferentes épocas do ano, Abreu et al. (2007) indicam melhores resultados no desempenho de frangos de corte a partir da

implantação de forro de polietileno. Além disso, a implantação do forro reduziu a carga térmica radiante média, de $426,33 \text{ W/m}^2$, para $423,31 \text{ W/m}^2$ contra 750 W/m^2 incidentes na parte externa. Isso resulta em temperaturas mais elevadas para os aviários sem forro.

A Figura 12 ilustra os resultados de Abreu et al. (2007) mostrando a relação entre a temperatura interna do aviário e a CTR encontrada, ambas medidas em aviários com forro e sem forro, bem como nas épocas 1 (outubro a dezembro) e 2 (janeiro a fevereiro) no sul do Brasil. O estudo reflete a situação de maiores temperaturas para a região, situação que determina os maiores valores de temperatura e CTR.

Figura 12 - Curvas ajustadas para temperatura do ar e CTR dentro de aviários com e sem a presença de forro, nas épocas 1 e 2, comparativamente ao exterior, em função das horas do dia. Retirado de Abreu et al. (2007)

A cobertura do aviário substitui uma área de solo aquecida por uma área sombreada, mas adiciona uma fonte de energia do material aquecido do telhado. Este pode ser o motivo da maior temperatura do ar logo após as construções receberem a maior incidência de CTR. Apesar do ar aquecido se manter na parte superior do galpão, esta energia térmica introduzida deve ser retirada pelos sistemas de ventilação e arrefecimento, elevando custos e dificultando a ambiência no espaço de criação (TINOCO, 2001).

2.2.9 Os frangos e objetivos de desempenho

Devido aos constantes avanços na genética das aves de corte, a melhoria na conversão alimentar permite grande redução no ciclo de produção atual, quando

comparada aos primórdios da produção intensiva. Os frangos produzem mais carne em menos tempo com menor quantidade de ração consumida.

Para demonstrar esta evolução, Zuidhof et al. (2014) compararam aves mistas de 1957, 1978 e a atual Ross-308 no ano de 2005 em três momentos do ciclo de produção (nascimento, 28 dias e 52 dias). Este comparativo, explicitado na Figura 13 conclui que as aves atuais possuem um padrão de crescimento muito mais acentuado a partir dos 14 dias fazendo com que as aves dos anos 70 e dos anos 50 representem respectivamente, 40% e 20% do recente desempenho produtivo.

Figura 13 - Comparativo do desempenho de aves comerciais mistas produzidas nos anos de 1957, 1978 e 2005. À esquerda, mudanças relacionadas à idade das aves em cada linha e mudanças relacionadas ao melhoramento genético em cada coluna. À direita, massa corporal absoluta de aves para cada situação ao final do ciclo produtivo (superior) e massa corporal relativa ao ano de 2005 (inferior). Adaptada de Zuidhof et al. (2014).

Para descrever os padrões de crescimento das aves, alguns modelos matemáticos estão disponíveis, tal como o modelo de Mitchel (1930), reportado na Equação (8) e utilizado por Nascimento (2015). No entanto, Henn (2014) afirma que os estudiosos da área preferem a equação de Gompertz para descrever o crescimento e a deposição de nutrientes nas aves, mostrada na Equação (11).

$$M = Ae^{-e^{-B(T-C)}} \quad (11)$$

Esta equação apresenta propriedades desejáveis em uma curva de crescimento, pois a massa inicial é sempre superior à zero. Desta forma, a massa corporal M é dependente da massa do animal A na maturidade, do crescimento relativo no ponto de inflexão B , idade no ponto de inflexão C e a idade do animal em dias T .

Dependendo dos objetivos de desempenho, mercado consumidor e metas de produção os frangos são entregues à agroindústria após o ciclo de produção (entre 30 e 49 dias), com massas variando entre 1,0 kg e 2,9 kg, conforme a programação da empresa integradora. Miele et al. (2010) apontaram o peso médio de entrega das aves às agroindústrias com 42 dias de produção, indicando um valor de 2,6 kg para, praticamente, todos os estados do país. Estes dados convergem com Funck e Fonseca (2008), os quais indicam um crescimento de 2,5 g/h de vida para as aves.

Em relação à conversão alimentar (CA), os dados apontam uma redução de 2,4 kg/kg em 1980 para 1,82 kg/kg em 2010. Mais recentemente, Teixeira et al. (2015) encontraram valores entre 1,6 kg/kg e 1,75 kg/kg em dois tipos diferentes de cama utilizada e para cinco ciclos de produção. Vale ressaltar que esta taxa apresenta grande variabilidade devido a fatores como gênero, idade e linhagem, mas vem reduzindo à medida que ocorre o melhoramento genético.

Considerando a EB como a energia transformada pela oxidação total da matéria orgânica, pode-se considerar que o valor encontrado com o uso de bomba calorimétrica indica a energia total disponível no produto. Santos (2001) indicou uma média para os valores experimentais em 25824 kJ/kg de massa seca, indicando também uma fração de massa seca de 37,34%, sendo o único trabalho quantificando a energia disponibilizada pelos frangos.

2.2.10 A cama de frangos: quantidade e características

A cama aviária é o resultado da mistura de material absorvente, ração desperdiçada, excrementos de aves e penas (LYNCH et al., 2013). Sua função é absorver a umidade, diluir uratos e fezes, fornecer isolamento térmico e superfície macia evitando a formação de lesões na carcaça das aves (CARVALHO et al., 2011). É composta, basicamente, por água e carbono, com pequenos traços de nitrogênio, fósforo, cloro, cálcio, magnésio, sódio, manganês, ferro, cobre, zinco e arsênio (KELLEHER et al., 2002). Suas características são dependentes do tipo e

composição das rações fornecidas, do material absorvente utilizado, do tempo e número de ciclos criados, linhagem e outros fatores climatológicos.

Para quantificar a cama gerada, Santos (2001) realizou um experimento com 0,442 kg de serragem seca por ave alojada em cama nova, com densidade de 16 aves/m². Ao final de 42 dias de alojamento, produziu-se um total 1,37 kg (MS) de cama de aviário por ave, sendo que, desse total, 0,93 kg (MS) foram acrescentados pelas aves. Seu estudo concluiu que são gerados 0,59 kg (MS) de resíduos para cada quilograma de frango vivo produzido.

Estes valores concordam com Santos (1997) que indica a geração de 0,521 kg (MS) de cama para cada 1 kg de “peso vivo” de ave e também converge com valores citados em estudo realizado na Espanha por Lynch et al. (2013), com 1,4 toneladas de cama gerada para cada 1000 aves criadas.

Em outro experimento realizado por Fukayama (2008), a geração de cama foi quantificada para quatro lotes consecutivos. Foram encontradas médias de 1,49 kg(MS)/ave para o primeiro lote e 1,24kg(MS)/ave com dois lotes criados sobre a mesma cama. Isto comprova evidências anteriores de que a reutilização da cama de frangos pode reduzir os custos com a sua aquisição, reduzindo o impacto ambiental com sua geração.

A reutilização da cama no ambiente criatório é uma alternativa viável para diminuir o impacto ambiental, além de favorecer regiões em que há escassez do material base, dificuldades com mão de obra e para venda (VIEIRA, 2011). Santos (1997) constata 0,439 kg de massa seca gerada para cada 1 kg de “peso vivo” quando a cama é reutilizada em dois lotes, constatando uma redução de 16% no reuso. Santos (2001) cita uma redução ainda maior, em média de 35% na geração de resíduos com a reutilização de cama.

Segundo Vieira (2011), do ponto de vista sanitário, o melhor momento para se proceder com a retirada da cama de maravalha do aviário ocorre no final do primeiro ciclo, coincidindo com os resultados obtidos por Marin (2011) quanto ao melhor período para se proceder a compostagem a campo.

A espessura recomendada para todos os tipos de galpões deve estar entre 5 cm e 10 cm e sua umidade, ao final da criação, entre 20% e 35%. Estes valores de umidade são atingidos mais facilmente quando utilizada granulometria próxima de 2,5 mm.

Furlan (2006), em estudo sintetizado na Tabela 6, relaciona a umidade da cama em função da densidade de aves, da idade e da altura da cama utilizada em condições ambientais do verão brasileiro. Percebe-se que a umidade da cama aumenta com a densidade das aves e com a idade das mesmas, reduzindo com o aumento de material absorvente introduzido.

Tabela 6 - Influência da idade das aves, da densidade de criação e da altura da cama na umidade da cama de frangos gerada.

<i>Umidade da cama (%)</i>	<i>Idade das aves (dias)</i>					
	7	14	21	28	35	42
	20,2	28,9	29,3	34,0	33,2	42,4
<i>Umidade da cama (%)</i>	<i>Densidade (aves/m²)</i>					
	10	14	18			
	28,1	32,5	33,3			
<i>Umidade da cama (%)</i>	<i>Altura da cama (cm)</i>					
	5	10	15			
	34,8	29,9	29,0			

Fonte: Adaptada de Furlan (2006).

Davassaim e Boodoo (1998), ao avaliarem maravalha e serragem, verificaram que a capacidade de retenção de água e a densidade da maravalha foram bem menores do que da serragem. Já Pearson et al. (2000) e Oliveira et al. (2002) verificaram que, menores tamanhos da partícula apresentaram maior capacidade de retenção de água e, conseqüentemente, maior umidade, situações indesejadas para um ambiente criatório.

Concordando com Furlan (2006), Santos, Lucas Junior e Sakomura (2005) indicam um aumento da umidade com o aumento da densidade na criação de 10 aves/m² (28,84%), 16 aves/m² (33,20%) e 22 aves/m² (39,03%), mas, considerando a reutilização da cama em um segundo lote, os autores perceberam a redução nos teores de umidade para 21,33%, 28,12% e 38,24% respectivamente, considerando positiva a reutilização da cama para mais de um lote de criação.

O custo para aquisição de material, a mão de obra para a retirada do insumo, a diminuição da atividade madeireira e a adaptação às épocas do ano para disponibilidade dos materiais são razões fortes para a reutilização da cama de frangos (PAGANINI, 2004). No entanto, este rejeito contém considerável potencial, que ao ser processado de forma a disponibilizar esta energia, poderia contribuir, inclusive, para o equilíbrio energético do galpão (SANTOS, 2001).

Para Santos e Lucas Junior (2004), o coeficiente médio energético da cama de frango corresponde a 15239 kJ/kg para uma fração de 76,12% de massa seca, valor

superior ao utilizado por Sordi, Souza e Oliveira (2005), cujo poder calorífico da cama de frangos foi medido experimentalmente chegando-se ao valor de 11600 kJ/kg para o PCI e 16100 kJ/kg para PCS.

Na Espanha, Quiroga et al. (2010) caracterizaram a excreta das aves com objetivo energético. O PCS foi medido experimentalmente com bomba calorimétrica encontrando-se o valor médio de 13084 kJ/kg para uma composição em 36,2% de C, 4,6% de H, 5,9% de N e 33,65% de cinzas.

Em outro trabalho, Lynch et al. (2013) analisaram a cama de frangos como matéria-prima energética destacando os valores de 18000 kJ/kg de forma experimental e 19500 kJ/kg calculado a partir das Equações (6) e (7). As análises indicaram a presença de 53,45% de C, 6,92% de H, 32,25% de O, 0,53% de S, 6,11% de N e 0,74% de cinzas com um PCI indicado de 8750 kJ/kg. Os resultados apontaram que o insumo é uma fonte de biomassa útil desde que produzida localmente e os devidos cuidados sejam tomados para minimizar as emissões nocivas durante a combustão.

Propostas para aproveitamento deste resíduo foram levantadas por vários pesquisadores. Uma delas aposta na utilização da cama de frangos para geração de biogás, através da utilização de biodigestores do tipo batelada (AIRES, 2009). Tal sugestão surgiu a partir de estudos que comprovam a necessidade de 0,12 kWh no inverno e 0,20 kWh no verão para criação de uma única ave (FERREIRA; TURCO, 2003). Se a cama de um frango de corte gera 1,556 kWh a partir da biodigestão anaeróbia, obtém-se um incremento de 92% no inverno e 87% no verão em termos de energia. Assim, a cama de um frango de corte, poderia produzir energia térmica suficiente para criação de 8 a 13 aves.

Miles, Miles e Bock (2004) demonstraram que a combustão estagiada pode ser utilizada para recuperar frações de fósforo e potássio nas indústrias de rações e fertilizantes. Este estudo encontrou para a cama de frangos um PCS de 15300 kJ/kg com composição elementar de 39,5% C, 4,3% H, 3,9% N, 0,8% S e 22,9% de cinzas com uma variação de 20% a 35% na umidade.

Além do citado e da utilização da cama de frangos como substrato na lavoura, existe o reconhecimento por parte dos pesquisadores em relação ao uso da cama de frangos de corte na forma de briquetes alimentando caldeiras já existentes nos ambientes criatórios, para geração de energia elétrica ou térmica (PALHARES; KUNZ, 2011). No entanto, na utilização do insumo para combustão direta, é

necessário promover a redução da umidade e a densificação para posterior armazenamento. Desta forma, seria possível elevar o PCS do insumo, o qual já sofre mudanças no processo de decomposição ainda no interior dos aviários.

2.2.11 Taxas de mortalidade e carcaças rejeitadas

Durante o ciclo produtivo, aves são descartadas devido à taxa de mortalidade assumida, bem como padrões irregulares de crescimento ou outras anomalias. Por uma questão de conveniência, neste trabalho será considerado que, até o momento do descarte, as aves rejeitadas apresentam os mesmos padrões de crescimento das remanescentes, com o mesmo consumo de ração e água, bem como a mesma geração de resíduos.

Em um estudo sobre balanço energético em galpões avícolas, Santos e Lucas Junior (2004) quantificaram a fração de massa seca das carcaças em 30,96% confirmando que o percentual de água em seu corpo é próximo de 70%. Resultados experimentais com bomba calorimétrica apontaram para um coeficiente médio energético de 26089 kJ/kg. Além deste estudo, nenhum outro trabalho procurou quantificar a MS destas aves, tampouco a composição proximal ou elementar dos frangos vivos ou descartados.

De acordo com Miele et al. (2010), as taxas de mortalidade podem ser consideradas normais entre 3% e 4% durante o ciclo, mas os atuais índices de desempenho e tecnologias aplicadas no sistema produtivo permitem indicar taxas de mortalidade inferiores a 3%. Sarmiento (2005), avaliando o efeito de pintura na cobertura dos galpões, identificou variações de 2,52% a 2,72% nesta taxa. Outros estudos também identificaram taxas nestes padrões (TOGHYANI et al., 2010). Este percentual caracteriza-se como redução na produção desejada e paralelamente um aumento nos rejeitos gerados pelo sistema produtivo.

Sivakumar et al. (2008) realizaram diferentes tratamentos para compostagem de carcaças em diferentes estações do ano. Os autores consideraram a compostagem como uma alternativa economicamente viável, que não agride o meio ambiente e que vem se destacando nas unidades produtoras como um método eficiente, sem grandes custos de implantação. Este sistema é uma forma de acelerar a decomposição da matéria orgânica em relação ao que ocorreria no meio ambiente.

Os sólidos biodegradáveis da matéria orgânica podem ser manejados e estocados para uso como adubo orgânico, desde que utilizados na dosagem adequada (ORRICO JUNIOR; ORRICO; LUCAS JÚNIOR, 2010).

Apesar dos esforços e das vantagens do sistema, observa-se durante a compostagem, significativas perdas de nitrogênio por volatilização na forma de NH_3 . Desta forma Orrico et al. (2010) realizaram um estudo para avaliar o processo de compostagem, na redução de sólidos totais, micro-organismos e na conservação de nutrientes a partir das camas de frangos e carcaças de frangos. Segundo eles, a compostagem demonstrou-se eficiente para o tratamento de carcaças e cama de frangos em relação à redução de sólidos totais e eliminação de micro-organismos, entretanto, não demonstrou a mesma eficiência na conservação do nitrogênio do material.

2.2.12 Geração de gases, poeiras e resíduos da combustão

Grande preocupação no sistema intensivo de produção de frangos de corte, porém com pequenos avanços na solução dos problemas ambientais é a geração de Gases de Efeito Estufa (GEE), na qual vale citar a emissão de Dióxido de Carbono (CO_2), Metano (CH_4) e Óxido Nitroso (N_2O), gases contribuintes no aquecimento global (SNYDER; BRUULSEMA; JENSEN, 2008). Destaque principal é dado para a produção de CO_2 oriunda da respiração dos animais e fermentação aeróbica das excretas e dos resíduos da cama, com os demais elementos menos significativos (HENN, 2013).

O CH_4 é 23 a 25 vezes mais nocivo como GEE que o CO_2 (MONTZKA; DLUGOKENCKY; BUTLER, 2011), no entanto, devido à alta concentração de CO_2 , seus danos são eminentes. Segundo a *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, em março de 2015, a concentração mundial atingiu a marca de 400 ppm, valores muito acima dos encontrados na era pré-industrial, em que situava-se em torno de 280 ppm. Além disto, destacam que metade deste incremento é posterior aos anos 1980 (NOAA, 2015).

Em relação ao sistema produtivo de frangos de corte, Henn (2015) desenvolveu modelos capazes de estimar a emissão de CO_2 na produção, a partir do balanço de carbono no frango e na cama de frangos. No estudo, o autor

considerou crescimento e composição corporal das aves, composição das dietas e das excretas em carbono, bem como sua emissão pela respiração e fermentação da cama. O resultado apontou as Equações (11) e (12) respectivamente para estimar a massa de CO₂ emitida pela respiração e emitida pela cama, considerando cada ave durante o ciclo de produção no dia d considerado e para a massa do frango m_f em gramas.

$$m_{CO_2,resp} = -70,2845 + 20,3322d - 0,0382m_f + 0,0215m_f d \quad (11)$$

$$m_{CO_2,cama} = 1,8283 + 3,2714d - 0,0945m_f + 0,00661m_f d \quad (12)$$

As equações foram obtidas com bons coeficientes de correlação, respectivamente $R^2 = 0,995$ e $R^2 = 0,944$. Em geral, o CO₂ emitido pela cama corresponde a 20% do total emitido pelos frangos. Aproximadamente 80% das emissões é resultado da respiração das aves (CALVET et al., 2011a).

Outro elemento importante a ser avaliado é a Amônia (NH₃), gerada pela volatilização do nitrogênio na cama. Estudos realizados por Miles et al. (2011) detectaram valores entre 24,2 g_{CO2}/m²h e 27,2 g_{CO2}/m²h sobre a superfície da cama de lotes, respectivamente para o inverno e o verão. Considerando as mesmas épocas, Calvet et al. (2011b) obtiveram taxas de 18,1 mg/h por ave e 19,7 mg/h por ave, sendo que as emissões aumentavam com a idade das aves.

O NH₃ é um gás incolor, irritante às mucosas, sendo formado pela decomposição microbiana do ácido úrico excretado pelas aves e sua detecção depende de ventilação, idade e método de medição (OLIVEIRA; MONTEIRO, 2013). Valores aceitáveis de dispersão no ar inalado são inferiores a 20 ppm, no entanto, sistemas fechados de criação intensiva podem apresentar concentrações de até 50 ppm (JONES; WATHES; WEBSTER, 2005). Quando as aves inalam quantidades superiores a 60 ppm, ficam suscetíveis a doenças respiratórias e, em níveis próximos de 100 ppm, há redução da taxa e profundidade da respiração, prejudicando os processos fisiológicos de trocas gasosas (GONZALES; SALDANHA, 2001).

Em estudo comparativo de dois galpões de produção de frangos, sem ventilação e com ventilação, Vigoderis et al. (2010) encontraram as concentrações

de amônia em 29,3 ppm e 23,2 ppm respectivamente e de dióxido de carbono em 1527,7 ppm e 1427,3 ppm respectivamente. Estes gases, principalmente a amônia, tornam-se um problema, geralmente em estações mais frias, em decorrência das condições de umidade excessiva da cama propiciando o crescimento de agentes patogênicos.

Um estudo realizado por Furlan (2006) e, ilustrado na Tabela 7, demonstra a geração de amônia pela cama de frangos, registrada na estação de verão.

Tabela 7 - Geração de amônia pela cama de frangos com diferentes alturas e densidades de aves.

<i>Densidade (aves/m²)</i>	<i>Altura cama (cm)</i>	<i>Amônia (g/100g)</i>
10	05	13,4
	10	11,2
	15	8,80
14	05	14,6
	10	16,6
	15	15,3
18	05	17,8
	10	16,4
	15	14,7

Fonte: Extraída de Furlan (2006)

Para as condições de inverno, os valores são ainda maiores, uma vez que a ventilação é mínima somente para manter os padrões aceitáveis de qualidade do ar. Pode-se perceber que a quantidade gerada depende diretamente da densidade de aves alojada e diminui com a altura de material absorvente adotada para a cama das aves.

Miragliota et al. (2004) desenvolveram um software para estimar a emissão de amônia na produção de frangos de corte. Do modelo probabilístico, a melhor curva ajustada é indicada na Equação (13) com a massa de amônia medida em mg/m²h, para o dia d , considerando a temperatura da cama T e seu PH.

$$m_{NH_3,cama} = e^{(-6,5023+0,3020d+0,1218T+0,6142PH-0,0043d^2)} \quad (13)$$

No tocante à emissão de gases pelo processo produtivo, a Tabela 8 aponta as quantidades suportáveis relatadas por Kunz et al. (2011), e algumas consequências prejudiciais ao organismo humano de acordo com a quantidade absorvida.

Oliveira e Monteiro (2013) mediram a concentração de GEE na produção de frangos de corte em aviário dark-house com cama de maravalha de terceiro lote e

com 12300 aves alojadas. Alguns resultados são apresentados na Tabela 9. É possível perceber que a concentração no interior dos galpões é sempre maior para a NH_3 e o CO_2 quando comparada ao ambiente externo.

Tabela 8 - Concentração de alguns gases oriundos da produção avícola e suas consequências para a saúde dos seres humanos.

<i>Amônia (Irritante)</i>	5 a 50 ppm – odor não detectável 100 a 500 ppm – irritação das mucosas superficiais em uma hora 400 a 700 ppm – irritação imediata dos olhos, nariz e garganta 2000 a 3000 ppm – severa irritação dos olhos, tosse intensa, pode ser fatal 5000 ppm – espasmos respiratórios, asfixia, pode ser fatal 10 000 ppm – nível fatal
<i>CO₂ (Asfixiante)</i>	20 000 ppm – sem riscos 30 000 ppm – respiração acelerada 40 000 ppm – dores de cabeça 60 000 ppm – asfixia 300 000 ppm – pode ser fatal em exposições acima de 30 min.
<i>CH₄ (Asfixiante)</i>	500.000 ppm – dores de cabeça

Fonte: Adaptada de Kunz et al. (2011)

Tabela 9 - Concentração em ppm de amônia (NH_3) e dióxido de carbono (CO_2) na produção de frangos de corte, obtida em diferentes períodos de crescimento.

<i>Dias</i>	<i>NH₃ (ppm)</i>		<i>CO₂ (ppm)</i>	
	<i>Interno</i>	<i>Externo</i>	<i>Interno</i>	<i>Externo</i>
14	2,11±0,41	2,09±0,47	633,21±17,57	554,75±85,24
27	2,27±0,39	1,29±0,20	559,72±12,80	485,43±5,48
29	2,22±0,25	0,99±0,14	622,65±10,30	493,81±5,04
34	2,08±0,19	1,29±0,20	554,75±1,71	453,13±3,76
41	3,10±0,54	1,70±0,30	776,78±30,62	456,89±8,72

Fonte: Adaptada de Oliveira e Monteiro (2013)

Diante da evidência da necessidade de tratamento destes gases, Aires (2009) indicou a biodigestão anaeróbia como forma de reduzir o poder poluente, e os riscos sanitários dos dejetos tendo como subprodutos o biogás e o biofertilizante. No entanto, esta sugestão é exequível, com exaustiva mão de obra, após a retirada do resíduo dos galpões e inserção em biodigestores batelada, não sendo aplicável durante os ciclos de produção.

As massas gasosas que deixam o aviário durante o ciclo constituem-se de ar úmido de entrada, da água líquida vaporizada nos aspersores e da água líquida de consumo eliminado pelo trato respiratório e excreção das aves (KUNZ et al., 2011). Pode-se dizer que toda a água necessária para nebulização e toda a água utilizada pelos frangos para manutenção de sua homeotermia são extraídos dos aviários em forma de vapor, que retorna ao meio para completar seu ciclo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta o modelo proposto e os instrumentos utilizados para a análise exérgica em um ciclo produtivo. São discutidas as ferramentas termodinâmicas utilizadas e, na sequência, são apresentados os resultados dos balanços de massa, de energia e estimada a destruição de exergia nos processos analisados.

3.1 DESCRIÇÃO DO MODELO

Dados necessários para o desenvolvimento deste trabalho permeiam as áreas da zootecnia, medicina veterinária e meio ambiente, com a aplicação de conceitos e ferramentas de análise termodinâmica. Foram realizados estudos teóricos sobre o desenvolvimento e fisiologia das aves, normas construtivas dos galpões avícolas, conforto térmico e ambiência, manejo, tecnologias associadas ao ciclo produtivo e fontes renováveis de energia vinculadas à biomassa.

A coleta dos dados para os principais insumos, produtos e rejeitos do processo produtivo pautou-se na literatura existente através de vasta pesquisa bibliográfica nas áreas indicadas, destacando a tipologia dos galpões, diversidade de microclimas e formas de manejo durante a realização dos experimentos, mas sem detalhar os procedimentos metodológicos usados pelos diversos autores. Com os dados coletados, buscou-se relações de convergência dos valores para as diferentes regiões brasileiras, diferentes níveis tecnológicos implantados e manejos adotados.

Devido à maturação do sistema termorregulador das aves e estudos bioclimáticos para diferentes regiões brasileiras, o ciclo produtivo foi subdividido em três fases. Na fase inicial admitiu-se a necessidade de aquecimento dos galpões, e na fase final a promoção de arrefecimento utilizando, além da ventilação, o resfriamento evaporativo. Durante todo o ciclo, a ventilação foi aplicada para conforto térmico das aves e, desta forma, os diferentes microclimas brasileiros passam a ser contemplados apenas variando-se o tempo de cada uma das fases dentro do ciclo completo.

Para a avaliação exergética foi necessária a realização de um completo balanço de massa e energia dos principais insumos, produtos e rejeitos do ciclo produtivo. Balanços de massa foram realizados nos processos de crescimento das aves, aquecimento e arrefecimento dos galpões bem como na cama gerada no processo. Balanços de energia foram realizados no processo de combustão e aquecimento dos galpões, desenvolvimento das aves, formação da cama e ar renovado em cada fase do ciclo.

Dentro da confiabilidade que os dados possibilitaram, foi realizado o equacionamento para os balanços de massa, energia e destruição de exergia desenvolvido com o programa *Engineering Equation Solver (EES®)*. Isto permitiu identificar, em cada VC tomado, as irreversibilidades inerentes aos processos de transformação de energia.

Como esperado, devido à amplitude do trabalho, foram encontradas divergências em relação aos dados publicados, fato que explica o motivo de inúmeras pesquisas da área trabalharem com realidades pontuais evitando uma maior abrangência nos estudos.

Foram utilizados manuais de desempenho das linhagens COBB-500 e ROSS-308, por compreenderem grande percentual das aves de corte criadas no mundo. Algumas características produtivas para lotes mistos, de machos e de fêmeas foram extraídas destes manuais, uma vez que as empresas ditam os limites potenciais genéticos de cada linhagem.

Na seção 2.2 discutiu-se propriedades físicas e termodinâmicas dos principais insumos, produtos e rejeitos estudados, para que fosse possível a realização dos balanços dentro das quantidades demandadas pelos diversos tipos de galpões.

Conforme classificação dos tipos de energia indicados por Campos e Campos (2004) em balanços energéticos, considerou-se o uso dos insumos, produtos e rejeitos que se relacionam de forma direta com o sistema produtivo, desconsiderando-se as formas indiretas vinculadas à cadeia de produção, como mão de obra, medicamentos, transporte, maquinário e industrialização.

Além disso, componentes considerados irrelevantes para a análise realizada, tais como vacinas e desinfetantes, foram desconsiderados no estudo. Um fluxograma da sequência metodológica utilizada está apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Fluxograma de desenvolvimento do projeto. Passos anteriores à definição do VC apresentam informações gerais sobre o processo produtivo. A rotina computacional permite dados de entrada para diferentes linhagens e características construtivas e, após os testes de hipóteses, foram lançadas as proposições de adequações construtivas e de manejo.

Como ponto de partida, foi criado um fluxograma simples com os principais insumos demandados, produtos e rejeitos gerados no ciclo de produção, sendo apresentado na Figura 15 a seguir. Sua função foi indicar as principais entradas e saídas do processo, que julga-se merecerem destaque no estudo.

Figura 15 - Fluxograma inicial na realização dos balanços de massa e energia do sistema produtivo para os diversos tipos de galpões avícolas em um ciclo de produção.

As análises consideraram um processo de regime permanente (em média) para um ciclo de produção (30 a 45 dias) uma vez que, neste período, as entradas dos insumos são totalmente convertidas em produtos e rejeitos, desconsiderando-se as variações de massa e energia no interior do VC. Algumas equações propostas foram validadas pelo Método dos Mínimos Quadrados com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), indicando as funções que melhor ilustram cada conjunto de pontos colhido da literatura.

A modelagem e equacionamento foram realizados com parâmetros de entrada de cada insumo, produto e rejeito dentro dos limites aceitáveis de confiabilidade dos dados. A partir de mudanças nestes parâmetros, o comportamento de saída foi avaliado identificando as principais perdas pela segunda lei, também chamadas de irreversibilidades.

As possíveis sugestões quanto a alterações estruturais, manejo, reaproveitamento energético, o uso de fontes renováveis e a transformação de resíduos em insumos do processo devem elevar os padrões de lucratividade, sustentabilidade e reduzir a agressão ambiental.

Com o modelo desenvolvido foi realizado o diagnóstico das irreversibilidades e a avaliação dos dados de saída apontaram a configuração com menor geração de resíduos, e mínima agressão ambiental, além de identificar, dentro do processo, as principais irreversibilidades termodinâmicas ou os entraves passíveis de solução.

3.2 ANÁLISE TERMODINÂMICA

3.2.1 Conservação da massa

Grandezas físicas como a massa estão sujeitas ao princípio da conservação. Estas grandezas não podem ser criadas nem destruídas no Universo e, como consequência, sua variação no interior de um Volume de Controle (VC) definido pode ser identificada a partir dos fluxos mássicos de entrada e saída. A Equação (14) fornece o balanço de massa em um VC qualquer sendo aplicada a todos os volumes tomados no processo.

$$\frac{dm_{VC}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (14)$$

Na equação, $\frac{dm_{VC}}{dt}$ indica a variação da massa no interior do VC e os termos do segundo membro indicam as somas de todas as massas que entram e saem do mesmo (MORAN et al., 2011; BEJAN, 2006; BORGNAKKE; SONNTAG, 2009).

Para um processo em regime permanente, não existe variação da massa no VC dentro do período considerado e, portanto, os fluxos de massa que entram devem ser iguais aos fluxos mássicos que saem do espaço analisado.

3.2.2 Primeira lei da termodinâmica e análise energética

A análise energética, baseada na primeira lei da termodinâmica ou conservação da energia, permite avaliar quantitativamente os fluxos energéticos que entram e saem de um sistema ou VC analisado. Seguindo convenção de sinais de máquinas térmicas, a Equação (15) mostra o balanço de energia para várias entradas e saídas.

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q}_{VC} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e \right) - \dot{W}_{VC} - \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gZ_s \right) \quad (15)$$

Nesta equação, $\frac{dE_{VC}}{dt}$ indica a variação da energia no interior do VC analisado, $\dot{Q}_{VC}$ indica a taxa de transferência de calor entrando ou saindo através da fronteira, $\dot{W}_{VC}$ indica a potência desenvolvida (fenômeno também de fronteira) e o termo $\sum \dot{m}_i (h_i + \frac{v_i^2}{2} + gZ_i)$ indica a soma dos fluxos de entalpia, energias cinéticas e potenciais que atravessam os limites do volume de controle. Quando o processo ocorre em regime permanente, então as quantidades de massa e energia que entram e saem do VC são iguais, indicando uma variação nula em cada ponto considerado (MORAN et al., 2011; BORGNAKKE; SONNTAG, 2009).

O uso de ferramentas e técnicas termodinâmicas como a análise energética, para avaliar sistemas de conversão de energia, tem se intensificado nos últimos anos no sentido de avançar para a racionalidade do seu uso. A partir da constatação de uma crescente demanda por energia, do possível esgotamento das fontes de energia não renováveis e do conceito de desenvolvimento sustentável, é de vital importância ampliar o consumo consciente e melhorar a eficiência energética dos processos (KRAHL, 2009).

Como o conceito de energia está em tudo o que nos cerca, suas definições termodinâmicas são utilizadas nas mais variadas áreas da engenharia com um vasto leque de aplicações desde os recursos naturais até as mais avançadas tecnologias.

Fisicamente, o conceito de energia mecânica como “a capacidade de realizar trabalho” não é perfeitamente aplicável à energia térmica, já que é impossível converter integralmente calor em trabalho. Desta forma, em 1882, Maxwell definiu Energia como sendo “aquilo que permite uma mudança na configuração de um sistema em oposição a uma força que resiste a esta mudança”. Desta forma, qualquer processo físico, químico ou biológico que se associe a uma mudança possui fluxos energéticos (KRAHL, 2009).

A energia contida em um composto pode ser quantificada através de sua entalpia que, para o estado padrão, é chamada de entalpia de formação. Ela indica a energia transferida ou absorvida quando o composto é formado por seus elementos, estando todos no estado de pressão e temperatura de referência. A entalpia específica de um composto em qualquer outro estado é encontrada adicionando à entalpia de formação (h_f) uma variação de entalpia (Δh) (associada à mudança de estado com composição constante) entre o estado padrão e o estado de interesse, conforme apresentado na Equação (16).

$$h_{(T,P)} = h_{f(T_0,P_0)} + \Delta h \quad (16)$$

Como a entalpia de formação nem sempre está disponível para alguns combustíveis da biomassa, em muitos casos, a entalpia de combustão, disponibilizada experimentalmente é utilizada para conduzir a análise energética. Ela é definida como a diferença entre a entalpia dos produtos e a entalpia dos reagentes quando a combustão completa ocorre a uma dada temperatura e pressão (MORAN; SHAPIRO, 2011), sendo explícita na Equação (17).

$$h_{RP} = \sum_P m_s h_s - \sum_R m_e h_e \quad (17)$$

A quantidade de energia liberada por unidade mássica de combustível durante o processo de combustão pode ser encontrada também através do Poder Calorífico (PC) ou calor de reação. Os combustíveis são substâncias que, em contato com agentes oxidantes, como exemplo o oxigênio, sofrem uma reação química exotérmica. A quantidade desta energia liberada por unidade de combustível com magnitude igual à entalpia de combustão é medida pelo Poder Calorífico (MORAN et al., 2011; CENGEL, 2008).

Segundo Cengel (2008) e Moran et al. (2011), durante uma combustão completa, os gases residuais que deixam a reação devem estar à temperatura ambiente e, para combustíveis que contêm hidrogênio, a queima resulta na formação de água que pode estar na fase de vapor ou ser condensada ao fim do processo. O Poder Calorífico Inferior (PCI) indica a quantidade de calor transferido na combustão completa de 1 kg da substância, quando os gases de combustão são resfriados até o ponto de ebulição da água, evitando que esta condense. Esta propriedade dos combustíveis é bastante considerada em motores, turbinas e caldeiras devido à alta temperatura em suas câmaras de combustão.

Por sua vez, o Poder Calorífico Superior (PCS) é a quantidade de calor transferido a partir da combustão completa de 1 kg da substância combustível quando os gases de combustão são resfriados condensando o vapor de água presente neles (CENGEL, 2008; MORAN et al., 2011). Quando o combustível não possui hidrogênio em sua composição, o valor do PCS é igual ao do PCI, pois não

há formação de água e, portanto, consequente gasto de energia para a sua vaporização.

Além da forma experimental, é possível definir o conteúdo energético de um combustível de forma analítica a partir de seus elementos constituintes. O PCI dos combustíveis, calculado pela Equação (18), é dado pela somatória dos produtos das frações mássicas (ou volumétricas) de cada elemento, pelo seu respectivo PCI. Os termos X_i e PCI_i indicam a fração mássica de cada elemento constituinte do combustível e o PCI do i -ésimo elemento que o compõe.

$$PCI_{comb} = \sum_i (X_i PCI_i) \quad (18)$$

Cálculos do poder calorífico podem também ser realizados considerando a composição do material combustível. Channiwala e Parikh (2002), estudando numerosas correlações para quantificar o PCS a partir dos constituintes elementares, apontaram a Equação (19) com margem de erro de, aproximadamente, 1,45%. Os símbolos C , H , S , O , N e A , são as porcentagens mássicas de Carbono, Hidrogênio, Enxofre, Oxigênio, Nitrogênio e cinzas, respectivamente.

$$PCS = 349,1C + 1178,3H + 100,5S - 103,4O - 15,1N - 21,1A \quad (19)$$

Esta expressão é válida para intervalos de percentuais mássicos entre 0% e 92,25% para o C, 0,43% e 25,15% para o H, 0% a 50% para o O, 0% a 5,6% para o N, 0% a 94,08% para o S e 0% a 71,4% para as cinzas e foi validada para qualquer combustível sólido, líquido ou gasoso a partir de sua composição elementar de massa seca (CHANNIWALA; PARIKH, 2002).

No entanto, constatou-se que os dados de entrada desta correlação necessitam de análises refinadas com equipamentos de elevado custo e habilidades específicas. Com isto, uma nova correlação foi validada sem restrições para qualquer substância orgânica. Tal correlação é apresentada na Equação (20), na qual FC indica o percentual de Carbono Fixo na amostra, VM o percentual de Matéria Volátil e A a quantidade de cinzas.

$$PCS = 353,6FC + 155,9VM + 7,8A \quad (20)$$

Devido aos testes de validação, tal relação pode ser utilizada para qualquer combustível fóssil ou material de biomassa (PARIKH; CHANNIWALA; GHOSAL, 2005).

A partir do PCS, é possível encontrar o valor do PCI através de correlações indicadas por Quiroga et al. (2010) e mostradas na Equação (21), na qual o teor de Hidrogênio é levado em consideração.

$$PCI = PCS - \left[\frac{(2441,8)(9H)}{100} \right] \quad (21)$$

Nesta equação medida em base mássica, H indica o percentual de hidrogênio, 2441,8 a entalpia de condensação da água ($T=0^{\circ}\text{C}$, $P=101,3\text{kPa}$) e 9 a quantidade de unidades de água que se formam para cada unidade de Hidrogênio contido no combustível.

