

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE MEDICINA VETERINÁRIA
CÂMPUS DE ARAÇATUBA

PATRÍCIA MARTINIANO DE OLIVEIRA CARVALHO

**MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS PARA ANÁLISE
DA CURVA DE CRESCIMENTO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
NA PRODUÇÃO DE FRANGOS DE CORTE**

ARAÇATUBA – SP
2021

PATRÍCIA MARTINIANO DE OLIVEIRA CARVALHO

**Modelos matemáticos aplicados para análise da curva de
crescimento e eficiência energética na produção de
frangos de corte**

Tese apresentada à Faculdade de Medicina Veterinária de Araçatuba da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Unesp, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciência Animal (Medicina Veterinária Preventiva e Produção Animal).

Orientador: Prof. Dr. Marcos Franke Pinto

Coorientador: Prof. Dr. Manoel Garcia Neto
Coorientador: Prof. Dr. Max José de Araujo Faria Junior

**ARAÇATUBA – SP
2021**

C331m	Carvalho, Patrícia Martiniano de Oliveira Modelos matemáticos aplicados para análise da curva de crescimento e eficiência energética na produção de frangos de corte / Patrícia Martiniano de Oliveira Carvalho. -- Araçatuba, 2021 111 f. : il., tabs. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Medicina Veterinária, Araçatuba Orientador: Marcos Franke Pinto Coorientador: Manoel Garcia Neto ; Max José de Araujo Faria Junior 1. Avaliação energética. 2. Energia cinética. 3. Força ontogênica do crescimento. 4. Programa prático de modelagem de forças. 5. Relação input-output. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Medicina Veterinária, Araçatuba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Araçatuba

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: Modelos matemáticos aplicados para análise da curva de crescimento e eficiência energética na produção de frangos de corte

AUTORA: PATRICIA MARTINIANO DE OLIVEIRA CARVALHO

ORIENTADOR: MARCOS FRANKE PINTO

COORIENTADOR: MANOEL GARCIA NETO

COORIENTADOR: MAX JOSÉ DE ARAUJO FARIA JUNIOR

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em CIÊNCIA ANIMAL, área: Medicina Veterinária Preventiva e Produção Animal pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MAX JOSÉ DE ARAUJO FARIA JUNIOR (Participação Virtual)
Departamento de Produção e Saúde Animal / Faculdade de Medicina Veterinária - Câmpus de Araçatuba/Unesp

Prof. Dr. CECILIO VIEGA SOARES FILHO (Participação Virtual)
Departamento de Produção e Saúde Animal / Faculdade de Medicina Veterinária - Câmpus de Araçatuba/UNESP

Pesquisador LEANDRO KANAMARU FRANCO DE LIMA (Participação Virtual)
Centro Nacional de Pesquisa em Pesca, Aquicultura e Sistemas Agrícolas / Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA

Prof. Dr. DANILO FLORENTINO PEREIRA (Participação Virtual)
Departamento de Gestão, Desenvolvimento e Tecnologia / Faculdade de Ciências e Engenharia - Câmpus de Tupã/UNESP

Prof. Dr. THIAGO LUÍS MAGNANI GRASSI (Participação Virtual)
Curso de Medicina Veterinária, Faculdade de Ciências Agrárias / Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE), Presidente Prudente/SP

Araçatuba, 20 de abril de 2021.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: Modelos matemáticos aplicados para análise da curva de crescimento e eficiência energética na produção de frangos de corte

AUTORA: PATRICIA MARTINIANO DE OLIVEIRA CARVALHO

ORIENTADOR: MARCOS FRANKE PINTO

COORIENTADOR: MANOEL GARCIA NETO

COORIENTADOR: MAX JOSÉ DE ARAUJO FARIA JUNIOR

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em CIÊNCIA ANIMAL, área: Medicina Veterinária Preventiva e Produção Animal pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MAX JOSÉ DE ARAUJO FARIA JUNIOR (Participação Virtual)

Departamento de Produção e Saúde Animal / Faculdade de Medicina Veterinária - Câmpus de Araçatuba/Unesp



Prof. Dr. CECILIO VIEGA SOARES FILHO (Participação Virtual)

Departamento de Produção e Saúde Animal / Faculdade de Medicina Veterinária - Câmpus de Araçatuba/UNESP

Pesquisador LEANDRO KANAMARU FRANCO DE LIMA (Participação Virtual)

Centro Nacional de Pesquisa em Pesca, Aquicultura e Sistemas Agrícolas / Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA

Prof. Dr. DANILO FLORENTINO PEREIRA (Participação Virtual)

Departamento de Gestão, Desenvolvimento e Tecnologia / Faculdade de Ciências e Engenharia - Câmpus de Tupã/UNESP

Prof. Dr. THIAGO LUÍS MAGNANI GRASSI (Participação Virtual)

Curso de Medicina Veterinária, Faculdade de Ciências Agrárias / Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE), Presidente Prudente/SP

Araçatuba, 20 de abril de 2021.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Araçatuba

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: Modelos matemáticos aplicados para análise da curva de crescimento e eficiência energética na produção de frangos de corte

AUTORA: PATRICIA MARTINIANO DE OLIVEIRA CARVALHO

ORIENTADOR: MARCOS FRANKE PINTO

COORDENADOR: MANOEL GARCIA NETO

COORDENADOR: MAX JOSÉ DE ARAUJO FARIA JUNIOR

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em CIÊNCIA ANIMAL, área: Medicina Veterinária Preventiva e Produção Animal pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MAX JOSÉ DE ARAUJO FARIA JUNIOR (Participação Virtual)
Departamento de Produção e Saúde Animal / Faculdade de Medicina Veterinária - Câmpus de Araçatuba/Unesp

Prof. Dr. CECILIO VIEGA SOARES FILHO (Participação Virtual)
Departamento de Produção e Saúde Animal / Faculdade de Medicina Veterinária - Câmpus de Araçatuba/UNESP


Pesquisador LEANDRO KANAMARU FRANCO DE LIMA (Participação Virtual)
Centro Nacional de Pesquisa em Pesca, Aquicultura e Sistemas Agrícolas / Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA

Prof. Dr. DANILO FLORENTINO PEREIRA (Participação Virtual)
Departamento de Gestão, Desenvolvimento e Tecnologia / Faculdade de Ciências e Engenharia - Câmpus de Tupã/UNESP

Prof. Dr. THIAGO LUÍS MAGNANI GRASSI (Participação Virtual)
Curso de Medicina Veterinária, Faculdade de Ciências Agrárias / Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE), Presidente Prudente/SP

Araçatuba, 20 de abril de 2021.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: Modelos matemáticos aplicados para análise da curva de crescimento e eficiência energética na produção de frangos de corte

AUTORA: PATRICIA MARTINIANO DE OLIVEIRA CARVALHO

ORIENTADOR: MARCOS FRANKE PINTO

COORIENTADOR: MANOEL GARCIA NETO

COORIENTADOR: MAX JOSÉ DE ARAUJO FARIA JUNIOR

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em CIÊNCIA ANIMAL, área: Medicina Veterinária Preventiva e Produção Animal pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MAX JOSÉ DE ARAUJO FARIA JUNIOR (Participação Virtual)
Departamento de Produção e Saúde Animal / Faculdade de Medicina Veterinária - Câmpus de Araçatuba/Unesp

Prof. Dr. CECILIO VIEGA SOARES FILHO (Participação Virtual)
Departamento de Produção e Saúde Animal / Faculdade de Medicina Veterinária - Câmpus de Araçatuba/UNESP

Pesquisador LEANDRO KANAMARU FRANCO DE LIMA (Participação Virtual)
Centro Nacional de Pesquisa em Pesca, Aquicultura e Sistemas Agrícolas / Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA

Prof. Dr. DANILO FLORENTINO PEREIRA (Participação Virtual)
Departamento de Gestão, Desenvolvimento e Tecnologia / Faculdade de Ciências e Engenharia - Câmpus de Tupã/UNESP

Prof. Dr. THIAGO LUÍS MAGNANI GRASSI (Participação Virtual)
Curso de Medicina Veterinária, Faculdade de Ciências Agrárias / Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE), Presidente Prudente/SP

Araçatuba, 20 de abril de 2021.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Campus de Araçatuba

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: Modelos matemáticos aplicados para análise da curva de crescimento e eficiência energética na produção de frangos de corte

AUTORA: PATRICIA MARTINIANO DE OLIVEIRA CARVALHO

ORIENTADOR: MARCOS FRANKE PINTO

COORIENTADOR: MANOEL GARCIA NETO

COORIENTADOR: MAX JOSÉ DE ARAUJO FARIA JUNIOR

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em CIÊNCIA ANIMAL, área: Medicina Veterinária Preventiva e Produção Animal pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MAX JOSÉ DE ARAUJO FARIA JUNIOR (Participação Virtual)
Departamento de Produção e Saúde Animal / Faculdade de Medicina Veterinária - Campus de Araçatuba/Unesp

Prof. Dr. CECILIO VIEGA SOARES FILHO (Participação Virtual)
Departamento de Produção e Saúde Animal / Faculdade de Medicina Veterinária - Campus de Araçatuba/UNESP