A eficiência energética de determinado processo pode ser encontrada a partir do quociente entre a energia do produto desejado e a energia dos insumos necessários para obtê-lo. Dessa forma, na Equação (22) podemos ver o cálculo do rendimento energético de um processo.

$$\eta_{en} = \frac{\text{produto gerado}}{\text{insumo necessario}} \quad (22)$$

Para o presente estudo, os produtos gerados são os frangos vivos entregues ao abate sendo que os insumos são todos os elementos necessários para que estas aves possam se desenvolver, como por exemplo, ração, água, energia elétrica e outros. Desta forma, o balanço energético contabiliza todas as entradas e saídas energéticas do sistema em termos quantitativos, não havendo preocupação alguma com a qualidade da energia transformada. Esta quantificação será realizada a partir da inserção da segunda lei da termodinâmica e da Análise Exergética, apresentadas na seção 3.2.3.

3.2.3 Segunda lei da termodinâmica e análise exergetica

No âmbito da segunda lei da termodinâmica, com a introdução do conceito de entropia, elucidam-se os possíveis processos de conversão de energia e a direção com que essas conversões ocorrem. Como uma das mais significativas leis físicas, ela indica que a entropia aumenta para qualquer sistema isolado que sofra um processo termodinâmico, tornando-se cada vez mais desorganizado.

Ao contrário da energia, a entropia não se conserva. Em processos reversíveis (situação hipotética) seu valor poderia ser constante, mas, em processos reais, seu valor aumenta devido à presença de irreversibilidades. A magnitude das irreversibilidades inerentes a uma mudança de estado de um sistema pode ser encontrada a partir da Equação (23), em que dS indica a variação da entropia no sistema, $\frac{\delta Q}{T}$ é a entropia que acompanha o fluxo de calor através da fronteira do sistema e δS_{ger} é a entropia gerada na mudança de estado.

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + \delta S_{ger} \quad (23)$$

Para um VC, permeável à massa, a Equação (23) se modifica como a mostrada na Equação (24), já que deve considerar a variação da entropia com o tempo e quantificar os fluxos de massa atravessando a fronteira.

$$\frac{dS_{VC}}{dt} = \sum \frac{\dot{Q}_{VC}}{T} + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s + \dot{S}_{ger} \quad (24)$$

Desta forma, $\frac{dS_{VC}}{dt}$ é a variação temporal da entropia no VC, $\dot{Q}_{VC}$ é a taxa de transferência de calor pela fronteira à temperatura T , $\sum \dot{m}_i s_i$ são os fluxos de entropia que cruzam a fronteira do VC e $\dot{S}_{ger}$ indica a taxa de geração de entropia.

Quando um sistema passa por um processo com consequente mudança de estado, tanto o sistema quanto o meio ao qual se insere são influenciados. Deste modo, a variação líquida da entropia, deve ser a soma da variação de entropia no sistema e da variação de entropia no meio. Portanto, de acordo com a Equação (25), por mais que o sistema possa transferir calor, reduzindo sua entropia, a soma líquida será sempre positiva em processos reais (ou nula em processos reversíveis).

$$dS_{liq} = (dS_{sist} + dS_{meio}) \geq 0 \quad (25)$$

O balanço global de entropia indica que os únicos processos possíveis são aqueles em que a variação líquida de entropia do sistema mais o meio seja positiva. Este princípio é denominado, princípio do aumento de entropia e determina um sentido único para a ocorrência dos processos.

Quando o objetivo de estudo é o aumento da eficiência de um processo ou equipamento, a busca é a realização da tarefa/alcance do objetivo com o menor aumento de entropia possível. Menores gerações de entropia em um processo de conversão energética correspondem a maior capacidade de realização de trabalho da energia transformada. Para a parcela útil da energia transformada denominamos Exergia.

A impossibilidade de total conversão energética foi introduzida em 1824 com estudos de Sadi Carnot que, publicando uma relação entre calor e trabalho, culminou na Segunda Lei da termodinâmica. Depois dele, em 1873, Gibbs e Maxwell formularam a relação matemática, seguidos por Gouy e Stodola, que introduziram a ideia de energia útil e, somente em 1956, Rant sugeriu o nome “Exergia”. Em 1977, Wall introduziu a exergia como conceito útil tanto para a engenharia como para melhoria dos recursos naturais e na redução dos impactos ambientais (WALL, 1986; WALL; GONG, 2001a; WALL; GONG, 2001b).

Segundo Kotas (1995), como a exergia não se sujeita às leis da conservação nos processos reais, devido à geração de irreversibilidades, sua aplicação é uma ferramenta útil na determinação das ineficiências de processos e equipamentos. Isto permite conhecer causas, locais e magnitudes das ineficiências, quantificando as perdas e resíduos gerados nos processos de conversão de energia (MORAN et al., 2011; BEJAN, 2006). Além destas características, a possibilidade de medir o desequilíbrio do sistema em relação ao meio, possibilita seu uso na obtenção de fatores ambientais (WALL, 1977).

A exergia pode ser obtida pelo máximo trabalho útil que pode ser extraído de certo sistema físico, no momento em que interage com o meio, devido a um desequilíbrio potencial, cinético, termomecânico e/ou químico. Enquanto houver desequilíbrio entre o sistema considerado e o meio em que se insere, é possível

extrair uma quantidade positiva de exergia através do potencial de realização de trabalho útil.

Em outras palavras, a exergia caracteriza-se como o mínimo trabalho útil necessário para levar uma quantidade de matéria nas condições do ambiente para qualquer outro estado termodinâmico. Pode ser considerada uma propriedade do sistema em questão e do meio em que se insere (SZARGUT; MORRIS; STEWARD, 1988; MORAN et al., 2011). Entende-se o meio ou ambiente de referência, aquele composto por substâncias que existem em abundância, de forma natural e estado estável, na atmosfera, nos oceanos e na crosta terrestre sob pressão de $P_0 = 101,3$ kPa e temperatura de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (SZARGUT; MORRIS; STEWARD, 1988). Nesta perspectiva, o ambiente tem uma condição normal e fixa de pressão e composição química, ainda que esta condição não retrate realidades locais e/ou temporais.

O uso da análise a partir do balanço exergético do sistema produtivo e demais ferramentas no campo da exergia, certamente trará elementos novos nas futuras tomadas de decisão do sistema produtivo de frangos de corte. Seu princípio pode auxiliar na busca de processos mais sustentáveis por indicar, dentro de todos os possíveis, aqueles que possibilitam a maior extração de energia útil.

A utilização desta ferramenta a partir dos dados obtidos no processo produtivo, aliados à aplicação de fontes de energia renováveis e biomassa residual, podem fornecer melhores resultados na produção, reduzindo a agressão ao meio ambiente e elevando os níveis de sustentabilidade.

Quando o sistema analisado encontra-se em diferentes alturas e velocidades em relação ao meio de referência, é possível a obtenção de exergia potencial e exergia cinética do mesmo. Tais parcelas são encontradas a partir das Equações (26) e (27). Os símbolos V , g e z representam, respectivamente, a velocidade (m/s), a aceleração gravitacional (m/s^2) e a altura/cota (m) em relação a um referencial.

$$b_c = \frac{v^2}{2} \quad (26)$$

$$b_p = gz \quad (27)$$

Na análise exergética, considera-se a ausência de efeitos nucleares, elétricos, magnéticos e de tensão superficial, desta forma, a exergia total de um fluxo ou de

um sistema será composta pela exergia física, exergia química, exergia cinética e exergia potencial, mesmo que as duas últimas sejam, geralmente, desconsideradas devido à magnitude insignificante quando comparada às demais componentes.

Quando, em determinado estado, o sistema apresenta desequilíbrio termomecânico (diferenças nas propriedades temperatura e pressão entre o estado considerado e o estado padrão) com o meio, exergia física pode ser extraída levando-o ao estado morto restrito⁷. Esta parcela é dada pela Equação (28), na qual os termos $(h - h_0)$ e $(s - s_0)$ são as diferenças de entalpia e entropia entre um estado qualquer e o estado morto restrito com T_0 indicando a temperatura ambiente.

$$b_f = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (28)$$

Quando o sistema em questão for um gás perfeito, as variações de entalpia e entropia podem ser rearranjadas com a equação dos gases perfeitos, encontrando a exergia física na forma da Equação (29), em que, c_p representa o calor específico à pressão constante, T e P as temperaturas e pressões para um estado qualquer e o estado de referência e R a constante universal do gás.

$$b_f = c_p(T - T_0) - T_0 c_p \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + RT_0 \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (29)$$

Mesmo que o sistema já esteja no estado morto restrito, ainda é possível obter trabalho útil levando o sistema deste estado (P_0, T_0, μ) para o estado de equilíbrio termodinâmico (P_0, T_0, μ_0) a partir do qual, o sistema encontra-se no estado morto absoluto⁸. Esta parcela da exergia, denominada “exergia química”, surge enquanto a composição dos componentes do sistema forem diferentes daquelas do meio de referência. A exergia química caracteriza o mínimo trabalho teórico necessário para formar certa quantidade de matéria a partir de processos reversíveis e substâncias

⁷ O estado morto restrito é caracterizado pelo equilíbrio termomecânico. No estado considerado, o sistema possui a temperatura e a pressão de referência ($T = T_0$, $P = P_0$), mas ainda pode conter um desequilíbrio químico em relação ao estado padrão ($\mu \neq \mu_0$). Nesta condição, exergia química pode ainda ser extraída do sistema inserido neste meio de referência.

⁸ O Estado morto absoluto é caracterizado pelo equilíbrio termodinâmico. No estado considerado, o sistema está em equilíbrio químico, de temperatura e de pressão ($T = T_0$, $P = P_0$, $\mu = \mu_0$). Nenhum trabalho útil pode ser extraído do sistema inserido neste meio de referência, portanto a exergia neste estado é nula.

presentes no meio (SZARGUT; MORRIS; STEWARD, 1988). Sua formulação permite quantificar a possibilidade de realização de trabalho por sistemas, mesmo estando em equilíbrio térmico e mecânico com o meio.

Ao atingir o estado morto absoluto, a composição e concentração do sistema iguala-se à do meio, anulando o trabalho associado à diferença de temperaturas, ao potencial químico ou à diferença de pressões parciais dos componentes do sistema e do meio. Extingue-se toda e qualquer possibilidade de realização de trabalho.

Para gases de referência encontrados na atmosfera padrão, a exergia química pode ser quantificada pelo trabalho de expansão isotérmica, o qual leva o gás da pressão no estado restrito (P_0) para sua pressão parcial na atmosfera (P_{00}), de acordo com a Equação (30). Nesta equação, y_i^e é a fração molar do gás no ambiente de referência (KOTAS, 1995).

$$b_q = -RT_0 \ln \left(\frac{P_{00}}{P_0} \right) = RT_0 \ln \left(\frac{1}{y_i^e} \right) \quad (30)$$

Para substâncias puras, não presentes no ambiente, é necessário promover uma interação com elementos retirados do meio para gerar elementos para o meio. Isto se faz através do uso da caixa de equilíbrio de Vant'Hoff indicada por Oliveira Junior (2013) e calculada, em base molar, através da Equação (31). Nela, o primeiro termo indica a variação da função de Gibbs da reação, o termo do meio indica o mínimo trabalho necessário para trazer os co-reagentes do ambiente para a reação e o último termo indica o trabalho extraído ao levar os produtos da reação para o ambiente.

$$\bar{b}_q = -\Delta G_{(T_0, P_0)} - \sum_{CO-R} x_i \bar{b}_{q,i} + \sum_P x_i \bar{b}_{q,i} \quad (31)$$

Quando considerada uma mistura de gases a exergia química em base molar pode ser encontrada com a Equação (32), da forma que segue, com os x_i representando a fração molar de cada componente, $\bar{R}$ a constante universal do gas e γ o chamado “coeficiente de atividade”, que possui valor unitário para gases ideais.

$$\bar{b}_{q,mist} = \sum_i x_i \bar{b}_{q,i} + \bar{R}T_0 \sum_i x_i \ln(\gamma_i x_i) \quad (32)$$

De forma geral, a equação da exergia específica permite encontrar o valor deste trabalho útil para cada unidade de massa de acordo com a Equação (33), na qual o termo $h - h_0 - T_0(s - s_0)$ representa a exergia física, $\frac{V^2}{2}$ está representando a exergia cinética, gz a exergia potencial e b_q a exergia química também em base mássica.

$$b = h - h_0 - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz + b_q \quad (33)$$

A Figura 16, a seguir, descreve as possibilidades de extração de trabalho e as parcelas da exergia para um determinado fluxo de massa. Consideremos um sistema inicialmente em desequilíbrio cinético, potencial, termomecânico e químico, sendo levado ao estado morto absoluto através de vários processos propostos. O somatório das exergias potencial, cinética, termomecânica e química nos fornece o trabalho útil total fornecido pelo sistema durante o processo.

O cálculo da exergia de gases combustíveis não apresenta maiores complicações, haja vista que as propriedades da maioria deles são bastante conhecidas. No entanto, o mesmo não ocorre com combustíveis sólidos e líquidos, uma vez que ligações à base de carbono podem ser complexas com propriedades termodinâmicas, muitas vezes desconhecidas.

Figura 16 - Mudanças de estado de um sistema de um estado qualquer até o estado morto absoluto.

Para situações e/ou misturas mais complexas, segundo Kotas (1995), existe uma relação entre a exergia química e o PCI, em que o coeficiente de correlação β é dado pela Equação (34), com valores tabelados para vários elementos.

$$\beta = \frac{b_q}{PCI} \quad (34)$$

O mesmo autor propõe as Equações (35) e (36) como forma de encontrar tais coeficientes para substâncias orgânicas secas (combustíveis sólidos) em termos das proporções mássicas dos elementos constituintes, nas quais os símbolos C , H , O e N , representam respectivamente os elementos Carbono, Hidrogênio, Oxigênio e Nitrogênio.

$$\beta = 1,0437 + 0,1882 * \frac{H}{C} + 0,0610 * \frac{O}{C} + 0,0404 * \frac{N}{C}, \quad \frac{O}{C} < 0,667 \quad (35)$$

$$\beta = \frac{1,0438 + 0,1882 * \frac{H}{C} - 0,2509 * \left(1 + 0,7256 * \frac{H}{C}\right) + 0,0383 * \frac{N}{C}}{1 - 0,3035 * \frac{O}{C}}, \quad 0,667 < \frac{O}{C} < 2,67 \quad (36)$$

A avaliação da qualidade da energia perpassa pelo seu grau de ordem. Por um lado, energias ordenadas como a Energia Potencial, Energia Cinética e Energia Elétrica são totalmente conversíveis em trabalho e ocorrem de forma reversível, sem variações de entropia dos sistemas envolvidos, portanto, seu conteúdo energético é integralmente exergia. Por outro lado, as energias desordenadas como calor, energia interna e energia química são convertidas integralmente em trabalho, apenas em processos reversíveis. Como os processos reais são irreversíveis, existe um limite superior de conversão intimamente ligado à segunda lei da termodinâmica na qual as conversões são acompanhadas por mudanças nas entropias dos sistemas envolvidos. Por isso, seu valor exergético é menor (KOTAS, 1995).

A análise exérgica caracteriza-se como uma ferramenta recente para análise de sistemas energéticos e o fato de utilizar a mesma base para diferentes formas de energia permite uma comparação dos estados inicial e final em qualquer processo considerado (ARAÚJO, 2008).

A aplicação da análise exergética possibilita avaliar qualquer recurso energético e material, pois os quantifica na mesma base métrica (trabalho) facilitando a comparação de processos e produtos de naturezas diferentes, o que inclui até mesmo organismos vivos, os quais são sistemas que interagem com o meio trocando energia, massa e informação. Estas interações criam estruturas complexas que não podem ser explicadas pela conservação da energia devido às irreversibilidades (BENDORICCHIO; JORGENSEN, 1997).

De acordo com Moran e Shapiro (2011), o balanço de exergia em um volume de controle é dado pela Equação (37), na qual $\frac{dB_{VC}}{dt}$ é a taxa de variação da exergia no tempo no interior do VC, $\left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j$ indica a taxa de transferência de exergia que acompanha a transferência de calor, $\left(\dot{W} - p_0 \frac{dV}{dt}\right)$ é a taxa de transferência de exergia por trabalho tanto de eixo quanto de expansão do VC contra a atmosfera e $\dot{B}_d$ a taxa de destruição da exergia devido às irreversibilidades internas ao VC. Por fim, os termos $\dot{m}_i e_i$ indicam a transferência de exergia que acompanha os fluxos de entrada e saída de massa.

$$\frac{dB_{VC}}{dt} = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \left(\dot{W}_{VC} - p_0 \frac{dV_{VC}}{dt}\right) + \sum_e \dot{m}_e b_e - \sum_s \dot{m}_s b_s - \dot{B}_d \quad (37)$$

Para obter um diagnóstico correto a partir da análise exergética, é necessário elencar critérios de eficiência exergética. Esta leva em consideração as condições termodinâmicas do ambiente externo ao componente ou VC em que se efetua o processo. Deve ser um número entre zero e um e diminuir à medida que ocorrem irreversibilidades e geração de entropia.

Uma das formas relatada por Kotas (1995) é definida como a razão entre a exergia útil e a exergia utilizada como insumo em que cada uma delas é selecionada de acordo com o processo. Com exceção de processos completamente dissipativos, qualquer conversão de energia pode ser avaliada a partir da Equação (38), cujo termo b indica a exergia específica.

$$\eta_b = \frac{b_{util}}{b_{total}} \quad (38)$$

Neste trabalho, a exergia útil foi considerada aquela associada aos frangos entregues para o abate, enquanto que a exergia total utilizada como insumo é a soma da exergia associada a todos os elementos sólidos, líquidos e gasosos inseridos no VC analisado.

3.3 EQUACIONAMENTO DOS BALANÇOS DE MASSA

Esta seção apresenta um modelo para estimar as vazões de massa no ciclo produtivo. Considerando as entradas e saídas diretas do processo produtivo, cujos dados foram apresentados na seção 2.2, e, com base na Figura 15, foram estimadas as quantidades de insumos necessários, produtos e rejeitos gerados em um ciclo de produção.

O fluxograma de massa, proposto na Figura 17, a seguir, direciona as massas de entrada de cada insumo para os produtos e os rejeitos gerados, após passar pelos processos. Devido à enorme faixa de magnitudes envolvidas nas massas, não foi possível apresentar os fluxos de forma proporcional.

Os fluxos indicados em cor azul representam os percentuais de água (líquida ou vapor) contida nos elementos. Os demais fluxos indicam as frações de massa seca que constituem cada insumo, produto e rejeito.

No lado esquerdo são listados os insumos (com quantidades estimadas da literatura), os quais foram direcionados para os processos. Estimou-se aquecimento na fase inicial e arrefecimento na fase final, devido ao desenvolvimento do aparelho termorregulador das aves. Esta separação em etapas, proposta teoricamente, permitiu manter o ambiente do galpão nas condições próximas de conforto térmico.

No lado direito foram identificados os produtos e principais rejeitos do processo produtivo, cujos valores estimados puderam ser comparados com dados obtidos experimentalmente ou divulgados em manuais de desempenho/manejo.

Figura 17 - Fluxograma de massa para um lote produzido. À esquerda, os insumos demandados, ao centro, os principais processos analisados e, à direita, os produtos e rejeitos gerados. Fluxos em azul indicam água líquida ou vapor. Demais fluxos indicam as massas secas (sólidas ou gasosas).

Com base na Figura 17, foram tomados volumes de controle em torno do ciclo total, em torno dos processos de crescimento das aves, de arrefecimento e aquecimento dos galpões, além de um VC em torno da cama gerada. Em todos eles, foi aplicada a Lei de Conservação da Massa indicada na Equação (14) da seção 3.2.

Os insumos foram direcionados para os processos de crescimento das aves (ração, água e ar respirado), arrefecimento/ventilação (ar e água) e aquecimento do galpão (GLP/lenha) . A Tabela 10 apresenta as equações propostas para indicar o direcionamento das massas e maiores detalhes sobre as quantidades mássicas de entrada e de saída do ciclo estão apresentadas nos tópicos seguintes.

Tabela 10 - Equacionamento dos fluxos de massa para insumos, produtos e rejeitos do processo.

Entradas		Processos / Fluxos		Saídas
Maravalha	m_1	m_1		Cama
	m_2	m_2		Cama
Ração	m_3	$m_{46} = MS_{carc} \left(\frac{m_3}{CA} + m_5 \right) \left(\frac{i_{mort}}{2} \right)$		Carcaças
		$m_{48} = MS_f * \left(\frac{m_3}{CA} + m_5 \right) (1 - i_{mort})$		Frangos
		$m_{53} = m_3 - m_{48} - m_{46}$		Cama
	m_4	$m_{45} = (1 - MS_{carc}) \left(\frac{m_4}{k.CA} + m_6 \right) \left(\frac{i_{mort}}{2} \right)$		Carcaças
		$m_{47} = (1 - MS_f) \left(\frac{m_4}{k.CA} + m_6 \right) (1 - i_{mort})$		Frangos
		$m_{52} = m_4 - m_{45} - m_{47}$		Cama
Pintainhos	m_5	$m_{44} = MS_{carc} m_5 \left(\frac{i_{mort}}{2} \right)$		Carcaças
		$m_{51} = MS_f m_5 (1 - i_{mort})$		Frangos
		$m_{55} = m_5 - m_{44} - m_{51}$		Cama
	m_6	$m_{43} = (1 - MS_{carc}) m_6 \left(\frac{i_{mort}}{2} \right)$		Carcaças
		$m_{49} = (1 - MS_f) m_6 (1 - i_{mort})$		Frangos
		$m_{56} = m_6 - m_{43} - m_{49}$		Cama
Água	m_7	$m_{42} = (1 - MS_{carc}) \left(\frac{m_7}{k.CA} + m_6 \right) \left(\frac{i_{mort}}{2} \right)$		Carcaças
		$m_{50} = (1 - MS_f) \left(\frac{m_7}{k.CA} + m_6 \right) (1 - i_{mort})$		Frangos
		$m_{54} = m_7 + m_{23} - m_{42} - m_{50} - m_{70}$		Cama
	m_8 m_9	m_8 m_9	$m_{33} = m_{22} + m_8 + m_9$	Ar
Ar	m_{10}	$\omega = \frac{m_{22}}{m_{20} + m_{19}} = \frac{m_{10}}{m_{11} + m_{12}}$	$m_{34} = m_{70} + m_{71}$	Vapor
		$\omega = \frac{m_{23}}{m_{21} + m_{18}} = \frac{m_{10}}{m_{11} + m_{12}}$		
		$\omega = \frac{m_{57}}{m_{16} + m_{17}} = \frac{m_{10}}{m_{11} + m_{12}}$	$m_{59} = m_{15} + m_{57}$	
	m_{11}	$m_{17} = 3,78m_{13} + 1,64m_{14}$	$m_{25} = 0,181m_{13} + 0,272 m_{14}$	Gases de Combustão
		$\frac{m_{19}}{m_{20}} = 3,29 = \frac{0,767}{0,233}$	$m_{29} = m_{20}$	Ar
		$q_r = \frac{m_{CO2resp}}{m_{O2resp}} = \frac{m_{35}}{m_{21}}$	$m_{30} = m_{21} - m_{35}$	
			$m_{35} = \left(\frac{-70,2845 + 20,3322d - 0,0382m_f(1000) + 0,0215m_f(1000)d}{1000} \right) n_p$	
	m_{12}	$m_{18} = 0,767(m_{18} + m_{21})$	$m_{32} = m_{18}$	Gases de Combustão
		$m_{19} = m_{12} - m_{16} - m_{18}$	$m_{31} = m_{19}$	
		$m_{16} = 12,431m_{13} + 5,407m_{14}$	$m_{26} = 12,43m_{13} + 5,407m_{14}$	
GLP	m_{13}	$m_{24} = 1,57m_{13} + 0,548m_{14}$	$m_{25} = 0,181m_{13} + 0,272m_{14}$	Gases de Combustão
Lenha	m_{14}	$m_{27} = 3,03m_{13} + 1,82m_{14}$	$m_{28} = 0,01m_{14}$	
	m_{15}	$m_{59} = m_{15} + m_{57}$		Vapor
$m_{41} = NH_{3(ave)} = \frac{A.d.24}{1000000} e^{(-6,5023 + 0,3020d + 0,1218T_{cama} + 0,6142pH - 0,0043d^2)}$			$m_{58} = m_{POcama} = \frac{10,58V_{ar}}{1000000} + 17000$	
$m_{36} = m_{CO2cama} = \left(\frac{1,8283 + 3,2714d - 0,0945m_f 1000 + 0,00611dm_f 1000}{1000} \right) n_p$				

3.3.1 Estimativa para a massa dos insumos

A massa de maravalha utilizada em cada ciclo de produção foi calculada a partir de sua densidade (ρ_{abs}) e do volume introduzido no início do processo ($\forall_{abs}$). Do volume resulta a altura da cama, haja vista que a superfície de produção está determinada pela edificação do galpão. A cada ciclo adicional realizado sobre a mesma cama, considera-se uma adição de 10% de maravalha nova sobre a região da pinteira, conforme mostrado nas Equações (39) e (40).

$$m_1 = MS_{abs}\{\forall_{abs}\rho_{abs} + 0,1[\forall_{abs}\rho_{abs}(n_{ciclos} - 1)]\} \quad (39)$$

$$m_2 = (1 - MS_{abs})\{\forall_{abs}\rho_{abs} + 0,1[\forall_{abs}\rho_{abs}(n_{ciclos} - 1)]\} \quad (40)$$

A Equação (39) fornece a massa da fração seca e a Equação (40) a umidade contidas na maravalha para cada ciclo, as quais somadas, indicam a massa total de material absorvente introduzido no galpão. Conhecendo a quantidade de frangos criados a cada ciclo, é possível determinar a massa de material absorvente por ave criada sobre a mesma cama.

O percentual de massa seca do material absorvente MS_{abs} foi estimado em 87%, sendo próximo do citado em Teixeira et al. (2015), Brand et al. (2012), Menezes (2013) e Do Vale et al. (2007), com valores acima dos citados por Santos e Lucas Junior (2004). Assumiu-se a massa específica de 55 kg/m³ em consonância com especificações do produto comercializado na região sul do Brasil.

A ração demandada é função da quantidade de aves vivas a cada dia do ciclo e da quantidade consumida individualmente. Para estimar o número de aves vivas considerou-se o número de pintainhos introduzidos no espaço criatório ao início do ciclo (n_p) e também a taxa de mortalidade estimada e aceitável para o processo (i_{mort}). A Equação (41) fornece o número de aves consumidoras de ração em cada dia x através do ciclo produtivo com d dias.

$$n_f(x) = n_p \left(1 - \frac{i_{mort}}{d}x\right) \quad (41)$$

Tomando como base tabelas de desempenho disponibilizadas pelos próprios fornecedores dos pintainhos, o consumo individual foi estimado para cada linhagem e gênero em função do dia de criação (COBB-VANTRESS, 2012).

Os resultados são apresentados na Figura 18 com funções que melhor representam o aumento do consumo individual dentro do ciclo e foram utilizados para estimar a ração demandada em cada caso analisado. As equações polinomiais utilizadas são apresentadas ao lado de cada um dos gráficos. Nelas, x indica o dia de consumo de cada frango dentro do ciclo. Nos intervalos $(1 < x < d_{in})$, $(d_{in} < x < d_{cres})$ e $(d_{cres} < x < d)$ são fornecidas as rações do tipo inicial, crescimento e terminação respectivamente, com d_{in} indicando o término do período inicial, d_{cres} indicando o término do período de crescimento e d indicando o final do ciclo de produção. Esta separação foi necessária devido a diferentes composições das rações no decorrer do ciclo.

Figura 18 - Consumo de ração (g) em função do tempo de vida (dias) de frangos de corte machos, mistos e fêmeas para as linhagens COBB 500 e ROSS 308 de acordo com padrões de desempenho.

As linhas de tendência das curvas, indicam a função que melhor representa o consumo de ração no decorrer do ciclo, e os erros médios quadráticos encontrados apontam, com alta acurácia, o consumo previsto para as linhagens estudadas. A massa total de ração foi calculada pelo produto entre o consumo individual e o número de aves remanescentes a cada dia do ciclo, somados em todo o ciclo.

A Equação (42) aponta a fração de massa seca e a Equação (43) indica a fração de água contida na ração, com i = linhagem e j = gênero das aves a cada dia de criação x .

$$m_3 = MS_{rac} \int_1^d n_f(x) m_{rac(i,j)}(x) dx \quad (42)$$

$$m_4 = (1 - MS_{rac}) \int_1^d n_f(x) m_{rac(i,j)}(x) dx \quad (43)$$

As duas funções somadas, indicam a ração demandada pelos frangos a cada dia do ciclo produtivo e de sua integração no período do ciclo, resulta a quantidade total de ração demandada. Utilizou-se o valor de 87% de massa seca, como uma média dos valores apresentados em Santos e Lucas Junior (2004), Dagostini et. al (2004) e Carvalho et. al (2004).

A massa associada aos pintainhos foi tomada como a massa média individual no momento do alojamento, multiplicada pelo número de aves a serem alojadas. A Equação (44) prevê esta estimativa, considerando o valor de 0,046 kg para cada pintainho, média de valores indicados em Gomes et al. (2008), Ross (2012), Almeida et al. (2006) e Abreu et al. (2012).

Em sua primeira semana de vida, as aves são capazes de quadruplicar ou quintuplicar sua massa (m_p), sendo que as diferenças de produtividade dependem de gênero, genética desenvolvida e tecnologia utilizada. A contribuição para as frações de massa seca e de umidade dos pintainhos foi encontrada pelas Equações (44) e (45), as quais somadas contabilizam a massa total de pintainhos. A fração de massa seca (MS_p) foi calculada por Santos e Lucas Junior (2004) como sendo 24,97%, bastante condizente com os percentuais assumidos para composição seca.

$$m_5 = MS_p n_p m_p \quad (44)$$

$$m_6 = (1 - MS_p) n_p m_p \quad (45)$$

Considerada um dos insumos mais importantes do processo, a massa de água demandada foi subdividida em água de consumo e água utilizada pelo sistema de nebulização ou pelos painéis evaporativos, responsáveis pelo arrefecimento do ambiente. A água utilizada na limpeza úmida foi considerada junto à aspersão.

A água de consumo foi calculada a partir de sua relação com a quantidade de ração consumida. Apesar de amplamente aceita a relação de 2 L_{água}/1 kg_{ração} para temperaturas dentro da ZCT (hipótese assumida neste trabalho), em maiores temperaturas do ambiente externo, este comportamento se altera. A partir de dados observacionais coletados (COBB-VANTRESS, 2009), a Equação (46) foi estimada para esta relação com a temperatura (T) medida em °C e válida para temperaturas entre 18 °C e 35 °C.

$$k = 0,0049T^2 - 0,0952T + 1,9829 \quad (46)$$

A massa de água consumida por ave durante o ciclo depende de linhagem, gênero e tempo do ciclo, mas apresenta forte dependência da temperatura e das propriedades da água fornecida. Desta forma, a Equação (47) foi utilizada como uma estimativa, na qual o divisor 1000 permite a conversão entre as unidades trabalhadas e m_{Trac} indica a massa total de ração consumida no ciclo.

$$m_7 = \rho_w k \frac{m_{Trac}}{1000} \quad (47)$$

Diante das características citadas em relação ao resfriamento evaporativo, seu uso foi considerado na fase final do ciclo quando as aves são mais suscetíveis às altas temperaturas. A Equação (48) permitiu estimar a massa de água demandada nos aspersores a partir do tempo de acionamento e do fluxo médio em cada um deles.

A Equação (49) possibilitou encontrar a massa de água usada nos painéis evaporativos. No entanto, o processo inverso também é possível. A partir das

demandas de água inserida no sistema para cada condição específica, é possível estimar a quantidade de aspersores (n_{asp}), o fluxo de água em cada aspersor (ϕ_{asp}) e o tempo em horas de solicitação diária (t_{asp} , t_{pad}) do equipamento.

$$m_8 = \rho_{w(P_0,T)} n_{asp} \frac{\phi_{asp}}{1000} \int_{d_{cres}}^d t_{asp}(x) dx \quad (48)$$

$$m_9 = \rho_{w(P_0,T)} \frac{V_w}{1000} \int_{d_{cres}}^d t_{pad}(x) dx \quad (49)$$

Em aviários convencionais, a renovação de ar é garantida por ventiladores e através do manejo das cortinas, assim, a única forma de estimar a massa de ar demandada durante o ciclo, foi através da indicação de renovações de ar, considerando que o volume total de ar no galpão fosse substituído em determinado intervalo de tempo. Desta forma, o volume de ar que entra no VC foi calculado a partir do volume de cada aviário e da quantidade de trocas completas ocorridas a cada dia do ciclo.

Cumprindo normas de bem-estar animal, o fornecimento de oxigênio foi mantido durante todo o ciclo através da ventilação mínima, que deve ser regulada com um *timer* e proporcionar uma troca completa de ar a cada 5 a 8 min, funcionando em aproximadamente 20% do tempo. Neste sentido, estimaram-se 7 trocas completas por hora, fornecendo oxigênio e extraindo os gases gerados. No acionamento da ventilação de transição, cujo objetivo é aumentar a renovação de ar com baixa velocidade sobre as aves, o controle deve ser realizado com termostato e proporcionar uma renovação completa a cada 2 min, totalizando 30 trocas completas por hora. Ao acionar a ventilação máxima, também controlada por termostato, a ventilação deve permitir renovação total em tempos menores a 1 min, permitindo velocidades do ar no nível das aves, em torno de 2 m/s a 2,5 m/s. Nesta situação, estimam-se 75 trocas completas por hora.

Uma estimativa para o volume de ar renovado levou em conta os diferentes horários do dia, conforme mostrado na Tabela 11 e independe de dimensões ou modelo do galpão, da linhagem ou gênero das aves.

Tabela 11 - Estimativa do tipo de ventilação praticado em diferentes fases de criação.

<i>Período do dia</i>	<i>Tipo de ventilação estimado</i>			<i>Renovações diárias</i>		
	<i>Inicial</i>	<i>Crescimento</i>	<i>Final</i>	<i>Inicial</i>	<i>Crescimento</i>	<i>Final</i>
0h - 4h	Mínima	Mínima	Mínima	28	28	28
4h - 8h	Mínima	Mínima	Transição	28	28	120
8h - 12h	Mínima	Transição	Transição	28	120	120
12h - 16h	Mínima	Máxima	Máxima	28	300	300
16h - 20h	Mínima	Transição	Máxima	28	120	300
20h - 24h	Mínima	Mínima	Transição	28	28	120
<i>Total de renovações diárias por fase</i>				168	624	988

Com a estimativa para as renovações diárias de ar da Tabela 11 e integrando para todo o ciclo de produção, estimou-se o volume de ar demandado em cada uma das fases e ao final do ciclo, indicados na Equação (50), na qual ntd indica o número de trocas diárias. A velocidade média do ar em aviários fechados poderia ser obtida para cada tipo de ventilação utilizando-se a área da seção transversal do galpão e o fluxo de ar considerado.

$$V_{ar} = V \left[\int_0^{d_{in}} ntd_{in}(x) dx + \int_{d_{in}}^{d_{cres}} ntd_{cres}(x) dx + \int_{d_{cres}}^d ntd_{final}(x) dx \right] \quad (50)$$

O volume de ar também poderia ser previsto pelas capacidades dos exaustores instalados e do tempo em que permanecem ligados diariamente, mas esta é uma consequência da demanda de ventilação mínima ou máxima dentro dos aviários e seria uma aproximação apenas para envelopes avícolas.

A massa de ar atmosférico foi subdividida em vapor d'água e os principais constituintes, N_2 ($\approx 76,7\%$ do ar seco) e O_2 ($\approx 23,3\%$ do ar seco), desconsiderando-se os demais componentes. O ar é indispensável para o crescimento de aves, para o arrefecimento e a combustão. Nesta perspectiva, foram utilizadas as Equações (1-6) já detalhadas na seção 2.2, indicando os fluxos das Equações (51-53) e observados na Figura 17. Uma estimativa para a massa de ar renovado nos galpões constitui-se da soma destes três fluxos.

$$m_{10} = \frac{P_v V_{ar}}{R_v T_0} \quad (51)$$

$$m_{11} = 0.233 \frac{P_a \nabla_{ar}}{R_a T_0} \quad (52)$$

$$m_{12} = 0.767 \frac{P_a \nabla_{ar}}{R_a T_0} \quad (53)$$

A partir da temperatura ambiente e da umidade relativa do ar como parâmetros de entrada e fazendo-se uso das pressões parciais do ar seco e do vapor, foi possível encontrar a umidade absoluta, a massa de ar seco e a massa de vapor contidas no ar atmosférico. Considerou-se a hipótese de que todas as aves respiram o ar no mesmo estado termodinâmico, o que é verdadeiro para galpões abertos e pode ser aproximado para envelopes avícolas.

Durante o aquecimento dos galpões, a massa de GLP é estimada pela quantidade de botijões comerciais de 13 kg utilizados durante o ciclo. Na maioria das propriedades, o GLP é utilizado somente para queima de penas durante o vazio sanitário, e consome de 1 a 2 botijões por lote. No entanto, existem vários galpões que adotam o aquecimento na fase inicial com este insumo promovendo um gasto de GLP que pode variar de 400 kg a 600 kg.

Devido aos diferentes microclimas encontrados no Brasil, a demanda de lenha foi estimada por Miele et al. (2010) para diferentes regiões, com variação de 5 m³ a 26 m³ por ciclo. A densidade média ρ_l apresentada na literatura indica 450 kg/m³ (FUNCK; FONSECA, 2008) e a fração de MS adotada foi de 87%, situação adequada para a combustão devido à baixa umidade (BRAND et al., 2012). As Equações (54) e (55) possibilitaram encontrar as frações de massa seca e de umidade contida na madeira e a soma permitiu quantificar a lenha demandada por ciclo com uso na fase inicial de criação.

$$m_{14} = MS_l \rho_l V_l \quad (54)$$

$$m_{15} = (1 - MS_l) \rho_l V_l \quad (55)$$

De acordo com o exposto na seção 2.2, a composição da madeira é variável e considera espécie arbórea, local de cultivo, idade dentre outros. Migliavacca et al.

(2015) elaboraram um resumo dos principais constituintes da lenha e, a partir dele, optou-se pela constituição média de 49% C, 6% H, 43% O, 1% N e 1% de cinzas. Estes dados foram importantes para proceder com o balanço de massa no processo de combustão.

3.3.2 Balanço de massa no processo de crescimento dos frangos

Para um VC tomado em torno do processo de crescimento das aves, assumiu-se que a fração seca da ração (m_3) e dos pintainhos (m_5) passam a integrar a fração seca dos frangos e das carcaças com o excedente rejeitado junto à cama dos frangos. As massas que compõem os frangos ($m_{48,51}$), as carcaças ($m_{44,46}$) e as excretas ($m_{53,55}$) foram estimadas a partir do conceito de Conversão Alimentar (CA) e apresentadas na Tabela 10.

Optou-se pelo uso da CA publicada nos manuais de desempenho a partir do potencial genético desenvolvido, apesar de alguns estudos citarem as curvas de crescimento de Gompertz como boas previsões para a deposição de proteína. A escolha partiu do pressuposto que o melhoramento genético modifica constantemente a CA e o desempenho esperado das aves.