Pesquisador LEANDRO KANAMARU FRANCO DE LIMA (Participação Virtual)
Centro Nacional de Pesquisa em Pesca, Aquicultura e Sistemas Agrícolas / Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA

Prof. Dr. DANILO FLORENTINO PEREIRA (Participação Virtual)
Departamento de Gestão, Desenvolvimento e Tecnologia / Faculdade de Ciências e Engenharia - Campus de Tupa/UNESP

Prof. Dr. THIAGO LUÍS MAGNANI GRASSI (Participação Virtual)
Curso de Medicina Veterinária, Faculdade de Ciências Agrárias / Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE), Presidente Prudente/SP

Araçatuba, 20 de abril de 2021.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

PATRÍCIA MARTINIANO DE OLIVEIRA CARVALHO - nascida em 30 de novembro de 1977, em São Paulo – SP, cursou o ensino fundamental e médio no Colégio Sagrado Coração de Jesus, no município de São Paulo – SP. Ingressou no curso de Medicina Veterinária na Faculdade de Medicina Veterinária de Araçatuba/UNESP – SP em 2007 e formou-se no ano de 2011. Durante a graduação foi aluna de iniciação científica, com bolsa FAPESP. Iniciou em 2012, como aluna especial e em 2013, como aluna regular do curso de mestrado em Ciência Animal na Faculdade de Medicina Veterinária de Araçatuba/UNESP – SP, na área de Medicina Veterinária Preventiva e Produção Animal, com bolsa CAPES, concluindo-o no ano de 2015. Atualmente é doutoranda, bolsista CAPES, vinculada à área de Medicina Veterinária Preventiva e Produção Animal, no programa de Pós-Graduação em Ciência Animal da Faculdade de Medicina Veterinária de Araçatuba/UNESP – SP, sob orientação do professor Marcos Franke Pinto.

Dedico

*A Deus por conceder mais essa vitória em
minha vida.*

*Aos meus pais, irmã e esposo por me apoiarem
nesta trajetória em busca do meu sonho.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus amados pais Oscar e Vita, alicerces da minha vida, que estiveram sempre ao meu lado oferecendo incentivo e apoio;

À minha querida e amada irmã Tatiana, que participou de todos os momentos importantes em minha vida, sem sua ajuda tudo se tornaria mais difícil;

Ao meu esposo Nilson, meu grande amor, companheiro fiel, grande presente de Deus em minha vida;

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Medicina Veterinária - campus de Araçatuba, e ao Programa de Pós-graduação em Ciência Animal, pela oportunidade da realização do Curso de Doutorado, e pelo suporte e todos os ensinamentos adquiridos através deste Corpo Docente que em sua totalidade é referência em competência, dedicação e amor à profissão;

Ao professor Marcos Franke Pinto por aceitar ser meu orientador, pelo apoio e por todos os ensinamentos;

Ao professor Max José de Araujo Faria Junior, meu coorientador pela segunda vez! Sou grata pela oportunidade que o senhor me ofereceu, pois não tinha expectativa de retornar à Araçatuba e retomar meus estudos, até o momento em que o senhor me propôs este projeto que agora, com a graça de Deus concluímos. Agradeço por fazer parte de momentos tão marcantes em minha vida acadêmica;

Ao professor Manoel Garcia Neto, exemplo de dedicação, perseverança. Sou imensamente grata pela generosidade do senhor e pela disponibilidade em me ensinar com tanto entusiasmo. Se não fosse todo esse cuidado, certamente, eu não estaria preparada. Agradeço imensamente por acreditar na minha capacidade.

Ao professor Luiz Eduardo Corrêa Fonseca, pelos conselhos e apoio. Estagiar na disciplina de Avicultura e Suinocultura foi uma experiência maravilhosa. O senhor me deu a oportunidade de ministrar aula e de acompanhar de perto todo o trabalho de elaboração de conteúdo, avaliações, enfim, sou muito grata por ter acreditado no meu potencial;

Aos professores e amigos Dr. Wilson Machado de Souza e Dona Nair Trevisan Machado de Souza pelos conselhos, amizade e carinho;

Aos membros das bancas da qualificação e da defesa de tese, professores Cecílio Viegas Soares Filho, Danilo Florentino Pereira, Leandro Kanamaru Franco de Lima, Leda Gobbo de Freitas Bueno e Thiago Luís Magnani Grassi, pela participação e sugestões;

Aos funcionários Daniela Manzatti Soares Danelussi, João Paulo Montoro Kampara, Joelmir Oliveira Cardoso, Alexandre Naba, a bibliotecária Cristina Alexandra de Godoy e o Ederson Vasconcelos Pereira por todas as orientações tão precisas e fundamentais;

Ao amigo Sr. William Raduan Ansarah (*in memoriam*), por ter apoiado meus estudos desde o início da graduação, sei que ficaria orgulhoso em saber que concluiu mais uma etapa do meu crescimento profissional;

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Enfim, a todos que direta e indiretamente contribuíram para a execução desta dissertação;

Que Deus com sua infinita misericórdia e bondade abençoe a todos extraordinariamente.

*“O maior valor de uma imagem é quando ela nos força a
notar o que nunca esperávamos ver”*

(John Turkey)

CARVALHO, P. M. O. **Modelos matemáticos aplicados para análise da curva de crescimento e eficiência energética na produção de frangos de corte.** 2021. 111 f. Tese (Doutorado em Ciência Animal) – Faculdade de Medicina Veterinária de Araçatuba, Universidade Estadual Paulista, Araçatuba, 2021.

RESUMO

A avicultura é uma atividade que apresenta um alto consumo energético, o que gera externalidades negativas. Diante do crescimento populacional e a necessidade crescente de aumentar a produção, sem que isso implique em prejuízos ambientais, medidas que garantam a obtenção de melhores índices de eficiência energética são primordiais, como a mensuração da relação *output/input*, ferramenta econômica útil que avalia o sistema produtivo a longo prazo. O objetivo deste estudo foi aplicar o Programa Prático de Modelagem de Forças (PPFM), o qual trabalha com a força ontogênica do crescimento e avaliação da eficiência energética através da energia cinética, cuja soma culmina no princípio da ação, na análise das curvas de crescimento de frangos de corte e também na avaliação da energia retida na carcaça em função da idade, através do modelo de Richards, no contexto da análise da eficiência energética para o sistema produtivo de carcaças evisceradas, como também expressar, em modelo matemático, a eficiência no uso de energia relacionando os *inputs* e *outputs* envolvidos na produção de frangos de corte. Foram utilizados dados dos padrões de crescimento de 384 frangos de corte (128 aves/linhagem), de ambos os sexos, segundo as linhagens Cobb 500, Hubbard Flex e Ross 380 para a modelagem das curvas de crescimento, e para estimar a eficiência energética foram empregados dados dos padrões de crescimento de 560 frangos de corte machos, da linhagem Cobb 500, de 1 a 56 dias de idade, alimentados com rações de diferentes níveis de energia metabolizável (EM) (2850, 3000, 3150 e 3300 kcal kg⁻¹ de ração). Pintainhos e ração foram considerados como *inputs*, e a carcaça eviscerada como *output*. Para avaliar a energia depositada na carcaça (ER_{carc}) calculou-se a energia retida como gordura (ER_{gord}) e na forma de proteína (ER_{prot}). A determinação dos *inputs* obteve-se mediante o conhecimento das energias retidas no pintainho (ER_{pint}) e no alimento (ER_{alim}). A eficiência no uso de energia (EUE), produtividade energética (PEn) e energia líquida (EL) foram calculados. Os dados

foram submetidos à análise de variância e ajustaram-se as regressões polinomiais significativas. A análise de superfície de resposta foi empregada para verificar e quantificar os efeitos sinérgicos e antagônicos. Através da análise energética do sistema produtivo, os índices EUE, PEn, EL encontrados foram 30%, 0,024 kg MJ⁻¹ e -72,53 MJ, respectivamente. Os resultados revelaram que a produção de frangos de corte avaliada possui baixa eficiência energética. Portanto, medidas são necessárias para melhorar os índices energéticos, como utilizar menos energia *input* através de dietas que atendam precisamente às necessidades energéticas das aves, já que a ração é o insumo que mais demanda energia, e/ou melhorar o rendimento de carne, através da utilização de outras partes da ave, como pescoço, pés e cabeça.

Palavras-chave: Avaliação energética. Energia cinética. Força ontogênica do crescimento. Programa prático de modelagem de forças. Relação *input-output*.

CARVALHO, P. M. O. **Mathematical models applied to growth curve analysis and energy efficiency in broiler chicken production.** 2021. 111 f. Thesis (Doctorate in Animal Science) – Faculty of Veterinary Medicine of Araçatuba, São Paulo State University, Araçatuba, 2021.

ABSTRACT

Aviculture is an activity that presents a high consumption of energy, which generates negative externalities. Due to population growth and the growing need of increasing production, without this implicating in environmental harms, measures which ensure the achievement of better indexes of energy efficiency are paramount, as the measurement of the output/input ratio, a useful economic tool that assesses, in the long term, the productive system. This study has aimed to apply the Practical Program for Forces Modeling (PPFM), which works with the ontogenetic growth force and energy efficiency assessment through kinetic energy, whose sum culminates in the action principle, in the analysis of broiler chickens growth curves and also in the assessment of energy retained in the carcass in function of age, through the Richards model, in the context of energy efficiency analysis for the productive system of the eviscerated carcass, as well as expressing, in a mathematical model, energy use efficiency relating the inputs and outputs involved in broiler chicken production. Data from the growth patterns of 384 broiler chickens (128 poultry/strain), from both sexes, according to the Cobb 500, Hubbard Flex, and Ross 380 strains were used to model the growth curves and, in order to estimate energy efficiency, data from the growth patterns of 560 male broiler chickens from the Cobb 500 strain, from 1 to 56 days of age, fed with feeds of different metabolizable energy (ME) levels (2850, 3000, 3150, and 3300 kcal kg⁻¹ of feed) were employed. Chicks and feed were considered inputs, and the eviscerated carcass, outputs. For the assessment of the energy deposited in the carcass (ER_{carc}), the energy retained as fat (ER_{fat}) and in the form of protein (ER_{prot}) was calculated. The determination of the inputs was obtained through the knowledge of the energies retained in the chicken (ER_{chick}) and in the feed (ER_{feed}). The energy use efficiency (EUE), energy productivity (EP), and net energy (NE) were calculated. Data was submitted to analysis of variance and significant polynomial regressions were adjusted. Response surface analysis was employed to verify and quantify the synergetic and antagonistic effects. EUE, Pen,

and EL indexes of 30%, 0,024 kg MJ⁻¹, and -72,53 MJ, respectively, were found through productive system energy analysis. The results revealed that the broiler chicken production assessed has low energy efficiency. Therefore, measures are needed to improve the energy indicators, as using less energy input through diets with precise energy requirements, since the feed is the highest energy input, and/or improving meat yield, through the use of others parts of birds, such as neck, feet and head.

Keywords: Energy analysis. Kinetic energy. Input-output ratio. Ontogenetic growth force. Practical program for forces modeling.

LISTA DE FIGURAS

CHAPTER 1 – PPFM: A NEW CONCEPT IN GROWTH CURVE MODELING

- Figure 1** – Interface of data entry. Initial adjustment of the parameters. Five indicators of quality of adjustment of the growth curve 54
- Figure 2** – Graphic representation of the growth curve by the traditional method (accumulation of mass in function of time) for broiler chickens, of both sexes, according strains 57
- Figure 3** – Location of the critical points F_0 , F_1 , F_2 , F_3 , and respective phases 58
- Figure 4** – Action calculation 62
- Figure 5** – Graphic representation of the approach of the growth process by the PPFM (energy assessment) for broiler chickens, of both sexes, according strains 65

CHAPTER 2 – ENERGY ANALYSIS OF THE PRODUCTION OF BROILER CHICKENS FED WITH FEEDS OF DIFFERENT ENERGY LEVELS

- Figure 1** – Response surface over the effect of metabolizable energy (ME) and days of life in broiler chickens for: energy retained by feeding (1A), energy retained in the carcass (1B), energy use efficiency (1C), energy productivity (1D), and net energy (1E) 83
- Figure 2** – Curves adjusted for energy retained in the carcass, in function of age, for male broiler chickens, according to treatments 90
- Figure 3** – Graphic representation of the energy assessment for broiler chickens fed with feed of different energy densities, according to the PPFM 91

LISTA DE TABELAS

CHAPTER 1 – PPFM: A NEW CONCEPT IN GROWTH CURVE MODELING

- Table 1** – Estimate of the parameters of the Gompertz and Richards functions for the live weight and percentage variation between estimated and observed weight of broiler chickens, of both sexes, according to the strains, of 1 up to 106 days of age through different approaches of the growth process .60
- Table 2** – Accumulated mass and action (sum of all useful work) for males and females according to strains 64

CHAPTER 2 – ENERGY ANALYSIS OF THE PRODUCTION OF BROILER CHICKENS FED WITH FEEDS OF DIFFERENT ENERGY LEVELS

- Table 1** – Composition of the feeds for broiler chickens males, according to treatment and breeding phase 78
- Table 2** – Regression equations' coefficients that describe the response surface models in function of the metabolizable energy and age and analysis of variance for male broiler chickens of the Cobb 500 line 82
- Table 3** – Averages in function of the metabolizable energy variations for Cobb 500 male broiler chickens for slaughter at 43 days of age 84
- Table 4** – Parameters of the Richards function that describe the model adjustment in function of metabolizable energy variations of feed and of age for Cobb 500 male broiler chickens 89

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS

$|a|$: aceleração; acceleration

a : parâmetro da função de Richards referente à assíntota superior; parameter of Richards' function related upper horizontal asymptote of the curve

A: limite assintótico do peso quando a idade se aproxima do infinito; asymptotic weight limit when age approaches infinity

ABIEC: Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes

ABPA: Associação Brasileira de Proteína Animal

AIC: critério de informação de Akaike

AIC_c: critério de informação de Akaike corrigido; corrected Akaike information criterion

Ag: idade das aves – dias; poultry age – days

a_1 : valor do intercepto da função; value of the intercept of the function

a_2 e a_3 : valores dos parâmetros para energia metabolizável e idade, respectivamente; values of the parameters for metabolizable energy and age, respectively

a_4 e a_6 : valores dos parâmetros quadráticos para energia metabolizável e idade, respectivamente; values of the quadratic parameters for metabolizable energy and age, respectively

a_5 : valor do parâmetro de interação entre idade e energia; value of the parameter of interaction between age and metabolizable energy

b : parâmetro da função de Richards relacionado à forma da curva; parameter of Richard's function related of curve shape – indicates indirectly the position of the inflexion point

B: taxa de maturidade; maturity rate

BE; EB: balanço eletrolítico; electrolyte balance

BIC: bayesian information criterion; critério de informação bayesiano

c : crescimento relativo máximo; the maximum relative growth

Ca/P: relação Ca/P; Calcium/Phosphorus ratio

CAPES: Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior

CEPEA: Centro de Estudos avançados em Economia Aplicada

CEUA: Comissão de Ética no Uso de Animais; Ethics Committee in the Use of Animals

Cl^- : Cloro; Chlorine

Co: Cobalto

COBEA: Colégio Brasileiro de Experimentação Animal; Brazilian College of Animal Experimentation

Cu: Cobre; Copper

CV: coeficiente de variação; coefficients of variation

d : idade no ponto de máxima taxa de crescimento; the age at maximum rate of growth

DPR: desvio padrão residual

E_D : estimativa de energia direta

E_I : estimativa de energia indireta

E_{input} : estimativa de energia consumida no processo de produção

EL; NE: energia líquida; net energy

EM; ME: energia metabolizável da ração; metabolizable energy of the feed

E_{output} : estimativa de energia que sai no processo de produção

ER_{alim} ; ER_{feed} : energia retida na ração; energy retained in the feed

ER_{carc} : energia retida na carcaça; energy retained in the carcass

ER_{gord} ; ER_{fat} : energia retida como gordura; energy retained as fat

ER_{pint} ; ER_{chick} : energia retida no pintainho; energy retained in the chicken

ER_{prot} : energia retida na forma de proteína; energy retained in the form of protein

EUE: eficiência no uso de energia; energy use efficiency

F: força resultante do crescimento; force resulting from growth

FAPESP: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

Fe: Ferro; Iron

F_i : ponto de inflexão; inflexion point

FMVA: Faculdade de Medicina Veterinária de Araçatuba; Faculty of Veterinary Medicine of Araçatuba

F_0 : ponto que marca o início do crescimento na curva; represents the start of growth curve

F_1 : ponto que sinaliza o início da fase linear e fim da fase exponencial crescente; marks the start of the linear phase and the end of the exponential increase phase

F_2 : ponto que demarca o fim da fase linear e início da fase exponencial decrescente; symbolizes the end of the linear phase and start of the exponential decrease phase

F_3 : ponto de saturação do crescimento – “platô biológico”; start of the stationary phase – sets the “biological plateau”

g: gramas; grams

I: Iodo; Iodine

IU: Unidade Internacional de medida em farmacologia

k : número de variáveis do modelo polinomial

K^+ : Potássio; Potassium

kcal kg^{-1} : quilocaloria por quilograma; kilocalorie per kilogram

K_E : energia cinética; kinetic energy

$K_{E \max}$: representa o momento em que alcançou o ápice da eficiência energética; represents the moment in which the energy efficiency is at its peak

kg: quilograma; kilogram

kg hab^{-1} : quilograma por habitante

kg MJ^{-1} : quilograma por megajoule de energia; kilogram per megajoule of energy

L: efeito linear; effect linear

$\log(n)$: logaritmo

$\log L(\hat{\theta})$: logaritmo da função de verossimilhança

m: massa; mass

mEq: miliequivalentes; miliequivalents

MJ: megajoule de energia; megajoule of energy

MJ/eviscerated carcass: megajoule de energia por carcaça eviscerada; megajoule of energy per eviscerated carcass