A umidade da ração, dos pintainhos e água de consumo ($m_{4,6,7,}$) devem compor a umidade dos frangos ($m_{47,49,50}$), das carcaças ($m_{42,43,45}$) e das excretas ($m_{52,54,56}$), sendo seu excedente eliminado junto ao ar úmido extraído dos galpões através do fluxo m_{34} . Além da CA, foi considerada a relação de consumo de água/ração para estimar as frações líquidas dos frangos, das carcaças e das excretas. A fração de MS encontrada nestes elementos foi utilizada para separar a parte seca da parte líquida em cada elemento. O último termo das equações propostas para a massa das carcaças (m_{42-46}) foi utilizado garantindo uma média das massas das carcaças, já que estas são eliminadas do primeiro ao último dia com massas crescentes através do ciclo.

A emissão de CO_2 pela respiração (m_{35}) foi quantificada através da Equação (11), publicada por Henn (2013), após realizar um balanço de carbono em frangos de corte. A equação original foi ajustada para medidas da massa dos frangos em kg e a quantidade de dias adotada para o ciclo, sendo apresentada na Tabela 10, e aplicada a todas as linhagens. Com isto e, utilizando-se do conceito de quociente respiratório (q_r), foi possível encontrar a massa de ar respirado pelas aves no período de criação. O valor de $q_r = 0,85$ foi tomado com base em estudos de

Hamidu et al. (2007) e Tachibana et al. (2013) considerando o metabolismo basal das aves.

A quantidade de O_2 foi estimada considerando 23,3% da massa de ar seco e a quantidade de N_2 , considerando 76,7% da massa seca demandada à respiração, ambas calculadas através das equações apresentadas na Tabela 10 e mostradas como fluxos m_{18} e m_{21} da Figura 17. Ao quantificar os componentes do ar inspirado, pode-se supor que a umidade absoluta seja a mesma do ar atmosférico, uma vez que o aumento de umidade interna dada pelo trato respiratório e pelo sistema de arrefecimento é compensado pelo aumento de umidade do ar saindo do galpão.

Assim, a massa total de ar inspirado foi dada pela soma de todas estas parcelas, de acordo com a Equação (56), e o O_2 rejeitado na respiração, foi encontrado pelo fluxo m_{30} equacionada na Tabela 10.

$$m_{ar(insp)} = m_{18} + m_{21} + m_{23} \quad (56)$$

Para os fluxos que saem do VC, as massas dos frangos, das carcaças e dos rejeitos que compõem a cama são quantificadas pelas vazões m_{42} a m_{56} . A primeira parte das equações correspondentes aos fluxos m_{44} , m_{46} , m_{48} e m_{51} indica a composição da parte seca dos frangos e carcaças. E nos fluxos m_{42} , m_{43} , m_{45} , m_{47} , m_{49} e m_{50} a primeira parte das equações indica a umidade destes.

A partir do conceito de CA, a parte central destas equações indica a fração de ração e água que passam a compor os frangos e as carcaças. A distinção entre eles é feita pelo último termo das equações, que considera a taxa de mortalidade (considerada constante no decorrer do ciclo). Uma vez que as aves morrem do primeiro ao último dia do ciclo com aumento de massa, o fator de divisão 2 indicará uma massa média para as aves descartadas.

A CA para cada linhagem e gênero estudados foi apresentada na Figura 19 e permitiu encontrar a massa de frangos prontas para o abate e de carcaças, conforme apresentado na Tabela 10. Neste equacionamento, foi considerada a fração de massa seca no frango (37,34%) e nas carcaças (30,96%), ambas citadas em Santos e Lucas Junior (2004).

Figura 19 - Estimativas para CA acumulada de cada linhagem e gênero estudados, com respectivas curvas de crescimento. Fonte: Adaptado de Cobb-Vantress (2012) e Aviagen (2012).

Através do balanço de água no processo, estimou-se o fluxo m_{54} . Caracteriza-se como excedente da água ingerida/vapor inspirado e que não permaneceram nas carcaças, nos frangos ou vaporizados pela respiração sendo direcionados como água líquida junto às excretas.

Foi necessário separar da água consumida o que foi vaporizado através da respiração ou eliminado através das excretas. Para isto, mesmo sem a pretensão de considerar a análise sobre um VC nas aves, foi realizado um breve balanço hídrico na tentativa desta distinção.

Considerando constantes as massas de ar seco na inspiração e expiração das aves ($m_{18} + m_{21} = m_{30} + m_{32} + m_{35}$), conhecendo a umidade do ar inspirado m_{23} e com a hipótese de que o ar expirado pelas aves é saturado ($\phi = 100\%$), estimou-se a umidade do ar expirado através das Equações (1-5).

A temperatura do ar expirado foi extraída do trabalho de Nascimento (2015) e ilustrada na Figura (20).

Figura 20 - Temperatura do ar expirado de frangos de corte da linhagem COBB em função da temperatura do ar. Extraído de Nascimento (2015).

Estimando-se a umidade do ar inspirado e expirado, calculou-se o vapor d'água que entra e sai das aves através da respiração. Assim, foi possível prever a parcela da água consumida que foi vaporizada pelo trato respiratório e mostrada no lado direito da Figura 21.

Figura 21 - Balanço hídrico nas aves com separação da água vaporizada através das excretas e transpiração, bem como através do trato respiratório.

Ao especificar o balanço de massa na respiração das aves para o ciclo total, a água eliminada junto às excretas (m_{54}) pode ser calculada pela diferença entre a água e vapor introduzidos ($m_7 + m_{23}$) e a água vaporizada pela respiração (m_{70}), água remanescente nas carcaças (m_{42}) e água remanescente nos frangos (m_{50}).

Um balanço de massa realizado na cama de frangos, considerando sua umidade, permite prever quanto desta água excretada é vaporizada e incorporada ao ar durante o lote produzido.

Por fim, a Equação (57) indica o balanço de massa no processo de crescimento das aves para o ciclo total.

$$m_{rac} + m_p + m_w + m_{ar} = m_{carc} + m_f + m_{exc} + m_{w_{ar}} + m_{CO_2} + m_{N_2} + m_{O_2} \quad (57)$$

No primeiro membro, aparecem a ração (m_{3-4}), os pintainhos (m_{5-6}), a água de consumo (m_7) e o ar inspirado pelas aves ($m_{18,21,23}$). No segundo membro, saem do processo as carcaças (m_{42-46}), os frangos (m_{47-51}), as excretas (m_{52-56}) e umidade do ar expirado (m_{70}).

O fluxo expirado contendo dióxido de carbono, nitrogênio e oxigênio (m_{35} , m_{32} , m_{30}) não apresenta as proporções contidas no ar seco devido às transformações ocorridas no processo de respiração e os componentes foram considerados de forma separada. No entanto, como é insignificante diante do ar renovado no galpão, após a mistura, assume propriedades de ar úmido.

3.3.3 Balanço de massa no processo de arrefecimento e ventilação

O arrefecimento artificial dos galpões utiliza ventilação por pressão positiva ou negativa que, na fase final do ciclo, é associada a sistemas de resfriamento evaporativo. A água líquida introduzida pelos sistemas extrai calor do ambiente durante a vaporização.

As massas de O_2 , N_2 e vapor que compõem o ar trocado no ciclo foram calculadas considerando a quantidade de renovações de ar proposta na Tabela 11, o volume de ar estimado pela Equação (50) e as massas calculadas pelas Equações (1-6). Tais massas são representadas pelos fluxos m_{19} e m_{20} para o ar seco, bem como m_{22} para o vapor. Todos mostrados na Figura 17 e cujas equações são apresentadas na Tabela 10.

Uma vez que não ocorre reação química, o ar seco ($m_{19,20}$) sai do processo representado pelos fluxos ($m_{29,31}$) enquanto que o vapor contido no ar (m_{22}), é adicionado à água líquida adicionada pelos aspersores e painéis evaporativos (m_{8-9}),

saindo do processo na forma de vapor (m_{33}) e elevando a umidade do ar de saída. A Equação (58) possibilitou um balanço de massa no processo em que a massa de ar na saída do processo tem sua umidade elevada pela inserção de água líquida.

$$m_{ar_e} + m_w = m_{ar_s} \quad (58)$$

A relação entre as massas de N_2 e O_2 compondo o ar usado no arrefecimento deve corresponder à relação entre a massa de N_2 e O_2 na composição do ar seco com um quociente de 3,29. Como a ventilação ocorre em todas as fases do ciclo, posteriormente, será necessário dividir o ar renovado em cada uma delas.

3.3.4 Balanço de massa no processo de combustão

Na reação de combustão, elementos combustíveis quebram suas moléculas rearranjando átomos e elétrons na forma de produtos. A oxidação rápida dos elementos combustíveis resulta nos gases de combustão e calor liberado (CENGEL, 2008), o qual é utilizado na ambiência dos aviários na fase inicial de criação.

Para a maioria dos estabelecimentos agropecuários, o aquecimento é garantido a partir da combustão de GLP e lenha. Neste estudo, considerou-se o GLP composto por 70% Butano (C_4H_{10}) e 30% Propano (C_3H_8) queimado com 5% de excesso de ar. Por sua vez, a lenha, cuja composição assumida neste trabalho foi 49% C, 6% H, 43% O, 1% N e 1% cinzas, assumiu a combustão com 20% de ar em excesso. Estes percentuais foram utilizados para garantir a combustão completa do material.

Em galpões cujo aquecimento se dá através do GLP, considerou-se o consumo entre 400 kg para galpões convencionais e 600 kg para galpões climatizados em cada lote de criação, comercialmente distribuídos em botijões de 13 kg. Naqueles galpões cujo aquecimento se dá pela queima direta da lenha, considerou-se a demanda de 2500 kg até 12000 kg dependendo das características construtivas. Nestes casos, o GLP é utilizado somente no manuseio da vassoura de fogo em época de vazão sanitário.

A demanda de GLP e lenha para a fase inicial foi discutida na seção 2.2.6 e o cálculo do ar necessário para a combustão seguiu as reações de combustão

mostradas em (59) e (60). Desta forma foram encontradas as vazões m_{16} , m_{17} e m_{57} mostradas na Tabela 10.

Considerando a parte inferior da Figura 17 e as equações constantes na Tabela 10, as reações de combustão nos fornecem a massa dos gases de combustão (m_{24-27}), do vapor (m_{59}) e das cinzas (m_{28}), as quais foram consideradas como 1% da massa seca da lenha. Um balanço de massa aplicado ao processo de combustão pode ser ilustrado através da Equação (60).

$$m_{glp} + m_l + m_{ar_e} = m_{gc} + m_v + m_{cinzas} \quad (60)$$

Os gases de combustão englobam a geração de CO_2 e água bem como são acompanhados pelo N_2 e excesso de O_2 . A massa de vapor provém da umidade da lenha e do ar de entrada no processo.

3.3.5 Balanço de massa na cama de frangos gerada

Considerando a análise da cama de frangos, a maravalha introduzida (m_{1-2}) recebe os excrementos (m_{52-56}), mistura-se a penas e ração desperdiçada formando a cama dos frangos. A fração seca da ração e dos pintainhos que não permanece nos frangos ou carcaças, passa a compor a cama através da fração seca das excretas.

O fluxo m_{54} indica a diferença entre a água consumida ($m_{7,23}$) e a água incorporada aos frangos e carcaças ($m_{42,50}$) (ou vaporizada pela respiração (m_{70})), sendo adicionado às excretas e, posteriormente vaporizado para o ar. A vaporização (m_{71}) permite reduzir a umidade da cama para os padrões aceitáveis, os quais

consideraram o valor de $MS_{\text{cama}} = 0,7612$ constatados por Santos e Lucas Junior (2004).

Na saída do processo, apresentam-se as perdas de massa através da geração de CO_2 , através da decomposição microbiana da cama (m_{36}) e pela geração de NH_3 na volatilização no N_2 (m_{41}). Além disso, foi calculada a partir da quantidade de poeira suspensa, a massa que seria extraída do galpão via ventilação. No entanto, para o correto balanço de massa, uma quantidade adicional de massa seca foi extraída do espaço criatório na forma de poeiras e particulados (m_{58}) permitindo que o remanescente seja comparado aos dados experimentais presentes na literatura. Um balanço de massa para a cama remanescente pode ser estimado pela Equação (61).

$$m_{abs} + m_{exc} = m_{cama} + m_{CO_2} + m_{NH_3} + m_{poeira/particulados} \quad (61)$$

Na equação, o primeiro termo indica a massa de material absorvente introduzido no sistema produtivo ($m_{1,2}$) e a massa de excretas adicionadas pelas aves (m_{52-56}). No segundo membro, as entradas de massa são reduzidas da geração de gases e particulados ($m_{36,41,58}$).

A massa de poeira extraída da cama foi considerada em $10,58 \text{ mg/m}^3$ de ar renovado (FERNANDES, 2004), cujo resultado considera o volume de ar trocado no ciclo, mas adicionado de uma quantidade de particulados extraídos pela ventilação. A geração de CO_2 pela cama foi estimada com estudos de Henn (2013), enquanto que a geração de NH_3 foi calculada das estimativas de Miragliotta (2004), todas elas constantes na parte inferior da Tabela 10. As emissões dos demais gases não foram consideradas devido à pequena diferença entre as quantidades identificadas dentro e fora dos galpões de criação.

3.3.6 Estimativa para a massa dos produtos e dos rejeitos

A partir dos dados de entrada para os VC analisados e dos procedimentos relatados, foram estimadas as massas dos produtos e dos rejeitos a fim de comparar com os resultados encontrados na literatura, bem como validar o modelo proposto.

A massa total de frangos para o ciclo produtivo (m_{Tf}) é função do ganho de massa individual e do percentual de mortalidade observado/estimado, sendo obtida pela Equação (62) e, para fins de comparação, as Equações (63) e (64) foram utilizadas quantificando o número de frangos vivos (n_f) ao final do ciclo e da massa de cada frango no momento da retirada para o abate.

$$m_{Tf} = \sum_{i=47}^{51} m_i \quad (62)$$

$$n_f = n_p * (1 - i_{mort}) \quad (63)$$

$$m_f = m_p + i_{cres} * d \quad (64)$$

Nessas equações, n_p indica o número de pintainhos recebidos, i_{mort} é a taxa de mortalidade, m_p a massa de cada pintinho e i_{cres} , sua taxa de crescimento diário no tempo d considerado para o ciclo.

A massa total de carcaças segue os padrões de crescimento dos frangos vivos, incorporando massa até o dia do descarte. Dessa forma é função do dia do descarte e pode ser encontrada pela Equação (65). Para fins comparativos, o número de carcaças descartadas a cada dia é dado pelo primeiro termo da Equação (66) e a massa de cada descarte aumenta a cada dia de acordo com o segundo termo. O total de carcaças é estimado pela soma sobre todo o ciclo.

$$m_{Tcarc} = \sum_{i=42}^{46} m_i \quad (65)$$

$$m_{Tcarc} = \int_1^d \left(n_p \frac{i_{mort}}{d} \right) (m_p + i_{cres} * x) dx \quad (66)$$

Com isso, a massa média das carcaças foi considerada através da Equação (65) dividida pela quantidade de carcaças descartadas durante o ciclo.

A cama de frangos gerada apresenta variações que dependem da densidade de aves, quantidade de ciclos criados na mesma cama, substrato absorvente,

alimentação, manejo e microclima. Desta forma, considerou-se a quantidade de material absorvente introduzido no sistema ($m_{1,2}$) bem como a quantidade de material acrescentado pelas aves durante cada ciclo de produção (m_{52-56}).

Após a extração de massa através da poeira/particulados (m_{58}), geração de CO_2 (m_{40}), de NH_3 (m_{41}) e da água vaporizada através das excretas (m_{71}), a Equação (67) indicou a quantidade de cama remanescente nos galpões. Com esta equação é possível estimar a massa seca de cama gerada por ave criada, apenas excluindo-se as frações líquidas e dividindo-se pelo número de aves alojadas.

$$m_{T\text{cama}} = m_1 + m_2 + \sum_{i=52}^{56} m_i - (m_{36} + m_{41} + m_{58} + m_{71}) \quad (67)$$

Os gases mais relevantes para fins de balanços de massa no processo produtivo englobam a geração de CO_2 (respiração e cama), NH_3 gerada (degradação da cama) e poeiras suspensas. Ainda assim, poderiam ser desprezadas diante da massa dos demais elementos envolvidos. A Equação (68) adiciona todos estes componentes a fim de quantificar a emissão de GEE e poeiras. Junto ao fluxo m_{58} , encontra-se adicionada a massa extraída pelo sistema de ventilação ou outro processo, cuja hipótese permitiu ajustar o balanço de massa de acordo com estudos experimentais relatados previamente.

$$m_g = m_{40} + m_{41} + m_{58} \quad (68)$$

A quantidade de ar úmido que sai do VC global considerou as massas de ar utilizadas no arrefecimento e ventilação, bem como no crescimento das aves, e deve conter maior quantidade de vapor em relação ao ar atmosférico. A Equação (69) prevê esta estimativa, na qual o fluxo m_{39} carrega consigo toda água vaporizada pelas aves e introduzida pelo sistema de resfriamento evaporativo.

$$m_{ar_s} = m_{37} + m_{38} + m_{39} \quad (69)$$

Por fim, a massa de gases de combustão indicada pela Equação (70) é acompanhada pelo vapor (m_{59}) como rejeito do processo de combustão. O conteúdo

de cinzas (m_{28}) também foi quantificado na Tabela 10, juntamente com os demais fluxos citados e apresentados na Figura 17.

$$m_{gc} = m_{24} + m_{25} + m_{26} + m_{27} \quad (70)$$

Com este procedimento, alterando dados de entrada para cada realidade pontual, foi possível quantificar os produtos e rejeitos propostos, confrontando-os com dados colhidos na literatura. Os balanços de massa em torno de todos os VC foram fechados, permitindo coerência interna nos dados utilizados no trabalho.

3.4 EQUACIONAMENTO DO BALANÇO DE ENERGIA PARA O CICLO

A cada quantidade de massa que cruza as fronteiras do VC, mostrado na Figura 17 e, devidamente calculadas na seção anterior, pode-se associar certa quantidade de energia, a qual contém a habilidade de causar mudanças no sistema estudado (CENGEL; BOLES, 2005). Tais mudanças ocorrem devido às interações de fronteira ocorridas entre o sistema e o meio circundante, na forma de trabalho e calor.

A Figura 22 apresenta uma proposta para realização dos balanços de energia no sistema produtivo. Foram incluídas as principais entradas e saídas energéticas, que consideraram a primeira lei da termodinâmica em cada balanço. Novamente, devido à enorme diferença nas ordens de grandeza das quantidades envolvidas, o fluxograma apresentou linhas desproporcionais, mas que permitem comparar qualitativamente os valores obtidos.

Os fluxos indicados em azul representam a entalpia associada à fração líquida dos elementos. Os demais fluxos indicam a entalpia associada à fração de massa seca constituinte, ou às interações de calor/trabalho transferido ao ar dentro do ambiente criatório. Na medida do possível, a numeração manteve os padrões prévios utilizados na indicação dos fluxos apresentados na Figura 16, principalmente para os cálculos das entalpias associadas às vazões de massa.

Figura 22 - Entradas e saídas de energia em cada VC considerado. O ar atmosférico (exceto para combustão) foi tratado como ar úmido com separação para cada componente. Todos os fluxos foram identificados por cores, sendo a água nas fases líquida e de vapor, indicada na cor azul.

À esquerda apresentam-se as energias associadas a cada insumo do processo e, à direita, as energias associadas aos produtos e rejeitos. Na parte superior da figura, foi analisado o processo de combustão e fornecimento de calor ao espaço de criação durante a fase inicial. Na parte inferior, foram quantificadas as transferências de entalpia associadas ao desenvolvimento das aves, à formação da cama a partir das excretas e ao controle do ar nas diferentes fases de criação, incluindo a nebulização aplicada na fase final do ciclo. Por fim, à direita, apresentam-se os produtos e rejeitos do processo.

Esta separação foi proposta para os balanços, pois considerou-se o ar usado na combustão como uma mistura de gases ideais, enquanto que o ar destinado aos demais processos foi tomado com propriedades de ar úmido, uma vez que não sofre reações químicas.

Considerando as divisões em fases abordadas neste estudo e as hipóteses de que: a) o aquecimento é necessário na fase inicial; b) na fase de crescimento a temperatura ambiente está dentro da ZCT e, c) a fase final requer arrefecimento do ar no interior do galpão de criação, o ar úmido provindo do ambiente, supostamente a (T_0, P_0, ω_0) , deve sofrer mudanças de estado durante as fases inicial e final, adequando temperatura e umidade do ar às condições ideais de criação das aves.

Nesta etapa do trabalho foi necessária uma subdivisão dos fluxos de massa já encontrados na Figura 17, indicando as frações de ar atmosférico (m_{60-68}), ar expirado pelas aves (m_{80-88}), geração de gases como CO_2 e NH_3 (m_{89-91} , m_{92-94} , $m_{110-112}$) e água vaporizada das excretas ($m_{115-117}$) para cada fase do ciclo. As subdivisões foram apresentadas na Figura 22 e são proporcionais à fração seca da ração consumida em cada fase de criação.

Com dados disponíveis na literatura, foram calculados o PCI da maravalha e da cama gerada a partir de sua composição elementar. Para os demais elementos, os valores de PCI foram tomados de estudos prévios e o fluxograma apresentou os destinos de cada fluxo energético no decorrer do processo.

Foram realizados balanços de energia em torno do processo de desenvolvimento dos frangos, da cama gerada a partir do material absorvente/excretas e do ar renovado em cada fase do ciclo produtivo. Ao final, foram quantificadas as entalpias dos produtos e dos rejeitos do ciclo de produção, conforme detalhado nas seções seguintes.

3.4.1 As entalpias associadas aos insumos

Com os dados apresentados na seção 2.2.1 e, considerando a composição elementar obtida dos estudos de diversos autores, a Tabela 12 apresenta uma estimativa para o PCI da maravalha (cepilho de madeira) utilizada neste estudo. Os valores das colunas grifadas por (*) foram obtidos com as Equações (19) e (21). Os demais valores foram colhidos das diversas literaturas, assumindo-se aqui uma média aritmética simples.

Tabela 12 - Estimativa do PCI a partir da composição elementar extraída de diferentes trabalhos.

<i>Autor</i>	<i>Material</i>	<i>C</i> (%)	<i>H</i> (%)	<i>O</i> (%)	<i>S</i> (%)	<i>N</i> (%)	<i>A</i> (%)	<i>PCS</i> (kJ/kg)	<i>PCS*</i> (kJ/kg)	<i>PCI*</i> (kJ/kg)
<i>Turn et al (1998)</i>	Serragem	48,01	6,04	45,43	0,05	0,15	0,32		19.175,77	17.848,41
<i>Marri et al (1982)</i>	Maravalha	51,80	6,30	41,30	0,00	0,00	0,50		21.225,70	19.841,20
<i>Moulin et al (2011)</i>	Maravalha	47,63	6,01	45,00	0,01	0,20	0,97	19.629,00	19.033,73	17.712,96
<i>Protásio (2012)</i>	Maravalha de Eucalipto	48,20	6,36	45,00	0,00	0,70	0,25	19.139,23	19.651,76	18.254,08
<i>Protásio (2012)</i>	Maravalha de Pínus	49,00	6,65	43,76	0,00	0,90	0,39	20.361,54	20.394,99	18.933,57
Média**								19.709,92	19.896,39	18.518,04

*Valores calculados com equações de Channiwala e Parikh (2002) e de Quiroga (2010).

**Média das amostras calculadas e obtidas da literatura.

A entalpia associada à ração foi calculada a partir de dados da Energia Bruta (EB) encontrados nos estudos de Santos e Lucas Junior (2004) e devidamente conceituados na seção 2.2.3. Devido a diferenças na sua composição para diferentes fases do crescimento, optou-se por estabelecer uma média na EB das três fases propostas no referido trabalho, adotando-se para este estudo, o valor de 16497 kJ/kg. Da mesma forma, assumiu-se o valor de 21946,78 kJ/kg para a entalpia associada aos pintainhos (SANTOS; LUCAS JUNIOR, 2004).

A energia associada à fração seca do material absorvente, da ração e dos pintainhos foi calculada pelo produto do PCI e a respectiva massa, conforme mostrado na Equação (71), para os fluxos $i = 1, 3, 5$ mostrados na Figura 22. Mesmo adotando pequenas variações de temperatura para definir diferentes estados do ambiente, o valor dos PCI para as frações secas foram mantidos fixos, uma vez que, sua variação é insignificante para esta pequena faixa de temperatura.

$$H_i = m_i PCI_i \quad (71)$$

A separação entre a fração seca e a umidade contidas em cada insumo foi realizada na seção 3.3.1 identificando cada contribuição. A Equação (72) permitiu calcular a contribuição energética da água contida na maravalha e na ração (m_2 , m_4) que entram nas condições (P_0 , T_0), além de calcular a contribuição da água de consumo (m_7) e da água utilizada pelo sistema evaporativo (m_8 , m_9), todos nas condições ideais de fornecimento às aves (P_0 , $T = 20^\circ\text{C}$). Para a água compondo os pintainhos, a energia associada foi estimada pela mesma equação, mas considerando seu estado termodinâmico na temperatura interna da ave (P_0 , T_p). Para todos os casos citados, a referência usada para a entalpia específica da água foi o estado de líquido comprimido a 101,3kPa e 0 °C.

$$H_w = m_w h_w \quad (72)$$

Por fim, a energia total associada ao material absorvente, à ração e aos pintainhos é a soma das duas contribuições dadas pelas Equações (71) e (72).

Com exceção do processo de combustão, que será discutido no tópico 3.4.3 junto ao aquecimento dos galpões, nos demais processos, as vazões de ar foram consideradas como ar úmido devido à ausência de reações químicas.

Conhecidas as condições do ar ambiente, as vazões utilizadas na ventilação, e mostradas na Figura 17, foram subdivididas para cada fase de criação de acordo com o exposto na Figura 22. Com os dados da Tabela 11, associados a cada termo da Equação (50) e às Equações (1-6), estimaram-se as massas de ar demandadas para renovação em cada fase do ciclo. A Tabela 13 apresenta esta subdivisão, a qual mantém proporcionalidade com a ração consumida em cada fase de criação.

Tabela 13 - Subdivisões da massa de ar renovado para cada fase do ciclo.

<i>Figura 16</i>	m_{22}	<i>Figura 20</i>	m_{60}	Fase inicial
	Umidade do ar		m_{63}	Fase crescimento
			m_{66}	Fase final
			m_{61}	Fase inicial
	m_{20} Oxigênio		m_{64}	Fase crescimento
			m_{67}	Fase final
			m_{62}	Fase inicial
	m_{19} Nitrogênio		m_{65}	Fase crescimento
			m_{68}	Fase final

A distribuição destas vazões mássicas somente foi acrescentada neste tópico devido à separação do ar renovado nas diferentes fases do ciclo, mostrados na Figura 22, as quais não eram necessárias no balanço de massa global apresentado na Figura 17.

Conhecidas as massas de ar úmido que são direcionadas para a ventilação e para a respiração em cada fase do ciclo, a Equação (73) foi utilizada para calcular a entalpia do ar úmido renovado no galpão durante as fases inicial (m_{60-62}), de crescimento (m_{63-65}), final (m_{66-68}), além do ar demandado para respiração das aves ($m_{18,21,23}$).

$$H_{ar} = m_{ar}h_{ar} \quad (73)$$

Nas condições ambiente aqui adotadas, o ar úmido pode ser modelado como uma mistura de gases ideais, cujos os valores de entalpia foram definidos por unidade de ar seco. A referência adotada para a entalpia específica é a do ar seco a 0°C, e a referência para a entalpia do vapor é baseada nas tabelas de vapor.

A CTR é um dos mais importantes índices utilizados para caracterizar o nível de (des)conforto térmico ambiental dos animais e indica a radiação total recebida no interior do ambiente criatório. Sua estimativa foi realizada através das Equações (9-10) a exemplo de várias publicações utilizadas na área, e a relação entre a temperatura de globo negro (°C) e a temperatura de bulbo seco do ar (°C) foi extraída do trabalho de Abreu et al. (2011), como apresentado na Equação (74).

$$T_{gn} = 0,456 + 1,0335T_{ar} \quad (74)$$

A Equação (75) permitiu quantificar a energia associada à CTR incidente. No entanto, como hipótese de que o coeficiente de absortividade do ar seja nulo para a composição adotada, considerou-se que tal carga térmica seja parcialmente absorvida pelas aves, auxiliando no controle da temperatura corporal. A fração desta carga térmica radiante absorvida pelas aves, depende de um coeficiente combinado de fator de forma, absortividade e emissividade, que pode ser estimado através do balanço de energia em torno do desenvolvimento das aves.

$$Q_{CTR} = 86400CTR(A)(d) \quad (75)$$

O trabalho elétrico foi encontrado por simples conversão (1 kWh = 3600 kJ) como forma de uniformizar todas as grandezas ao Sistema Internacional de Unidades. Com a potência instalada em cada aviário estudado, calculou-se a demanda de energia elétrica e, com isto, foi obtido o gasto de energia em: 1) motores de distribuição de ração (alimentadores); 2) bombas para fornecimento de água de consumo; 3) bombas utilizadas para os aspersores; 4) bombas utilizadas nos painéis evaporativos; 5) Exaustores; 6) Ventiladores; e 7) Lâmpadas.

Uma estimativa para seu cômputo foi apresentada de forma analítica na Tabela 14, para os processos: a) desenvolvimento das aves; b) fase inicial; c) fase de crescimento; e, d) fase final do ciclo, mostrando o método utilizado para calcular a energia elétrica demandada nos processos. O asterisco indica os equipamentos utilizados em cada processo, permitindo maior facilidade na separação dos fluxos energéticos.

Tabela 14 - Estimativa da potência instalada e demanda energética dos processos.

		W (kW)	t (h)	$Energia$ Demandada (kWh)	a	b	c	d
1	n_{alim}	W_{alim}	t_{alim}	$n_{alim}W_{alim}t_{alim}$	*			
2	$n_{bomicons}$	$W_{bomicons}$	$t_{bomicons}$	$n_{bomicons}W_{bomicons}t_{bomicons}$	*			
3	n_{bomasp}	W_{bomasp}	t_{asp}	$n_{bomasp}W_{bomasp}t_{bomasp}$				*
4	$n_{bomypad}$	$W_{bomypad}$	t_{pad}	$n_{bomypad}W_{bomypad}t_{bomypad}$				*
5	n_{exa}	W_{exa}	t_{exa}	$n_{exa}W_{exa}t_{exa}$		*	*	*
6	n_{vent}	W_{vent}	t_{vent}	$n_{vent}W_{vent}t_{vent}$		*	*	*
7	n_{lamp}	W_{lamp}	t_{lamp}	$n_{lamp}W_{lamp}t_{lamp}$		*	*	*

Para o trabalho elétrico demandado no desenvolvimento das aves (W_{72}) são acionados motores alimentadores e bombas de fornecimento da água de consumo. Para regular a ambiência do galpão na fase final (W_{75}) são utilizadas as bombas de aspersão e de circulação do resfriamento evaporativo. Os exaustores, ventiladores e lâmpadas são acionados para renovação de ar e iluminação durante todas as fases do ciclo.

Apesar da demanda elétrica no decorrer do ciclo, este insumo responde por um baixo percentual da energia utilizada quando comparado à energia associada aos demais elementos. Além disso, vale ressaltar que ocorrem muitas perdas energéticas nos equipamentos elétricos ressaltando a hipótese de que pequenas

variações na estimativa deste insumo não devem afetar a avaliação energética do processo produtivo.

3.4.2 Balanço de energia no processo de desenvolvimento dos frangos

Na seção anterior, foram apresentados e caracterizados os principais insumos necessários ao processo de produção. Para o processo de desenvolvimento das aves, foram analisadas as energias associadas aos pintainhos, à ração, à água de consumo, ao ar demandado na respiração, à energia elétrica e a CTR, da qual, certa parcela de calor é absorvida pelas aves. Neste tópico, foi apresentado um método para identificar as conversões energéticas ocorridas neste processo.

Com base no fluxograma de massa proposto na Figura 17, e no fluxograma de energia apresentado na Figura 22, identificaram-se as frações de massa seca e de água contidas em cada entrada/saída deste VC. Com os respectivos PCI, a energia associada à fração seca dos frangos, carcaças e excretas foi calculada com a Equação (71). Para a fração líquida, a entalpia da água utilizou-se da temperatura ambiente (T_0) para as carcaças e a temperatura do frango vivo ($T_f = 41^\circ\text{C}$) para os frangos e excretas, sendo estimada através da Equação (72).

Além de compôr os frangos e carcaças, parte da água de consumo que entra no VC na fase líquida permanece junto à cama residual, parte desta água absorve calor das aves e vaporiza-se através do trato respiratório e o restante, após excretado, vaporiza-se absorvendo calor do ar.

Durante seu desenvolvimento, as aves convertem ração e água consumidas em proteína e subprodutos e, grande parte da energia transformada pelo seu metabolismo é transferida na forma de calor. Segundo Ferreira (2001), metabolismo é um conjunto de processos químicos que permitem a manutenção celular liberando energia a partir da queima de carboidratos, gorduras e proteínas. Durante este processo ocorre o consumo de oxigênio com liberação de CO_2 e água.

Através de ajustes nas Equações (7) e (8) a quantidade de calor transferido de cada ave foi quantificada utilizando-se a Equação (76) na qual a massa do frango (LW) é função da idade e da taxa de crescimento para cada linhagem trabalhada.

$$Q_f = \int_1^d \left[4,2915(LW(x))^{0,705} + 0,00283(LW(x))^{1,705} \right] dx \quad (76)$$

A conversão de O₂ (m₂₁) em CO₂ (m₈₉₋₉₁=m₃₅) a partir da respiração considerou o conceito de quociente respiratório para o metabolismo basal das aves (qr = 0,85). Desta forma, os fluxos expirados (m₈₀₋₈₈) não apresentam proporções corretas de O₂ e N₂ em sua constituição. No entanto, devido à sua pequena contribuição diante do balanço total (sua massa representa 0,12% da massa de ar contida em m₆₀₋₆₈), estes fluxos foram considerados com propriedades de ar úmido.

Para calcular a umidade absoluta do “ar expirado”, levou-se em consideração a Equação (3), incluindo o CO₂ junto à massa de ar seco. Desta forma, a massa de ar seco expirado é idêntica à do ar seco inspirado em cada fase do ciclo e a umidade é elevada até o limite da saturação pela vaporização da água líquida consumida. Sua temperatura foi estimada de acordo com estudos de Nascimento (2015) e devidamente ilustrada na Figura 20.

Ao ser expirado, o fluxo m₈₀₋₉₁ mistura-se com o ar renovado do galpão (m₆₀₋₆₈) assumindo as proporções corretas de O₂ e N₂, mas com pequeno aumento de umidade, causada pela inserção da água vaporizada através da respiração e pela água vaporizada das excretas.

Considerando que parte da CTR incidente nos frangos é absorvida, contribuindo para o balanço energético neste processo, a Equação (77) pode indicar as transformações energéticas ocorridas.

$$\alpha_f Q_{CTR} + H_{rac} + H_p + H_w + H_{ar_e} + W_{el} = H_f + H_{carc} + H_{exc} + Q_f + H_{ar_s} + H_{CO_2} \quad (77)$$

O primeiro termo da equação aponta uma estimativa para a parcela da carga térmica radiante absorvida pelas aves, calculada através da Equação (75) e visualizada no lado esquerdo da Figura 22. O segundo, o terceiro e o quarto termos, indicam a entalpia associada à ração, aos pintainhos e à água de consumo (H₇), devidamente calculadas pelas Equações (71) e (72). O quinto termo da equação indica a entalpia associada ao ar inspirado (m_{18,21,23}) estimado pela Equação (73) seguido do trabalho elétrico (W₇₂) encontrado considerando a Tabela 14.

No segundo membro, em sequência, aparecem a entalpia associada aos frangos, à carcaça e às excretas encontradas pelas Equações (71) e (72), o calor gerado pelo metabolismo das aves ($Q_{76,78,79}$) estimado pela Equação (76), seguidos da entalpia do “ar úmido” expirado e do CO_2 gerado na respiração.

O calor metabólico gerado pelas aves aparece integralmente no balanço realizado. No entanto, pequenas parcelas dele são transferidas na respiração e nas excretas. Mais especificamente, uma fração é utilizada para vaporizar a água líquida consumida através da respiração $((m_{70} - m_{23})h_{lv})$, parte eleva a temperatura do ar expirado em relação ao ar atmosférico inspirado do ambiente $((m_{18,21,23})cp_{ar}(T_{arexp} - T_{23}))$ e parte eleva a temperatura da água contida nos frangos e nas excretas em relação à temperatura de consumo $((m_{47,49,50} + m_{52,54,56})cp_w(T_{47} - T_7))$.

Apesar disso, todas estas parcelas representam aproximadamente 3% do calor metabólico transferido no decorrer do ciclo ou 1% das entradas energéticas do processo analisado. Portanto, são desprezíveis para o balanço em questão. Estima-se, então, que a maior parte do calor metabólico seja transferida através da pele/patas e convertida em trabalho químico/elétrico/mecânico no frango. Vale salientar também uma pequena diferença energética na obtenção dos PCI para as entradas e saídas ($T=25^\circ\text{C}$) em relação às temperaturas do processo.

Com isso, o balanço permitiu estimar o percentual de carga térmica absorvida pelas aves a partir da CTR incidente, variando-se um coeficiente combinado de fator de forma, absortividade e emissividade.

3.4.3 Balanço de energia na formação da cama de frangos

Excretas de frangos constituem-se de uma mistura de fezes e urina com elevada umidade que, ao ser incorporada ao material absorvente e misturada a restos de ração e penas, passa a constituir a cama de frangos. Durante todo ciclo de produção ocorrem a vaporização da água excretada, mantendo a umidade da cama dentro dos padrões estabelecidos, e o processo de fermentação do material que libera CO_2 e NH_3 para o ar renovado através da ventilação.

Tomando-se um VC em torno deste processo, conforme mostrado na Figura 22, as principais entradas energéticas são as entalpias associadas às excretas e ao

material absorvente, devidamente discutidas na seção anterior. Uma estimativa para a quantidade de CO₂ e NH₃ gerados na formação da cama foi discutida na seção 3.3.2 com as equações apresentadas na Tabela 10. Na figura 22 estas quantidades foram separadas para cada fase do ciclo produtivo considerando-se a proporcionalidade com a ração consumida pelas aves em cada fase. Desta forma, o fluxo m₃₆ subdividiu-se em m₁₁₀₋₁₁₂, o fluxo m₄₁ em m₉₂₋₉₄, e a água vaporizada das excretas m₇₁ foi subdividida em m₁₁₅₋₁₁₇, respectivamente para as fases inicial, de crescimento e final.