MJ/poultry: megajoule de energia por ave; megajoule of energy per poultry

MMQ; LSM: método dos mínimos quadrados; least squares method

Mn: Manganês; manganese

n : número de observações

Na^+ : Sódio; Sodium

ns: não significativo; non significant

p : número de parâmetros da função (modelo)

PE_n; EP: produtividade energética; energy productivity

P_i : ponto de inflexão da curva de crescimento; inflexion point of the growth curve

PPFM: Programa Prático de Modelagem de Forças; Practical Program for Forces Modeling

PPFR: Programa Prático de Formulação de Ração; Practical Program for Formulation of Rations

P_1 : ponto da curva de crescimento onde a aceleração é máxima; point of growth curve where the acceleration is maximum

P_2 : ponto da curva de crescimento onde a desaceleração é máxima; point of growth curve where the deceleration is maximum

Q: efeito quadrático; effect quadratic

QMR: quadrado médio dos resíduos

RE; ER: relação eletrolítica; electrolyte ration

R^2 : coeficiente de determinação; determination coefficient

R^2_{adj} : coeficiente de determinação ajustado; adjusted determination coefficient

SAS: *Statistical Analysis System*

Se: Selênio; Selenium

SQR; SSR: soma dos quadrados dos resíduos; residual sum of the squares

SQT: soma dos quadrados total

T_{action} : número de dias totais para o crescimento; total of days for growth

T_i : idade no ponto de inflexão; age at the inflexion point

$T_{K_E max}$: idade – dia no pico do investimento energético; age – day of the peak of energy investment

T_3 : idade na maturidade; age at maturity

UC Davis: Universidade da Califórnia, Davis; University of California, Davis

UNESP: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”; São Paulo State University “Júlio de Mesquita Filho”

v: velocidade; velocity

VBA: Visual Basic for Application

Vit. A: Vitamina A – Retinol; Vitamin A – Retinol

Vit. B₁: Vitamina B₁ – Tiamina; Vitamin B₁ – Thiamine

Vit. B₂: Vitamina B₂ – Riboflavina; Vitamin B₂ – Riboflavin

Vit. B₆: Vitamina B₆ – Piridoxina; Vitamin B₆ – Pyridoxine

Vit. B₁₂: Vitamina B₁₂ – Cobalamina; Vitamin B₁₂ – Cobalamin

Vit. D₃: Vitamina D₃ – Colicalciferol; Vitamin D₃ – Cholicalciferol

Vit. E: Vitamina E – Tocoferol; Vitamin E – Tocopherol

Vit. K₃: Vitamina K₃ – Menadiona; Vitamin K₃ – Menadione

W_{action} : peso alcançado no final do crescimento; weight reached at the end of growth

W_{fat} : conteúdo estimado de gordura depositado na carcaça em kg; estimated fat content deposited in the carcass (kg)

W_i : peso no ponto de inflexão; weight at the inflexion point

$\frac{W_i}{A}$: posição do ponto de inflexão na curva; the position of the point of inflexion in the curve

$W_{KE\ max}$: peso no pico do investimento energético; weight at the peak of energy investment

W_{mean} : peso médio; average weight

W_{prot} : quantidade estimada de proteína depositada na carcaça; estimated amount of protein deposited in the carcass

W_3 : peso na maturidade; weight at maturity

x : matriz do desenho experimental

x_i : variável independente

x_j : variável independente

Y : resposta para a variável do estudo; response for the variable in study

y_i : i -ésimo valor observado

$\hat{y}_i$: i -ésimo valor estimado

Zn: Zinco; Zinc

β : vetor constituído pelos coeficientes do modelo ajustado

β_i : parâmetro de regressão para efeito do coeficiente linear

β_{ii} : parâmetro de regressão para o efeito quadrático

β_{ij} : parâmetro de regressão para o efeito de interação

β_0 : termo constante da função polinomial de 1º e 2º grau

ε : resíduo

Σ : somatório

σ^2 : variância residual

$\tilde{\sigma}^2$: estimador de máxima verossimilhança

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	26
1.1 Modelos matemáticos	28
1.2 Curvas de crescimento	30
1.3 Indicadores de qualidade de ajuste para modelos não lineares	32
1.4 Ajuste de modelos	35
1.4.1 Programa Prático de Modelagem de Forças – PPFM	35
1.4.2 Metodologia de superfície de resposta	38
1.5 Abordagem energética na avicultura de corte	42
1.6 Implicações da análise energética no contexto da avicultura atual	46
1.7 Objetivos	47
1.7.1 Objetivo Geral	47
1.7.2 Objetivo Específico	48
2 CHAPTER 1 – PPFM: A NEW CONCEPT IN GROWTH CURVE MODELING	49
2.1 Resumo	49
2.2 Abstract	50
2.3 Introduction	50
2.4 Material and Methods	52
2.5 Results and Discussion	56
2.6 Conclusion	67
2.7 Acknowledgments	67
2.8 References	67
3 CHAPTER 2 – ENERGY ANALYSIS OF THE PRODUCTION OF BROILER CHICKENS FED WITH FEEDS OF DIFFERENT ENERGY LEVELS	73
3.1 Resumo	73
3.2 Abstract	74
3.3 Introduction	74
3.4 Material and Methods	76
3.5 Results and Discussion	81
3.6 Conclusion	91
3.7 Acknowledgments	92
3.8 References	92
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	96

5 CONCLUSÃO	97
APÊNDICE A – Referências da Introdução Geral	98
ANEXO A – Certificado do Comitê de Ética	109
ANEXO B – Normas de Publicação da Revista	110

1 INTRODUÇÃO GERAL

A posição de destaque do setor avícola no agronegócio não apenas no âmbito nacional, mas também mundial deve-se, em grande parte, aos avanços em genética, nutrição, sanidade, manejo e instalações (CAETANO et al., 2015). A criação de aves se estabeleceu como uma importante atividade fornecedora de proteína animal, dando ênfase à produção de frangos de corte, a qual apresentou, nas últimas décadas, um significativo aumento (DAMASCENO et al., 2010).

O Brasil, em termos de volume, é considerado um dos maiores produtores mundiais de carne de frango. Sua produção, em 2019, alcançou o expressivo valor de 13.245 milhões de toneladas, sendo superado apenas pelos EUA e China, cujas produções atingiram 19.941 e 13.750 milhões de toneladas, respectivamente (ABPA, 2020). Já, em relação à exportação, o Brasil ocupa o primeiro lugar, com 4.214 milhões de toneladas de carne de frango exportadas (ABPA, 2020). Em relação ao consumo per capita, a carne de frango, em 2019, alcançou a quantidade de 42,84 kg hab⁻¹ e a carne suína atingiu 15,3 kg hab⁻¹ ABPA (2020), ao passo que, a carne bovina apresentou um consumo per capita de 39,12 kg hab⁻¹ (ABIEC, 2020).

Diante destes dados, e considerando a crescente demanda mundial por alimentos, para suprir as necessidades alimentares de uma população em constante crescimento, a carne de frango se consolida como potencial fornecedor de proteína animal, em virtude da sua capacidade de conversão da ração ingerida em proteína de alto valor nutricional, em um curto intervalo de tempo (SEFEEDPARI et al., 2012b). Como consequência de todo este processo, há o aumento na utilização de energia não renovável, impactando negativamente o ambiente (MARTINS et al., 2015). Desta maneira, a busca por novas práticas com a finalidade de tornar os sistemas agrícolas mais sustentáveis e eficientes se faz necessária, já que o objetivo é diminuir os custos energéticos e aumentar o rendimento na produção (SALEHI et al., 2014).

Neste contexto, em decorrência deste crescimento populacional, e a necessidade crescente de aumentar a produção, sem que isto implique em prejuízos ambientais, os produtores são encorajados a adotarem medidas que garantam a obtenção de melhores índices de eficiência energética (SEFEEDPARI et al., 2014).

Em vista disso, a análise energética torna-se um importante instrumento com o propósito de avaliar um sistema produtivo.

Como descrito por Martins et al. (2015), através da análise energética é possível definir os fluxos de energia, reconhecendo sua demanda total, a eficiência energética retratada através do ganho líquido de energia e também pela relação energia *output* (saída)/*input* (entrada), ou seja, energia convertida/energia consumida, além da energia imprescindível para produzir ou processar um quilograma de um determinado produto. Por meio da análise energética, quantificam-se todos os insumos de produção (utilizados e convertidos), e os produtos, os quais são transformados em unidades de energia (CAMPOS et al., 2005; SOUZA et al., 2009). Com isso, através desta verificação é possível determinar os processos, materiais e equipamentos de maior dispêndio energético, sinalizando opções de economia (CAMPOS et al., 2003).