O balanço mostrado na Equação (78) foi realizado considerando as condições de entrada e de saída do processo. Na entrada, a fração de água líquida eliminada via excretas foi considerada na temperatura dos frangos (T = 41°C) e a contribuição da água líquida contida no material absorvente utilizou a temperatura ambiente (T₀), ambas quantificadas pela Equação (72). Os PCI das frações secas foram discutidos previamente utilizando a Equação (71). Uma vez que o líquido excretado necessita de calor para vaporizar, o termo Q_{vap} indica a quantidade de calor absorvido que serve também para promover o balanço energético. A interação de calor no VC está indicada pelas setas sobre a superfície de controle tomada.

$$H_{exc} + H_{abs} + Q_{vap} = H_v + H_{CO_2} + H_{NH_3} + H_{113} + H_{114} \quad (78)$$

Na saída do processo, para o cálculo das entalpias associadas à água vaporizada e à geração dos gases, a temperatura foi mantida constante em 27 °C de acordo com o trabalho de Miragliotta et al. (2004). A energia associada à cama gerada foi estimada com condições de saída a (P₀, T₀) para a fração líquida e com PCI de 15237 kJ/kg extraído de Santos e Lucas Junior (2004) para a fração seca, ambas quantificadas pelas Equações (70) e (71).

3.4.4 Balanço de energia para o ar renovado na fase inicial

O balanço em torno do processo de combustão foi separado dos demais processos, pois, na reação de combustão, o ar foi considerado como uma mistura de N₂, O₂ e vapor, em que o O₂ participa da combustão. O N₂ e o vapor se mantêm

inertes apenas elevando sua temperatura ao sair junto à umidade vaporizada da lenha na temperatura dos gases de combustão.

Na fase inicial do ciclo, o processo de aquecimento do ar considerou o uso de lenha (com a constatação de que mais de 70% dos avicultores no sul do Brasil utilizam este insumo) ou GLP (utilizado em algumas granjas). A quantidade de calor transferido das fornalhas ao ar foi calculada considerando-as como reatores que operam em regime permanente onde o combustível é totalmente queimado com ar e, para que os produtos da reação retornem à mesma temperatura dos reagentes, é necessária uma transferência de calor do reator para o espaço de criação.

A parte superior da Figura 22 mostra o fluxograma de energias associadas às entradas e saídas da reação de combustão. A diferença entre a entalpia dos insumos e a entalpia dos produtos é o calor transferido para o ambiente (Q_{77}) e encontrado pela Equação (79).

$$Q_{comb} = \sum_P m_s h_s - \sum_R m_e h_e \quad (79)$$

Para quantificar a energia contida no GLP utilizou-se a entalpia de combustão de seus elementos em uma mistura de gases ideais. As entalpias do Butano e do Propano foram definidas como a diferença entre a entalpia dos produtos e dos reagentes quando ocorre a combustão completa à temperatura e pressão de referência (25°C; 101,3kPa). Na Equação (80), j representa cada um dos elementos constituintes do GLP e $\Delta \bar{h}_j$ indica a variação da entalpia específica de cada componente em base molar.

$$\Delta \bar{h}_j = \sum_P n_s \bar{h}_s - \sum_R n_e \bar{h}_e \quad (80)$$

Consequentemente, a entalpia do GLP foi calculada pela mistura de gases ideais em que produtos e reagentes estão na mesma temperatura e pressão do estado de referência. O valor da entalpia da mistura em base mássica é dado pela Equação (81), com a massa molar da mistura $M_{mix} = 0,7M_{C_4H_{10}} + 0,3M_{C_3H_8}$, calculada através das frações molares de cada componente dentro da mistura.

$$h_{glp} = \frac{1}{M_{mix}} \sum y_i \bar{h}_i = \frac{1}{M_{mix}} (0,7 \bar{h}_{C_4H_{10}} + 0,3 \bar{h}_{C_3H_8}) \quad (81)$$

A energia obtida da lenha seca considera a composição elementar adotada no balanço de massa do processo de combustão e o valor encontrado para o PCI foi comparado com valores citados na literatura. A Tabela 15 detalha a composição elementar utilizada em que o PCS foi encontrado segundo a Equação (19) de Channiwala e Parikh (2002) e o valor do PCI foi calculado segundo a Equação (21), citada por Quiroga et al. (2010), ambas discutidas na seção 3.2.2.

Tabela 15 - Composição elementar e valor do PCI adotados para a lenha.

Composição	C (%)	H (%)	O (%)	S (%)	N (%)	Ash (%)	PCS (kJ/kg)	PCI (kJ/kg)
% (massa)	49,0	6,0	43,0	0,0	1,0	1,0	19.693,30	18.374,73

A umidade do ar entra no VC superior em equilíbrio com o ambiente e sai no estado (P_0 , T_{gc}) o que reduz a quantidade de calor liberado pela combustão. A água líquida contida na madeira necessita absorver parte da energia gerada pela combustão para vaporizar, saindo do VC junto com a umidade do ar atmosférico e nas mesmas condições de temperatura e pressão que os gases de combustão.

Com isso, a Equação (79) pode ser reescrita como na forma da Equação (82), quantificando a energia liberada no processo de combustão e transferida para o espaço criatório no período de aquecimento.

$$Q_{comb} = m_{glp} h_{glp} + m_l PCI_l - m_w (h_v - h_w) - m_v (h_{v_s} - h_{v_e}) - m_{gc} c p_{gc} (T_{gc} - T_0) \quad (82)$$

Os termos negativos reduzem a energia disponível ao ambiente por destinarem parte dela à mudança de estado físico ou variação de temperatura da água e gases de combustão.

Neste trabalho, considerou-se que os reagentes entram no processo nas condições (P_0 , T_0) e os produtos saem do VC a (P_0 , $T_{gc} = 300^\circ\text{C}$). A temperatura dos gases de combustão foi uma estimativa para o estado termodinâmico na saída do galpão. A massa dos gases de combustão é resultado da massa seca de combustível como insumo e foi estimada pela soma das vazões secas de entrada ($m_{13,14,16,17}$).

O calor específico dos gases de combustão cp_{gc} considerou a percentagem mássica de GLP, lenha e ar seco na combustão, sendo calculado pela mistura de gases ideais da reação de combustão. Devido às mudanças nas quantidades de tais insumos (GLP, lenha e ar úmido), os procedimentos de cálculo foram explicitados na Tabela 16 de forma genérica permitindo diferentes composições nos parâmetros de entrada para os insumos da combustão.

Tabela 16 - Cálculo dos calores específicos de elementos envolvidos no processo de combustão.

Produtos	GLP		Lenha	
	n (kmols)	Y	n (kmols)	Y
CO ₂	3,7	0,1135	4,083	0,1499
H ₂ O	4,7	0,1442	3	0,1101
O ₂	0,305	0,0093	0,854	0,0313
N ₂	23,89	0,7329	19,3	0,7086
Soma	32,59	100%	27,24	100%

$$Cp_i = \frac{\int_{T_0}^{T_{gc}} (\alpha + \beta T + \gamma T^2 + \delta T^3 + \varepsilon T^4) dT}{T_{gc} - T_0}$$

Gas	α	$\beta \times 10^3$	$\gamma \times 10^6$	$\delta \times 10^9$	$\varepsilon \times 10^{12}$	Cp (kJ/kgK)
CO ₂	2,401	8,735	-6,607	2,002	0	0,97
H ₂ O	4,070	-1,108	4,152	-2,964	0,807	1,93
O ₂	3,626	-1,878	7,055	-6,764	2,156	0,96
N ₂	3,675	-1,208	2,324	-0,632	0,226	1,05
Air	3,653	-1,337	3,294	-1,913	0,2763	1,06

$$Cp_i = y_{CO_2i} Cp_{CO_2} + y_{H_2Oi} Cp_{H_2O} + y_{O_2i} Cp_{O_2} + y_{N_2i} Cp_{N_2}$$

$$Cp_l = 1,13 \frac{kJ}{kgK} \quad Cp_{glp} = 1,165 \frac{kJ}{kgK}$$

$$Cp_{gc} = y_{glp} Cp_{glp} + y_l Cp_l + y_{ar} Cp_{ar}$$

Definido o procedimento de cálculo para estimar o calor fornecido pelo sistema de aquecimento, procedeu-se a análise do balanço energético em torno do ar aquecido. Durante toda a fase inicial de criação, as aves transferem calor do seu corpo, como resultado da atividade metabólica. A quantidade de calor gerada em cada ave na fase inicial foi quantificada utilizando-se a Equação (76), somada somente na fase inicial, para o cálculo do fluxo Q_{76} mostrado na Figura 22. O “Peso Vivo (LW)” dos frangos no decorrer do processo depende da massa inicial e da sua taxa de crescimento a cada dia do ciclo x , sendo considerado no período da fase inicial.

Pode-se ilustrar o aquecimento dentro do aviário como um duto de ar e gases gerados com uma entrada e uma saída bem como energia transferida a ele na forma de calor. Ao observar o VC tomado, o calor gerado pelas aves (Q_{76}) é adicionado ao calor provindo da combustão (Q_{77}) e eleva a temperatura do ar renovado (m_{60-62}), do

“ar expirado” ($m_{80-82,89}$) e dos gases gerados na fase inicial ($m_{92,110,115}$), mudando seu estado para a condição desejada (m_{95-99}) e rejeitando-o para o ambiente.

Conforme definido na Tabela 13, a massa de ar úmido demandado para ventilação na fase inicial do ciclo corresponde a m_{60-62} no estado termodinâmico definido pelas condições ambiente (P_0, T_0, ω_0). Quando este ar se junta ao “ar úmido saturado” que sai da respiração – e não possui características de ar, pois, parte do O_2 (m_{21}) foi convertida em CO_2 (m_{89}) - a mistura de ambos novamente assume proporção correta de N_2 e O_2 com umidade aumentada. A umidade absoluta do ar expirado foi calculada pela Equação (83).

$$\omega_{80} = \frac{m_{80}}{m_{81} + m_{82} + m_{89}} \quad (83)$$

Uma vez que o fluxo expirado (m_{80-82}) nas condições (P_0, T_{arexp}) é muito pequena se comparada à massa do ar atmosférico de entrada (m_{60-62}), é possível assumir que eles apresentem propriedades de ar úmido durante o balanço.

Durante o período inicial, gases são gerados da respiração (m_{89}) e das excretas na formação da cama de frangos ($m_{92,110}$). Além disso, certa quantidade de água é vaporizada para controlar a umidade da cama aumentando o percentual de vapor junto ao ar. Os gases gerados, apesar de serem considerados no estudo, não interferem no balanço de energia devido à sua pequena quantidade de massa, e poderiam ser desprezados.

Na saída do processo de aquecimento, além do ar úmido (m_{96-98}), são gerados CO_2 pela respiração e pela cama ($m_{89,110}$) e NH_3 pela volatilização do Nitrogênio (m_{92}), os quais saem do processo como vazões $m_{95,99}$. Devido a suas insignificantes contribuições para a estimativa pretendida, suas temperaturas foram igualadas à temperatura do ar úmido na entrada e na saída do processo.

O balanço de massa foi realizado aplicando-se a Equação (14) e o balanço de energia foi realizado com o uso da Equação (15). As massas m_{60-62} provêm do ar atmosférico no estado do ambiente e as massas m_{80-82} provêm da respiração cuja entalpia depende da temperatura do ar expirado e pressão do ambiente de referência além da umidade absoluta dada pela Equação (83).

Ao ser aplicado o balanço de energia, uma vez que não há realização de trabalho e nem variação de energia interna (regime permanente), todo calor

transferido ao ar e aos gases, pelas aves e pela combustão, resulta na elevação de entalpia dos fluxos de saída. Isto pode ser observado na Equação (84), e possibilita encontrar todas as demais propriedades termodinâmicas, uma vez que a pressão é considerada constante em P_0 .

$$\begin{aligned} Q_{comb} + H_{ar(exp)} + Q_f + H_{CO_2} + H_{ar(e)} + W_{el} + H_v + H_{NH_3} + H_{CO_2} - Q_{vap} \\ = H_{ar(s)} + H_{CO_2} + H_{NH_3} \end{aligned} \quad (84)$$

No primeiro membro aparecem as energias associadas ao calor transferido pela combustão (Q_{77}), à entalpia associada ao fluxo expirado pelas aves (m_{80-82}), ao calor transferido pelo metabolismo dos frangos (Q_{76}), à entalpia do CO_2 junto ao fluxo expirado (m_{89}), entalpia do ar renovado (m_{60-62}), energia elétrica (W_{73}), entalpia da água vaporizada, CO_2 e NH_3 gerados através das excretas ($m_{115,110,92}$) e o calor transferido para vaporização da água excretada. No segundo membro, encontram-se a entalpia do ar renovado (m_{96-98}) e dos gases extraídos do galpão ($m_{95,99}$).

Apesar de insignificantes ao balanço de energia, na saída deste VC consideraram-se as massas de CO_2 e de NH_3 , as quais assumem a mesma temperatura do ar úmido e, desta forma, também têm seu estado termodinâmico conhecido.

3.4.5 Balanço de energia para o ar renovado na fase de crescimento

Nesta fase, o ar renovado e os gases gerados no período, sofrem mudanças de estado ao absorver calor provindo dos frangos (Q_{78}), com a introdução da energia elétrica (W_{74}) e transferindo calor para vaporização de parte da água contida nas excretas. No primeiro caso, o calor transferido é quantificado de forma análoga à Equação (76) que, quando aplicada ao período de crescimento do ciclo produtivo, permite encontrar o calor metabólico gerado nesta fase. Assim, o intervalo de integração passa a ser do último dia da fase inicial (*din*) ao último dia da fase de crescimento (*dcres*). Para a energia elétrica, o procedimento de cálculo foi idêntico ao aplicado na seção anterior e de acordo com a Tabela 14. O calor transferido para vaporização da água excretada foi estimado no balanço das excretas com sua proporcionalidade para esta fase do ciclo.

A massa de ar úmido (Ver Tabela 13) na fase de crescimento do ciclo corresponde a m_{63-65} no estado termodinâmico definido pelo ambiente. O “ar” expirado pelas aves (m_{83-85}) considerou a temperatura obtida por estudos de Nascimento (2015) e apresentada na Figura 21, idealizando ar saturado e umidade absoluta calculada pela razão entre a massa de vapor (m_{83}) e a massa seca ($m_{84,85,90}$). Quando estes fluxos se juntam, a mistura assume proporção correta de N_2 e O_2 com umidade aumentada, já que os fluxos m_{83-85} são muito pequenos em relação à massa do ar atmosférico utilizado na renovação de ar.

Nesta etapa, adotou-se que o ar renovado não necessita de aquecimento ou arrefecimento e, portanto, as mudanças de estado das vazões m_{63-65} e m_{83-85} somente ocorrerão por absorção do calor transferido pelas aves (Q_{78}), pela energia elétrica demandada no período (Q_{74}) e calor trocado no processo de formação da cama.

Gases são gerados na respiração (m_{90}) e na formação de CO_2 ou volatilização do N_2 pela cama ($m_{93,111}$). Além destes, certa quantidade de água é vaporizada para o ar (m_{116}) a fim de controlar a umidade da cama aos limites aceitáveis. Com a percepção de sua insignificância, estes fluxos não fariam diferença no balanço de energia e poderiam ser desprezados. No entanto, sua quantificação mássica é significativa.

Novamente, o balanço de massa foi realizado no VC aplicando-se a Equação (1) e o balanço de energia foi realizado através da Equação (85).

$$H_v + H_{NH_3} + H_{CO_2} + H_{CO_2exp} + Q_f + H_{ar_{exp}} + H_{ar_e} + W_{el} - Q_{vap} = H_{CO_2} + H_{ar_s} + H_{NH_3} \quad (85)$$

O primeiro termo corresponde à água vaporizada das excretas durante o período (m_{116}), na sequência a entalpia dos gases gerados pela cama e pela respiração ($m_{90,93,111}$), o calor gerado pelos frangos (Q_{78}), a entalpia do ar expirado pelas aves (m_{83-85}), a entalpia do ar úmido renovado (m_{63-65}), a energia elétrica demandada pelos equipamentos nesta fase (W_{74}) e o calor transferido no processo de formação da cama. No segundo membro, a massa de ar úmido ($m_{101-103}$) juntamente com a entalpia dos gases gerados ($m_{100,104}$) permitem estimar a entalpia de saída e as demais propriedades termodinâmicas do ar.

Como não há realização de trabalho e nem variação de energia interna, todo calor absorvido pelo ar e gases acarreta na elevação de entalpia dos fluxos de saída. As entalpias de saída dos gases apresentam pequena contribuição, assumindo a mesma temperatura de saída do ar úmido.

3.4.6 Balanço de energia para o ar renovado na fase final

Na seção 3.3.3 foi discutida a realização do balanço de massa para o processo de arrefecimento e ventilação durante todo o ciclo de acordo com o observado na Figura 17. Agora, para avaliar as energias envolvidas no arrefecimento apenas na fase final, é necessário identificar e quantificar os insumos demandados para este período do ciclo.

Conforme definido na Tabela 13, e visualizado na Figura 22, a massa de ar úmido demandado para ventilação corresponde a m_{66-68} no estado termodinâmico definido pelo ar no estado do ambiente. Os fluxos que saem da respiração (m_{86-88}), apesar de não terem características de ar⁹, apresentam massas muito pequenas em relação à massa do ar atmosférico de entrada e foram tratados como ar úmido neste estudo. A temperatura do ar expirado foi mostrada na Figura 21 e a umidade absoluta, dada pela Equação (86), reflete a hipótese de ar saturado na expiração.

$$\omega_{86} = \frac{m_{86}}{m_{87} + m_{88} + m_{91}} \quad (86)$$

No VC tomado, além do ar úmido, são gerados CO₂ pela respiração e pela cama ($m_{91,112}$) e NH₃ pela volatilização do Nitrogênio (m_{94}) os quais saem do processo como vazões $m_{108,109}$. Devido a suas pequenas contribuições ($m_{91,94,112} \ll m_{66-68}$), estes rejeitos também não interferem na temperatura resultante, assumindo a temperatura do ar na entrada e na saída do processo. Além deles, água líquida é vaporizada das excretas na formação da cama de frangos (m_{117}) retirando calor do ar renovado e, ao incorporar-se a ele, eleva sua umidade.

⁹ Isto se deve, pois parte do O₂ inspirado (m_{21}) foi convertido em CO₂ (m_{91}) e a quantidade de água vaporizada pela respiração e excretas das aves faria os fluxos m_{86-88} ultrapassarem o limite da saturação caso fossem considerados como ar úmido.

A energia elétrica (W_{75}) e o calor gerado pelas aves (Q_{79}) são as interações de trabalho e calor na fronteira do VC tomado. Por fim, a entalpia das massas de água líquida introduzidas via sistema de resfriamento evaporativo (m_8, m_9) nas condições (P_0, T_i) conclui as entradas energéticas no VC considerado.

Desta forma, aplicando a Equação (1) no VC tomado foi possível a realização do balanço de massa, sendo que o balanço de energia foi realizado através da Equação (87).

$$\begin{aligned} H_v + H_{NH_3} + H_{CO_2} + H_{CO_2exp} + H_{ar_{exp}} + Q_f + H_{ar_e} + W_{el} + H_w - Q_{vap} \\ = H_{ar_s} + H_{CO_2} + H_{NH_3} \end{aligned} \quad (87)$$

Na ordem em que aparecem, os termos do primeiro membro representam a água vaporizada das excretas na composição da cama (m_{117}), a entalpia da amônia gerada pela volatilização do nitrogênio (m_{94}), as entalpias do dióxido de carbono gerado na decomposição microbiana da cama e pela respiração ($m_{112,91}$), a entalpia do ar expirado (m_{86-88}), o calor gerado pelas aves (Q_{79}), as entalpias associadas ao ar atmosférico (m_{66-68}), o trabalho elétrico demandado (W_{75}), a entalpia da água líquida introduzida (m_{8-9}) e o calor cedido para vaporização do líquido excretado. Os termos do segundo membro compreendem às entalpias do ar úmido e dos gases gerados no processo.

Com a massa de ar saindo ($m_{105-107}$), a entalpia do ar de saída (h_{105}), sua umidade absoluta e a pressão atmosférica, encontram-se todas as demais propriedades dos elementos resultantes neste processo. Assumindo que a temperatura dos gases gerados ($m_{108-109}$) é idêntica à temperatura do ar e, conhecendo a pressão de saída, também foi possível definir o estado termodinâmico destes elementos na saída do processo.

3.4.7 Estimativa para a entalpia dos produtos e rejeitos

Para a realização do balanço energético do VC global, foram quantificadas as entalpias dos produtos e rejeitos como os frangos, as carcaças, a cama residual, a estimativa de poeira e particulados extraídos durante o processo e os GEE, além do

ar úmido que é o mais significativo devido à quantidade demandada na renovação de ar do ciclo. Todos estes elementos estão mostrados no lado direito da Figura 22.

Na ausência de dados da composição elementar/proximal para os frangos e carcaças, para o cálculo da entalpia associada à fração seca, adotaram-se os valores de EB indicados na literatura por Santos e Lucas Junior (2004) como sendo 25790 kJ/kg e 26089 kJ/kg respectivamente. Apesar destes valores terem sido encontrados em determinadas condições ambiente, pequenas variações de temperatura externa não devem ser significativas na alteração destes números. Desta forma, a entalpia destas saídas é encontrada pelo produto do seu PCI e respectiva massa seca, conforme mostrado na Equação (71).

Para o caso da cama residual, o PCI foi calculado a partir do levantamento de composição elementar em diferentes amostras de cama, e foi apresentado na Tabela 17. Os valores grifados com (*) foram extraídos da literatura após serem obtidos analiticamente ou experimentalmente pelos autores.

O valor PCI* foi encontrado através da Equação (21) e os valores marcados com (**) foram calculados a partir das Equações (19) e (21). Para o O*, o percentual foi calculado utilizando a diferença $100\% - (C + M + N + S + \text{Ash} + \text{Cl})$ indicada em Lynch et al. (2013).

Tabela 17 – Poder calorífico da cama de frangos gerada a partir da composição elementar.

Autor	C* (%)	H* (%)	O* (%)	S* (%)	N* (%)	Cinzas (%)	Cl* (%)	PCS* (kJ/kg)	PCI* (kJ/kg)	PCS** (kJ/kg)	PCI** (kJ/kg)
<i>Miles and Bock (2004)</i>	39,50	4,30	27,30	0,80	3,90	22,90	1,28	15300,0	9300,0	15572,6	14626,7
<i>Fried et al. (2005)</i>	42,60	5,70	32,20	0,40	3,40	15,50	0,10	10200,0	8947,4	17920,0	16667,7
<i>Steinfeld et al. (2006)</i>	37,38	4,19	15,64	0,74	3,76	37,79	0,50	14900,0	13979,2	15589,5	14668,7
<i>Lynch et al. (2013)</i>	45,17	5,85	27,25	0,45	5,16	15,49	0,35	18020,0	16734,4	19484,7	18199,1
<i>Média</i>								14605,0	12240,3	17141,7	16040,6

* Valores citados na literatura.

** Valores calculados a partir das Equações (19) e (21).

A separação entre a fração seca e a umidade contidas em cada componente foi realizada na seção 3.3.1, e a Equação (72) foi utilizada para avaliar a entalpia da água contida nos frangos, nas carcaças e na cama (H_{47} , H_{42} e H_{52}). Para os frangos vivos foram consideradas a pressão ambiente e a temperatura média corporal no momento da entrega para o abate ($T = 41^\circ\text{C}$), enquanto que, para a cama gerada e

as carcaças, as condições assumidas foram (P_0 , T_0). Desta forma, a entalpia total associada a cada produto/rejeito citado é a soma das duas contribuições, massa seca e umidade.

O ar úmido extraído dos galpões apresenta temperaturas diferentes para cada fase do ciclo e, como não se misturam já que atravessam os galpões em períodos diferentes do ciclo, suas entalpias foram consideradas de forma separada. Através dos balanços de massa e energia realizados em torno do ar em cada uma das fases, foram encontradas as entalpias específicas, temperaturas e demais propriedades termodinâmicas do ar. A entalpia total do ar extraído corresponde à soma das entalpias extraídas em cada fase do ciclo, conforme mostrado na Equação (88).

$$H_{ar} = (m_{97} + m_{98})h_{96} + (m_{102} + m_{103})h_{101} + (m_{106} + m_{107})h_{105} \quad (88)$$

Por fim, as entalpias do CO_2 e NH_3 gerados no decorrer do ciclo são compostas pelas parcelas geradas em cada fase na respectiva temperatura média do galpão. Seus valores foram estimados a partir das Equações (89) e (90).

$$H_{CO_2} = m_{95}h_{95} + m_{100}h_{100} + m_{108}h_{108} \quad (89)$$

$$H_{NH_3} = m_{99}h_{99} + m_{104}h_{104} + m_{109}h_{109} \quad (90)$$

Durante o balanço energético global do processo produtivo, considerou-se que parte da CTR quantificada no espaço criatório, foi absorvida pelo telhado e paredes sendo transferida para o ambiente através das fronteiras e, assim, fechando o balanço de energia no processo. Com todas as entalpias vinculadas aos insumos, produtos e rejeitos do ciclo de produção, foi possível realizar um balanço global de energia em todo ciclo, com detalhamentos da Equação (15), e boa confiabilidade. O rendimento energético foi realizado de acordo com a Equação (22).

3.5 EQUACIONAMENTO DA EXERGIA DESTRUÍDA NOS PROCESSOS

Estamos considerando o VC global como a porção de espaço interno ao galpão avícola. Desta forma, além da transferência de exergia via interações de calor e trabalho, é necessário considerar fluxos de massa através de sua fronteira como mecanismo de transferência de exergia.

A exergia é a energia disponível em um sistema/fluxo qualquer devido ao seu desequilíbrio termodinâmico com o ambiente de referência e, quando alteradas as propriedades do sistema ou do ambiente, altera-se a disponibilidade energética. Desta forma, definindo-se as condições do sistema analisado (ZCT das aves em cada fase), as mudanças nas propriedades termodinâmicas do ambiente alteram a quantidade de energia útil disponível após cada processo realizado.

A partir dos balanços de massa e energia, mostrados nas Figuras 17 e 22, fica evidente a contribuição de cada fluxo utilizado. Com a sequência adotada previamente, a exergia associada aos insumos, produtos e rejeitos do processo foi calculada e, ao final, procedeu-se com o balanço exergético de forma a identificar as principais perdas e irreversibilidades.

Balanços de exergia foram realizados nos processos de desenvolvimento das aves durante o ciclo completo, no processo de formação da cama e no ar renovado em cada fase do ciclo. Para diferentes condições dos insumos e tipologias de galpões/diversidade de manejos, a exergia destruída em cada processo apontou os gargalos energéticos para o ciclo total.

Dos resultados obtidos, fica evidente a baixa contribuição dos gases gerados pela respiração e formação da cama, quando comparados ao ar renovado. Desta maneira é possível readequar o fluxograma mostrado na Figura 22 incorporando os gases gerados ao ar úmido. Esta adequação evita a complexidade de cálculos da exergia para misturas de gases, os quais não trariam significantes modificações para o balanço global.

Existem outros processos de transformação energética, internos ao VC e diferentes dos analisados aqui que tornam a exergia dissipada no ciclo completo um pouco superior à soma das exergias dissipadas nos processos internos analisados (<1%). Esta diferença é atribuída à dissipação de exergia por processos não identificáveis ou de difícil estimativa, como mistura de gases, transferências de calor com temperaturas finitas ou atritos.

3.5.1 Estimativa da exergia associada aos insumos

Segundo Kotas (1995), valores da exergia de substâncias orgânicas secas compostas por C, H, O, N e S podem ser obtidos com a relação (34). Ela permite o cálculo da exergia química associada às frações secas da maravalha (m_1), da ração (m_3) e dos pintainhos (m_5). O PCI utilizado para a maravalha foi apresentado na Tabela 12 e os valores utilizados para a ração (16497 kJ/kg) e os pintainhos (21947 kJ/kg) foram publicados por Santos e Lucas Junior (2004).

O coeficiente exergetico foi calculado a partir da Equação (36) que retornou para a maravalha o valor de $\beta=1,09$ considerando a composição elementar apresentada na Tabela 12 e, devido à indisponibilidade de dados para os pintainhos e a ração, seu coeficiente exergetico foi aproximado para a unidade. A estimativa da exergia total para todos estes insumos é a soma da exergia da fração seca com a exergia da parte líquida.

A água entra no processo na fase líquida a (P_0, T_i) , mas no ambiente encontra-se na fase de vapor e com pressão parcial nas condições (yP_0, T_0) . Este desequilíbrio permite a realização de trabalho útil. A exergia da água líquida que compõe a maravalha (m_2), a ração (m_4), os pintainhos (m_6) além da exergia da água de consumo (m_7) e da água introduzida pelo resfriamento evaporativo (m_{8-9}) foram calculadas em base mássica considerando-se as condições do ambiente de acordo com a Equação (91) apresentada por Wepfer, Gaggioli e Obert (1979).

$$b_w = h_w(T) - h_v(T_0) - T_0 s_w(T) + T_0 s_v(T_0) + (P - P_{sat(T)}) v_{l(T)} - R_v T_0 \ln(\phi_0) \quad (91)$$

Os primeiros quatro termos representam a diferença da função de Gibbs para a água líquida na temperatura do fluxo e para o vapor no estado de referência. O termo intermediário geralmente é desprezado devido ao pequeno valor de $v_{l(T)}$ para temperaturas do ambiente e o símbolo ϕ_0 indica a umidade relativa do meio de referência, que pode assumir diferentes valores neste estudo.

Para o caso especial onde a água esteja em equilíbrio térmico com o ambiente os quatro primeiros termos tendem a zero e a exergia da água pode ser encontrada

apenas pelo último termo com boa aproximação, conforme indicado por Farmahini-Farahani et al. (2012).

O ar atmosférico entra no processo em equilíbrio termodinâmico com o ambiente e, portanto, não apresenta capacidade de realizar trabalho útil. No entanto, a exergia específica associada ao fluxo de ar por unidade de ar seco pode ser calculada pela Equação (92) proposta por Wepfer et al. (1979) e citada por Bejan (2006).

$$b_{ar} = (c_{p_a} + \omega c_{p_v})T_0 \left(\frac{T}{T_0} - 1 - \ln \frac{T}{T_0} \right) + (1 + \tilde{\omega})R_a T_0 \ln \frac{P}{P_0} + R_a T_0 \left[(1 + \tilde{\omega}) \ln \left(\frac{1 + \tilde{\omega}_0}{1 + \tilde{\omega}} \right) + \tilde{\omega} \ln \frac{\tilde{\omega}}{\tilde{\omega}_0} \right] \quad (92)$$

Nesta equação c_{p_a} é o calor específico do ar seco, c_{p_v} o calor específico do vapor, R_a a constante dos gases para o ar seco com $\tilde{\omega} = 1.608\omega$ e $\tilde{\omega}_0 = 1.608\omega_0$ as umidades absolutas do ar no fluxo e no meio de referência. A exergia do ar úmido foi dividida por Chengqin, Nianping e Guangfa (2002) nos componentes térmico, mecânico e químico, representados pelo primeiro, segundo e terceiro termo desta equação respectivamente.

A energia elétrica, por se tratar de uma energia totalmente ordenada e que pode ser convertida integralmente em trabalho de eixo, tem sua exergia idêntica à energia calculada na Tabela 14 para cada fase do ciclo produtivo. A Carga Térmica Radiante (CTR) introduz uma quantidade de calor no galpão avícola, cuja parte é absorvida pelas aves, podendo ser estimada pela Equação (93).

$$B_{CTR} = Q_{CTR} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (93)$$

No entanto, como esta transferência de calor ocorre na temperatura da fronteira do ar contido no galpão (T_0), a exergia associada a ela é nula. Uma vez que o VC foi considerado na interface interna do galpão indicando certa quantidade de exergia térmica transferida para dentro e para fora, ao efetuar as comparações em diferentes tipos de construções e manejos, seu valor é constante para cada fase do ciclo e não será relevante nas análises comparativas.

3.5.2 Cálculo da exergia destruída no desenvolvimento dos frangos e formação da cama a partir das excretas

O procedimento de cálculo da energia útil disponível nos insumos foi apresentado na seção anterior. Foi discutido o desequilíbrio termodinâmico associado às entalpias dos pintainhos, da ração, da água de consumo e do ar respirado em relação ao ambiente de referência. Por consequência, foi quantificada a exergia disponível nos insumos para o desenvolvimento das aves.

Na saída do processo, a exergia associada aos frangos, às carcaças e às excretas foi estimada através das Equações (34) e (36) para a fração seca e utilizando a Equação (91) para a umidade. Para a fração seca, foram utilizados os valores de 25790 kJ/kg, 26089 kJ/kg e 12280 kJ/kg respectivamente para o PCI dos frangos, das carcaças e das excretas. Na fração líquida, a temperatura assumida para os frangos foi de 41°C e, para as carcaças e as excretas, assumiu-se a temperatura ambiente (T_0). Os coeficientes exergéticos foram aproximados da unidade devido à inexistência de dados sobre a composição elementar ou proximal destes elementos.

A exergia associada ao calor transferido pelo metabolismo das aves considera as transferências de calor Q_{76} para o ar na fase inicial, Q_{78} para o ar na fase de crescimento e Q_{79} para o ar na fase final, de acordo com a Equação (94).

$$b_Q = Q \left(1 - \frac{T_0}{T_{ar}} \right) \quad (94)$$

A temperatura da fronteira onde ocorrem tais transferências foi considerada como a temperatura média do galpão em cada fase, dada pelas condições de conforto térmico das aves no decorrer do seu crescimento. Assim, a temperatura do ar assume diferentes valores nas fases inicial, de crescimento e final, reduzindo conforme mostrado na Tabela 1 e o amadurecimento do aparelho termorregulador das aves.

A exergia associada ao fluxo expirado pelas aves (m_{80-91}) foi estimada através da Equação (92), seguindo a hipótese de ar úmido saturado e assumindo que a massa de CO_2 gerada no processo seja incorporada ao ar somando-se ao oxigênio.

O balanço de exergia realizado no processo, baseado na Equação (37) e reescrito na Equação (95), permitiu estimar a exergia destruída com boa confiabilidade, uma vez que mantiveram-se os elementos de maior contribuição exergética na entrada e na saída do processo.

$$B_d = B_{rac} + B_p + B_w + B_{ar_e} + B_{el} + B_{CTR} - B_f - B_{carc} - B_{exc} - B_{Q_f} - B_{ar_s} \quad (95)$$

As exergias de entrada estão relacionadas à ração (B_{3-4}), aos pintainhos (B_{5-6}), à água de consumo (B_7), ao ar introduzido na respiração (B_{23}), ao trabalho elétrico (B_{72}) e à parte da CTR que é absorvida pelas aves (B_{69}). Na saída, aparecem a exergia associada aos frangos (B_{47-51}), às carcaças (B_{42-46}), às excretas (B_{52-56}), ao calor metabólico transferido ($B_{76,78-79}$) e ao ar expirado (B_{80-91}).

Tomando-se um VC em torno do processo de formação da cama pode-se afirmar que, após eliminadas, as excretas misturam-se ao material absorvente (B_{1-2}), a restos de penas e escamas e ração desperdiçada, formando assim a cama de aves. Durante o processo, são gerados gases como CO_2 e NH_3 , além da vaporização de muita água, devido à diferença entre a umidade das excretas ($\approx 70-80\%$) e da cama residual ($\approx 20-25\%$).

Considerando a análise realizada no balanço de energia e as setas indicativas mostradas na Figura 22, pode ocorrer uma transferência de calor do ar úmido para a água líquida excretada de tal forma que ocorra sua vaporização para o ar renovado. Esta transferência de calor ocorre na temperatura média do galpão para cada fase do ciclo e pode ser estimada pela Equação (94). Esta estimativa indicou valores desprezíveis na comparação aos demais fluxos e, portanto, não foi considerada no balanço.

Desta mesma análise, também elucidou-se que a entalpia associada aos gases gerados na saída do processo ($h_{92-94,110-112}$) é insignificante se comparada à entalpia do vapor ($h_{115-117}$), correspondendo a menos de 1%, e nos permitiu incorporar tais massas ao vapor, evitando cálculos de exergia para mistura de gases.

Completando o balanço, a exergia associada à cama residual deve descontar a massa de poeira extraída do galpão, conforme discutido no balanço de massa. Assim, a Equação (96) permite estimar a exergia destruída no processo.

$$B_{exc} + B_{abs} = B_v + (m_{114} - m_{58})b_{114} + B_d \quad (96)$$

3.5.3 Cálculo da exergia destruída para aquecimento na fase inicial

A exergia útil disponível nos reagentes e produtos da reação de combustão foi calculada individualmente para cada elemento buscando o desequilíbrio do sistema/fluxo em relação ao ambiente. Um balanço de exergia foi proposto para quantificar a destruição de exergia por irreversibilidades.

A energia útil contida no GLP considera uma mistura de gases ideais (70% C_4H_{10} + 30% C_3H_8) entrando no VC em condições ambiente (P_0 , T_i). Deste modo, já se encontra no estado restrito e a exergia física é nula, tornando a exergia total composta apenas pela exergia química. Seu cômputo foi realizado pela Equação (97) na qual o coeficiente de atividade γ é a unidade para mistura de gases ideais. A massa molar do GLP foi calculada como discutido na seção 3.4.3.

$$b_{glp} = \frac{1}{M_{glp}} \left(\sum_i y_i \bar{b}_i + \bar{R}T_0 \sum_i y_i \ln(\gamma y_i) \right) \quad (97)$$

Para a fração seca da lenha utilizada na reação de combustão, utilizou-se a composição de 49% C, 6% H, 43% O, 1% N e 1% cinzas. Com a correlação proposta por Szargut e Styrylska (1964) e apresentada nas Equações (19) e (21) foi possível encontrar o valor do PCI. Com a mesma composição e utilizando as Equações (34) e (36) foi estimado o valor do coeficiente exergético e da exergia específica do insumo.

Devido à umidade da lenha, a massa de água líquida entra no VC em condições ambiente. A energia útil da massa de água pode ser obtida pela Equação (91) em base mássica, na qual a variável mais significativa é a umidade relativa do meio de referência ϕ_0 que assume diferentes valores neste estudo.

O ar seco é utilizado como oxidante para a combustão e sua exergia foi calculada como uma mistura de gases ideais. No entanto, uma vez que entra no VC superior da Figura 22 em equilíbrio completo com o ambiente de referência, não apresenta capacidade de realizar trabalho útil. Por sua vez, a massa de vapor contida no ar atmosférico, tomada separadamente para a combustão, apresenta

pequena exergia química devido a um desequilíbrio de pressão em relação ao ar úmido, mas que também pode ser desconsiderada diante das demais.

Os produtos da combustão saem das fornalhas a (P_0, T_{gc}) , sendo modelados como uma mistura de gases ideais. Assim, sua exergia total envolve as contribuições químicas e físicas. Considerando que cada componente está presente no ambiente, a contribuição química por mol de combustível pode ser obtida pela Equação (97) e a contribuição física da exergia é obtida pela Equação (98), em que o último termo é desprezado já que é considerado o equilíbrio mecânico ($P = P_0$) durante todos os processos.

$$b_{gc} = cp_{cg}(T - T_0) - T_0 cp_{cg} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + RT_0 \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (98)$$

Como a queima do GLP e da lenha não ocorrem simultaneamente, a exergia dos gases de combustão foi calculada separadamente para cada insumo. Ao final, a exergia total dos gases de combustão é a soma da contribuição de cada combustível.