Como a avicultura é uma atividade que apresenta alto consumo energético é fundamental quantificar os insumos envolvidos no sistema produtivo, bem como mensurar a eficiência energética. De acordo com Atilgan e Koknaroglu (2006), a eficiência energética medida através da relação *output/input* se apresenta como uma ferramenta econômica útil para avaliar a sustentabilidade a longo prazo de várias práticas agrícolas, ao mesmo tempo que quantifica o retorno energético dos produtos em relação à energia investida para a sua produção (HEITSCHMIDT et al., 1996). Pois, tal ferramenta associada a uma correta interpretação das curvas de crescimento são instrumentos que contribuem para a adoção de um manejo sustentável na avicultura.

Este trabalho propôs expressar, em modelo matemático, a eficiência no uso de energia, relacionando os *inputs* e *outputs* de energia envolvidos na produção de frangos de corte, com vista à otimização da produtividade e minimização dos impactos através da análise energética. Para tanto, utilizou-se a metodologia de superfície de resposta, e o Programa Prático de Modelagem de Forças (PPFM) Garcia Neto et al. (2020), o qual traz uma abordagem inovadora do processo de crescimento ao trabalhar com a curva da força ontogênica do crescimento, que retrata somente a energia destinada à produção da nova biomassa responsável pelo crescimento, e a análise energética do processo, permitindo determinar, com acurácia, o momento em que acontece o auge do investimento energético, a fim de

produzir a nova biomassa, e definir o momento mais oportuno para a realização do abate, visto que o ideal é que a ave tenha o melhor aproveitamento dos recursos energéticos ofertados.

Ao trabalhar com a modelagem matemática evitou-se a repetição desnecessária de experimentos, o que vem ao encontro da Lei nº 11.794 de 8 de outubro de 2008, conhecida como Lei Arouca, a qual normatiza os procedimentos para o uso científico de animais Brasil (2008), e da Resolução Normativa nº 17 de 2014, que dispõe sobre o reconhecimento no país de métodos alternativos que tenham, por finalidade, a redução, substituição ou refinamento do uso de animais em atividades de pesquisa, nos termos do inciso III do art. 5 da Lei nº 11.794 de 8 de outubro de 2008 (BRASIL, 2016). Desse modo, os modelos matemáticos se enquadraram como métodos alternativos, e utilizando dados de experimentos anteriormente realizados nesta instituição de ensino, executaram-se, com precisão, todas as análises necessárias. Tratando-se de um novo modo de fazer ciência, com conhecimento e responsabilidade, racionalizando recursos e humanizando os cuidados.

Assim, dois capítulos foram estruturados, o primeiro destinado à aplicação da planilha PPFM na modelagem das curvas de crescimento de frangos de corte e o segundo capítulo abordou o foco da nossa proposta de estudo, ou seja, a avaliação da eficiência no uso da energia na produção de frangos de corte, empregando-se o PPFM para mensurar a variação de energia retida na carcaça.

1.1 Modelos matemáticos

Segundo Barrozo (2020), modelo matemático é a representação de algum fenômeno do mundo real, comumente descrito por meio de equações matemáticas que possibilitam entender o comportamento das variáveis relacionadas ao objeto em estudo, sendo comum o seu uso na produção animal para descrever fenômenos biológicos (THOLON; QUEIROZ, 2009). Tais equações matemáticas foram utilizadas para adicionar um rigor quantitativo às descrições de componentes de sistemas animais nos últimos 100 anos (BLACK, 2014; DUMAS et al., 2008).

A modelagem matemática definida por Dumas et al. (2008) refere-se ao uso de equações para descrever ou simular processos em um sistema e está intrinsicamente relacionada à aplicação do conhecimento, tornando-se indispensável para a ciência e sociedade. Ela assume uma função fundamental na produção animal, pois propicia a maximização do sistema ao produzir estimativas de alta precisão (DEMUNER et al., 2017).

Na avicultura o termo “modelo” está vinculado à descrição matemática de um dado acontecimento biológico, obtido por meio de um arranjo de equações, em que as variáveis quantitativas são utilizadas para representar os fatores que influenciam esses fenômenos (RONDÓN et al., 2002). Dessa forma é notório o valor da modelagem no melhoramento genético, nos sistemas de manejo e na economia da atividade avícola (RONDÓN et al., 2002).

A qualidade e confiabilidade das informações obtidas através dos modelos estão associadas ao ajuste deles aos dados (RONDÓN et al., 2002). Os modelos matemáticos devem se ajustar bem aos dados experimentais, e também apresentar um pequeno conjunto de parâmetros com significado biológico (VÁZQUEZ; MURADO, 2008; TELEKEN et al., 2017). Conforme proposto por Harlow e Ivey (1994), quatro aspectos básicos precisam ser avaliados em cada modelo: calibração, acurácia, precisão e viés.

A calibração está relacionada ao processo de ajuste dos parâmetros dos modelos. Após a etapa de calibração cada modelo é capaz de prever, com precisão, a produção comercial. Já a acurácia pode ser definida como a precisão com que um modelo estima os dados de produção, enquanto que precisão remete à variabilidade de respostas do modelo. Um modelo preciso não apenas prevê corretamente os valores médios, mas também a distribuição dos dados. Por fim, o viés indica as falhas sistemáticas para prever os valores, podendo levar à super ou subestimação de variáveis importantes (HARLOW; IVEY, 1994).

Os modelos podem ser classificados como lineares e não lineares. Nos modelos lineares as estimativas dos parâmetros são obtidas por meio de um sistema de equações normais. Já nos não lineares as estimativas dos parâmetros são alcançadas através de métodos numéricos iterativos (MISCHAN; PINHO, 2014). Amplamente utilizados para o ajuste das curvas de crescimento, os modelos não

lineares apresentam boa qualidade de ajuste, além de um número pequeno de parâmetros interpretáveis biologicamente, o que possibilita sua aplicação nas mais variadas áreas do conhecimento (SILVEIRA et al., 2018).

Conforme delineado por Thornley e France (1984) *apud* Baldwin (1995), os modelos matemáticos podem ser classificados em: estáticos ou dinâmicos, determinísticos ou estocásticos e empíricos ou mecanísticos.

Os modelos estáticos descrevem o fenômeno em determinado momento ou instante, tais como os empregados nas determinações das exigências nutricionais para uma idade específica. Por outro lado, nos modelos dinâmicos os parâmetros se modificam ao longo do tempo, como no caso das curvas de crescimento. Já os modelos determinísticos apresentam uma única resposta, enquanto que nos modelos estocásticos as respostas dependerão de uma distribuição normal de probabilidade. Por sua vez, os modelos empíricos não consideram os mecanismos envolvidos no fenômeno, contrapondo-se aos modelos mecanísticos, os quais fundamentados em leis da física, química, bioquímica entre outras, procuram explicar e descrever os mecanismos envolvidos no processo (RONDÓN et al., 2002). A característica mais importante em um modelo mecanicista é a capacidade de prever o resultado de um evento antes que ele seja observado (BLACK, 2014).

Inicialmente usavam-se equações simples para a descrição do crescimento animal como um todo e de suas partes, bem como para prever as necessidades nutricionais dos animais de produção. Mas, com o advento dos computadores, os modelos mais complexos e dinâmicos foram desenvolvidos, o que permitiu a interação entre o metabolismo animal e o seu ambiente (BLACK, 2014). Assim, os modelos com o passar do tempo tornaram-se gradualmente mais específicos (DUMAS et al., 2008).

1.2 Curvas de crescimento

Para Afonso et al. (2009), o crescimento é um fenômeno complexo. Logo, o conhecimento sobre o desenvolvimento das aves torna-se essencial ao produtor a

fim de planejar a lucratividade da atividade avícola, considerando o fornecimento de ração, a idade ao abate, entre outros critérios (WINKELSTROTER, 2013).

Cada tipo de animal possui uma curva de crescimento, a qual deve ser observada em condições ideais ou não limitantes (GOUS et al., 1999). Segundo Mignon - Grasteau (1999), estudos de curvas de crescimento em aves demonstram que alguns fatores inerentes aos animais, como linhagem e sexo, afetam as características da curva, com reflexo no peso à maturidade dos diferentes órgãos, composição e taxas de deposição dos nutrientes corporais, bem como o peso à maturidade (MARCATO, 2007; MARCATO et al., 2008; MARCATO et al., 2010).

As curvas de crescimento animal são descritas através de modelos de regressão não lineares, os quais, usualmente, têm por objetivo caracterizar uma trajetória assintótica da variável dependente peso, em função da variável independente tempo (RIBEIRO, 2014).

Como relatado por McManus et al. (2003), as relações matemáticas entre o tamanho do animal e o tempo são denominadas de curvas de crescimento, as quais são ajustadas através de funções não lineares, permitindo condensar informações em série de todo o período da vida dos animais, relacionando o peso à idade, os quais são quantificados num conjunto de parâmetros interpretáveis biologicamente.

Portanto, a visualização das características de crescimento de uma população de indivíduos, através das curvas de crescimento, contribui na melhora dos índices produtivos. À vista disso, as linhagens atuais de frangos de corte são os grandes exemplos do potencial das curvas de crescimento em prever o desempenho dessas aves, as quais são frutos de programas de seleção voltados para alcançar um crescimento rápido, uma melhor conformação corporal e reduzida idade ao abate (ZUIDHOF et al., 2014). Tudo isso em virtude da aplicabilidade das curvas de crescimento, obtidas através de modelos matemáticos que sintetizam o desenvolvimento do animal em 3 ou 4 parâmetros interpretáveis biologicamente, possibilitando avaliar as respostas dos tratamentos ao longo do tempo, bem como identificar os animais mais jovens e mais pesados em uma determinada população (FREITAS, 2005).

Inúmeras são as funções matemáticas utilizadas para descrever o crescimento dos animais e estimar os parâmetros para uma determinada variável. Porém, faz-se necessário avaliar os modelos através de critérios pré-determinados e assim, selecionar o modelo que melhor se ajuste. Segundo Fitzhugh Jr (1976), deve-se considerar: a interpretabilidade biológica dos resultados obtidos, qualidade do ajuste dos modelos aos dados, e por fim considerar as diferenças entre os modelos quanto às dificuldades enfrentadas no processamento dos dados.

1.3 Indicadores de qualidade de ajuste para modelos não lineares

Ao selecionar um modelo é preciso considerar que não existem modelos verdadeiros, eles são apenas aproximações da realidade, tal qual afirmativa de George Box *apud* Wickham e Grolemond (2019), por isso há perda de informações (EMILIANO, 2013; BURNHAM; ANDERSON, 2004).

Vários modelos não lineares disponíveis na literatura são utilizados para estimar as curvas de crescimento dos animais. Todavia, quando um mesmo conjunto de dados é ajustado por diferentes modelos de regressão não linear, torna-se necessário definir qual o modelo, dentre os empregados, que melhor se ajusta aos dados. Desta maneira, os indicadores de qualidade de ajuste são ferramentas estatísticas empregadas a fim de selecionar o melhor modelo dentre aqueles que foram ajustados, com o intuito de explicar o fenômeno em estudo.

O princípio científico fundamentado na parcimônia propõe que dentre os modelos que elucidam bem os dados, somente o mais simples deve ser escolhido, ou seja, nem sempre o modelo mais parametrizado é o melhor (EMILIANO, 2013).

Importantes avaliadores são utilizados para comparar os modelos, destacando-se: coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}), quadrado médio dos resíduos (QMR), análise gráfica dos resíduos, desvio padrão residual (DPR), critério de informação de Akaike (AIC), critério de informação de Akaike corrigido (AIC_c), critério de informação bayesiano (BIC), dentre outros.

O coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}) é empregado para comparar modelos que possuem diferentes números de parâmetros e/ou diferentes

números de observações através do uso do coeficiente de determinação (R^2) (SOUZA et al., 2013). Já para Guimarães et al. (2006), uma razão para optar pelo uso do coeficiente de determinação ajustado é que quanto maior o número de parâmetros do modelo, menor o grau de liberdade do resíduo e maior a soma de quadrados do modelo de regressão. Sua expressão é dada por:

$$R_{adj}^2 = R^2 - \left(\frac{p-1}{n-p} \right) (1 - R^2)$$

em que: (p) representa o número de parâmetros na função, (n) é o número de observações e o $R^2 = 1 - \frac{SQR}{SQT}$, onde: SQR (soma dos quadrados dos resíduos) e SQT (soma dos quadrados total).

Assim como o R^2 , modelos que possuem maiores valores de R_{adj}^2 são os que possuem melhor ajuste aos dados.

Com o objetivo de comparar o quadrado médio dos resíduos (QMR) dos modelos com diferentes números de parâmetros a serem estimados, como relatado por Sarmiento et al. (2006), o (QMR) é obtido dividindo-se a soma dos quadrados dos resíduos, pelo número de observações, que é o estimador de máxima verossimilhança da variância residual. O (QMR) é um indicador de bondade de ajuste onde modelos com valores menores são considerados mais adequados (MISCHAN; PINHO, 2014). É expresso através da seguinte equação:

$$QMR = \tilde{\sigma}^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n} = \frac{SQR}{n}$$

sendo: $\tilde{\sigma}^2$ é o estimador de máxima verossimilhança da variância residual σ^2 , y_i representa o i -ésimo valor observado, $\hat{y}_i$ equivale ao i -ésimo valor estimado, (n) é o número de observações e SQR é a soma dos quadrados dos resíduos.

Logo, menores valores do (QMR) indicam melhores ajustamentos (PUIATTI et al., 2013).

O gráfico dos resíduos é utilizado para visualizar a aleatoriedade dos resíduos de cada modelo, portanto, quanto mais dispersos e aleatórios os pontos, melhor e, por conseguinte, quanto mais tendenciosos, pior (MENDES et al., 2020).

Então, a distribuição aleatória do resíduo em relação à variável independente (tempo) é indicativo de que o ajuste foi adequado (MELLO et al., 2008).

O desvio padrão residual mede a variabilidade dos dados (MELLO et al., 2008; DIAS, 2014). É expresso por:

$$DPR = \sqrt{\frac{SQR}{n-p}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p}}$$

onde: SQR é a soma dos quadrados dos resíduos, (n) representa o número de observações, (p) indica o número de parâmetros do modelo, y_i representa o i -ésimo valor observado, e $\hat{y}_i$ equivale ao i -ésimo valor estimado.

Quanto menor for o valor do desvio padrão residual, melhor será o modelo ajustado (MELLO et al., 2008).

O critério de informação de Akaike (AIC) proposto em 1974 refere-se a uma medida relativa da qualidade de ajuste de um modelo estocástico estimado (aquele que não captura todos os aspectos inerentes do fenômeno estudado). Embasado no conceito de informação de Kullback-Leibler, oferece uma medida relativa das informações perdidas no momento em que um modelo é utilizado para descrever a realidade (EMILIANO, 2013). A informação de Kullback-Leibler é uma medida, entre as diversas encontradas na literatura, que quantifica a informação perdida quando se ajusta um modelo.

Através do (AIC) há uma maior interação entre a prática e a teoria na seleção de modelos e análise de conjuntos de dados complexos (EMILIANO, 2013).

Ao utilizar o princípio da parcimônia na escolha do modelo, nem sempre o modelo mais parametrizado é o melhor (BURNHAM; ANDERSON, 2004). Em síntese, menores valores de (AIC) refletem um melhor ajuste (AKAIKE, 1974). Sua expressão é dada por:

$$AIC = -2 \log L(\hat{\theta}) + 2(p)$$

em que: (p) representa o número de parâmetros e $\log L(\hat{\theta})$ é o valor do logaritmo da função de verossimilhança considerando as estimativas dos parâmetros.

Como advertido por Sugiura (1978), o (AIC) pode apresentar um desempenho ruim se houver muitos parâmetros em comparação com o tamanho da amostra, com isso propôs uma correção de segunda ordem do viés do (AIC), denominando de critério de informação de Akaike corrigido (AIC_c). Sendo assim, a utilização do (AIC_c) é recomendada quando a razão entre o tamanho amostral (n) e o número de parâmetros do modelo (p) é pequena, ou seja, $\frac{n}{p} < 40$. Caso essa relação seja grande o suficiente, ambos os critérios, (AIC) e (AIC_c), expressarão resultados semelhantes (BURNHAM; ANDERSON, 2004).

O critério de informação de Akaike corrigido é expresso por:

$$AIC_c = -2 \log L(\hat{\theta}) + 2p \left(\frac{n}{n-p-1} \right)$$

onde: (n) é o tamanho amostral, (p) representa o número de parâmetros do modelo e $\log L(\hat{\theta})$ é o valor do logaritmo da função de verossimilhança considerando as estimativas dos parâmetros.

Do mesmo modo que o (AIC), o melhor modelo será aquele que apresentar menor valor de (AIC_c).

Por sua vez, o critério de informação bayesiano (BIC), denominado também de critério de Schwarz, foi proposto por Schwarz (1978), que analogamente ao (AIC), também considera o grau de parametrização do modelo, pois, quanto menor for o seu valor, melhor será o ajuste do modelo (SCHWARZ, 1978). Sua expressão é dada por:

$$BIC = -2 \log L(\hat{\theta}) + p \log(n)$$

sendo: (n) é o número de observações utilizadas para ajustar a curva e $\log L(\hat{\theta})$ é o valor do logaritmo da função de verossimilhança considerando as estimativas dos parâmetros.

1.4 Ajuste de modelos

1.4.1 Programa Prático de Modelagem de Forças – PPFM

Trata-se de uma nova ferramenta desenvolvida por Garcia Neto et al. (2020), a qual proporciona o ajuste das curvas de crescimento de forma acurada e precisa. O programa é fundamentado na planilha Excel™ da Microsoft®, versão 2016, que utiliza o suplemento Solver para ajustar as curvas através do procedimento de otimização iterativa possibilitando encontrar os parâmetros mais adequados para as curvas de crescimento.

É uma nova estratégia que facilita a interpretação da dinâmica do crescimento em virtude da inserção das leis da física diretamente nas curvas, o que proporciona o cálculo da força resultante envolvida no processo de expansão, a qual viabiliza a definição das diferentes fases que caracterizam a curva de crescimento (fase lag, exponencial crescente, quase linear, exponencial decrescente e estacionária).