A exergia associada ao vapor que acompanha os gases de combustão apresenta a parcela química, a parcela mecânica pela diferença de pressão, e a parcela térmica devido à diferença de temperatura na entrada e na saída do processo. Desta forma, as contribuições química e física são dadas, respectivamente, pelo último termo da Equação (91) e pela Equação (98).

A exergia térmica transferida dos gases de combustão para o ar renovado no interior do galpão na temperatura de ZCT das aves apresenta certa quantidade de energia útil, sendo calculado pelo primeiro termo da Equação (37).

O balanço global de exergia no VC superior da Figura 22 indica a exergia destruída no processo de combustão. A partir do balanço de exergia mostrado na Equação (37) e considerando regime permanente, a exergia destruída no processo foi calculada pela Equação (99).

$$B_{glp} + B_l + B_{ae} + B_{ve} = B_{vs} + B_{gc} + B_{Q_{comb}} + B_d \quad (99)$$

A exergia útil é obtida do GLP (B_{13}), da lenha (B_{14-15}) e do vapor contido no ar úmido (B_{57}), sendo que, para o ar seco tomado como mistura de gases ideais em

equilíbrio com o meio (B_{16-17}), a exergia é nula. Na saída do processo, parte da exergia é associada ao vapor (B_{59}), aos gases de combustão (B_{24-27}) e ao calor transferido dos gases de combustão para o ar nos galpões (B_{77}). A diferença entre as exergias dos reagentes e dos produtos foi considerada destruída no processo de combustão.

Considerando um VC no ar renovado para a fase inicial, as exergias térmicas associadas ao calor transferido da combustão (B_{77}) e ao calor metabólico (B_{76}) estimadas pela Equação (94) são acrescidas da exergia elétrica (W_{73}) e das exergias associadas ao ar expirado ($B_{80-82,89}$) e ao ar renovado (B_{60-62}). Todos já quantificados nas seções anteriores. A massa de gases gerados durante o processo de formação da cama foi incorporada à água vaporizada das excretas devido à sua pequena contribuição energética. Deste modo, a exergia da água vaporizada das excretas para o ar foi quantificada com a Equação (91) completando as entradas de exergia no VC considerado.

A hipótese de desconsiderar a geração de gases na respiração e na formação da cama, incorporando suas massas aos fluxos de maior destaque se evidenciou após os balanços de massa e energia. A entalpia do CO_2 gerado pela respiração (h_{89}) correspondeu a menos de 5% da entalpia do ar expirado (h_{80-82}) e a entalpia dos gases gerados no processo de formação da cama ($h_{92,110}$) correspondeu a 0,7% da entalpia do vapor (h_{115}), indicando que a simplificação não afeta significativamente a análise exergética do processo.

Na saída do processo, o ar úmido tem sua entalpia aumentada com o calor absorvido e apresenta maior exergia útil que o ar de entrada (em equilíbrio termodinâmico com o ambiente). A Equação (100) permitiu realizar um balanço no processo de aquecimento do ar para a fase inicial do ciclo.

$$B_d = B_{Qcomb} + B_{ar_{exp}} + B_{Qf} + B_{ar_e} + B_{el} + B_v - B_{ar_s} \quad (100)$$

Os termos positivos são as exergias de entrada, associadas ao calor gerado na combustão (B_{77}), ao ar expirado pelas aves ($B_{80-82,89}$), ao calor gerado pelo metabolismo (B_{76}), ao ar renovado na fase inicial (B_{60-62}), à energia elétrica (B_{73}) e ao vapor gerado na formação da cama ($B_{92,110,115}$). O termo negativo constitui-se da exergia associada ao ar úmido de saída ($B_{95,99,96-98}$).

3.5.4 Cálculo da exergia destruída para ambiência na fase de crescimento

Adequar o ar renovado às condições ideais de conforto térmico das aves durante a fase de crescimento pressupõe extrair o calor gerado pelo seu metabolismo de tal forma que a entalpia do ar de saída seja superior à entalpia de entrada. Novamente, o ar considerado na ventilação é composto pelo fluxo expirado pelas aves ($m_{83-85,90}$), pelo ar ambiente estimado para a ventilação (m_{60-62}), a água vaporizada das excretas (m_{116}) e os gases gerados pelas excretas na formação da cama ($m_{93,111}$), os quais apresentam valores insignificantes para o balanço realizado.

A exergia associada ao calor gerado pelas aves (B_{78}) e calculada pela Equação (94) foi adicionada ao trabalho elétrico (W_{74}) completando as demais exergias de fluxo como entradas do balanço. De acordo com a hipótese lançada anteriormente, a massa dos gases gerados foi incorporada ao vapor, uma vez que sua entalpia ($H_{93,111}$) representa cerca de 0,01% da entalpia da água vaporizada das excretas (H_{116}).

Na saída do processo, o calor transferido eleva a entalpia do ar úmido, aumentando a temperatura e o desequilíbrio térmico com o ambiente. A Equação (101) permite realizar um balanço no processo em torno da fase de crescimento.

$$B_d = B_v + B_{Qf} + B_{ar_{exp}} + B_{ar_e} + B_{el} - B_{ar_s} \quad (101)$$

Os termos positivos da equação são as exergias de entrada, associadas à água vaporizada ($B_{93,111,116}$), ao calor gerado pelas aves (B_{78}), ao ar expirado pelas aves ($B_{83-85,90}$), ao ar renovado na fase de crescimento (B_{63-65}) e à energia elétrica (B_{74}). O termo negativo refere-se à exergia associada ao ar úmido de saída (B_{101}).

3.5.5 Cálculo da exergia destruída no arrefecimento na fase final

As exergias específicas associadas com entradas e saídas do VC tomado em torno do processo foram calculadas para cada elemento e um balanço de exergia foi proposto para quantificar sua destruição durante a ventilação e o resfriamento evaporativo, aplicados na fase final do ciclo.

A exergia específica do ar úmido provindo da respiração (b_{86}) pode ser determinada considerando-se o ar seco e o vapor d'água como uma mistura de gases ideais através da Equação (92), nas condições de (P_0, w_i, T_{exp}). Para o ar úmido utilizado como ar renovado, o procedimento de cálculo é idêntico, mas considerando as condições do ambiente de referência (P_0, w_i, T_i). Neste caso, uma vez que o equilíbrio termodinâmico já está estabelecido, a energia útil deste fluxo deve retornar com valor nulo.

A exergia da água líquida ($b_{8,9}$), cujos fluxos são visualizados na Figura (22), foi proposta por Wepfer *et al.* (1979), já apresentada na Equação (91), mas, para o caso especial quando a água líquida já está em equilíbrio com o ambiente, ela pode ser obtida apenas pelo último termo da equação, como mencionado em trabalhos prévios (FARMAHINI-FARAHANI; DELFANI; ESMAEELIAN, 2012).

Os procedimentos de cálculo da exergia térmica (b_{79}) e da exergia elétrica (b_{75}) introduzidas no VC já foram elucidados em tópicos anteriores. Um balanço global de exergia indica a exergia destruída no processo de arrefecimento considerando a ventilação e introdução de água líquida pelos sistemas de resfriamento evaporativo.

Considerando o processo em regime permanente sem nenhum trabalho realizado pelas fronteiras do VC, a exergia destruída no processo é dada pela Equação (102).

$$B_d = B_v + B_{ar_{exp}} + B_{ar_e} + B_w + B_{Qf} + B_{el} - B_{ar_s} \quad (102)$$

Os termos positivos indicam as exergias entrando no VC associadas aos fluxos de água vaporizada das excretas (b_{117}), do ar expirado pelas aves ($b_{86-88,91}$), do ar utilizado na ventilação (b_{66-68}) e da água líquida introduzida pelo sistema de resfriamento evaporativo (b_{8-9}). Somam-se a eles a exergia térmica do calor metabólico (b_{79}) e a exergia elétrica introduzida (b_{75}). O termo negativo compreende a exergia que sai do VC junto ao ar úmido, que eleva sua umidade e exergia comparativamente ao ar de entrada no processo.

3.5.6 Estimativa da exergia associada aos produtos e rejeitos

Considerando o ciclo completo, a exergia associada aos frangos e às carcaças foi discutida na seção 3.5.2. A disponibilidade energética associada à fração seca da cama dos frangos pode ser encontrada pelo mesmo método através das Equações (34), (36) e (91) e considerando o valor do PCI já apresentado na Tabela 17.

Adicionalmente, com os mesmos valores coletados, foi possível estimar o coeficiente exergético e a exergia química, respectivamente com as Equações (34) e (36). Os valores médios estimados foram 1,06 para o coeficiente exergético e 15241 kJ/kg para a exergia química da fração seca compondo a cama residual.

A exergia do fluxo de ar úmido saindo do VC foi calculada como uma mistura de gases perfeitos, composta de ar seco e vapor de água, de acordo com a equação (92), citada por Bejan (2006), e incorporando os gases gerados no ciclo.

Quantificadas todas as entradas e saídas do processo, foi possível encontrar a exergia dissipada em todo o ciclo para diferentes configurações construtivas ou formas de manejo. Esta exergia difere-se da soma das exergias dissipadas nos VC internos, pois existem outros processos de dissipação que não foram tomados como análise no interior do VC global.

Ao fim de todo este procedimento, foi possível estimar o rendimento energético e exergético, para o sistema de produção intensiva de frangos de corte. Apesar de não considerar o bem-estar animal nas variáveis, ele pode ser utilizado no sentido de comparar diferentes formas de manejo, microclimas e configurações construtivo-tecnológicas. Para este estudo, o uso das Equações (22) e (38) permitiram indicar tais coeficientes, como mostrados nas Equações (103) e (104).

$$n_{en} = \frac{m_f PCI_f}{H_{abs} + H_p + H_{rac} + H_w + H_{el} + H_{glp} + H_l} \quad (103)$$

$$n_b = \frac{B_f}{B_{abs} + B_p + B_{rac} + B_w + B_{el} + B_{glp} + B_l} \quad (104)$$

Em relação ao observado na Figura 22, a energia e exergia associadas à CTR e ao ar úmido renovado não foram consideradas como insumos para o cálculo dos rendimentos, devido à elevada contribuição energética quando comparado aos demais elementos, tornando-os insignificantes na análise.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos com o modelo proposto na seção 3 e as comparações com estudos experimentais previamente realizados. O modelo desenvolvido permite alterar os dados de entrada adequando-se a diferentes microclimas, gênero dos lotes, manejo, características construtivas e linhagens.

Diante desta gama de possibilidades, foi definido um cenário padrão para as análises do balanço de massa e energia, discutidas nos tópicos 4.1 e 4.2. Dentro das classificações propostas por Abreu e Abreu (2011), e considerando a disponibilidade de dados comparativos, optou-se em utilizar galpões convencionais/semi-climatizados com área produtiva de 1200 m² e pé direito de 4 m de altura. As condições do ambiente de referência foram mantidas constantes em ($P_0 = 101,3$ kPa, $T_0 = 20$ °C, $\phi_0 = 65$ %).

Para a discussão realizada nas seções 4.1 e 4.2, estimaram-se ciclos de 13000 aves mistas da linhagem Cobb, taxa de mortalidade de 3,5% e período de 42 dias subdivididos em três fases. Na fase inicial foi proposto o aquecimento à lenha utilizando-se fomalhas e, na fase final, o resfriamento evaporativo utilizando 200 aspersores de média pressão. Ventilação positiva com 16 ventiladores, auxiliados pelo manejo de cortinas foi proposta em todo o ciclo. Nestas condições, o modelo permitiu estimar entradas e saídas de massa e energia e, através dos balanços realizados, as contribuições de cada insumo, produto e rejeito no processo produtivo.

Na seção 4.3 apresenta-se um estudo mais detalhado em relação à ambiência na fase inicial do ciclo. Realizou-se a comparação dos modelos mais utilizados para aquecimento considerando a demanda para diferentes microclimas. Estimou-se a geração de calor, de gases de efeito estufa, o balanço de energia e a exergia destruída para os modelos mais utilizados de aquecimento: aquecimento indireto com uso de fomalhas e, aquecimento direto com uso de campânulas a gás.

Na seção 4.4 a análise foi realizada considerando o resfriamento evaporativo para arrefecimento durante a fase final do ciclo. Diferentes condições de temperatura e umidade foram propostas para o ambiente de referência, avaliando as condições do ambiente interno dos galpões. Obteve-se uma estimativa para a quantidade de água utilizada no processo e a exergia destruída em cada condição proposta.

No tópico 4.5, os modelos de galpão convencional e climatizado foram comparados utilizando-se da avaliação exergética a partir da variação de parâmetros como o número de aves criadas, densidade de alojamento, período do ciclo, linhagens e gênero das aves. Foram acrescentadas proposições e adequações ao ciclo produtivo na seção 4.6, seguida das conclusões e proposição de trabalhos futuros na seção 5.

4.1 BALANÇOS DE MASSA PARA O CICLO PRODUTIVO

O método desenvolvido para previsão das entradas e saídas de massa do processo produtivo permitiu encontrar as massas dos produtos e rejeitos e compará-las com dados colhidos na literatura. Definido o cenário padrão e considerando uma camada inicial de 0,1 m de material absorvente (55 kg/m^3), os galpões comerciais necessitam a introdução de, aproximadamente, 6600 kg de maravalha no início do ciclo. Este valor é dependente do tamanho do galpão, da espessura adotada para a cama e da densidade média do insumo. Apesar da densidade adotada ser inferior às apresentadas por Ribeiro e Machado (2005) com 130 kg/m^3 e Bratti (2013) com 85 kg/m^3 , o valor concorda com o trabalho de Moulin et al. (2011) e com valores divulgados atualmente por empresas comercializadoras do insumo na região sul do Brasil (Ex. Maravalhas Rossa). Neste contexto, a massa obtida pelo modelo foi menor do que a encontrada por Santos e Lucas Junior (2004) com 13443 kg, na qual a umidade apresentou-se fora dos padrões indicados para o conforto das aves (aproximadamente 48% em base úmida).

Atualmente, a reposição ou não de maravalha nova a cada ciclo depende da orientação das empresas integradoras, mas, neste trabalho, concordou-se na adição de 10% da massa inicial na região da pinteira a cada novo ciclo. Isto resulta em quantidades crescentes de material absorvente introduzido, que atinge 9900 kg no sexto lote e cuja demanda proposta pode variar de 0,51 kg/ave no primeiro lote até 0,76 kg/ave para esta quantidade de reusos, quando aplicada em densidade de 10,8 aves/m².

Dependendo do mercado consumidor, os ciclos produtivos podem ser menores do que o adotado. Na produção de frangos do tipo “griller”, no qual a densidade pode se elevar para até 18 a 20 aves/m² e apresenta a inserção de tecnologias apropriadas para o controle das condições de conforto, os lotes podem reduzir seu

ciclo para 30 dias e as agroindústrias podem indicar até 16 ciclos de produção sobre a mesma cama.

Do ponto de vista econômico, o reuso é importante para reduzir os gastos com o insumo, uma vez que ele é de inteira responsabilidade do avicultor integrado (PAGANINI, 2004). Do ponto de vista sanitário, foram comprovados benefícios no desempenho dos lotes com a reutilização, seguindo normas corretas de sanidade e sem a inserção de maravalha na região da pinteira a cada ciclo (SANTOS; LUCAS JR; SAKOMURA, 2005).

Em relação ao crescimento dos frangos, apesar de indicado o uso da curva de Gompertz para descrever a conversão em proteína e deposição de nutrientes (FIALHO, 2000), a opção feita pela CA condicionou os padrões de crescimento das aves ao consumo de ração demonstrado nos gráficos da Figura 18 e permite atualizar o desempenho observado no melhoramento genético das linhagens.

Os padrões de consumo e CA dos frangos para cada linhagem e gênero determinam os resultados para a massa de frangos e rejeitos do processo, de acordo com a Tabela 10. Assim, as equações propostas para estimar a massa final dos frangos, a demanda de ração e a conversão alimentar foram adequadas e descrevem bem os resultados de acordo com as tabelas de desempenho publicadas.

Para o cenário proposto no início da seção 4, a comparação entre as linhagens e gênero analisados permitiu a obtenção da massa final do frango, do consumo de ração, do consumo de água e da CA dentro da ZCT, retornando os dados apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 - Resultados fornecidos pelo modelo considerando o cenário proposto (10,8 aves/m², mortalidade de 3,5%, ciclo de 42 dias, ambiente de referência a P₀, T₀ e ϕ_0).

	<i>Cobb-M</i>	<i>Cobb-MF</i>	<i>Cobb-F</i>	<i>Ross-M</i>	<i>Ross-MF</i>	<i>Ross-F</i>
<i>m_f</i> (kg)	2,872	2,723	2,496	2,779	2,684	2,585
<i>m_{rac}</i> (kg/ave)	4,961	4,648	4,280	5,037	4,735	4,425
<i>m_w</i> (kg/ave)	10,100	9,461	8,711	10,250	9,638	9,007
CA (kg/kg)	1,713	1,696	1,708	1,800	1,754	1,704
<i>m_{Trac}</i> (kg/ciclo)	62923	58971	54310	63928	60105	56181
<i>m_{Tw}</i> (kg/ciclo)	128067	120024	110538	130112	122331	114345

M – lotes machos, *MF* – lotes mistos, *F* – lotes de fêmeas, *Trac/Tw* – massa total para o ciclo

O consumo total de ração e água para o ciclo depende da quantidade de aves vivas a cada dia. À medida que o consumo individual aumenta com o crescimento dos frangos, a quantidade de frangos consumidores diminui devido à taxa de

mortalidade. Estudos de Funck e Fonseca (2008) demonstraram taxas próximas de 4% para ciclos de 45 dias enquanto que Bueno e Rossi (2006) identificaram, para o mesmo tempo do ciclo, taxas próximas a 2,5%. Destes e de outros trabalhos, percebe-se grande variabilidade neste índice, a qual depende de fatores como linhagem, gênero, manejo e microclima e, principalmente, período do ciclo.

No geral, ciclos mais curtos apresentam taxas menores, que se acentuam conforme o tempo do ciclo aumenta, principalmente em locais e estações mais quentes. Diante do exposto, assumiu-se neste estudo uma taxa de mortalidade de 3,5%, como um valor bastante razoável para esta estimativa. Dos valores obtidos com o modelo, verificou-se que lotes de frangos machos consomem maior quantidade de ração comparativamente aos lotes de fêmeas, devido ao tamanho de carcaça. No entanto, a melhor CA foi demonstrada em frangos Cobb mistos.

Relações entre o consumo de água e de ração foram publicadas por Viola (2003) e Kunz e Palhares (2011), os quais assumiram padrão de crescimento linear no decorrer do ciclo, mas sem considerar a influência de variações na temperatura ambiente. O consumo de água, estimado pela Equação (47), apresentou um adicional em relação a estes estudos, que é a relação entre o consumo de água e o consumo de ração para diferentes temperaturas. O coeficiente estimado na Equação (46) pode melhorar a estimativa deste consumo por variar a relação $k = m_w/m_{rac}$, principalmente na fase final de criação e em microclimas mais quentes. Tal relação apresentou-se efetiva para valores da temperatura ambiente entre 18°C e 35°C, temperaturas que compreendem a ZCT das aves durante o ciclo.

A Figura 23 apresenta uma nova estimativa para o consumo individual de água por frangos da linhagem Cobb 500 submetidos à diferentes temperaturas em dois períodos para o ciclo produtivo.

O comportamento das curvas indica maiores consumos em ciclos mais longos, para frangos macho com crescimento quadrático em função da temperatura ambiente. Isto ocorre devido à maior eliminação de água via excretas, demandada pelo sistema termorregulador na busca do conforto térmico, principalmente na fase final. Sabe-se que, submetidas a temperaturas acima da ZCT na fase final do ciclo, as aves elevam sua frequência respiratória e o volume corrente respirado em até dez vezes, aumentando a água eliminada, também, pelo trato respiratório.

Figura 23 - Estimativa para o consumo de água por frangos da linhagem Cobb 500, em lotes de machos (M), mistos (MF) e fêmeas (F), considerando ciclos de 30 dias e de 42 dias.

Com o procedimento apresentado na Figura 21, observou-se que parte da água consumida pelas aves é eliminada através do trato respiratório e parte é vaporizada através das excretas. No primeiro caso a água líquida vaporizada foi calculada pela diferença de umidade entre a massa de ar saturado expirado (m_{70}) e a massa de ar ambiente ($\phi = 65\%$) inspirado pelas aves (m_{23}), retornando 4004 kg no ciclo. No segundo caso, o fluxo líquido (m_{71}) indica a quantidade de água consumida que não fica retida nos frangos, nas carcaças, na cama e também não é vaporizada pela respiração, retornando 95686 kg. Ao vaporizar das excretas esta quantidade incorpora-se ao ar renovado, elevando sua umidade.

O total de água vaporizada é dado pela diferença ($m_{34} - m_{23} = 99690$ kg) e aponta que, no balanço hídrico, aproximadamente 4% da água consumida é eliminada pela respiração e 96% é eliminada pelas excretas. Esta última inclui as fezes (20% a 30% da eliminação total) e a urina que é a maior responsável pela eliminação de líquidos. Toda esta água eliminada torna coerentes os valores encontrados no modelo, para a fração de água contida nas excretas ($\approx 71\%$), que concorda com outros trabalhos experimentais e com dados publicados por agências internacionais (USDA, 2008).

Fazendo-se um adendo ao cenário padrão proposto nesta seção, caso a temperatura ambiente se eleve até 35°C , o aumento da relação água/ração consumida eleva a umidade das excretas para 86,3% e torna quase insignificante a eliminação de água via trato respiratório ($< 2\%$ da eliminação total). Uma vez que estes valores absolutos podem variar com as condições externas, a Tabela 19

apresenta um possível balanço hídrico nas aves para diferentes condições de temperatura e umidade do ar respirado.

Tabela 19 - Balanço hídrico nas aves de corte, para diferentes temperaturas e umidades relativas do ar atmosférico em lotes de 42 dias com 10,8 aves/m². Em negrito o ambiente de referência proposto.

Estado do ar de entrada					Balanço de água nas aves			
ϕ_e (%)	T_e (°C)	ω_e (kg _w /kg _{ar})	m_v (kg)	k (L _w /kg _f)	$m_{w(cons)}$ (kg)	$m_{v(exp)}$ (kg)	$m_{w(exc)}$ (kg)	$m_{w(remanescente)}$ (kg)
50	20	0,00723	1496	2.039	120024	5956	95231	20334
	25	0,00988	2020	2.665	156720	6755	131978	20007
	30	0,01331	2704	3.537	207669	7660	182977	19736
	35	0,01776	3591	4.653	272779	8689	248157	19525
65	20	0,00947	1952	2.039	120024	5956	95686	20334
	25	0,01291	2639	2.665	156720	6755	132597	20007
	30	0,01741	3538	3.537	207669	7660	183811	19736
	35	0,02329	4709	4.653	272779	8689	249474	19525
80	20	0,01170	2410	2.039	120024	5956	96145	20334
	25	0,01596	3264	2.665	156720	6755	133222	20007
	30	0,02157	4383	3.537	207669	7660	184656	19736
	35	0,02891	5846	4.653	272779	8689	250412	19525

m_v = massa de vapor contido no ar atmosférico

$m_{w(cons)}$ = massa de água consumida no ciclo

$m_{v(exp)}$ = massa de vapor expirado junto ao ar saturado

$m_{w(exc)}$ = água líquida eliminada via excretas

$m_{w(remanescente)}$ = água que passa a compor frangos, carcaças e cama.

Fixando-se a umidade relativa, a elevação de temperatura do ambiente aumenta a umidade absoluta e, com ela, a massa de vapor contida no ar. Maiores temperaturas do ambiente também elevam a relação entre o consumo de água e ração além da quantidade de água líquida nas excretas. O resultado disso é uma mudança no modo com que a água eliminada sai das aves, passando de 96% para 98% via excretas e de 4% para 2% via trato respiratório, conforme a temperatura do ar se eleva. Isto se explica, pois o aumento da temperatura e umidade relativa do ar o aproxima da saturação, reduzindo a possibilidade de perda de água via respiração. Uma vez que o consumo aumenta com a temperatura ambiente, eleva o percentual eliminado via excretas.

Estes percentuais não são de alta confiabilidade, pois a comparação não prevê o aumento da frequência respiratória ou do volume de respiração corrente, com o aumento da temperatura externa, fato que elevaria a quantidade de ar respirado e o percentual de água eliminada pelo trato respiratório. Para isso, seria necessário conhecer o comportamento da respiração variando-se a temperatura.

Diferentes trabalhos buscaram obter as funções respiratórias (Kassin e Sykes, 1982) e a perda de água pela respiração e ventilação (Brackenbury et al., 1981a;

1981b; 1982), mas restritos a temperaturas fixas ou sem abranger o ciclo completo. A melhor estimativa para as funções respiratórias durante todo o ciclo foi encontrada em Nascimento et al. (2017) mas, que também considera condições fixas de temperatura e umidade relativa do ar.

Com poucos estudos dados na literatura, o modelo proposto permite estimar de que maneira a água é eliminada pelas aves submetidas à diferentes condições do ambiente e evidencia a predominância de eliminação através das excretas.

De volta ao cenário proposto, o volume de ar demandado na respiração das aves, considerou o CO₂ gerado via processo respiratório ($m_{35} = 40799 \text{ kg}$), cujo método de cálculo foi extraído do trabalho de Henn (2013) e o quociente respiratório indicado para o metabolismo basal com o valor de 0,85 (HAMIDU et al., 2007). Esta opção partiu do entendimento que, dentro da ZCT e das normas de bem estar animal, as aves devem manter-se constantemente tranquilas e com pouca movimentação no interior dos galpões.

Com isso foram estimadas as demandas de O₂ ($m_{21} = 47999 \text{ kg}$), N₂ ($m_{18} = 158004 \text{ kg}$) e vapor ($m_{23} = 1952 \text{ kg}$), nas quais o N₂ e o O₂ mantêm a proporção correta na composição do ar seco e a massa de vapor é proporcional à umidade do ar atmosférico. Como o CO₂ gerado na respiração (m_{35}) é dependente do número de aves criadas e do tempo do ciclo, a massa de ar demandado no processo sempre estará de acordo com estas variáveis para diferentes cenários propostos.

Partindo da Tabela 11 e com a estimativa da ventilação através das renovações de ar, foi possível identificar a velocidade do ar em um envelope avícola. Utilizando-se da área de secção transversal (A) e do fluxo de ar que atravessa tal área (ϕ), a velocidade média do ar foi estimada pela Equação (105).

$$\phi = Av \quad (105)$$

Foram encontrados valores de 0,20 m/s para a ventilação mínima, 0,85 m/s para a ventilação de transição e 2,0 m/s para a ventilação máxima, os quais estão muito próximos de valores indicados para conforto animal e comprovam que o número de renovações de ar proposto na Tabela 11, concorda com o praticado em campo. A ventilação é de extrema importância, uma vez que, além da renovação do ar no decorrer do ciclo, permite uma sensação térmica diferenciada.

Para o aquecimento, assumiu-se o uso de GLP e lenha, cujos valores adotados cobrem a maioria dos galpões avícolas brasileiros. A faixa estipulada para consumo de GLP (entre 400 kg e 600 kg) e de lenha (entre 2500 kg e 12000 kg) correspondeu bem ao manter a temperatura do galpão próxima da ZCT durante a fase inicial, mesmo com mudanças nas condições do ambiente. Além da maior quantidade demandada, aumento da mão de obra e menor poder calorífico, a combustão da lenha apresentou maior geração de GEE para o mesmo objetivo de aquecimento. Ainda assim, a opção por este insumo é generalizada entre os avicultores integrados, devido à facilidade de obtenção e baixo custo na extração da biomassa.

Maiores detalhes sobre o aquecimento são apresentados na seção 4.2, devido à sua importância no controle térmico para os galpões avícolas.

Na saída do processo de desenvolvimento das aves, as vazões m_{52-56} indicam a massa excretada durante o ciclo completo. O quociente da fração seca pela massa total excretada fornece MS_{exc} próxima de 0,29 (71% de umidade em base úmida). Esta situação ocorre quando as aves são criadas dentro da ZCT com $T_0 = 20^\circ\text{C}$ e, portanto, a relação k é próxima de 2. Conforme mostrado na Tabela 19, a quantidade de água nas excretas tende a se elevar em maiores temperaturas do ambiente, devido ao aumento no consumo.

A massa de carcaças estimada pelo modelo foi encontrada pela Equação (65) e apresentou valores condizentes com o encontrado pela Equação (66) tendo, aproximadamente, 50% da massa dos frangos prontos para o abate. Isto indica que a distribuição das massas provindas da ração e dos pintainhos direcionadas para os frangos e as carcaças é condizente com as massas obtidas nos experimentos.

Nos estudos prévios, as quantidades de cama gerada foram identificadas em torno de 1,4 kg (MS)/ave criada em 42 dias (Seção 2.2.10). No entanto, no modelo proposto, as entradas de ração, maravalha e pintainhos excediam as saídas de cama e geração de GEE em aproximadamente 17000 kg, apontando um valor 50% superior na geração de cama, quando comparado ao registrado de forma experimental. Diferença semelhante foi observada no balanço realizado por Santos e Lucas Junior (2004) em condições específicas.

Para que o balanço fosse condizente com a Equação (14), foi lançada a hipótese de que esta quantia possa ter sido extraída dos galpões através do sistema de ventilação na forma de particulados e sua saída foi incluída junto ao fluxo de poeira extraída (m_{58} mostrado na Tabela 10). Com sua aplicação, a Tabela 20

apresentou a massa total de cama gerada e a cama gerada por frango criado durante um ciclo de produção.

Tabela 20 - Estimativa da cama de frangos gerada em um ciclo de produção de 42 dias para as linhagens e gêneros propostos no estudo.

<i>massa (kg)</i>	<i>Cobb-M</i>	<i>Cobb-MF</i>	<i>Cobb-F</i>	<i>Ross-M</i>	<i>Ross-MF</i>	<i>Ross-F</i>
m_{Tcama}	27090	23856	20484	29035	25485	21850
$m_{camave} (MS)$	1,62	1,42	1,22	1,73	1,52	1,30
$m_{camave} (MN)$	2,12	1,87	1,61	2,27	1,99	1,71

O ponto negativo desta hipótese é que, talvez, a vegetação na saída do galpão devesse estar coberta de poeira, o que geralmente não é observado, mas deve-se considerar a extensão dos galpões e que a saída de particulados não ultrapassa 0,3kg/min, o que seria insignificante diante da massa de ar renovado no ciclo.

No entanto, uma vez que a agroindústria não tem responsabilidade sobre este insumo/rejeito e não existe controle de dados comparativos para este resíduo, a hipótese parece ser interessante, pois ajusta a massa de cama gerada aos valores obtidos experimentalmente por outros trabalhos (SANTOS, T.M.B; LUCAS JUNIOR J, 2004; FUKAYAMA, 2008).

Para o cenário proposto, e assumindo-se a massa inicial de cada pintainho no início do processo seja de 0,046 kg, os objetivos de desempenho de aves mistas da linhagem Cobb apontam uma CA de 1,7 com “peso vivo” de 2,72 kg e consumo de ração de 4,65 kg por frango em 42 dias (COBB-VANTRESS, 2012).

Com as características citadas, as massas de produtos e rejeitos do processo, propostas pelo modelo, foram apresentadas na Figura 17 com equacionamentos explicitados na Tabela 10 e solução apresentada na Tabela 21.

Os resultados mostram a elevada participação do ar úmido diante dos demais insumos, produtos e rejeitos. Desta forma, para determinar a contribuição mássica de cada entrada/saída do processo, optou-se por excluí-lo ao considerar os percentuais de participação dos elementos. Como consequência, o maior responsável pela entrada de massa no processo é a água (69,2%) seguida da ração (24,9%), do material absorvente (2,8%) e da lenha (2,8%). Em relação aos produtos e rejeitos, as principais contribuições correspondem aos GEE/particulados (39,4%), dos gases de combustão (25,6%), dos frangos (19,8%) e da cama gerada (14,2%)

Tabela 21 - Aplicação do modelo desenvolvido no cenário padrão obtendo as saídas de massa.

Entradas do ciclo de produção (kg)			Saídas do ciclo de produção (kg)		
			Carcaças (MS = 0,26)	628,1 (0,36%)*	$m_{42} = 425$ $m_{43} = 5,4$ $m_{44} = 0,8$ $m_{45} = 32,2$ $m_{46} = 164,7$
Maravalha (MS = 0,87)	6600 (2,8%)*	$m_1 = 5742$ $m_2 = 858$			$m_{47} = 1612$ $m_{48} = 10957$ $m_{49} = 271,3$ $m_{50} = 21264$ $m_{51} = 53,8$
Ração (MS = 0,87)	58971 (24,9%)*	$m_3 = 51305$ $m_4 = 7666$	Frangos (MS = 0,32)	34158 (19,8%)*	
Pintainhos (MS = 0,25)	598 (0,25%)*	$m_5 = 149,3$ $m_6 = 448,7$			
Água	163627 (69,21%)*	$m_7 = 120024$ $m_8 = 43603$ $m_9 = 0$	Cama de Frangos (MS = 0,76)	24522 (14,2%)*	$m_{52} = 6022$ $m_{53} = 40184$ $m_{54} = 94331$ $m_{55} = 94,7$ $m_{56} = 172$
Ar atmosférico ($\omega = 0,0094$)	1.433×10^8	$m_{10} = 1,34 \times 10^6$ $m_{11} = 3,30 \times 10^7$ $m_{12} = 1,09 \times 10^8$			$m_{36} = 8292$ $m_{41} = 1304$ $m_{58} = 18266$ $m_{70} = 5956$ $m_{71} = 95686$
GLP	13 (0,00%)*	$m_{13} = 13$	GEE/partículas	68153 (39,4%)*	$m_{40} = 49091$ $m_{41} = 1304$ $m_{58} = 18266$
Lenha (MS = 0,87)	6600 (2,8%)*	$m_{14} = 5742$ $m_{15} = 858$	Ar Úmido ($\omega = 0,0105$)	1.433×10^8	$m_{37} = 3,30 \times 10^7$ $m_{38} = 1,09 \times 10^8$ $m_{39} = 1,48 \times 10^6$
			Cinzas	57,42 (0,03%)*	$m_{28} = 57,42$
Percentuais desconsideram a participação do ar úmido na massa total, considerando somente os demais elementos no cômputo.			Gases de Combustão	44275 (25,6%)	$m_{24} = 3121$ $m_{25} = 1553$ $m_{26} = 31209$ $m_{27} = 10490$
			Vapor	1243 (0,72%)*	$m_{59} = 1243$
Soma dos Insumos		$1,434 \times 10^8$	Soma dos Produtos e Rejeitos		$1,434 \times 10^8$

Os dados apresentados são relativos ao cenário proposto no início deste tópico, mas o modelo desenvolvido permite modificações de modo que o balanço indique os destinos e quantidades dos produtos e rejeitos para diferentes parâmetros escolhidos.

Em relação aos gases gerados no processo, segundo Dong et. al (2006), para cada 1 kg de “peso vivo” de frango produzido são gerados de 2 kg a 2,3 kg de CO₂. Por sua vez, Calvet et. al (2011b) constataram que somente a respiração é responsável por 1,4 kg de CO₂ gerado para cada 1 kg de carne produzida.

A partir de um balanço de Carbono na cama e na respiração, o estudo de Henn (2015) gerou equações que permitem estimar tais emissões em função da massa e do período do ciclo, sendo considerado o estudo mais completo e detalhado para estas estimativas. Sua aplicação, apresentada na Tabela 21, indica através do quociente m_{CO_2}/m_f a geração de 1,44 kg de CO₂/kg de “peso vivo”.

O valor menor do que estimado por outros autores pode ser atribuído à época do ano ou ao uso de cama nova com menor atividade microbiana e menores emissões de CO₂. No entanto, verificou-se que o total do gás gerado via cama, corresponde a aproximadamente 20% da geração no ciclo produtivo, sendo o restante (80%) atribuído à respiração.

A geração de NH₃ foi estudada por Miragliotta et. al (2004) e, com as devidas adequações, a equação para sua estimativa foi proposta e apresentada na Tabela 10. Apesar da menor presença quando comparada ao CO₂, sua contribuição ao efeito estufa é 23 vezes mais agressiva. Tais valores são demonstrados na Tabela 22, na qual para o cenário analisado, o modelo indicou uma geração aproximada de 40 g/kg de peso vivo produzido em 42 dias.

Para fins comparativos, a geração de gases durante o ciclo produtivo, pode ser convertida em partes por milhão (ppm) determinando sua concentração no ar úmido de saída, obtido pelo modelo proposto.

Tabela 22 - Concentração de gases no ar úmido de saída, obtida pelo modelo desenvolvido e para o cenário proposto em um ciclo de criação. Considera apenas os gases gerados pela respiração e decomposição da cama sem contabilizar os gases de combustão.

	m _{gas} (kg)	m _{ar} (kg)	concentração (ppm ou mg/kg)
CO ₂	49091	1,434x10 ⁸	342,3
NH ₃	1304	1,434x10 ⁸	9,1

A massa de água introduzida para uso da nebulização e dos painéis evaporativos depende das condições do ar ambiente, com uso indicado na fase final do ciclo e nas horas mais quentes do dia. Uma análise mais detalhada com variações na umidade e temperatura do ambiente será apresentada com maiores detalhes na seção 4.3.

4.2 BALANÇOS DE ENERGIA PARA O CICLO PRODUTIVO

O balanço de energia foi mostrado na Figura 22, na qual o ar respirado, o calor metabólico das aves e os gases gerados no processo foram subdivididos para cada fase do ciclo produtivo. Para esta divisão, foi considerada a proporcionalidade de cada elemento com a ração consumida em cada fase do ciclo. Esta escolha é pertinente, pois todo desenvolvimento das aves (desde o consumo de água, a

geração calor metabólico, o ar respirado e a geração de GEE) está diretamente relacionado ao consumo de ração.

Comparando-se as Figuras 17 e 22, as massas de ar renovado foram subdivididas de acordo com a Tabela 13. Os fluxos de “ar expirado” ($m_{30,32,70}$) foram subdivididos nos fluxos m_{80-88} . O fluxo de CO_2 gerado na respiração (m_{35}) foi subdividido para cada fase em m_{89-91} e o calor gerado pelas aves no ciclo total foi considerado como a soma do calor trocado nas diferentes fases ($Q_{76,78,79}$).

Durante a formação da cama residual, parte da umidade das excretas é vaporizada (m_{71}) com o intuito de reduzir a umidade e empastamento da cama e, conseqüentemente, evitar lesões no peito e coxim-plantar das aves. Seu valor foi subdividido entre as fases do ciclo produtivo ($m_{115-117}$). Além disso, o mesmo procedimento foi realizado na geração de CO_2 pela decomposição microbiana da cama (m_{36}) subdividida em ($m_{110-112}$) e na geração de NH_3 pela volatilização do nitrogênio (m_{41}) subdividida em (m_{92-94}). Para o cenário padrão proposto no início do tópico 4, a Tabela 23 aponta os valores destas subdivisões.

Tabela 23 - Gases resultantes da respiração e da decomposição microbiana da cama, respectivamente para as fases inicial, de crescimento e final do ciclo produtivo.

Gerados no processo respiratório		Gerados na formação da cama	
O_2 (m_{30}) = 7200 kg	$m_{81} = 705$ kg	Vapor (m_{71}) = 95686 kg	$m_{115} = 9374$ kg
	$m_{84} = 2360$ kg		$m_{116} = 31363$ kg
	$m_{87} = 4135$ kg		$m_{117} = 54949$ kg
N_2 (m_{32}) = 158004 kg	$m_{82} = 15479$ kg	CO_2 (m_{36}) = 8292 kg	$m_{110} = 812,3$ kg
	$m_{85} = 51789$ kg		$m_{111} = 2718$ kg
	$m_{88} = 90735$ kg		$m_{112} = 4762$ kg
Vapor (m_{70}) = 5956 kg	$m_{80} = 583,5$ kg	NH_3 (m_{41}) = 1304 kg	$m_{92} = 127,8$ kg
	$m_{83} = 1952$ kg		$m_{93} = 427,4$ kg
	$m_{86} = 3420$ kg		$m_{94} = 748,9$ kg
CO_2 (m_{35}) = 40799 kg	$m_{89} = 3997$ kg		
	$m_{90} = 13373$ kg		
	$m_{91} = 23429$ kg		

A proporcionalidade em relação à ração consumida explica o aumento dos valores encontrados, respectivamente, para as fases inicial, de crescimento e final. À medida que as aves se desenvolvem, eleva-se o consumo e a quantidade de ar demandado/gases gerados na respiração, bem como a quantidade de excretas e os gases gerados delas.

Com estes pré-requisitos, VC foram tomados em torno dos processos de combustão, desenvolvimento das aves, formação da cama e ar renovado em cada fase do processo produtivo. No entanto, devido à sua importância nas

transformações energéticas ocorridas no ciclo, os processos de aquecimento na fase inicial e de arrefecimento na fase final receberão uma atenção especial nas seções 4.3 e 4.4.

Uma vez que, mudanças nas propriedades do ambiente afetam as entalpias na entrada e na saída do processo produtivo, optou-se por fixá-las em ($P_0 = 101,3$ kPa, $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $\phi_0 = 65\%$) para este tópico. Um dos motivos para isso é a comparação dos valores às planilhas termodinâmicas e a relação entre o consumo de água e ração, que permanece próxima de 2 para estas condições.

A entalpia total associada a cada elemento pode ser modificada alterando-se a massa na entrada dos processos. No entanto, a entalpia específica associada a alguns dos insumos, produtos e rejeitos pode ser considerada fixa e, neste caso, foi apresentada na Tabela 24. Para os demais elementos, a entalpia depende dos valores utilizados como parâmetros de entrada no processo, modificando-se para diferentes condições.

Valores de PCI foram obtidos da literatura ou calculados a partir da composição elementar (seção 3), já as entalpias específicas da água que acompanha as frações secas dependeram da temperatura considerada para cada insumo, produto e rejeito.

Tabela 24 - PCI e entalpias específicas associadas aos insumos, produtos e rejeitos do processo. As entalpias associadas à água líquida consideraram sua dependência com a temperatura: para a água de consumo ($T = 20^\circ\text{C}$), para os pintainhos e os frangos ($T = 41^\circ\text{C}$) e para os demais ($T=T_0$).

Insumos		Produtos e Rejeitos	
Gás GLP	$PCI_{13} = 45870$ kJ/kg	Frangos	$h_{47} = 171,7$ kJ/kg
Lenha	$PCI_{14} = 18375$ kJ/kg		$PCI_{48} = 25790$ kJ/kg
	$h_{15} = 83,83$ kJ/kg	Carcaças	$h_{42} = 83,83$ kJ/kg
Vapor	$h_{57} = 2537$ kJ/kg		$PCI_{44} = 26089$ kJ/kg
Absorvente	$PCI_1 = 18518$ kJ/kg	Cama Residual	$h_{113} = 83,83$ kJ/kg
	$h_2 = 83,83$ kJ/kg		$PCI_{114} = 15241$ kJ/kg
Pintainhos	$PCI_5 = 21947$ kJ/kg	Desenvolvimento das Aves	
	$h_6 = 171,7$ kJ/kg	"Ar" expirado e CO_2	$h_{80,83,86} = 105,1$ kJ/kg
Ração	$PCI_3 = 16497$ kJ/kg	gerado	$h_{89-91} = 25,17$ kJ/kg
	$h_4 = 83,83$ kJ/kg	Formação da Cama de Frangos	
	$h_7 = 83,83$ kJ/kg	Excretas	$h_{52} = 171,7$ kJ/kg
Água	$h_8 = 83,83$ kJ/kg		$PCI_{53} = 12280$ kJ/kg
	$h_9 = 83,83$ kJ/kg	NH_3 gerado	$h_{92-94} = 59,06$ kJ/kg
	$h_{23} = 44,12$ kJ/kg	CO_2 gerado	$h_{110-112} = 21,78$ kJ/kg
Ar atmosférico	$h_{60,63,66} = 44,12$ kJ/kg	Vapor	$h_{115-117} = 2550$ kJ/kg

A lenha, o material absorvente, a ração, e o ar atmosférico que entram, bem como as carcaças e a cama residual que saem foram considerados nas condições do ambiente (P_0 , T_0). A água utilizada para o consumo e resfriamento evaporativo foi

considerada no estado (P_0 , $T=20^\circ\text{C}$) como indicado para melhor condição de fornecimento às aves.

As entalpias da parte líquida dos pintainhos, dos frangos e das excretas apresentam valores mais elevados, uma vez que a temperatura corporal das aves foi fixada em 41°C . As entalpias do “ar” expirado pelas aves e do CO_2 gerado na respiração seguem os padrões de temperatura mostrados na Figura 20. Os gases e vapor gerados na formação da cama apresentam-se na temperatura média da cama, conforme trabalho de Miragliotta et. al (2004).

A CTR calculada pelas Equações (9-10, 74-75), para as mesmas condições do ambiente, retornou um valor de $433,4 \text{ W/m}^2$ e $1,89 \times 10^9 \text{ kJ}$ para o ciclo de 42 dias. No entanto, para coerência do balanço de energia em torno do desenvolvimento das aves com a primeira lei da termodinâmica, para o cenário proposto, as aves devem absorver aproximadamente 40% desta energia radiante, transferindo-a ao ar na forma de calor. Considerou-se que o restante da CTR foi absorvida pelas paredes e telhado do galpão avícola e transferida para fora do VC na forma de calor, propiciando o balanço energético global do processo produtivo.

Considerando galpões convencionais, a energia elétrica demandada para todo o ciclo foi estimada em 2517 kWh ($0,19 \text{ kWh/ave}$), valor condizente com outros trabalhos para galpões desta grandeza, como em Silva et al. (2011), Bueno e Rossi (2006) e Ferreira e Turco (2003). A média de consumo de energia elétrica em aviários convencionais, obtida no Brasil, a partir de estudos em cada estado brasileiro, indica 2300 kWh por lote criado (MIELE et al., 2010). No entanto, há de se considerar que parte desta energia deva ser dissipada de acordo com o rendimento dos equipamentos elétricos, sendo disponibilizada apenas em parte para o processo.

Na saída do processo de desenvolvimento a mistura expirada pelas aves foi considerada hipoteticamente como “ar úmido”. Conforme estimado por Nascimento (2015) e mostrado na Figura 20, esta entalpia é dependente da temperatura do meio, apresentando-se constante para uma determinada condição externa, conforme visto no lado direito da Tabela 24.

Segundo Abreu et al. (2012), é pela cloaca que grande parte do calor metabólico é perdido via fezes e urina, mas também através das partes com menos empenamento como as patas, cristas e asas. O modelo desenvolvido identificou que, do calor gerado ($7,6 \times 10^8 \text{ kJ}$), uma pequena parte é efetivamente perdida via

respiração (1×10^7 kJ) ou excretas ($1,4 \times 10^7$ kJ), sendo mais significativa a transferência de calor para o meio através das partes empenadas e não empenadas e na realização de trabalho na própria ave ($7,4 \times 10^8$ kJ).

Para o ar renovado na fase intermediária do ciclo, a hipótese é que não há necessidade de aquecimento ou arrefecimento para atingir as condições de conforto das aves. Desta forma, o balanço realizado através da Equação (85) permitiu encontrar a temperatura do ar no galpão aproximadamente 5°C acima da temperatura ambiente, como resultado do calor metabólico gerado pelas aves (que acentua esta diferença) e da vaporização da água líquida eliminada pelas excretas (que reduz esta diferença). Esta elevação na temperatura, geralmente é compensada pela velocidade do ar promovida pelos ventiladores ou exaustores em um efeito chamado “*Wind Chill*”.

A Tabela 25 mostra as contribuições energéticas dos insumos, produtos e rejeitos do ciclo total para as entradas e saídas estimadas na Figura 22, excluindo-se as contribuições do ar e CTR. Caso eles fossem incluídos, a soma de entradas e saídas energéticas da tabela coincidiria, mas, devido à diferença de magnitudes, tornariam insignificantes as contribuições dos demais elementos.

Tabela 25 - Contribuições energéticas dos principais insumos, produtos e rejeitos para o processo produtivo em um ciclo de 42 dias, utilizando aves mistas da linhagem Cobb e aquecimento à lenha.

<i>Insumos</i>			<i>Produtos e Rejeitos</i>		
<i>Maravalha</i>	$1,06 \times 10^8$ kJ	9,71%	<i>Frangos</i>	$2,88 \times 10^8$ kJ	33,22%
<i>Ração</i>	$8,47 \times 10^8$ kJ	77,70%	<i>Carcaças</i>	$4,37 \times 10^6$ kJ	0,50%
<i>Pintainhos</i>	$3,28 \times 10^6$ kJ	0,30%	<i>Cama Residual</i>	$2,78 \times 10^8$ kJ	32,06%
<i>Água de Consumo</i>	$1,00 \times 10^7$ kJ	0,92%	<i>CO₂</i>	$8,89 \times 10^5$ kJ	0,10%
<i>Energia Elétrica</i>	$9,06 \times 10^6$ kJ	0,83%	<i>NH₃</i>	$6,49 \times 10^4$ kJ	0,01%
<i>Água Arrefecimento</i>	$1,15 \times 10^7$ kJ	1,06%	<i>Gases de Combustão</i>	$1,49 \times 10^7$ kJ	1,72%
<i>GLP</i>	$5,90 \times 10^5$ kJ	0,06%	<i>Vapor</i>	$3,82 \times 10^6$ kJ	0,44%
<i>Lenha</i>	$1,05 \times 10^8$ kJ	9,63%	<i>Particulados</i>	$2,77 \times 10^8$ kJ	31,95%
<i>Total</i>	$1,09 \times 10^9$ kJ	100%	<i>Total</i>	$8,67 \times 10^8$ kJ	100%

Como a umidade e a temperatura do ar na saída são maiores que na entrada do VC, incorporando toda água líquida vaporizada, o maior valor da entalpia do ar na saída do processo equilibra a diferença constatada nos totais da tabela. De qualquer modo, os percentuais apresentados permitem a comparação das contribuições energéticas de cada insumo, produto e rejeito citado, sobre os quais pode haver algum tipo de controle através do manejo.

Na entrada do ciclo, a maior contribuição energética é dada pela inserção da ração (77,7%), seguida pelo material absorvente (9,7%), concordando com os resultados obtidos por Santos e Lucas Junior (2004), os quais também convergem para a contribuição energética dos pintainhos (0,3%). Houve diferenças nos valores obtidos para a lenha e o GLP devido à diferença no modelo de aquecimento adotado nas pesquisas. A consideração da entalpia da água no presente trabalho, também diferenciou os percentuais encontrados para a contribuição deste insumo, uma vez que foi desprezada no trabalho de Santos e Lucas Junior (2004).

De acordo com Baxevanou et al. (2017), a demanda de energia elétrica corresponde a um pequeno percentual dos custos de produção, elevando-se com nível de automação e mecanização. Sua contribuição energética, encontrada para o processo produtivo, corresponde a 0,8% da demanda energética do ciclo. Este dado foi encontrado também no trabalho de Santos e Lucas Junior (2004), apesar de utilizarem métodos diferentes para a quantificação.

Nesta perspectiva, as maiores contribuições energéticas para o ciclo produtivo são melhor identificadas através do diagrama de Sankey, apresentado na Figura 24.

Figura 24 - Contribuições energéticas dos insumos, produtos e rejeitos do processo produtivo, considerando o cenário padrão adotado para galpões convencionais.

Na saída do processo, percebe-se um equilíbrio entre a energia associada aos frangos produzidos (33,2%) e os rejeitos de cama (32%), o que a torna o mais importante e significativo rejeito do processo produtivo. A hipótese lançada previamente em relação à extração de partículas junto ao ar, pelo sistema de ventilação, dificultou a análise do balanço de energia, uma vez que, retirando parte da massa de cama residual tivemos que contabilizá-la à parte no balanço de

energia. Por fazer parte do processo de geração da cama, seu PCI foi considerado o mesmo daquele utilizado para a cama residual.

Segundo Abreu e Abreu (2011), cerca de 80% da energia metabolizável ingerida é utilizada para manutenção da homeotermia e apenas 20% é utilizada para produção. Dados semelhantes foram apresentados no trabalho de Sakomura e Rostagno (2007) de acordo com a Figura 7. Esta informação converge aos valores obtidos pelo modelo desenvolvido quando mostra que a energia bruta associada aos frangos na saída do processo representa aproximadamente 30% da energia bruta ingerida pelas aves através da ração e da água de consumo.

A eficiência energética calculada para o ciclo total foi estimada a partir da Equação (22). De acordo com as considerações propostas e o cenário indicado no início deste capítulo, a eficiência energética foi de 3,12% ao assumir os frangos como produtos, e todos os insumos vistos na Figura 22, incluindo a entalpia do ar e o calor absorvido da CTR. No entanto, se o ar úmido e a CTR forem excluídos dos insumos, este rendimento global assume o valor de 26,72%, de acordo com a Equação (103). Este é considerado mais coerente, uma vez que a entrada destes insumos pode ser controlada através do manejo e se aproxima do valor encontrado no trabalho realizado por Santos e Lucas Junior (2004), relatando 28%.

O avanço deste trabalho é estar baseado em um estudo mais detalhado de balanços de massa e energia, mesmo que considerando somente os insumos e produtos diretos ao processo produtivo.

Com tudo isso, procurou-se apresentar, em termos gerais, o balanço de energia encontrado para o ciclo produtivo, restrito ao processo que ocorre nas granjas e para um cenário bastante amplo. Muitas hipóteses precisam ser lançadas para se obter uma padronização e tentar certa previsibilidade. A maior dificuldade está relacionada às grandes variações de clima, manejo e características construtivas. No entanto, os dados lançados podem servir de parâmetros comparativos e os resultados obtidos serão úteis para trabalhos futuros.

4.3 AVALIAÇÃO EXERGÉTICA NO AQUECIMENTO DOS AVIÁRIOS

Foram analisados dois sistemas de aquecimento para os galpões comerciais de aves de corte que, juntos, abrangem a maioria dos sistemas de aquecimento para este sistema produtivo. A forma mais difundida no contexto brasileiro considera o aquecimento indireto a partir da combustão da lenha, por ter baixo custo e boa

disponibilidade nas propriedades rurais. Outro modelo é o aquecimento direto e mais localizado a partir de campânulas a gás e utilizando o GLP como insumo. Uma vez que em todo sistema de integração brasileiro as adequações dos galpões são atribuídas ao avicultor integrado, esse modelo é menos difundido quando comparado ao primeiro, devido ao elevado custo de implantação/operação.

Apesar de campânulas elétricas terem sido utilizadas durante anos, principalmente em microclimas de menor temperatura média, esta possibilidade não foi considerada no estudo, uma vez que as lâmpadas incandescentes estão fora do mercado brasileiro por sua grande conversão em calor, conforme portaria interministerial 1007 de 2010. Além disso, com a ausência de uma avaliação financeira, o uso de Gás Natural foi assumido como semelhante ao GLP com valores próximos de PCI.

A partir das reações de combustão apresentadas nas Equações (59) e (60) para a combustão do GLP e da lenha, a Tabela 26 apresenta as quantidades demandadas de reagentes e produtos em base mássica.

Tabela 26 - Resultados do balanço de massa e comparação entre os combustíveis amplamente utilizados no aquecimento dos galpões avícolas brasileiros. Faixa utilizada para a demanda térmica nos diferentes tamanhos de galpões com a) GLP: 400kg a 600kg e b) Lenha: 2500 kg a 12000 kg.

<i>Insumo</i>		<i>GLP (1 kg)</i>	<i>Lenha (1 kg)</i>	<i>GLP (1 ciclo)</i>	<i>Lenha (1 ciclo)</i>
<i>Reagentes</i>	O_2	3,78 kg	1,64 kg	1512 kg a 2268 kg	4100 kg a 19680 kg
	N_2	12,43 kg	5,407 kg	4972 kg a 7458 kg	13518 kg a 64884 kg
<i>Produtos</i>	CO_2	3,03 kg	1,82 kg	1212 kg a 1818 kg	4550 kg a 21840 kg
	$H_2O_{(g)}$	1,57 kg	0,54 kg	628 kg a 942 kg	1350 kg a 6480 kg
	O_2	0,181 kg	0,272 kg	72 kg a 109 kg	680 kg a 3264 kg
	N_2	12,43 kg	5,407 kg	4972 kg a 7458 kg	13518 kg a 64884 kg

A faixa de valores para a massa foi estimada a partir da literatura, na intenção de abranger as demandas para maioria dos estados brasileiros. Foram consideradas as faixas de valores de 2500 kg a 12000 kg para uso de lenha e 400 kg a 600 kg para uso de GLP, dependendo do microclima e da tecnologia implantada, conforme publicado por Miele et al. (2010).

No processo de combustão, um parâmetro frequentemente utilizado é a quantidade de ar necessária para a combustão completa. Neste sentido, a demanda na combustão da lenha é menor do que na combustão do GLP devido à composição elementar dos combustíveis. No entanto, para o ciclo completo, a combustão da

lenha demanda maior quantidade de ar em relação ao GLP, devido à massa utilizada para o mesmo objetivo fim: o aquecimento dos frangos.

O mesmo ocorre com as emissões de CO₂, indicando que o uso da lenha causa um maior impacto ambiental em cada ciclo de criação, quando comparado ao uso do GLP. Desta forma, do ponto de vista ambiental (emissão de poluentes e degradação do ambiente), o uso do GLP apresenta-se menos agressivo ao ambiente apesar de originar de fonte não renovável.

Considerando o balanço de energia apresentado na Figura 22 para o processo de aquecimento, percebe-se que o calor metabólico gerado pelas aves ($Q_{76,78,79}$) deve ser suplementado pelo calor adicional gerado pela combustão do GLP ou da lenha (Q_{77}), uma vez que não é suficiente para manter as aves dentro da ZCT nas duas primeiras semanas de vida.

A entalpia de combustão do GLP foi calculada utilizando-se a entalpia de formação dos produtos e reagentes obtida em Moran e Shapiro (2011) com os valores de $\bar{h}_{f_{H_2O}}^{\circ} = -241,820 \text{ kJ/kmol}$, $\bar{h}_{f_{CO_2}}^{\circ} = -393,520 \text{ kJ/kmol}$, $\bar{h}_{f_{C_4H_{10}}}^{\circ} = -126,150 \text{ kJ/kmol}$ e $\bar{h}_{f_{C_3H_8}}^{\circ} = -103,850 \text{ kJ/kmol}$ e os elementos estáveis no ambiente, como exemplo o N₂ e O₂ considerados com entalpia de formação nula.

Considerando que a entalpia de uma mistura de gases ideais em base mássica, consiste na adição das frações molares de cada elemento constituinte, conforme Equação (81), o valor da entalpia para esta composição foi estimado em $h_{glp} = 45870 \text{ kJ/kg}$.

Em relação à composição elementar usada para a biomassa lenhosa (Tabela 15), os valores utilizados indicam, pela aplicação das Equações (19) e (21), um valor de $PCI_l = 18375 \text{ kJ/kg}$. Além disso, o cálculo do balanço de energia prevê a estimativa dos calores específicos da lenha, do GLP e dos gases de combustão, cujo procedimento de cálculo foi apresentado em detalhes na Tabela 16.

As frações molares de cada produto gerado na combustão do GLP e da lenha e o calor específico entre a temperatura ambiente T_0 e a temperatura de saída dos gases de combustão T_{gc} foram estimados para cada componente do gás. Com a escolha de diferentes quantidades de GLP, lenha e ar o procedimento de cálculo do poder calorífico dos gases de combustão (Cp_{gc}) foi mostrado na parte inferior da Tabela 16 e englobam a faixa de valores entre 1,061 kJ/kgK a 1,064 kJ/kgK, respectivamente para aquecimento com GLP e lenha.

A Tabela 27 sintetiza os valores das entalpias no balanço do VC para a combustão. Foram consideradas as entradas de combustível junto à água líquida contida na biomassa lenhosa e ao vapor de água contido no ar. Na saída, a energia se mantém nos gases de combustão, no vapor d'água proveniente da umidade da lenha e na energia térmica fornecida para os aviários a partir da reação de combustão.

Tabela 27 - Balanço de Energia para a faixa de consumo estimada na promoção do aquecimento.

	Mínimo Consumo Estimado				Máximo Consumo Estimado			
	Entradas	H (kJ)	Saídas	H (kJ)	Entradas	H (kJ)	Saídas	H (kJ)
Sistema a gás GLP	GLP	$1,83 \times 10^7$	Gases	$2,14 \times 10^6$	GLP	$2,75 \times 10^7$	Gases	$3,22 \times 10^6$
	Lenha	-	Q_{glp}	$1,62 \times 10^7$	Lenha	-	Q_{glp}	$2,42 \times 10^7$
	$H_2O_{(l)}$	-	$H_2O_{(v)}$	$1,89 \times 10^5$	$H_2O_{(l)}$	-	$H_2O_{(v)}$	$2,83 \times 10^5$
	$H_2O_{(v)}$	$1,56 \times 10^5$	Soma	$1,85 \times 10^7$	$H_2O_{(v)}$	$2,33 \times 10^5$	Soma	$2,77 \times 10^7$
Sistema com fornalhas à Lenha	GLP	$5,96 \times 10^5$	Gases	$5,38 \times 10^6$	GLP	$5,96 \times 10^5$	Gases	$2,56 \times 10^7$
	Lenha	$4,00 \times 10^7$	Q_l	$3,42 \times 10^7$	Lenha	$1,92 \times 10^8$	Q_l	$1,62 \times 10^8$
	$H_2O_{(l)}$	$2,73 \times 10^4$	$H_2O_{(v)}$	$1,45 \times 10^6$	$H_2O_{(l)}$	$1,31 \times 10^5$	$H_2O_{(v)}$	$6,95 \times 10^6$
	$H_2O_{(v)}$	$3,73 \times 10^5$	Soma	$4,10 \times 10^7$	$H_2O_{(v)}$	$1,77 \times 10^6$	Soma	$1,94 \times 10^8$

(l) estado líquido, (v) estado de vapor

A parte superior da tabela admite o uso exclusivo de GLP para o aquecimento e limpeza seca. Na parte inferior, assumiu-se que o aquecimento ocorre com queima de lenha, utilizando-se do GLP somente para a limpeza seca com vassoura de fogo. Esta energia térmica gerada da combustão é adicionada ao calor metabólico das aves, causando o aumento da entalpia do ar úmido na saída do galpão.

Com base no diagrama mostrado na parte superior da Figura 22, foi calculada a exergia associada a cada componente de entrada e saída do processo de combustão. Uma vez que os reagentes entram em condições do ambiente, a possibilidade de obtenção de trabalho útil termomecânico é cancelada, a exergia total de cada componente torna-se a exergia química. Assumiu-se que os produtos da combustão saem do VC com temperatura $T_{gc} = 300^\circ\text{C}$, apresentando contribuições físicas e químicas em sua energia útil.

Aplicando dados extraídos de Szargut, Morris e Steward (1988) na Equação (97), a exergia específica associada ao GLP foi calculada e apresenta o valor de 48386 kJ/kg. Também, a exergia associada com a lenha foi calculada pelas Equações (34) e (36), encontrando-se o valor de 19897 kJ/kg. Neste caso, o coeficiente de correlação exergetico ($\beta = 1,083$) apresentou-se abaixo do valor relatado por Kotas (1985) para a madeira, mas bastante consistente com

composições próximas, levantadas a partir de outros trabalhos (MIGLIAVACCA; OLIVEIRA JUNIOR; YANAGIHARA, 2015).

Considerando a umidade da madeira como um fluxo de água líquida entrando no VC nas condições ambiente ($P = 101,3 \text{ kPa}$, $T = 20^\circ\text{C}$, $\phi = 65\%$), a aplicação da Equação (91) fornece o valor da exergia específica para a água líquida em $58,4 \text{ kJ/kg}$. A exergia total do ar seco usado como oxidante também foi calculada considerando uma mistura de gases ideais e, uma vez que os gases encontram-se em equilíbrio com o ambiente, a exergia total retornou com valor nulo. Este fluxo de ar fornece o oxigênio necessário para a combustão, mas nenhum trabalho útil pode ser extraído dele.

A exergia dos gases de combustão gerados pela queima dos combustíveis foi quantificada através da Equação (97) para a componente química e através da Equação (98) para a componente física e dependem das frações molares de cada componente na mistura do gás. Foram obtidos os valores de $41,6 \text{ kJ/kg}$ para a exergia química dos gases gerados com o uso do GLP e de $85,39 \text{ kJ/kg}$ para a exergia química dos gases gerados pela combustão da lenha ($T=20^\circ\text{C}$). A exergia física dos gases de combustão gerados foi quantificada e forneceu o valor de $97,19 \text{ kJ/kg}$ para o uso GLP e o valor de $94,26 \text{ kJ/kg}$ para o uso da lenha.

Valores de exergia química para o CO_2 (19870 kJ/kmol), H_2O (9494 kJ/kmol), O_2 (3974 kJ/kmol) e N_2 (720 kJ/kmol) foram obtidos de Szargut, Morris e Steward (1988) e Oliveira Junior (2013), considerando o estado de referência padrão. Assim, considerando as Equações de balanço químico apresentadas em (59) e (60) e a composição dos gases gerados, mostrada na Tabela 16, a exergia específica dos gases de combustão para o GLP é $138,8 \text{ kJ/kg}$ e a exergia específica dos gases de combustão da lenha é $179,6 \text{ kJ/kg}$. Estes valores puderam ser calculados separadamente devido à sua queima não ocorrer de forma simultânea o que evita ainda a presença de irreversibilidades pela mistura dos gases.

A energia útil do vapor saindo do VC juntamente com os gases de combustão, foi calculada pelo último termo da Equação (91) a fim de encontrar a exergia química em base molar. A contribuição química retornou com os valores de $568,2 \text{ kJ/kg}$ e a fração de $160,4 \text{ kJ/kg}$ foi encontrada para a parcela física da exergia.

O calor fornecido pela combustão para as aves é transferido na temperatura do galpão conforme Equação (93) e contém uma quantidade de energia útil. Os valores calculados são listados na Tabela 28.

Aviários pequenos, ou aqueles localizados em regiões quentes, onde a demanda de aquecimento na fase inicial é pequena, adotam o mínimo consumo estimado. Uma vez que a temperatura ambiente é próxima da ZCT das aves, menor quantidade de insumos é requerida para aquecimento. A exergia dissipada pelo uso da lenha ($4,22 \times 10^7$ kJ) é superior à quantidade dissipada pelo uso do GLP ($1,89 \times 10^7$ kJ) em aproximadamente duas vezes, o que indica que o GLP é menos danoso ao ambiente.

Tabela 28 - Balanço de exergia para a faixa de consumo estimada na promoção do aquecimento.

Mínimo Consumo Estimado					Máximo Consumo Estimado			
	Entradas	B (kJ)	Saídas	B (kJ)	Entradas	B (kJ)	Saídas	B (kJ)
Sistema com Gás GLP	GLP	$1,94 \times 10^7$	Gases	$5,55 \times 10^4$	GLP	$2,90 \times 10^7$	Gases	$8,33 \times 10^4$
	Lenha	0	Q_{glp}	$3,98 \times 10^5$	Lenha	0	Q_{glp}	$6,44 \times 10^5$
	$H_2O_{(l)}$	0	$H_2O_{(v)}$	$4,48 \times 10^4$	$H_2O_{(l)}$	0	$H_2O_{(v)}$	$6,71 \times 10^4$
	Soma	$1,94 \times 10^7$	Soma	$4,98 \times 10^5$	Soma	$2,90 \times 10^7$	Soma	$6,89 \times 10^5$
Sistema com Fornalhas à Lenha	GLP	$6,29 \times 10^5$	Gases	$3,93 \times 10^5$	GLP	$6,29 \times 10^5$	Gases	$1,88 \times 10^6$
	Lenha	$4,33 \times 10^7$	Q_l	$9,83 \times 10^5$	Lenha	$2,08 \times 10^8$	Q_l	$9,39 \times 10^6$
	$H_2O_{(l)}$	$1,90 \times 10^4$	$H_2O_{(g)}$	$3,44 \times 10^5$	$H_2O_{(l)}$	$9,11 \times 10^4$	$H_2O_{(g)}$	$1,65 \times 10^6$
	Soma	$4,39 \times 10^7$	Soma	$1,72 \times 10^6$	Soma	$2,09 \times 10^8$	Soma	$1,29 \times 10^7$

Aviários grandes, ou aqueles localizados em regiões frias onde a demanda de aquecimento na fase inicial de criação é grande, necessitam maiores quantidades de insumo. O uso da lenha indica uma maior quantidade de exergia destruída ($1,96 \times 10^8$ kJ), a qual é sete vezes maior que a exergia destruída pelo GLP ($2,83 \times 10^7$ kJ). Consequentemente, a maior geração de entropia pelo uso da lenha em ambos os casos indica que o GLP é a melhor opção de aquecimento do ponto de vista da exergia.

A diferença nos resultados pode ser consequência da forma com que o calor é transferido para as aves. Enquanto as fornalhas aquecem o ar circunvizinho por condução e convecção para somente depois aquecer a cama das aves, o sistema de campânulas transfere muita da energia por irradiação, que, como é mais localizada, demanda menor quantidade de insumos. Além disso, aviários gigantes contêm grande volume de ar a ser aquecido pelo aquecimento indireto e, em regiões frias, deve ser considerada a má isolamento térmica dos galpões.

Segundo Nascimento (2015), muito do calor perdido pelas aves para o ambiente ocorre através das regiões sem penas, como as patas. Desta forma, aquecer a cama e o piso é o fator mais importante para o conforto térmico das aves,

sendo muito mais eficiente no sistema de campânulas a gás, já que a energia é direcionada por irradiação ao piso sob as aves.

Por fim, ao comparar as formas mais difundidas de aquecimento utilizado nos galpões brasileiros à luz da análise exergética, pode-se observar que a grande diferença nas quantidades demandadas de lenha e GLP podem ser atribuídas à forma de transferência de calor. Apesar das conhecidas diferenças nos custos para os sistemas estudados, a análise claramente mostra que as perdas por geração de entropia são menores quando o aquecimento é realizado por GLP, caracterizando-o assim, como a melhor escolha do ponto de vista da degradação da energia.

Após avaliação no processo de combustão com energia transferida ao ar no ambiente criatório (Q_{77}), as energias associadas aos gases gerados pela respiração ($H_{80-82,89}$) e calor transferido pelas aves (Q_{76}) unem-se à entalpia do ar renovado (H_{60-62}) e à energia elétrica (W_{73}), completando as entradas energéticas do VC tomado para o ar renovado na fase inicial. O balanço de energia realizado através da Equação (84) fornece as propriedades do ar úmido para a fase inicial do ciclo.

A Figura 25 mostra a temperatura do ar dentro do galpão em função da demanda de lenha ou GLP para aquecimento em diferentes temperaturas do ambiente.

Figura 25 - Temperatura média do ar nos galpões para diferentes temperaturas do ambiente externo utilizando a) aquecimento à lenha e b) aquecimento à GLP

Ressalta-se que esta é a temperatura média no período desconsiderando-se a amplitude térmica entre as diferentes horas do dia e estações do ano. Desta forma, os consumos mínimos e máximos dependem destas variáveis com maiores demandas no período noturno e estações mais frias.

Na comparação entre os dois insumos avaliados, percebe-se que o aumento da demanda de lenha, eleva cada vez mais a temperatura do ar, o que não ocorre para o uso do GLP. Já que as aves são submetidas ao conforto térmico independente do uso de um ou outro sistema, a diferença entre eles está na forma com que o calor é transferido às aves. Enquanto o aquecimento à lenha se dá de forma indireta, aquecendo o ar e posteriormente as aves e a cama, o aquecimento por campânulas a gás ocorre de maneira direta, incidindo nas aves e na cama, sem necessidade de aquecer o ar renovado.

A partir do balanço energético realizado, destaca-se que as temperaturas do CO_2 e do NH_3 devem assumir o mesmo valor da temperatura do ar úmido, uma vez que suas quantidades mássicas são insignificantes, diante da massa de ar úmido.

Em relação à exergia destruída no processo de aquecimento, a aplicação da Equação (100) forneceu os valores de $9,6 \times 10^6$ kJ (400 kg de GLP) e $9,8 \times 10^6$ kJ (600 kg de GLP), apresentando-se praticamente constante ao se elevar a demanda de combustível. Quando o aquecimento utilizou-se de lenha, os mesmos valores indicaram a faixa de $1,1 \times 10^7$ kJ (2500 kg) e $1,53 \times 10^7$ kJ (12000 kg).

Portanto, o modo com que o calor é transferido às aves (direta ou indireta) impacta decisivamente na exergia destruída durante o aquecimento, apontando que o uso do GLP se mostra mais apropriado do ponto de vista da segunda lei da termodinâmica.

4.4 AVALIAÇÃO EXERGÉTICA NO ARREFECIMENTO DOS AVIÁRIOS

Para a análise na fase final do ciclo, duas possibilidades foram consideradas. Por um lado, o uso dos painéis evaporativos permitem a umidificação do ar na entrada dos galpões para, depois disso, extrair o calor metabólico gerado. Deste modo, o ar passa por um processo de resfriamento evaporativo adiabático seguido de aquecimento. Por outro lado, nos aviários com aspersores, o processo de resfriamento evaporativo e transferência de calor ocorrem simultaneamente, e não é possível identificar precisamente a sequência dos processos, apenas os estados de entrada e saída do ar úmido.

Para atender aos galpões convencionais (com ventilação pelo manejo de cortinas) e climatizados (com ventilação controlada), estimou-se a renovação de ar a partir da quantidade de trocas completas indicadas para melhor desempenho das aves. Quando se eleva a velocidade do ar sobre as aves, a taxa de perda de calor

se acentua e provoca uma sensação térmica diferenciada, conhecida como “*Wind Chill*”. Com base em dados experimentais publicados em tabelas de desempenho e, sintetizados na Figura 26, foi realizada uma estimativa da possível redução na temperatura efetiva para diferentes combinações de temperatura, umidade e velocidade do ar. Os pontos marcados sobre o eixo das temperaturas apontam as condições do ambiente para a análise. As linhas plotadas indicam a sensação térmica das aves para diferentes umidades do meio e velocidades do vento.

Figura 26 - Possível redução na temperatura efetiva para diferentes combinações da temperatura ambiente, umidade relativa e velocidade do ar sobre as aves. Adaptada de Cobb-Vantress (2009).

Os dados indicam que, sem ventilação, a temperatura efetiva se eleva em relação à temperatura ambiente em umidades mais altas. Também observa-se que o aumento da ventilação ocasiona redução na temperatura efetiva em todas as condições propostas para o ambiente, sendo mais significativa em temperaturas mais elevadas. Estes resultados reforçam a importância da ventilação para o bem-estar das aves que, para além da renovação do ar e fornecimento de O_2 , apresenta evidente contribuição no controle da temperatura.

Com base na Tabela 11 e considerando o cenário proposto (1200 m^2 , 4 m de altura, 20°C , $101,3\text{kPa}$ e 65% de UR), a massa de ar seco trocado nas duas últimas semanas (m_{67-68}) para um ciclo de 42 dias, foi de $7,88 \times 10^7 \text{ kg}$. Aplicando-se as Equações (1-6) com variações de 50% a 80% para a umidade relativa e 20°C a 35°C para a temperatura ambiente, encontraram-se as condições de entrada do ar úmido.

Esta faixa de temperaturas e umidades cobre grande variedade de microclimas, especialmente na região Sul do Brasil.

No lado esquerdo da Tabela 29, a seguir, foram apresentados diferentes estados termodinâmicos para o ar úmido na entrada dos galpões. Na parte central estimou-se a quantidade de água introduzida no ar através do trato respiratório ($m_{70} - m_{23}$) durante a fase final, além da água introduzida pelas excretas (m_{117}) e sistema de resfriamento evaporativo (m_{8-9}), encontrando o estado termodinâmico do ar úmido na saída do processo.

Para temperaturas do ar atmosférico em 20°C, desconsiderou-se o uso de aspersores, utilizando-se somente a ventilação para adequação do ambiente interno. Em temperaturas mais elevadas, uma primeira simulação foi realizada considerando 120 aspersores de média pressão. No entanto, para a quantidade de ar renovado e as condições de entrada propostas, a umidade de saída estava bem abaixo da saturação. Deste modo, idealizou-se a utilização de 200 aspersores de média pressão e fluxo de 6,5 L/h durante 2h/dia, 4h/dia e 8h/dia, para as temperaturas de 25°C, 30°C e 35°C respectivamente.

Tabela 29 - Estado do ar úmido e demanda de água para diferentes condições de entrada do ar atmosférico, considerando a fase final do ciclo com uso de resfriamento evaporativo.

Estado do ar de entrada		Água adicionada pelas aves e sistemas de resfriamento					Estado do ar dentro do galpão e efeito da ventilação			
ϕ_e (%)	T_e (°C)	ω_e (kg _w /kg _{ar})	k (L _w /kg _r)	$m_{w(resp)}$ (kg)	$m_{w(exc)}$ (kg)	$m_{w(asp)}$ (kg)	ω_s (kg _w /kg _{ar})	ϕ_s (%)	T_s (°C)	ΔT (°C)
50	20	0,00729	2,044	2563	95527	0	0,00801	37	26	-7
	25	0,00991	2,673	2720	132418	36293	0,01140	44	30	-9
	30	0,01335	3,547	2847	183559	72483	0,01574	51	33	-11
	35	0,01781	4,666	2928	248880	149728	0,02174	64	34	-13
65	20	0,00950	2,044	2300	95984	0	0,01023	48	26	-6
	25	0,01295	2,673	2364	133039	36293	0,01444	56	30	-8
	30	0,01746	3,547	2367	184395	72483	0,01987	64	33	-10
	35	0,02336	4,666	2284	250001	149728	0,02732	80	34	-12
80	20	0,01174	2,044	2036	96445	0	0,01247	58	26	-6
	25	0,01601	2,673	2004	133665	36293	0,01751	67	30	-8
	30	0,02164	3,547	1880	185242	72483	0,02406	77	33	-11
	35	0,02900	4,666	1629	251141	149728	0,03233	96	34	-13

$m_{w(resp)}$ – massa de água vaporizada via respiração

$m_{w(exc)}$ – massa de água vaporizada das excretas

$m_{w(asp)}$ - massa de água introduzida pelos aspersores

ΔT – variação da temperatura efetiva sobre as aves, devido à ventilação aplicada

Nas primeiras três colunas estão expostas as condições do ar renovado e, para uma umidade relativa fixa, o aumento de temperatura introduz maior quantidade de vapor que é eliminado via respiração junto à água vaporizada pelo processo. A

quarta coluna indica a relação entre o consumo de água e consumo de ração, elevando-se com a temperatura de acordo com a Equação (46) e gerando maior quantidade de água eliminada através das excretas, mostrada na sexta coluna.