Além de avaliar as forças que operam na cinética do crescimento, o programa também analisa a energia envolvida neste processo, através do cálculo da energia cinética, cuja somatória, no decorrer de toda a trajetória, resulta no cálculo da ação, o qual representa a soma de todo o trabalho útil realizado durante o crescimento.

O programa disponibiliza 8 modelos matemáticos com 4, 5, 6, 8 ou 9 parâmetros, cabendo ao usuário a responsabilidade em determinar qual função melhor se ajusta aos dados. Os modelos disponíveis são: Richards, Weibull, Richards de 5 parâmetros, modelo geral de 5 parâmetros, modelo Logístico de 5 parâmetros, duplo Logístico, duplo de Richards e triplo Logístico.

Respeitando a ordem cronológica das aplicações desses modelos não lineares de crescimento na ciência animal, e de acordo com as funções disponíveis pelo PPFM temos: a função Logística, desenvolvida pelo matemático Verhulst (1838) *apud* Darmani Kuhl et al. (2010), aplicada em estudos com animais por Robertson (1916) e Robertson (1923) *apud* Dumas et al. (2008). Tal função possui ponto de inflexão fixo em 50% do valor do peso assintótico, revelando que a taxa de crescimento é um processo irreversível sendo proporcional à quantidade de nutrientes (DARMANI KULHI et al., 2010).

A função de Weibull (1951), descrita detalhadamente por Waloddi Weibull em 1951, refere-se a uma função explicitamente dependente do tempo e que

através do ajuste dos 3 parâmetros da equação é possível se adequar a diversas formas de curvas de crescimento.

Desenvolvida pelo botânico Richards, a função de Richards (1959) utilizou inicialmente a equação proposta por Von Bertalanffy (1957), criando uma função mais abrangente, com 4 parâmetros e ponto de inflexão flexível. Apesar de ser um modelo mais empírico, por não levar em consideração os mecanismos que controlam o fenômeno em estudo como descrito por Rondón et al. (2002), a função de Richards pertence ao mesmo grupo das funções clássicas, que em virtude da sua flexibilidade, mostra-se como alternativa à outras equações, como Gompertz com 3 parâmetros e ponto de inflexão fixo a 36,79% do valor assintótico, segundo Tjørve e Tjørve (2017) e os modelos Logístico e Von Bertalanffy, ambos com 3 parâmetros e ponto de inflexão fixo a 50% e 29,63% do valor assintótico, respectivamente, conforme Tjørve e Tjørve (2010).

O ajuste de tais modelos é feito através do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), por meio de iterações sucessivas a partir dos valores dos parâmetros inicialmente ajustados pelo usuário (KEMMER; KELLER, 2010). Os indicadores de qualidade de ajuste disponibilizados pelo PPFM são: coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}), desvio padrão residual (DPR), critério de informação de Akaike corrigido (AIC_c), critério de informação bayesiano (BIC), soma dos quadrados dos resíduos (SQR), e o gráfico dos resíduos. Esses indicadores já foram relatados nesse mesmo capítulo no item 2.2 intitulado “Indicadores de qualidade de ajuste para modelos não lineares”.

Todos os atributos do PPFM foram pormenorizados no segundo capítulo dessa apresentação, o qual foi empregado para o ajuste dos dados dos padrões de crescimento corporal de frangos de corte, de ambos os sexos, segundo as linhagens Cobb, Hubbard e Ross. Esta inovadora ferramenta também será aplicada na análise da variação de energia retida na carcaça eviscerada de frangos de corte, em decorrência da análise da eficiência energética para aves alimentadas com quatro níveis diferentes de energia metabolizável na ração.

1.4.2 Metodologia de superfície de resposta

A metodologia de superfície de resposta foi desenvolvida por Box e seus colaboradores da *Imperial Chemical Industries* (BOX; WILSON, 1951; BOX, 1954; BOX; YOUNG, 1955).

Essa terminologia refere-se a uma coleção de técnicas matemáticas e estatísticas que são utilizadas para modelar e ajustar problemas nos quais a resposta de interesse é influenciada por diversas variáveis, tendo como objetivo a sua otimização, ou seja, a busca de um valor ótimo (BAŞ; BOYACI, 2007; MONTGOMERY, 2017). Então, funções polinomiais lineares ou quadráticas são empregadas para descrever o sistema estudado, e desse modo, explorar as condições experimentais até sua otimização (TEÓFILO; FERREIRA, 2006).

Essas técnicas matemáticas e estatísticas são usadas para definir as relações entre a resposta e as variáveis independentes, estabelecendo o efeito dessas variáveis sozinhas ou em combinação nos processos, além de gerar um modelo matemático empírico, cuja perspectiva gráfica originou o termo “Metodologia de Superfície de Resposta” (BEZERRA et al., 2008; BAŞ; BOYACI, 2007).

É uma metodologia prática, econômica e de fácil implementação como mencionado por Singh et al. (2007), tratando-se do método mais popular de otimização (BAŞ; BOYACI, 2007).

Os objetivos da superfície de resposta são: encontrar uma resposta ótima, e compreender a mudança na resposta em função do ajuste das variáveis (BRADLEY, 2007). Por isto, os gráficos se apresentam como ferramentas úteis para o entendimento da superfície de resposta.

A análise é feita em termos de superfície ajustada. Logo, se tal superfície for adequada, esta análise será aproximadamente equivalente à análise da superfície real (MONTGOMERY, 2017; AMARAL et al., 2018).

Para a aplicação da metodologia de superfície de resposta algumas etapas são necessárias: seleção das variáveis independentes e seus níveis, escolha do desenho experimental, tratamento matemático-estatístico dos dados experimentais obtidos através do ajuste da função polinomial, avaliação da

adequação do modelo, obtenção dos gráficos de superfície de resposta e de contorno da resposta em função das variáveis independentes, bem como a determinação dos pontos ótimos para cada variável estudada (BEZERRA et al., 2008; BAŞ; BOYACI, 2007).

O modelo mais simples utilizado na superfície de resposta tem como base a função linear segundo a equação abaixo:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon$$

onde: "k" representa o número de variáveis, " β_0 " o termo constante, " β_i " parâmetro de regressão para o efeito do coeficiente linear, " x_i " variável e " ε " o resíduo.

O outro modelo empregado na superfície de resposta é o modelo polinomial de segundo grau demonstrado a seguir:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq k} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (a)$$

em que: "Y" é o vetor resposta, "k" representa o número de variáveis, " β_0 " o termo constante, " β_i ", " β_{ij} " e " β_{ii} " são os parâmetros de regressão para os efeitos dos coeficientes linear, de interação e quadrático, " x_i " e " x_j " são as variáveis independentes codificadas e ε é o resíduo, representando a diferença entre a resposta obtida experimentalmente e a resposta prevista pelo modelo (NOVAES et al., 2017).

Como relatado por Novaes et al. (2017), após a realização dos experimentos e obtenção das respostas relacionadas a cada ponto experimental, a etapa seguinte consiste no ajuste da função matemática, de modo a descrever o comportamento dessas respostas em razão da variação dos níveis das variáveis estudadas, ou seja, estimar os coeficientes do modelo, o qual está representado abaixo pela notação matricial do modelo (a) descrito anteriormente, conforme demonstrado por Baş e Boyaci (2007):

$$Y = x\beta + \varepsilon \quad (b)$$

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}}_y = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix} \underbrace{\begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}}_\beta + \underbrace{\begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}}_\varepsilon$$

Da mesma forma que nas demais equações, "Y" representa o vetor resposta, "x" é a matriz do desenho experimental, " β " o vetor constituído pelos coeficientes do modelo ajustado e " ε " o resíduo.

Esse sistema de equações acima representado por (b) é resolvido pelo método dos mínimos quadrados (MMQ), técnica de regressão múltipla usada para ajustar um modelo matemático a um conjunto de dados experimentais, gerando o menor resíduo possível, como caracterizado por Novaes et al. (2017), e resumido por Baş e Boyacı (2007).

Pelo MMQ assume-se que os erros aleatórios apresentam um perfil de distribuição randômica com média zero e variância desconhecida comum, sendo independentes uns dos outros (NOVAES et al., 2017).

Após a determinação dos coeficientes de regressão, a resposta estimada pode ser facilmente calculada através da equação do modelo (BAŞ; BOYACI, 2007).

Como normalmente o comportamento do sistema não é conhecido, deve-se verificar se o modelo é adequado para a descrição dos dados experimentais (BAŞ; BOYACI, 2007; NOVAES et al., 2017). Para tanto, diversas técnicas são realizadas: análise do resíduo, soma dos quadrados dos resíduos (SQR), o teste de falta de ajuste, entre outros. O coeficiente de determinação (R^2), calculado a partir da SQR, explica a capacidade preditiva geral do modelo. O R^2 sozinho não mede a acurácia do modelo. Trata-se de uma medida da redução da quantidade de variabilidade de resposta, obtida pelo uso de variáveis repressoras no modelo. Um grande valor de R^2 não necessariamente está relacionado a um bom modelo de regressão. Seu valor sempre aumenta à medida que novas variáveis são adicionadas ao modelo, independentemente de serem significativas ou não (BAŞ; BOYACI, 2007).