A quinta coluna é a diferença entre o ar inspirado e expirado na fase final. Fixando-se a temperatura, quando se eleva a umidade do ar atmosférico, a proximidade da saturação reduz a quantidade de água vaporizada por unidade de ar seco no processo. Por outro lado, fixando a UR do ar inspirado e elevando a temperatura, a umidade absoluta se eleva e com ela a quantidade de vapor junto ao ar seco. Em baixas umidades relativas (50%), a massa vaporizada aumenta com a temperatura mas, nas altas UR (80%) a proximidade do ponto de saturação reduz a eliminação de água via processo respiratório.

Com o aumento da temperatura, adotou-se o aumento do tempo de aspersão que eleva a massa de água inserida pelos aspersores, mostrada na sétima coluna, bem como a umidade do ar de saída, apresentada na oitava coluna.

As condições do fluxo expelido pelas aves foram definidas pelo estado (P_0 , T_{arexp} , $\phi = 1$) com massa de ar seco ($m_{87,88,91}$) de 118299 kg. Os gases gerados no processo ($m_{94,112}$) na temperatura média da cama de frangos (27°C) adicionam mais 5511 kg durante a fase do ciclo em que o arrefecimento é necessário.

Para definir a umidade de saída, mostrada à direita da Tabela 29, foram consideradas a água excretada pelas aves (m_{117}) e a água introduzida através do sistema de resfriamento evaporativo (m_{8-9}), que se incorporam ao ar elevando sua umidade.

O estado termodinâmico do ar renovado na saída do processo sofre influências das condições de entrada do ar atmosférico, do calor transferido pelo metabolismo das aves ($Q_{79} = 4,49 \times 10^8$ kJ) e do trabalho elétrico ($W_{75} = 2,1 \times 10^6$ kJ), adicionados às entalpias do fluxo expirado pelas aves ($H_{86-88,91} = 1,5 \times 10^7$ kJ) e dos gases gerados pela decomposição da cama ($H_{94,112}$), cujos valores são desprezíveis diante dos demais. Se comparados à entalpia do vapor provindo das excretas, representam apenas 0,08%. Por fim, definiu-se o estado termodinâmico do ar úmido que sai dos galpões e, na última coluna, foi estimada a redução da temperatura efetiva devido à velocidade do ar sobre as aves.

As entalpias totais do ar renovado e da água líquida são dependentes das massas e dos estados termodinâmicos quando entram no VC, conforme mostrado na Tabela 30. Foram apresentadas as principais entradas e saídas energéticas para

o processo de arrefecimento e a diferença de entalpias entre as entradas e saídas apresentadas está associada aos gases gerados na entrada e na saída do processo ($H_{91,94,112,108,109}$), à energia elétrica (W_{75}), e o calor cedido para vaporização do líquido excretado, os quais não foram apresentados na Tabela.

Tabela 30 - Balanço de energia no ar renovado durante a fase final. Considera 200 aspersores de médio fluxo por 2h/dia, 4h/dia e 8h/dia para o ambiente em 25°C, 30°C e 35°C respectivamente.

ϕ_e (%)	T_e (°C)	$H_{ar(e)}$ (kJ)	Q_f (kJ)	$H_{ar(exp)}$ (kJ)	$H_{v(exc)}$ (kJ)	$H_{w(asp)}$ (kJ)	$H_{ar(s)}$ (kJ)	T_s (°C)	ΔT (°C)
50	20	$3,05 \times 10^9$	$4,49 \times 10^8$	$9,98 \times 10^6$	$1,40 \times 10^8$	0	$3,70 \times 10^9$	26	-7
	25	$3,90 \times 10^9$	$4,43 \times 10^8$	$1,11 \times 10^7$	$1,94 \times 10^8$	$3,04 \times 10^6$	$4,55 \times 10^9$	30	-9
	30	$4,87 \times 10^9$	$4,38 \times 10^8$	$1,24 \times 10^7$	$2,69 \times 10^8$	$6,08 \times 10^6$	$5,53 \times 10^9$	33	-11
	35	$5,98 \times 10^9$	$4,34 \times 10^8$	$1,38 \times 10^7$	$3,64 \times 10^8$	$1,21 \times 10^6$	$6,65 \times 10^9$	34	-13
65	20	$3,48 \times 10^9$	$4,49 \times 10^8$	$9,98 \times 10^6$	$1,40 \times 10^8$	0	$4,14 \times 10^9$	26	-6
	25	$4,48 \times 10^9$	$4,43 \times 10^8$	$1,11 \times 10^7$	$1,95 \times 10^8$	$3,04 \times 10^6$	$5,13 \times 10^9$	30	-8
	30	$5,63 \times 10^9$	$4,38 \times 10^8$	$1,24 \times 10^7$	$2,70 \times 10^8$	$6,08 \times 10^6$	$6,28 \times 10^9$	33	-10
	35	$6,97 \times 10^9$	$4,34 \times 10^8$	$1,38 \times 10^7$	$3,66 \times 10^8$	$1,21 \times 10^6$	$7,64 \times 10^9$	34	-12
80	20	$3,92 \times 10^9$	$4,49 \times 10^8$	$9,98 \times 10^6$	$1,41 \times 10^8$	0	$4,57 \times 10^9$	26	-6
	25	$5,05 \times 10^9$	$4,43 \times 10^8$	$1,11 \times 10^7$	$1,96 \times 10^8$	$3,04 \times 10^6$	$5,71 \times 10^9$	30	-8
	30	$6,39 \times 10^9$	$4,38 \times 10^8$	$1,24 \times 10^7$	$2,71 \times 10^8$	$6,08 \times 10^6$	$7,05 \times 10^9$	33	-11
	35	$7,96 \times 10^9$	$4,34 \times 10^8$	$1,38 \times 10^7$	$3,68 \times 10^8$	$1,21 \times 10^6$	$8,63 \times 10^9$	34	-13

De acordo com a Equação (87), na saída do processo, o ar úmido apresenta pequenas porções de CO_2 e NH_3 , em que a temperatura de saída acompanha a variação de temperatura do ar úmido que, por sua vez, determina o balanço de energia no processo. O possível calor cedido para vaporização da água das excretas no processo de formação da cama é compensado pela elevação na entalpia do vapor em relação à água líquida.

A entalpia do ar úmido é função da umidade e da temperatura, e apresenta valores crescentes com a elevação destas propriedades, tanto para a entrada quanto para a saída do VC. O calor metabólico transferido para o ar ambiente, diminui levemente à medida que a temperatura do ar externo se eleva, devido a aproximar-se da temperatura corporal da ave. Menores diferenças de temperatura entre a ave e o ar indicam menor transferência de calor através da pele.

O aumento da entalpia total para a água inserida pelos aspersores é resultado do crescente tempo de uso, respectivamente 2h/dia, 4h/dia e 8h/dia para as temperaturas 25°C, 30°C e 35°C. A entalpia total do ar expirado aumenta devido ao aumento da temperatura, conforme mostrado na Figura 20. Por fim, a entalpia da água excretada via fezes e urina se eleva com a temperatura ambiente, em decorrência do aumento de consumo dependente da temperatura ambiente, como

visto na Equação (46). A elevação da umidade do ar dificulta a perda de calor via respiração aumentando um pouco a quantidade eliminada via excretas.

Seguindo trabalhos prévios como o realizado por Chengqin, Nianping e Guangfa (2002), o estado do ar atmosférico foi considerado como estado morto para a estimativa das entradas e saídas de exergia. Para diferentes condições de entrada do ar (e diferentes estados mortos) a análise considerou a variação do mínimo trabalho requerido para o processo de resfriamento dos aviários na fase final. Deste modo, as entradas e saídas do VC foram comparadas com o ar atmosférico nas condições (P_0 , T_e , ϕ_e), quantificando o mínimo trabalho requerido para trazer os fluxos, do estado termodinâmico que se encontram ao estado morto.

Esta abordagem foi escolhida porque, embora as regiões do Brasil apresentem diferentes condições climáticas, as aves necessitam sempre das mesmas condições de temperatura, umidade e pressão em cada fase do ciclo, possibilitando para a fase final, um estado termodinâmico fixo do ar úmido.

Os balanços de massa e energia, discutidos previamente, possibilitaram a inclusão do CO_2 gerado na respiração, junto ao ar úmido expirado e dos gases gerados pela cama, junto à água vaporizada das excretas. Também os gases na saída do processo foram considerados como componente do ar úmido devido à sua pequena representatividade diante das demais entalpias. Estas aproximações não comprometem a análise global, uma vez que são recorrentes em outros estudos considerando a exergia, como os de Dincer, Hussain e Al-Zaharnah (2005), Utlu e Hepbasli (2006), Chen et al. (2009) e Ahamed et al. (2011).

A Tabela 31 apresenta as principais entradas e saídas de exergia para o processo de arrefecimento na fase final do ciclo. A exergia específica do ar úmido na entrada e na saída do VC foi estimada pela Equação (92) em cada condição adotada para o ambiente. O ar atmosférico de entrada encontra-se em equilíbrio termodinâmico com o ambiente e sua disponibilidade energética é nula. Para a saída, a exergia associada a ele varia com a elevação da temperatura e umidade do ambiente devido à diferença nestas propriedades do ar analisado em relação à referência no ambiente.

Percebe-se que a exergia do ar expirado diminui à medida que a temperatura aumenta de 20°C para 35°C e também se torna menor à medida que a umidade relativa do ar cresce de 50% para 80%. Este comportamento já era esperado, uma vez que o ar expirado foi considerado saturado e com temperatura sempre superior

à do ambiente. A energia útil é proporcional ao desequilíbrio térmico do fluxo com o estado de referência.

Tabela 31 - Entradas e saídas exergeticas para o processo de arrefecimento na fase final. Considera 200 aspersores de médio fluxo utilizados por 2h/dia, 4h/dia e 8h/dia para o ambiente com temperaturas em 25°C, 30°C e 35°C respectivamente.

ϕ_e (%)	T_e (°C)	T_s (°C)	ϕ_s (%)	$B_{V(exc)}$ (kJ)	$B_{ar(exp)}$ (kJ)	B_{Qf} (kJ)	B_{el} (kJ)	$B_{W(asp)}$ (kJ)	$B_{ar(s)}$ (kJ)	B_d (kJ)
50	20	26	37	$3,98 \times 10^7$	$3,12 \times 10^5$	$9,41 \times 10^6$	$2,08 \times 10^6$	0	$5,73 \times 10^6$	$4,59 \times 10^7$
	25	30	44	$4,79 \times 10^7$	$2,77 \times 10^5$	$6,62 \times 10^6$	$2,23 \times 10^6$	$3,47 \times 10^6$	$3,82 \times 10^6$	$5,66 \times 10^7$
	30	33	51	$5,72 \times 10^7$	$2,41 \times 10^5$	$2,54 \times 10^6$	$2,38 \times 10^6$	$7,09 \times 10^6$	$2,98 \times 10^6$	$6,75 \times 10^7$
	35	34	64	$6,59 \times 10^7$	$2,04 \times 10^5$	$1,43 \times 10^6$	$2,68 \times 10^6$	$1,45 \times 10^7$	$4,27 \times 10^6$	$7,76 \times 10^7$
65	20	26	48	$3,79 \times 10^7$	$2,25 \times 10^5$	$9,39 \times 10^6$	$2,08 \times 10^6$	0	$5,63 \times 10^6$	$4,39 \times 10^7$
	25	30	56	$4,52 \times 10^7$	$1,85 \times 10^5$	$6,60 \times 10^6$	$2,23 \times 10^6$	$2,16 \times 10^6$	$3,56 \times 10^6$	$5,67 \times 10^7$
	30	33	64	$5,33 \times 10^7$	$1,44 \times 10^5$	$3,51 \times 10^6$	$2,38 \times 10^6$	$4,43 \times 10^6$	$2,40 \times 10^6$	$6,14 \times 10^7$
	35	34	80	$6,07 \times 10^7$	$1,06 \times 10^5$	$1,52 \times 10^6$	$2,68 \times 10^6$	$9,11 \times 10^6$	$3,36 \times 10^6$	$6,77 \times 10^7$
80	20	26	58	$3,63 \times 10^7$	$1,64 \times 10^5$	$9,38 \times 10^6$	$2,08 \times 10^6$	0	$5,56 \times 10^6$	$4,24 \times 10^7$
	25	30	67	$4,30 \times 10^7$	$1,22 \times 10^5$	$6,58 \times 10^6$	$2,23 \times 10^6$	$1,12 \times 10^6$	$3,38 \times 10^6$	$4,97 \times 10^7$
	30	33	77	$5,03 \times 10^7$	$8,29 \times 10^4$	$3,48 \times 10^6$	$2,38 \times 10^6$	$2,32 \times 10^6$	$2,08 \times 10^6$	$5,65 \times 10^7$
	35	34	96	$5,65 \times 10^7$	$4,77 \times 10^4$	$1,55 \times 10^6$	$2,67 \times 10^6$	$4,94 \times 10^6$	$2,76 \times 10^6$	$5,98 \times 10^7$

B_{Qf} – Exergia associada ao calor transferido das aves

$B_{ar(exp)}$ – Exergia associada ao ar expelido

$B_{V(exc)}$ – Exergia associada à água vaporizada das excretas

$B_{W(asp)}$ – Exergia associada à água de aspersão

$B_{ar(s)}$ – Exergia associada ao ar úmido de saída

B_d – Exergia dissipada no processo

A água adicionada (apresentada na Tabela 29) entra no processo nas condições (P_0 , $T = 20^\circ\text{C}$) e, ao vaporizar, eleva a umidade do ar retirando calor do espaço de criação. Sua disponibilidade energética diminui à medida que se eleva a umidade do ambiente de referência, pois aumenta a pressão de vapor no ar atmosférico reduzindo o componente mecânico da exergia. Levar água líquida do estado morto restrito para uma condição de pressão parcial no estado morto absoluto requer uma expansão, da pressão de referência (P_0) até a pressão parcial do vapor no ambiente (yP_0). Assim, quanto maior a pressão de vapor no ambiente, menor a energia útil do fluxo líquido. Também, a exergia da água, inserida pelos aspersores, se eleva com o aumento da temperatura pelo fato de aumentar o tempo diário de aspersão e a quantidade de água aspergida.

A exergia que acompanha o calor transferido pelas aves na temperatura do ar foi encontrada pela Equação (94). Desta maneira, à medida que a temperatura do ambiente de referência aumenta, aproxima-se da temperatura da ave, reduzindo a energia transferida e a exergia térmica disponível. Para o caso de $T_0 > T_{zct}$ este valor

será negativo. Esta disponibilidade depende da quantidade de calor transferido e do fator de Carnot, não tendo relação com umidade ou pressão.

A exergia destruída no processo de arrefecimento, analisada pela aplicação da Equação (102) e sob as mesmas mudanças no estado no ar ambiente, indicaram o comportamento ilustrado na Figura 27. De baixo para cima aparecem as contribuições da água vaporizada das excretas, do calor metabólico, da energia elétrica, da água introduzida pelos aspersores, do ar de saída e a exergia dissipada.

Figura 27 - Exergia destruída no processo de arrefecimento dos galpões durante a fase final do ciclo produtivo em diferentes condições do ar atmosférico demandado para renovação de ar.

Qualitativamente, pode-se observar que a maior contribuição exergética do processo é da água vaporizada das excretas. Para determinada umidade relativa o aumento da temperatura aumenta a massa de água excretada e vaporizada e o aumento da umidade relativa do ar, eleva a pressão de vapor e causa uma leve redução na exergia dissipada pelo processo para uma mesma temperatura. Assim, é notório que a inserção de água no sistema aumenta a exergia disponibilizada e, consequentemente destruída, e deve ser evitado enquanto o arrefecimento puder ser realizado pela ventilação.

Com menor influência sobre o processo, a exergia do ar expirado reduz com o aumento da temperatura e da umidade pelo menor desequilíbrio mecânico e térmico com estado de referência. A menor diferença de temperatura entre o frango e o ambiente também reduz a exergia associada ao calor transferido.

4.5 ANÁLISE EM AVIÁRIOS CONVENCIONAIS E CLIMATIZADOS

Para proceder uma análise comparativa entre o modelo convencional e o modelo climatizado, foram mantidas fixas as condições do ambiente em $(P_0, T_0, \phi_0) = (101,3\text{kPa}, 20^\circ\text{C}, 65\%)$ variando para os dois galpões, a densidade de aves, o

período do ciclo, demandas para ventilação e arrefecimento, bem como linhagem e gênero das aves.

A análise dos dois modelos propostos padronizou um aviário de 1200 m² e 4 m de altura com características construtivas e tecnológicas já citadas para galpões convencionais/semi-climatizados e galpões climatizados, previamente discutidas na seção 2.1.2. Devido à grande representatividade, considerou-se o aquecimento com lenha para ambos galpões com diferenças na capacidade de produção e na demanda de energia elétrica para os processos.

Os processos analisados quantificaram as perdas pela segunda lei. Apesar de se perceber uma pequena diferença entre a entropia gerada em um ciclo completo, comparada à soma das entropias geradas nos diferentes processos analisados internamente, esta diferença corresponde a 0,2% para aviários convencionais e 0,04% para aviários climatizados. Isso indica que existem outras irreversibilidades, inerentes ao ciclo produtivo, que não foram contempladas na análise realizada. Elas podem estar associadas à mistura de gases, outras reações químicas e trocas térmicas não analisadas, mas correspondem a percentuais desprezíveis diante dos processos analisados.

A Tabela 32 aponta a exergia destruída em cada processo para aviários convencionais e climatizados. Quantificou-se a exergia destruída em cada processo dentro do ciclo e para cada ave criada.

Tabela 32 - Exergia destruída nos processos de combustão, desenvolvimento das aves, ar renovado nas fases inicial, crescimento e final, formação da cama a partir das excretas, bem como no ciclo completo para galpões convencionais e climatizados, considerando aves mistas Cobb com 42 dias.

Processos	Convencional (13000 aves)			Climatizado (18000 aves)		
	Bd (kJ)	%	Bd/ave (kJ)	Bd (kJ)	%	Bd/ave (kJ)
Combustão	1,09x10 ⁸ kJ	21,84	8,38x10 ³	1,09x10 ⁸ kJ	20,47	6,06x10 ³
Desenvolvimento aves	5,16x10 ⁷ kJ	10,42	4,00x10 ³	5,95x10 ⁷ kJ	11,16	3,31x10 ³
Fase inicial	1,19x10 ⁷ kJ	2,38	9,15x10 ²	1,91x10 ⁷ kJ	3,58	1,06x10 ³
Fase de crescimento	2,55x10 ⁷ kJ	5,11	1,96x10 ³	3,27x10 ⁷ kJ	6,13	1,82x10 ³
Fase final	4,38x10 ⁷ kJ	9,03	3,47x10 ³	5,56x10 ⁷ kJ	10,43	3,09x10 ³
Formação da cama	2,57x10 ⁸ kJ	51,50	1,97x10 ⁴	2,57x10 ⁸ kJ	48,22	1,43x10 ⁴
Ciclo completo	4,99x10 ⁸ kJ	100	3,84x10 ⁴	5,33x10 ⁸ kJ	100	2,96x10 ⁴

Da comparação realizada, identifica-se que o aviário convencional destrói menor quantidade de exergia comparativamente ao climatizado por ciclo de produção. No entanto, com maior grau tecnológico implantado, nos galpões climatizados o número de aves produzidas por ciclo torna-se maior e a exergia

destruída por ave criada é menor. Esta diferença pode ser melhor observada na Figura 28 que apresenta a destruição de exergia por ave nos dois tipos de galpão analisados.

Figura 28 - Comparativo da Exergia destruída/ave nos processos analisados para galpões convencionais (à esquerda) e climatizados (à direita) considerando o cenário proposto.

O processo de formação da cama, a partir das reações químicas ocorridas no material absorvente e excretas é o maior responsável pela destruição de exergia, respondendo por, aproximadamente 50% de toda irreversibilidade ocorrida no ciclo. Em seguida, o processo de combustão da lenha para aquecimento abrange cerca de 21% em ambos tipos de galpões.

A exergia dissipada para controle da temperatura e umidade do ar renovado aumenta com o crescimento das aves devido à demanda na ventilação/respiração bem como a utilização do resfriamento evaporativo na fase final.

Em relação à densidade de aves criadas em cada um dos tipos, Bueno e Rossi (2006) realizaram experimentos em galpões convencionais com 13 aves/m² e em galpões climatizados com 18 aves/m². Essa tem sido a taxa praticada pelas agroindústrias para maximizar a produção, mesmo com fortes questionamentos em relação às liberdades que compõem o bem-estar das aves. Nesta perspectiva, a maior densidade de aves criada por unidade de área resulta em menos entropia gerada por ave criada em todos os processos. No comparativo entre as densidades de aves criadas em cada ciclo, foram consideradas aves mistas da linhagem Cobb com todas as demais variáveis mantidas fixas. A Tabela 33 apresenta a exergia destruída por cada sistema analisado e o respectivo rendimento de segunda lei, para os dois tipos de aviários.

Tabela 33 - Exergia destruída por ciclo/por ave criada e eficiência de segunda lei para um ciclo de produção para diferentes densidades de criação em galpões convencionais e climatizados.

	10 aves/m ²			14 aves/m ²			18 aves/m ²		
	Bd (kJ/ciclo)	Bd (kJ/ave)	n _{II} (%)	Bd (kJ/ciclo)	Bd (kJ/ave)	n _{II} (%)	Bd (kJ/ciclo)	Bd (kJ/ave)	n _{II} (%)
Convencional	5,02x10 ⁸	4,18x10 ⁴	25,45	5,16x10 ⁸	3,49x10 ⁴	27,28	5,29x10 ⁸	2,45x10 ⁴	28,42
Climatizado	5,30x10 ⁸	4,42x10 ⁴	24,77	5,44x10 ⁸	3,24x10 ⁴	26,72	5,56x10 ⁸	2,57x10 ⁴	27,95

Galpões convencionais apresentam rendimento exergético levemente superior, gerando menos entropia que os galpões climatizados para o mesmo período do ciclo. Parece que a única diferença para este resultado é a maior dependência por energia elétrica apresentada pelos galpões com maior tecnologia implantada. No entanto e, mais uma vez, a exergia destruída por ave criada diminui com o aumento no número de aves por unidade de área. Como se espera, o rendimento do ciclo aumenta à medida que se produzem maiores quantidades de aves no mesmo espaço de criação. Apesar do maior consumo de ração e água, muitos insumos como o material absorvente não se modificam para atender maiores densidades, com maior quantidade de frangos produzidos.

Ao se analisar o período do ciclo de 30 dias a 48 dias com as demais variáveis fixas, existe um ponto máximo de eficiência exergética global em torno de 37 dias para os dois tipos de galpão. Nos convencionais, este máximo rendimento exergético corresponde a 26,12%. Já para galpões climatizados, o máximo atinge 25,43% para o mesmo tempo de vida das aves. Vale ressaltar que, nesta estimativa, a densidade de aves foi fixada em 10,8 aves/m². A Figura 29 mostra este comportamento em diferentes períodos de criação para galpões convencionais sendo observado o mesmo comportamento para os galpões climatizados.

Figura 29 - Eficiência de segunda lei e Exergia destruída em galpões convencionais por ciclo de produção considerando diferentes períodos.

Observa-se que, quanto maior o período do ciclo, maior a entropia gerada no processo, o que já era esperado uma vez que as conversões energéticas crescem com o tempo. No entanto, este crescimento não parece ser linear e, a taxa de destruição de exergia se acentua para ciclos maiores, o que pode ser resultado da maior demanda por ventilação e aspersão, ou ainda por ter atingido a fase adulta tendo reduzida a taxa de crescimento.

Quanto à ventilação, necessária em todas as fases da criação, a diferença está na tecnologia implantada e no tempo em que os ventiladores e exaustores devem permanecer ligados atendendo à ventilação mínima, de transição ou máxima. Como a ventilação e o arrefecimento são mais efetivos na fase final, devido à maior sensibilidade às altas temperaturas por parte das aves, quanto mais o ciclo se estende, maior será a entropia gerada.

Se mantido o ciclo de 42 dias, aviários mais avançados tecnologicamente estão sujeitos à maior demanda por energia elétrica pelas diferentes potências instaladas e, deste modo, apresentam um rendimento levemente inferior aos galpões convencionais. A Tabela 34 apresenta a diferença entre os dois tipos de galpões.

Tabela 34 - Exergia destruída e eficiência de segunda lei em um ciclo de produção considerando a diferença na energia elétrica demandada por galpões convencionais e climatizados para 13000 aves mistas da linhagem Cobb em ciclo de 42 dias.

	$B_{destruída}$	η_{II}/ciclo
Convencional	$4,99 \times 10^8 \text{ kJ}$	25,98%
Climatizado	$5,33 \times 10^8 \text{ kJ}$	25,27%

Considerando a análise comparativa global, pode-se identificar que os galpões convencionais apresentam maior eficiência exergética e geram menos entropia para cada ciclo criado. No entanto, cabe ressaltar que a quantidade produzida por unidade de área sempre será maior para galpões climatizados devido à maior densidade no alojamento.

Apesar de permitirem uma maior densidade de criação proporcionando melhor conforto às aves no decorrer do ciclo, o aumento da dependência por energia elétrica por parte dos aviários climatizados pode ser mais arriscado do ponto de vista da ambiência devido à instabilidade no fornecimento de energia elétrica. No entanto, devido às baixíssimas diferenças no rendimento de segunda lei entre os galpões convencionais e os galpões climatizados, os benefícios do controle térmico no espaço criatório são evidentes.

A menor variação térmica nas diferentes horas do dia e a redução da mão de obra por parte dos trabalhadores são aspectos desejáveis, bastante significativos e que certamente devem ser considerados.

Por fim, diferenças entre as linhagens analisadas e o gênero dos lotes foram apresentadas na Tabela 35. A linhagem Cobb demonstra eficiência maior para lotes de machos e lotes mistos e o ciclo com esta linhagem destrói menor quantidade de exergia que os frangos da linhagem Ross.

Tabela 35 - Exergia destruída e eficiência de segunda lei para cada ciclo criado em galpões convencionais considerando o gênero das aves nas duas linhagens estudadas.

	Machos		Misto		Fêmeas	
	$B_{destruída}$	η_{II}	$B_{destruída}$	η_{II}	$B_{destruída}$	η_{II}
Cobb	$5,019 \times 10^8$ kJ	26,07 %	$5,014 \times 10^8$ kJ	25,98 %	$5,012 \times 10^8$ kJ	25,34 %
Ross	$5,034 \times 10^8$ kJ	24,90 %	$5,024 \times 10^8$ kJ	25,23 %	$5,013 \times 10^8$ kJ	25,59 %

No entanto a eficiência constatada para ciclos de fêmeas é maior para a linhagem Ross, mesmo destruindo maior quantidade de exergia. Isto é resultado dos índices de conversão alimentar apresentados pelos desenvolvedores das linhagens e deve ter os dados atualizados sempre que possível, para novas tomadas de decisão.

4.6 PROPOSIÇÕES E ADEQUAÇÕES AO CICLO PRODUTIVO

Neste tópico apresentam-se sugestões para melhoria no manejo e características construtivas que, do ponto de vista da exergia, podem elevar a eficiência e reduzir impactos ambientais. No final do tópico, são apresentadas algumas sugestões que, mesmo não sendo o foco do estudo, podem ainda melhorar o processo produtivo do ponto de vista ambiental.

Uma das propostas é transformar parte dos rejeitos do ciclo em insumos para o próprio processo produtivo e, dentre eles, o rejeito mais significativo é a cama de aves. Durante a discussão realizada na seção 4.3, e publicada em Migliavacca, Oliveira Junior e Yanagihara (2016) evidenciou-se a opção do aquecimento com GLP como a mais interessante do ponto de vista da segunda lei. Ao se considerar aviários convencionais e climatizados como os analisados na seção 4.3, seriam necessários entre 30 e 46 botijões comerciais de 13kg para aquecimento em um único ciclo produtivo. Da mesma maneira, se a lenha fosse comprada, demandaria entre 6m^3 e 27m^3 , cujos valores se assemelhariam ao GLP. No entanto, a maioria

dos avicultores opta pelo uso da lenha quando podem extraí-la de forma gratuita de suas próprias propriedades rurais. Esta escolha leva em conta a oportunidade de venda do adubo e obtenção de matéria prima gratuita. Não considera impactos ambientais com a extração da madeira que, muitas vezes e apesar de indicação das integradoras, não provém de reflorestamento.

Cordeiro et al (2010) identificaram que a melhor forma de promover o bem-estar térmico às aves no inverno do sul brasileiro é a forma conjugada do uso de fornalhas à lenha com campânulas a gás. Neste sentido, após a discussão realizada na seção 4.3, indica-se o uso do GLP apenas complementado, em situações extremas, pelo aquecimento indireto da combustão de biomassa lenhosa. Esta lógica inverte a ordem de complementação térmica indicada por Madalena, Oliveira e Rochadelli (2013).

Se o fator custos ainda é determinante pela não opção ao GLP, lança-se a proposta de utilizar a combustão da cama de frangos em substituição à lenha. Uma primeira comparação entre a exergia química dos diferentes insumos para aquecimento, publicada em Migliavacca, Oliveira Junior e Yanagihara (2015), apontou que o potencial exergético deste rejeito poderia suprir a demanda exergética do sistema de aquecimento com um excedente de, pelo menos 25%. Por outro lado deve haver novos estudos de impacto no ar, relativo aos gases gerados.

Considerando a faixa de consumo para o cenário padrão adotado neste trabalho e a massa de cama gerada em cada ciclo de produção, a Tabela 36 mostra a disponibilidade energética desta substituição.

Tabela 36 - Disponibilidade exergética da cama de frangos em um ciclo de produção comparada às demandas exergéticas dos insumos utilizados no aquecimento dos galpões.

Insumo	m (kg)		b (kJ/kg)	B (kJ)	
GLP	400	600	48386	$1,93 \times 10^7$	$2,90 \times 10^7$
Lenha	2500	12000	19897	$4,98 \times 10^7$	$2,39 \times 10^8$
Cama	23367 (MS)		16155	$3,77 \times 10^8$	

Assim, mesmo em um único ciclo produtivo, a quantidade de cama gerada, com o devido tratamento para densificação e redução da umidade, pode suprir com excedente a demanda térmica dos galpões. No cenário proposto, transformar este rejeito em insumo poderia elevar os rendimentos, energético e exergético, respectivamente de 27% para 29,5% e de 26% para 29%, aproximadamente. Neste

caso, a exergia destruída no ciclo é reduzida da exergia introduzida pela lenha na promoção do aquecimento.

A hipótese de gerar biogás e biofertilizante através da biodigestão anaeróbica da cama não foi considerada neste trabalho, por entender que a biomassa sólida necessita reposição por batelada elevando demais a mão de obra do avicultor. Tal feito seria possível com algum equipamento de biodigestão onde entradas e saídas de massa fossem verticais, facilitando seu manejo.

Outra possibilidade para melhorar o desempenho do sistema produtivo é a inserção de painéis fotovoltaicos junto às instalações, uma vez que, poucas adequações são necessárias para implantação desta tecnologia, principalmente na região Sul do Brasil. Os galpões são construídos longitudinalmente ao eixo Leste-Oeste, e há sempre um telhado voltado para o Norte, com a inclinação adequada para captação solar.

A redução da demanda por energia elétrica provinda da concessionária através da microgeração distribuída traz ótimos benefícios, principalmente para galpões climatizados. Neste caso, pode-se ter um aumento de 27% para 27,2% e de 26% para 26,2%, respectivamente para os rendimentos energético e exergético.

Considerando o manejo, uma estratégia interessante para reduzir a exergia destruída é valorizar ao máximo a ventilação antes de acionar o sistema de resfriamento evaporativo. É comprovado que a ventilação adequada entre as aves possibilita boa redução na temperatura efetiva sendo que a inserção de água líquida introduz exergia ao sistema, que é posteriormente destruída durante o processo.

Apesar de estudos realizados por Fiorelli (2010) e Sarmiento et al. (2005), indicando telhas cerâmicas e de amianto, ou Abreu et al. (2007), indicando o uso de forro para reduzir a CTR média, toda carga térmica introduzida no galpão deve ser extraída pelos sistemas de ventilação e arrefecimento, fato que aumenta a exergia destruída, principalmente na fase final. Assim, o uso de telhas térmicas seria a mais indicada, uma vez que refletem a maior parte da radiação incidente, reduzindo a entrada de carga térmica nos galpões através do telhado. Além disso, se houver presença de forro, seria interessante a inserção de um exaustor junto à cumeeira, promovendo a renovação do ar aquecido pela radiação.

Em relação à distribuição geográfica dos empreendimentos da agroindústria e, considerando a participação evidente da indústria avícola em todas as regiões brasileiras, seria possível pensar diferentes objetivos de produção em diferentes

microclimas disponíveis. Ciclos mais curtos de até 30 dias apresentariam maior rendimento em locais mais quentes onde as temperaturas médias se aproximassem da ZCT das aves no início de suas vidas. Ciclos mais longos de 42 a 49 dias poderiam preferir microclimas mais amenos que evitariam gastos energéticos para climatização dos galpões na fase final do ciclo produtivo e demasiadas perdas por mortalidade. Na impossibilidade desta adequação, há de se considerar o máximo rendimento entre o 37° e 38° dia de vida das aves.

Outros fatores podem ainda melhorar a eficiência do sistema produtivo, dentre eles, pode-se citar: a) a pintura branca no telhado e a presença de sombreamento, que podem reduzir a CTR presente no interior dos galpões; b) redução do tempo entre a eclosão e a chegada dos pintainhos ao galpão de criação fazendo com que eles cheguem com massas maiores, iniciem o consumo antes e, conseqüentemente, obtenham maior desenvolvimento no decorrer do ciclo, c) promover a coleta da água da chuva nos telhados com posterior aspersão pode criar um microclima com menores variações de temperatura e umidade.

5 CONCLUSÕES E CONTINUIDADE DO TRABALHO

Conclusões

Neste trabalho, foi realizada uma avaliação exergética em torno do processo produtivo intensivo de frangos de corte. Foram realizados balanços de massa, de energia e de exergia em ciclos produtivos próximos de 42 dias, considerando características construtivas e de manejo do sistema brasileiro de produção. As análises perpassaram diferentes microclimas, linhagens, gênero dos lotes, períodos do ciclo e manejos mensurando as entradas e saídas do processo produtivo.

Relativo às massas, excetuando-se o ar atmosférico, as maiores demandas identificadas para os insumos foram a água (69,2%) e a ração (24,9%). Para os rejeitos, os GEE/particulados extraídos através da ventilação (39,4%), os gases de combustão da lenha (25,6%) e a cama de frangos (14,2%) consistem nas maiores contribuições nas quais a massa de frangos representa em torno de 20%.

Estabeleceu-se a relação entre os consumos de água e ração como função quadrática da temperatura ambiente. Foi observado que o aumento de temperatura ambiente eleva o consumo de água, a qual é eliminada pelas aves, em mais de 95% via excretas. A pequena fração de água eliminada via respiração ($\approx 4\%$ do total) reduz para próximo de 2% à medida que a temperatura ambiente se eleva de 20°C para 35°C. No entanto, o trabalho não prevê o aumento de evaporação pelo trato respiratório com a elevação da temperatura, fator que será incrementado em trabalhos futuros.

Em relação às energias, as maiores contribuições identificadas para os insumos foram a ração (77,7%) acompanhada do material absorvente (9,7%) e da lenha (9,6%). Na saída do processo, lideram as entalpias associadas aos frangos (33,2%) e da cama gerada (32,1%). O rendimento energético obtido para o cenário padrão adotado, que corresponde à maioria dos galpões comerciais, ficou próximo de 27%.

Os processos que mais destroem exergia dentro do ciclo produtivo são a formação da cama de frangos a partir das excretas (51,5% em convencionais e 48,2% em climatizados) e a combustão da lenha para aquecimento (21,8% em convencionais e 20,5% em climatizados). Além disso, o rendimento de segunda lei foi encontrado próximo de 26%. A proximidade deste valor ao rendimento energético se deve, principalmente, pela aproximação no coeficiente exergético para vários

insumos, produtos e rejeitos do processo. A falta de dados de composição elementar caracteriza uma lacuna na literatura abre novas perspectivas de estudo.

A análise realizada possibilitou a introdução dos índices energético e exergético de produção, dados pelas Equações (103-104). Com eles é possível analisar, de forma simplificada, a energia transformada/exergia destruída durante um ciclo produtivo para diferentes tipos de galpões, microclimas, manejos e linhagens, além de indicar os reais impactos ambientais causados pelo processo produtivo. Estes índices podem ser utilizados para comparar diferentes sistemas e maximizar a produção com menores impactos ambientais. Como exemplo, o máximo rendimento exergético foi encontrado para ciclos entre 37 e 38 dias.

Volumes de controle foram tomados em torno de processos internos ao ciclo com o intuito de quantificar as entradas e saídas de massa/energia e identificar os principais processos de destruição exergética. Foram analisados os processos de combustão, desenvolvimento das aves, formação de cama a partir das excretas e a renovação de ar em cada fase do ciclo.

A combustão com GLP apresentou maior eficiência de Segunda Lei se comparada ao uso de lenha, por emitir menores quantidades de gases de efeito estufa e demandar menos insumo para aquecimento. A exergia dissipada por seu uso é duas vezes menor que a dissipada pela lenha, sendo menos danosa ao meio ambiente. Uma vez que o GLP proporciona um aquecimento direto na cama e nas aves, não há necessidade de aquecimento do ar de todo o galpão, sendo indicado com menores impactos ambientais.

A extração de lenha na própria propriedade é uma realidade eminente para redução de custos com o GLP. Deste modo, uma possibilidade lançada para melhoria no sistema de produção é a substituição da madeira pela cama de frangos densificada. Com tratamento apropriado, ela pode substituir a demanda térmica dos galpões com sobra energética. A análise realizada indica que a exergia disponibilizada pela cama de frangos poderia suprir a demanda com um excedente de até 25%.

O sistema de arrefecimento é mais eficiente quando prioriza a ventilação e o efeito da velocidade do ar sobre as aves. Uma vez que a nebulização somente é acionado com ventilação máxima, o custo exergético com sistema de ventilação não modifica se o galpão estiver ou não sendo aspergido. Ao ser inserida água líquida

pelos sistemas de resfriamento evaporativo, aumenta-se a demanda por energia elétrica e a exergia destruída nos processos de mistura e vaporização.

Desta maneira, outra possibilidade para melhoria do processo na fase final do ciclo é aumentar a velocidade do ar sobre as aves e acionar os aspersores ou painéis evaporativos somente quando a temperatura ambiente atinja a temperatura crítica ou em casos de baixa umidade. No entanto, quando seu uso é necessário, verificou-se que o número de 120 aspersores de média pressão não eleva a umidade do ar ao limite da saturação, sendo indicado o número de 200 aspersores em aviários comerciais de acordo com o padrão aqui adotado.

Percebe-se que a implantação de maior tecnologia na ambiência das aves, apesar de reduzir a mão de obra do avicultor, causa uma elevação na entropia gerada por ciclo. No entanto, na atual conjuntura de produção, é incontestável a necessidade de melhoramento tecnológico. Por isso, aconselha-se a implantação da microgeração distribuída junto ao ponto de consumo, reduzindo a demanda por energia elétrica externa e possibilitando o uso de fontes renováveis como a geração solar fotovoltaica.

Continuidade dos Trabalhos

Como sequência para esta pesquisa, vislumbra-se a possibilidade de realizar uma análise exergoeconômica no sistema produtivo, de modo a analisar custos operacionais e viabilidade financeira das mudanças propostas. Outro item a destacar é a necessidade de se obter a composição elementar dos pintainhos, dos frangos, das carcaças e da ração para comparar seu PCI com os obtidos através de bomba calorimétrica. Somente com estes dados será possível estimar o coeficiente exergético destes elementos e aprimorar as estimativas realizadas.

A identificação dos elementos mais relevantes na análise exergética do processo produtivo possibilita a criação de um modelo simplificado de análise que permita avaliar com maior rapidez a exergia destruída para cada adequação proposta. Também, avaliar a eliminação da água pelas aves submetidas ao estresse térmico e consequente variação na ventilação corrente. Por fim, pode-se comparar o rendimento exergético deste sistema produtivo a outros sistemas de produção intensiva do meio rural.

6 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ABPA. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL - ABPA. Relatório Anual 2015, 2015. Disponível em <http://abpa-br.com.br>. Acessado em junho 2017.

ABREU, P. G. et al. Medidas morfológicas em função do peso e da idade da ave, por meio de imagens. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v.16, n.7, p. 795-801, 2012.

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

ABREU, P. G. et al. Condições Térmicas ambientais e desempenho de aves criadas em aviários com e sem uso de forro. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 59, n. 4, p. 1014–1020, 2007.

ABREU, V. M. N.; ABREU, P. G. DE. Os desafios da ambiência sobre os sistemas de aves no Brasil. **Revista Brasileira de Zootecnia**. v. 40, p. 1–14, 2011.

AIRES, A. M. **Biodigestão anaeróbia da cama de frangos de corte com ou sem separação das frações sólida e líquida**. 2009. 134 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

AHAMED, J.U. et al. An application of energy and exergy analysis in agricultural sector of Malaysia. **Energy Policy**. v. 39, p. 7922-9. 2011.

ALFA LAVAL. **Poder calorífico inferior de combustíveis**. Petrópolis: [s.n.]. Disponível em: <www.alfalaval.com>.

ALMEIDA, J. G. et al. Efeito da idade da matriz no tempo de eclosão, tempo de permanência do neonato no nascedouro e o peso do pintainho. **Archives of veterinary science**, v. 11, n. 1, p. 45–49, 2006.

_____. **Desempenho de Frangos de Corte Influenciado pela idade da Matriz, tempo de incubação e manejo pós-eclosão**. 2006. 186 p. Tese (doutorado) – Faculdade de Agronomia - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

ANGONESE, A. R. et al. Eficiência energética de sistema de produção de suínos com tratamento dos resíduos em biodigestor. **DEAg/UFCG**, Campina Grande, v. 10, n. 45, p. 745–750, 2006.

ARAÚJO, P. A. **Análise Exergética e Termoeconômica da planta de utilidades de uma refinaria de Petróleo**. 2008. 172 p. Trabalho de Formatura (Graduação) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2008.

ARAUJO, J. DOS S.; OLIVEIRA, V. DE; BRAGA, G. C. Desempenho de frangos de corte criados em diferentes tipos de cama e taxa de lotação. **Ciência Animal Brasileira**, v. 8, n. 1, p. 59–64, 2007.

ARAUTERM. **Poder calorífico Inferior**. Cachoeirinha - RS: [s.d.]. Disponível em: <www.arauterm.com.br>.

AVIAGEN. Frango: objetivos de desempenho ROSS 308. Disponível em: www.aviagen.com. Acessado em maio de 2017.

AVILA, V. S. et al. **Sistemas de Produção: Produção Frangos de Corte**. Disponível em: <<http://www.cnpsa.embrapa.br/SP/aves/index.html>>. Acessado em 3 de abril de 2015.

_____. Avaliação de materiais alternativos em substituição à maravalha como cama de aviário. **R. Bras. Zootec.** v. 37, n. 2, p.273-7, 2008.

AVISITE. **O peso médio do frango brasileiro abatido nos estados, conforme o IBGE**. Disponível em: <http://www.avisite.com.br/noticias>. Acesso em junho de 2014.

BALESTIERI, J. **Cogeração, geração combinada de eletricidade e calor**. Florianópolis: UFSC, 2002.

BALDIN, V. **Geração de energia na avicultura de corte a partir da cama de aviário**. 2013. 136 p., Dissertação (Mestrado) - Pós Graduação em Engenharia Elétrica, UTFPR, Pato Branco, 2013.

BEJAN, A. **Advanced Engineering Thermodynamics**. 3. ed. Hoboken - USA: John Wiley & Sons, 2006.

BENDORICCHIO, G.; JORGENSEN, S. E. Exergy as goal function of ecosystems dynamic. **Ecological Modelling**, v. 102, n. 1, p. 5–15, 1997.

BENITES, V. et al. **Geração de Resíduos nos sistemas de produção de suínos e aves no Brasil**. Disponível em: <<http://www.cienciadosolo.com.br/tecnologia>>. Acessado em 02 de março de 2014.

BRACKENBURY, J.H., GLESON, M. AVERY, P. Respiration in exercising fowl. I. oxygen consumption, respiratory rate and respired gases. **J. Exp. Bio.** v.93, p.317-325, 1981.

_____. Respiration in exercising fowl. II. Respiratory water loss and heat balance. **J. Exp. Bio.** v.93, p.327-332, 1981.

_____. Respiration in exercising fowl. III. Ventilation. **J. Exp. Bio.** v.96, p.315-324, 1982.

BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. **Fundamentals of Thermodynamics**. 7a. ed. Hoboken -USA: John Wiley & Sons, 2009.

BRAND, M. A. **Qualidade da Biomassa Florestal para uso na geração de energia em função da estocagem**. 2007. 169 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

BRAND, M. A. et al. Influência da época de estocagem na qualidade da biomassa florestal para a geração de energia. **Floresta**, Curitiba-PR, v. 42, n. 2, p. 369–380, 2012.

BRASIL FOODS. **Relatório Anual e de sustentabilidade 2009**. Jaguaré-SP, 2009. 62 p. Disponível em: <<http://www.brf-br.com/global/>>.

BRATTI, F. C. **Uso da cama de aviário como fertilizante orgânico na produção de aveia preta e milho**. 2013. 70 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, 2013.

BUENO, L.; ROSSI, L. A. Comparação entre tecnologias de climatização para criação de frangos quanto a energia, ambiência e produtividade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande - PB, v. 10, n. 19, p. 497–504, 2006.

CALVET et al. The influence of broiler activity, growth rate, and litter on carbon dioxide balances for the determination of ventilation flow rates in broiler production. **Poultry Sci.**, v.90, p.2449-58, 2011.

_____. Characterization of gases emissions from a Mediterranean broiler farm. **Poltry Sci.**, v.90, p.534-42, 2011.

CAMPOS, A. T.; CAMPOS, A. T. Balanços energéticos agropecuários: uma importante ferramenta como indicativo de sustentabilidade de agroecossistemas. **Ciência Rural**, Santa Maria - RS, v. 34, n. 6, p. 1977–1985, 2004.

CARVALHO, C. D. D. O. et al. Composição química e energética de amostras de milhos submetidas a diferentes temperaturas de secagem e períodos de armazenamento. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 33, n. 2, p. 358–364, 2004.

CARVALHO, T. M. R. et al. Qualidade da cama e do ar em diferentes condições de alojamento de frangos de corte. **Revista Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, Brasília - DF, v. 46, n. 1, p. 351–361, 2011.

CENGEL, Y. **Thermodynamics and Heat Transfer**. 2. ed. Estados Unidos: McGraw-Hill, 2008.

CHANNIWALA, S. A.; PARIKH, P. P. A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. **Fuel**, v. 81, p. 1051–1063, 2002.

CHEN, G. Q. et al. Exergetic assessment for ecological economic system: Chinese agriculture. **Ecological Modelling**, v. 220, n. 3, p. 397–410, 2009.

COBB-VANTRESS. **Manual de Manejo de Frangos de Corte**. Guapiaçu-SP, 2009. Disponível em: <www.aviculturainteligente.com.br>.

COBB-VANTRESS. **Suplemento: Desempenho e nutrição para frangos de corte COBB 500**. Guapiáçu-SP, 2012.

CORDEIRO, M. B. et al. Conforto térmico e desempenho de pintos de corte submetidos a diferentes sistemas de aquecimento no período de inverno. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, n. 1, p. 217–224, 2010.

CURTIS, S. E. **Environmental management in animal agriculture**. Iowa: Iowa State University Press, 1983. 653 p.

D'AGOSTINI, P. et al. Valores de composição química e energética de alguns alimentos para aves. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 33, n. 1, p. 128–134, 2004.

DAVASSAIN, M. M.; BOODOO, A. A. **Use of bagasse as a potential source of litter material for broiler production**. In: Proceedings of the Annual Meeting of Agricultural Scientists. 1998. pg.15-20.

DINCER, I.; HUSSAIN, M. M.; AL-ZAHARNAH, I. Energy and exergy utilization in agricultural sector of Saudi Arabia. **Energy Policy**, v. 33, n. 11, p. 1461–1467, 2005.

DO VALE, A. T. et al. Caracterização Energética e Rendimento da Carbonização de Resíduos de Grãos de Café e de madeira Duke. **Cerne**, Lavras, v. 13, n. 4, p. 416–420, 2007.

DONG, H.; MANJINO, J.; MCALLISTER, T.A. Emissions from livestock and manure management. In: EGGLESTON, H. S. et al (Ed.). **2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories: agriculture, forestry and other land use**. Hayama: National Greenhouse Gas Inventories Programme, 2006. v. 4. Cap.10, pg.10.81 – 10.89.

FAO - ONU. **FAO Statistical Yearbook 2013: World food and agriculture**. Rome: FIAT PANIS, 2013. 289 p.

_____. **FAO Statistical Yearbook 2016: World food and agriculture**. Rome: FIAT PANIS, 2016.

FARMAHINI-FARAHANI; DELFANI; ESMAEELIAN. Exergy analysis of evaporative cooling to select the optimum system in diverse climates. **Energy**, v. 40, p.250-7, 2012.

FERNANDES, F.C. Poeiras em Aviários. **Rev. Bras. Med. Trab.** v. 2, n.4, p. 253-62, 2004.

FERREIRA, L. F.; TURCO, J. E. P. **Avaliação do consumo e custo de energia elétrica em galpão para criação de frangos de corte, em dois ciclos de criação**. In: 3 Encontro de Energia no meio Rural, Campinas-SP, 2003.

FERREIRA, M. S. **Um modelo do sistema térmico do corpo humano**. 2001. 167p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

FIORELLI, J. et al. Influência de Diferentes Materiais de cobertura no conforto térmico de Instalações para frangos de corte no oeste paulista. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal-SP, v. 30, n. 5, p. 986–992, 2010.

FUKAYAMA, E. H. **Características quantitativas e qualitativas da cama de frango sob diferentes reutilizações: efeitos na produção de biogás e biofertilizante**. 2008. 99 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Jaboticabal-SP, 2008.

FUNCK, S. R.; FONSECA, R. A. Avaliação energética e de desempenho de frangos com aquecimento automático a gás e a lenha. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 12, n. 1, p. 91–97, 2008.

FURLAN, R. L. **Influência da Temperatura na produção de Frangos de Corte**. In: VII Simpósio Brasil Sul de Avicultura. 2006. Chapecó-SC, 2006. p. 104-135.

GABARDO, R. P.; LIMA, E. A. DE. **Aproveitamento de Resíduos de origem florestal para a produção de carvão**. In: II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. 2011, Londrina - PR: Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2011, p. 1-4.

GARCIA et al. Litter materials and the incidence of carcass lesions in broilers chickens. **Bras. J. Poultry Sci.** v. 14, n. 1, p. 27-32, 2012.

_____. Selecting the most adequate bedding material for broiler production in Brazil. **Bras. J. Poultry Sci.** v. 14, n.2, p. 71-158, 2012.

GLOBALGAP. **Pontos de controle e critérios de cumprimento garantia integrada da fazenda**: aves. Cologne: 2007. p. 1-22. Disponível em: <www.gobalgap.org>.

GOMES, G. A. et al. Tempo de Fornecimento da dieta pré-inicial para frangos de corte com diferentes pesos ao alojamento. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, n. 10, p. 1802–1807, 2008.

GONZALES, E.; SALDANHA, E. S. P. B. **Os primeiros dias de vida do frango e a produtividade futura**. In: Congresso Brasileiro de Zootecnia, 2001, p. 310-327.

HAMIDU et al. The effect of broiler breeder genetic strain and parent flock age on eggshell conductance and embryonic metabolism. **Poultry Sci.**, v.86, p.2420-32, 2007.

HENN, J. D, et al. Growth and deposition of body components of intermediate and high performance broilers. **Bras. J. Poultry Sci.**, v.16, n.3, 2014.

_____. Determination of the equation parameters of carbon flow curves and estimated carbon flow and CO₂ emission from broiler production. **Poultry Science**, v.94, n.9, 2015.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo Agropecuário 2006: Agricultura Familiar**. Rio de Janeiro - RJ: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2009. 267 p.

JAENISCH, F. R. F. et al. **Importância da Higienização na Produção Agrícola**. Concórdia-SC: Embrapa Suínos e Aves, 2004. 5 p. (Comunicado Técnico 363 do Ministério da Agricultura, pecuária e Abastecimento).

JONES, E. K. M.; WATHES, C. M.; WEBSTER, A. J. F. Avoidance of atmospheric ammonia by domestic fowl and the effect of early experience. **Applied Animal Behaviour Science**, v. 90, n. 3-4, p. 293–308, 2005.

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

KELLEHER et al. Advances in poultry litter disposal technology. **Bioresource Tech**. v.83, p.27-36, 2002.

KLEIN, S. A.; ALVARADO, F. L. **EES - Engineering Equation Solver**. Academic version 9.698-3D, Mechanical Engineering Department, Texas A & M University-College Station, Tx, 1992.

KOLLMANN, F. F. P.; COTÊ, W. A. **Principles of wood science and technology**. Berlin: Springer-Verlag, 1968.

KOTAS, T. J. **The Exergy Method of Thermal Plant Analysis**. 1995. ed. Malabar, Florida: KRIEGER PUBLISHING COMPANY, 1995. 325 p.

KRAHL, I. M. **Desenvolvimento Sustentável, sustentabilidade e Exergia: Identificação de relações pertinentes e de indicadores baseados em Exergia**. 2009. 198 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2009.

KRAHL I.M.; PINTO, C. **Indicadores de sustentabilidade baseados em exergia e sua relação com a gestão ambiental**. In: VI Congresso nacional de excelência em gestão, Niterói-RJ, 2010.

KUNZ, A. et al. **Manejo Ambiental na Avicultura**. Concórdia-SC: Embrapa Suínos e Aves, 2011. 217 p. (Documentos 149 do Ministério da Agricultura, pecuária e Abastecimento).

LANA, G. R. Q. et al. Efeito da Densidade e de Programas de Alimentação sobre o Desempenho de Frangos de Corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 30, n. 4, p. 1258–1265, 2001.

LEAL, P. M.; CORTEZ, L. A. B.; NEBRA, S. A. Avaliação exergética de processos psicrométricos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, v. 4, n. 3, p. 421–428, 2000.

LEITE, E. R. D. S. et al. Avaliação da qualidade da madeira de Coffea Arábica como fonte de bioenergia. **Cerne**, v. 20, p. 541–549, 2014.

LIBONI, B. S. et al. Diferentes programas de luz na criação de frangos de corte. **Revista Científica Eletrônica de Medicina Veterinária**, Garça-SP, v. 20, jan. 2013.

LIEN, R. J.; CONNER, D. E.; BILGILI, S. F. The use of recycled paper chips as litter material for rearing broiler chickens. **Poultry Science**, v. 71, p. 81–87, 1992.

LYNCH, D. et al. Utilisation of poultry litter as an energy feedstock. **Biomass and Bioenergy**, v. 49, p. 197–204, 2013.

MACARI, M.; GONZALES, E.; FURLAN, R. L. **Fisiologia aviária aplicada a frangos de corte**. Jaboticabal: Funep, 1994. 246 p.

MADALENA, L. C. DE S.; OLIVEIRA, A. F. DE; ROCHADELLI, R. Lenha: o dendrocombustível na avicultura de corte. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 2, p. 48–60, 2013.

MALONE, G. W. Nutrient enrichment in integrated broiler production systems. **Poultry Science**, v. 71, p. 1117–1122, 1992.

MARIN, O. L. Z. **Caracterização e avaliação do potencial fertilizante e poluente de distintas camas de frango submetidas a reusos sequenciais na zona da mata do estado de Minas Gerais**. 2011. 68 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2011.

MARRI, A. O.; JB DE MENDES, M. G.; GOMES, P. A. **Manual de construção e operação de fornos de carbonização**. 1982. Belo Horizonte - MG: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC. 55 p.

MENEZES, M. J. S. **Poder Calorífico e Análise imediata da maravalha de Pinus (Pinus sp) e Araucária (Araucária Angustifolia) de reflorestamento como resíduos de madeira**. 2013. 65 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE-PR, Cascavel, 2013.

MIELE, M. et al. **Coeficientes técnicos para o cálculo do custo de produção de frango de corte, 2010**. Concórdia-SC: Embrapa Suínos e Aves, 2010. 14 p. (Comunicado Técnico 483 do Ministério da Agricultura, pecuária e Abastecimento).

MIELE, M.; GIROTTO, A. F. Análise da situação atual e perspectivas da avicultura de corte. **Anuário 2005 da avicultura industrial**, v. 96, p. 20–28, 2004.

MIGLIAVACCA, A; OLIVEIRA JUNIOR, S; YAHAGIHARA, J. I. Exergy Evaluation of the use of Poultry Litter to Supply the Thermal Load of Aviaries. In: 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering. Rio de Janeiro, Brazil, 2015.

MIGLIAVACCA, A; OLIVEIRA JUNIOR, S; YANAGIHARA, J.I. Exergy Analysis Applied to the Heating Process of Aviaries for Broiler Production in Brazil. In: 29th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. Portoroz, Slovenia, 2016.

MIGLIAVACCA, A; YANAGIHARA, J. I. Mass Balance Applied to Brazilian Conventional Broiler Houses during One Production Cycle. São Paulo – Brazil, **Brazilian Journal of Poultry Science**, v.19, n.1, pg. 75-86, 2017.

MIRAGLIOTTA et al. Software para estimativa de emissão de amônia em alojamento de frangos de corte. **Rev. Bras. Agroinformática**, v.6, n.2, pg.79-89, 2004.

MIRANDA, D. L. R.; MARTINS, P. As políticas públicas na conjuntura do desenvolvimento rural e manutenção da agricultura familiar: paradigmas, desafios e controvérsias. Curitiba – PR, **Rev. Bras. Planej. Desenv**, v.4, n.2, pg. 69-83, 2015.

MONTZKA, S. A; DLUGOKENCKY, E. J.; BUTLER, J. H. Non-CO₂ greenhouse gases and climate change. Colorado - USA, **Nature**, v. 476, n. 7358, p. 43–50, 2011.

MORAES, S. R. P. **Conforto térmico e módulos reduzidos de galpões avícolas para diferentes coberturas durante o verão**. 1998. 73 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 1998.

MORAN, M. J. et al. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 7. ed. Hoboken -USA: John Wiley & Sons, 2011.

MOULIN, J. C. et al. Avaliação energética da maravalha gerada em uma serraria de pequeno porte. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 2, n. 2, p. 16–22, 2011.

NAAS, I. A. et al. Avaliação térmica de telhas de composição de celulose e betume pintadas de branco, em modelos de aviários com escala reduzida. **Engenharia Agrícola**, v. 21, n. 2, p. 121–126, 2001.

NAAS, I. A. **Princípios de Conforto Térmico na Produção Animal**. São Paulo - SP: Ed. Icone., 1989. 183 p.

NAAS, I.A. Princípios de bem-estar animal e sua aplicação na cadeia avícola – Palestra. São Paulo: **Biológico**, v.70, n.2, p.105-6, 2008.

NASCIMENTO, L. A. B. **Análise Energética na Avicultura de Corte: Estudo da viabilidade econômica para um sistema de geração de energia elétrica eólico-fotovoltaica conectado à rede**. 2011. 126 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco-PR, 2011.

NASCIMENTO, S.T. **Modelagem do equilíbrio térmico de frangos de corte: um estudo da geração e transferência de calor**. 2015. 143 p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Jaboticabal-SP, 2015.

NASCIMENTO, S.T. et al. Metabolic heat production and evaporation of poultry. **Poultry Science**. V.0, n.1, p. 1-8, 2017.

OLIVEIRA, J. E. DE et al. Efeito do isolamento térmico de telhado sobre o desempenho de frangos de corte alojados em diferentes densidades. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 29, n. 5, p. 1427–1434, 2000.

OLIVEIRA JR, S. **Exergy: Production, Cost and Renewability**. London: Springer, 2013.

OLIVEIRA, M. C.; GOULART, R. B.; SILVA, J. C. N. Efeito de duas densidades e dois tipos de cama sobre a umidade da cama e a incidência de lesões na carcaça de frango de corte. **Ciência Animal Brasileira**, v. 3, n. 2, p. 7–12, 2002.

OLIVEIRA, P. A. V.; MONTEIRO, A. N. T. R. **Emissão de amônia na produção de frangos de corte**. In: Embrapa Suínos e Aves - Artigo em Anais de congresso (ALICE). In: 78 Conferência FACTA. Campinas-SP, 2013, Campinas: FACTA, 2013. 1 CD-ROM, 2013.

ORRICO JUNIOR, M. A.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS JÚNIOR, J. DE. Compostagem dos resíduos da produção avícola: cama de frangos e carcaças de aves. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal-SP, v. 30, n. 3, p. 538–545, 2010.

PAGANINI, F. J. Produção de frangos de corte: manejo de cama. Campinas - SP: FACTA, 2004. 356 p.

PAIXÃO, S. J. et al. **Uso de Uva Japão (*Hovenia dulcis* Thunberg) e Eucalipto (*Eucalyptus* sp.) para aquecimento em aviários**. In: Sistemas de Produção Agropecuária - Ciências Agrárias, Animais e Florestais. 2009, Dois Vizinhos, Dois Vizinhos: UTFPR, 2009.

Disponível em: <revistas.utfpr.edu.br/dv/index.php/SSPA/article/download/430/262>

PARIKH, J.; CHANNIWALA, G. K.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, v. 84, p. 487 – 494, 2005.

PEARSON, E. G.; LEAVENGOOD, S.; REEB, J. E. Comparison of the absorptive capacity of shavings of western juniper, western redcedar, and douglas-fir for animal bedding. **Forest Products Journal**, v. 50, n. 6, p. 109–119, 2000.

PROTÁSIO et al. Correlações canônicas entre as características químicas e energéticas de resíduos lignocelulósicos. **Cerne**, v. 18, n. 3, p. 433-9, 2012.

QUIRINO, W. F. et al. Poder calorífico da madeira e de materiais Ligno-Celulósicos. **Revista da Madeira**, v. 89, p. 100–106, 2005.

QUIROGA, G. et al. Physico-chemical analysis and calorific values of poultry manure. **Waste Management**, v. 30, n. 5, p. 880–884, 2010.

ROSA, Y. B. C. J. **Influência de três materiais de cobertura no índice de conforto térmico em condições de verão para Viçosa**. Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa, 1984. 77 p.

ROSS. **Frango ROSS 308**: Objetivos de Desempenho. Campinas-SP, 2013. Disponível em: <http://pt.aviagen.com/ross-308/>.

ROSSI, P. R. **Sistemas de climatização de instalações avícolas**. In: Simpósio Internacional sobre Ambiente e Sistemas de Produção Avícola. 1998, Concórdia. Anais... Concórdia-SC. v. 28, pg. 1-6, 1998.

SAKOMURA, N. K.; ROSTAGNO, H. S. **Metodologias para avaliar o conteúdo de energia dos alimentos**. Métodos de pesquisa em nutrição de monogástricos. Jaboticabal - SP: Funep, 2007. 283 p.

SANTOS, M. J. B. **Sistema de produção de frangos de corte caipira com piquetes enriquecidos e sua influência no bem-estar animal e desempenho zootécnico**. 2009. 87 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-PE, 2009.

SANTOS, T. M. B. **Caracterização química, microbiológica e potencial de produção de biogás a partir de três tipos de cama, considerando dois ciclos de criação de frangos de corte**. 1997. 95 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal-SP, 1997.

SANTOS, T. M. B. **Balanco Energético e Adequação do uso de Biodigestores em Galpões de Frangos de Corte**. 2001. 180 p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal-SP, 2001.

SANTOS, T. M. B.; LUCAS JUNIOR, J. **Balanco Energético em Galpão de Frangos de Corte**. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal-SP. v. 24, n. 1, p. 25–36, 2004.

_____. **Utilização de resíduos da avicultura de corte para a produção de energia**. In: ZOOTECA, 2003: 5 Congresso Internacional de Zootecnia, 13 Congresso Nacional de Zootecnia. Uberaba-MG. Anais... Uberaba, 2003. pg. 131-141.

SANTOS, T. M.; LUCAS JR, J. DE; SAKOMURA, N. K. Efeitos de densidade populacional e da reutilização da cama sobre o desempenho de frangos de corte e produção de cama. **Revista Portuguesa de Ciências Veterinárias**, v. 100, p. 45–52, 2005.

SARAZ et al. Modeling and experimental validation to estimate the energy balance for a poultry house with misting cooling. **Dyna**., v. 78, n. 170, p.167-74, 2011.

SARDINHA, A.; MACEDO, F. W.; MACEDO, F. V. **Combustão Lenhosa Directa e Indirecta**: Sua relevância para a Temática dos Fogos florestais. *Silva Lusitana*, v. 10, n. 1, p. 91–100, 2002.

SARMENTO, L. G. V. et al. Efeito da pintura externa do telhado sobre o ambiente climático e o desempenho de frangos de corte. **Agropecuária Técnica**, v. 26, n. 2, p. 117–122, 2005.

SILVA, A. T. O. S. **Análise Termodinâmica de uma Central de Biomassa Lenhosa**. 2013. Universidade Nova de Lisboa, 2013. 103 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2013.

SILVA, E. C. et al. Diagnóstico energético em aviários de frangos de corte. **Cultivando o Saber**, v. 5, n. 2, p. 104–112, 2011.

SIVAKUMAR, K. et al. Seasonal variations in composting process of dead poultry birds. **Bioresource technology**, v. 99, n. 9, p. 3708–13, 2008.

SNYDER, C.S.; BRUULSEMA, T.W.; JENSEN, T.L. Melhores práticas de manejo para minimizar emissões de gases de efeito estufa associadas ao uso de fertilizantes. **Informações Agronômicas**, n. 121, 2008.

SORDI, A.; SOUZA, S. N. M. DE; OLIVEIRA, F. H. DE. Biomassa gerada a partir da produção avícola na região oeste do Estado do Paraná: uma fonte de energia. **Acta Scientiarum Technology**, v. 27, n. 2, p. 183–190, 2005.

SOUZA, M. J. F. **Ajuste de Curvas pelo método dos Mínimos Quadrados**. Departamento de Computação/ICEB/UFOP. Ouro Preto - MG. 2000. Disponível em:

<<http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/Disciplinas/MetodosNumericoseEstatisticos/QuadradosMinimos.pdf>>.

STURION, J. A.; TOMASELLI, I. A influência do tempo de estocagem de lenha de bracatinga na produção de energia. **Boletim de Pesquisa Florestal**, v. 21, p. 37–47, 1990.

SZARGUT, J.; MORRIS, D. R.; STEWARD, F. R. **Energy analysis of thermal chemical and metallurgical processes**. Nova Iorque: Springer, 1988.

SZARGUT, J.; STYRYLSKA, T. Approximate evaluation of the exergy of fuels. *Brennst: Warme Kraft*, v.16, p.589-96, 1964.

TACHIBANA et al. Central Administration of prolactin-releasing peptide shifts the utilities of metabolic fuels from carbohydrate to lipids in chicks. **Physiology and Behavior**, v. 120, p.40-45, 2013.

TEIXEIRA et al. Poultry litter of wood shavings and/or sugarcane bagasse: animal performance and bed quality. **Rev. Colomb. Cienc. Pecu.**, v. 28, p. 238-46, 2015.

UBABEF. **Relatório Anual 2013**. São Paulo - SP: União Brasileira da avicultura, 2013. 109 p.

USDA. United States Department of Agriculture. **National Engineering Handbook: Agricultural waste management field handbook. Part 651.** Chapter 4. Washington DC, 2008.

UTLU, Z.; HEPBASLI, A. Assessment of the energy and exergy utilization efficiencies in the Turkish agricultural sector. **International Journal of Energy Research**, v. 30, n. 9, p. 659–670, 2006.

VIEIRA, M. DE F. A. **Caracterização e análise da qualidade sanitária de camas de frango de diferentes materiais reutilizados sequencialmente.** 2011. 81 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2011.

VIGODERIS, R. B. et al. Avaliação do uso de ventilação mínima em galpões avícolas e de sua influência no desempenho de aves de corte no período de inverno. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, n. 6, p. 1381–1386, 2010.

VIOLA, T.H., **A influência da restrição de água no desempenho de frangos de corte.** 2003. 151p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

WALL, G. **Exergy** - A useful concept within resource accounting. Goteborg-Sweden: Institute of Theoretical Physics, Chalmers University of Tecnology, 1977. 61 p.

WALL, G. **Exergy** - A useful concept. (P. R. T. Group, Ed.). Goteborg: Chalmers Biblioteks Tryckeri, 1986. 35 p.

WALL, G.; GONG, M. On exergy and sustainable development — Part 1 : Conditions and concepts. **Exergy, an International Journal**, v. 1, n. 3, p. 128–145, 2001a.

WALL, G.; GONG, M. On exergy and sustainable development — Part 2 : Indicators and methods. **Exergy, an International Journal**, v. 1, n. 4, p. 217–233, 2001b

ZUIDHOF et al. Growth, efficiency, and yield of commercial broilers from 1957, 1978, and 2005. **Poultry Sci**, v.93, p.1-13, 2014.

ANEXO 1 – LEGENDA AUXILIAR PARA FIGURA 17

m ₁	Fração de massa seca contida no material absorvente (maravalha)
m ₂	Fração de água líquida contida no material absorvente (maravalha)
m ₃	Fração de massa seca contida na ração
m ₄	Fração de água líquida contida na ração
m ₅	Fração de massa seca contida nos pintainhos
m ₆	Fração de água líquida contida nos pintainhos
m ₇	Massa de água consumida pelas aves durante o ciclo
m ₈	Massa de água utilizada para resfriamento evaporativo em aspersores
m ₉	Massa de água utilizada para resfriamento evaporativo em painéis
m ₁₀	Massa de água contida do ar atmosférico
m ₁₁	Massa de oxigênio contida no ar atmosférico
m ₁₂	Massa de nitrogênio contida no ar atmosférico
m ₁₃	Massa de gás liquefeito de petróleo utilizada para aquecimento
m ₁₄	Fração de massa seca contida da lenha utilizada para aquecimento
m ₁₅	Fração de água líquida contida na lenha utilizada para aquecimento
m ₁₆	Parte do nitrogênio direcionada para combustão
m ₁₇	Parte do oxigênio direcionada para combustão
m ₁₈	Parte do nitrogênio direcionada para crescimento das aves
m ₁₉	Parte do nitrogênio direcionada para arrefecimento e ventilação
m ₂₀	Parte do oxigênio direcionada para arrefecimento e ventilação
m ₂₁	Parte do oxigênio direcionada para crescimento das aves
m ₂₂	Umidade do ar atmosférico direcionada para arrefecimento e ventilação
m ₂₃	Umidade do ar atmosférico direcionada para crescimento das aves
m ₂₄	Massa de água gerada no processo de combustão
m ₂₅	Massa de oxigênio excedente no processo de combustão
m ₂₆	Massa de nitrogênio saindo do processo de combustão
m ₂₇	Massa de dióxido de carbono gerado no processo de combustão
m ₂₈	Massa de cinzas residuais da combustão da lenha
m ₂₉	Massa de oxigênio compondo o ar durante a ventilação
m ₃₀	Massa de oxigênio expirado no processo de respiração
m ₃₁	Massa de nitrogênio compondo o ar durante a ventilação
m ₃₂	Massa de nitrogênio expirado no processo de respiração
m ₃₃	Umidade do ar atmosférico saindo do arrefecimento e ventilação
m ₃₄	Massa de água eliminada pelas aves durante o ciclo produtivo
m ₃₅	Massa de dióxido de carbono gerado no processo de respiração
m ₃₆	Massa de dióxido de carbono gerado na composição da cama de aves
m ₃₇	Massa de oxigênio compondo ar úmido de saída
m ₃₈	Massa de nitrogênio compondo ar úmido de saída
m ₃₉	Umidade do ar úmido de saída
m ₄₀	Massa de dióxido de carbono gerado no ciclo de produção
m ₄₁	Massa de amônia gerada no ciclo de produção
m ₄₂	Fração de água líquida consumida direcionada para as carcaças
m ₄₃	Fração de água líquida dos pintainhos direcionada para as carcaças
m ₄₄	Fração de massa seca dos pintainhos direcionada para as carcaças
m ₄₅	Fração de água líquida da ração direcionada para as carcaças
m ₄₆	Fração de massa seca da ração direcionada para as carcaças
m ₄₇	Fração de água líquida da ração direcionada para os frangos
m ₄₈	Fração de massa seca da ração direcionada para os frangos
m ₄₉	Fração de água líquida dos pintainhos direcionada para os frangos
m ₅₀	Fração de água líquida consumida direcionada para os frangos
m ₅₁	Fração de massa seca dos pintainhos direcionada para os frangos
m ₅₂	Fração de água líquida da ração direcionada para a cama
m ₅₃	Fração de massa seca da ração direcionada para a cama
m ₅₄	Fração de água líquida consumida direcionada para a cama
m ₅₅	Fração de massa seca de pintainhos direcionada para a cama
m ₅₆	Fração de água líquida dos pintainhos direcionada para a cama
m ₅₇	Umidade do ar atmosférico direcionada para a combustão
m ₅₈	Poeiras e particulados extraídos do galpão durante o ciclo
m ₅₉	Massa de vapor saindo do processo de combustão
m ₇₀	Umidade do ar saturado expirado pelas aves
m ₇₁	Massa de água vaporizada das excretas na composição da cama de aves

ANEXO 2 – LEGENDA AUXILIAR PARA FIGURA 22

H ₁	Entalpia associada à fração de massa seca contida no material absorvente (maravalha)
H ₂	Entalpia associada à fração de água líquida contida no material absorvente (maravalha)
H ₃	Entalpia associada à fração de massa seca contida na ração
H ₄	Entalpia associada à fração de água líquida contida na ração
H ₅	Entalpia associada à fração de massa seca contida nos pintainhos
H ₆	Entalpia associada à fração de água líquida contida nos pintainhos
H ₇	Entalpia associada à massa de água consumida pelas aves durante o ciclo
H ₈	Entalpia associada à massa de água utilizada para resfriamento evaporativo em aspersores
H ₉	Entalpia associada à massa de água utilizada para resfriamento evaporativo em painéis
H ₁₃	Entalpia associada à massa de gás liquefeito de petróleo utilizada para aquecimento
H ₁₄	Entalpia associada à fração de massa seca contida da lenha utilizada para aquecimento
H ₁₅	Entalpia associada à fração de água líquida contida na lenha utilizada para aquecimento
H ₁₆	Entalpia associada à massa de nitrogênio direcionada para combustão
H ₁₇	Entalpia associada à massa de oxigênio direcionada para combustão
H ₂₃	Entalpia associada ao ar úmido atmosférico direcionado para respiração das aves
H ₂₄₋₂₇	Entalpia associada aos gases de combustão
H ₄₂₊₄₃₊₄₅	Entalpia associada à água líquida direcionada para carcaças
H ₄₄₊₄₆	Entalpia associada à massa seca direcionada para carcaças
H ₄₇₊₄₉₊₅₀	Entalpia associada à água líquida direcionada para frangos
H ₄₈₊₅₁	Entalpia associada à massa seca direcionada para frangos
H ₅₂₊₅₄₊₅₆	Entalpia associada à água líquida excretada
H ₅₃₊₅₅	Entalpia associada à massa seca das excretas
H ₅₇	Entalpia associada ao vapor na entrada da combustão
H ₅₉	Entalpia associada ao vapor na saída da combustão
H ₆₀₋₆₂	Entalpia do ar atmosférico utilizado para renovação de ar na fase inicial
H ₆₃₋₆₅	Entalpia do ar atmosférico utilizado para renovação de ar na fase crescimento
H ₆₆₋₆₈	Entalpia do ar atmosférico utilizado para renovação de ar na fase final
W ₇₂	Trabalho elétrico demandado para desenvolvimento das aves
W ₇₃	Trabalho elétrico demandado para fase inicial
W ₇₄	Trabalho elétrico demandado para fase crescimento
W ₇₅	Trabalho elétrico demandado para fase final
Q ₇₆	Calor metabólico gerado pelas aves durante a fase inicial
H ₇₇	Calor gerado no processo de combustão
H ₇₈	Calor metabólico gerado pelas aves durante a fase crescimento
H ₇₉	Calor metabólico gerado pelas aves durante a fase final
H ₈₀₋₈₂	Entalpia associada ao “ar” expirado pelas aves na fase inicial
H ₈₃₋₈₅	Entalpia associada ao “ar” expirado pelas aves na fase crescimento
H ₈₆₋₈₈	Entalpia associada ao “ar” expirado pelas aves na fase final
H ₈₉	Entalpia do CO ₂ gerado pela respiração na fase inicial
H ₉₀	Entalpia do CO ₂ gerado pela respiração na fase crescimento
H ₉₁	Entalpia do CO ₂ gerado pela respiração na fase final
H ₉₂	Entalpia do NH ₃ gerado pela cama na fase inicial
H ₉₃	Entalpia do NH ₃ gerado pela cama na fase crescimento
H ₉₄	Entalpia do NH ₃ gerado pela cama na fase final
H ₉₅	Entalpia do CO ₂ de saída na fase inicial
H ₉₆₋₉₈	Entalpia do ar úmido de saída na fase inicial