A visualização da equação do modelo previsto pode ser obtida através do gráfico de superfície de resposta, cuja apresentação tridimensional demonstra a relação entre a resposta e as variáveis independentes, e pelo gráfico de contorno, uma exibição bidimensional da plotagem da superfície de resposta, onde linhas de respostas constantes são desenhadas no plano das variáveis independentes, auxiliando a visualização da forma de uma superfície de resposta (BAŞ; BOYACI, 2007).

Quando o gráfico de contorno exibir elipses ou círculos, o centro do sistema refere-se ao ponto de resposta máxima ou mínima. Todavia, caso exiba o sistema hiperbólico ou parabólico, neste caso o ponto estacionário será o ponto de sela (BAŞ; BOYACI, 2007).

Como demonstrado por Baş e Boyaci (2007), as coordenadas do ponto crítico (ponto estacionário) podem ser calculadas nos modelos quadráticos através da 1ª derivada da função matemática igualando-a a zero:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_1} = \beta_1 + 2\beta_{11}x_1 + \beta_{12}x_2 = 0$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_2} = \beta_2 + 2\beta_{22}x_2 + \beta_{12}x_1 = 0$$

Dessa forma, é necessário resolver o sistema de primeiro grau formado pelas equações para encontrar os valores de " x_1 " e " x_2 ". Tais valores calculados indicam o valor codificado dos parâmetros independentes que fornecem a resposta mais alta (ponto máximo) e mais baixa (ponto mínimo) (BAŞ; BOYACI, 2007).

Embora, tanto o gráfico de superfície, quanto o de contorno forneçam informações úteis sobre o modelo ajustado, deve-se considerar que às vezes podem não representar o verdadeiro comportamento do sistema. Como Myres e Montgomery *apud* Baş e Boyaci (2007) descreveram, as superfícies e os contornos representam uma resposta estimada de um modelo ajustado, não da estrutura verdadeira.

Quanto às vantagens do uso da metodologia de superfície de resposta pode-se mencionar: oferecimento de grande quantidade de informações com

pequeno número de experimentos e observação do efeito da interação dos parâmetros independentes na resposta. Já a principal desvantagem relaciona-se ao ajuste dos dados a um polinômio de segunda ordem, pois nem todos os sistemas que contenham curvatura são bem acomodados por esse polinômio. Nesse caso, escolhe-se um intervalo menor de parâmetros independentes para aumentar a precisão da equação do modelo, apesar de reduzir a possibilidade de determinação dos pontos estacionários (BAŞ; BOYACI, 2007).

1.5 Abordagem energética na avicultura de corte

O substantivo energia, cuja origem remonta à ciência aristotélica, da terminologia grega “energeia” tem como significado “ato”, que no dicionário clássico grego está relacionado à força, algo que transforma, movimenta (ORNELLAS, 2006).

A definição apresentada pelo Dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa Michaelis, “energia” é a capacidade de um corpo, ou sistema de corpos, ou uma substância têm de realizar trabalho (ENERGIA, 2020). Da mesma forma que para Hetz (1992); Canakci e Akinci (2006), os quais definiram energia como a capacidade de realizar trabalho, ocupando o centro de todas as atividades humanas, principalmente às relacionadas à produção de bens e serviços. Já Ebrahimi et al. (2016), relacionam a energia como uma das bases materiais mais importantes para alcançar o crescimento econômico e o desenvolvimento social de um país ou região. Assim sendo, a definição de energia apresenta variados significados em função da ótica de quem a interpreta.

Levando-se em consideração que os recursos naturais são limitados e ponderando o impacto do uso de diferentes fontes de energia no meio ambiente e na saúde humana, é necessário investigar os padrões do uso de energia nas atividades agrícolas (HATIRLI et al., 2005).

Como a produção avícola ocupa um setor notável dentro da indústria de produtos de origem animal, e avaliando-se o aumento no consumo de energia em função do crescimento populacional e do padrão de vida Kilic (2016), nos últimos anos, inúmeros estudos se concentraram na estimativa do uso de energia no processo de produção de frangos de corte, visto ser a avicultura uma atividade com

alto consumo energético, a exemplificar, o alto uso de energia pelas granjas (AMINI et al., 2015; SANTOS; LUCAS JÚNIOR, 2004). Estudos sobre o padrão *input-output* de energia é de grande valia (HEIDARI et al., 2011a).

Em decorrência do crescimento populacional e, conseqüentemente, da maior demanda por alimentos seguros e de qualidade, aliado ao aumento dos custos com fontes de energia, torna-se primordial uma melhora na eficiência energética da produção pecuária visando à redução do consumo de energia (SEFEEDPARI et al., 2012a). Neste contexto, é imprescindível a análise energética. Com base no relato de Sefeedpari et al. (2012b), o aumento da eficiência do uso de energia e a redução dos custos de produção dos produtos pecuários são fatores relevantes para competir no mercado global atual.

A análise de energia, também denominada de balanço energético, é uma ferramenta de grande utilidade para diagnosticar os fluxos ou gastos de energia na produção, sendo um dos métodos mais úteis na avaliação do potencial de sustentabilidade a longo prazo nas mais variadas práticas agrícolas, de acordo com Veloso et al. (2012), em virtude do aumento da população e da necessidade por energia nos últimos anos (ATILGAN; KOKNAROGLU, 2006).

Como caracteriza Martins et al. (2015), a análise energética além de estabelecer os fluxos de energia, identifica a sua demanda total, a eficiência energética, a qual é retratada através do ganho líquido de energia e pela relação *output/input*, assim como a energia imprescindível para produção ou processamento de um quilograma de determinado produto. Através da relação entre energia *output/input* é possível quantificar o retorno energético dos produtos produzidos em relação à energia investida para produzi-los (HEITSCHMIDT et al., 1996). Dessa maneira, pela análise energética calculam-se todos os insumos utilizados e convertidos, os quais são transformados em unidades de energia (CAMPOS et al., 2005). Por meio desta verificação torna-se possível determinar os processos, materiais e equipamentos que apresentam maior dispêndio energético, sinalizando opções de economia (CAMPOS et al., 2003).

A estimativa dos *outputs* envolvidos, sem dúvida nenhuma, é mais fácil do que o estabelecimento de todos os *inputs* relacionados, em decorrência da diversidade e da variação em sua utilização. São considerados como *inputs*: mão de

obra, transporte, maquinários, combustíveis, dentre outros. Apesar dessas dificuldades, a determinação *output/input* apresenta considerável valor, ao fornecer uma estimativa do nível de dependência de fontes exógenas de energia de modo a atender os objetivos de produção estabelecidos, principalmente, no que se refere à dependência em relação aos combustíveis fósseis (HEITSCHMIDT et al., 1996).

Nas granjas produtoras de frangos de corte são considerados *inputs*: pintainhos, mão de obra, maquinário, combustível fóssil, ração, energia elétrica, ao passo que os *outputs* são representados pelos frangos de corte (carne) e excretas (AMID et al., 2015; AMID; MESRI-GUNDOSHMIAN, 2016; HEIDARI et al., 2011a; PISHGAR-KOMLEH et al., 2017; AMINI et al., 2015; KILIC, 2016).

A energia *input* também é classificada em energia direta, indireta, renovável e não renovável (YILMAZ et al., 2005). Compõem a energia direta nas granjas produtoras de frangos de corte: mão de obra, combustível fóssil (óleo diesel) e eletricidade, enquanto que a energia indireta está relacionada àquela incorporada nos pintainhos, maquinário e ração (HEIDARI et al., 2011b; NABAVI-PELESARAEI et al., 2013; AMID et al., 2015; AMID et al., 2016).

A categorização em energia renovável refere-se à energia utilizada para descrever as fontes energéticas, as quais são reabastecidas através de processos naturais e de forma rápida. Em contrapartida, a denominação de energia não renovável é usada para descrever as fontes de energia que existem em quantidade limitada na Terra (PISHGAR-KOMLEH et al., 2011). Por conseguinte, considerando as granjas produtoras de frangos de corte, pintainhos, mão de obra e ração se enquadram na categoria de energia renovável, enquanto combustível fóssil (óleo diesel), maquinário e eletricidade estão relacionados à energia não renovável (HEIDARI et al., 2011b; NABAVI-PELESARAEI et al., 2013; AMID et al., 2015; AMID et al., 2016).

Após a descrição dos *inputs* e *outputs* envolvidos no processo de produção, o próximo passo consiste em convertê-los em unidades de energia equivalentes (CAMPOS et al., 2005; AMID et al., 2015). Tal procedimento é importante, permitindo quantificar o poder calorífico de cada componente presente no processo de produção, seja ele direto ou indireto, *inputs* ou *outputs*, expressos

em joule ou calorias, permitindo o cálculo da eficiência energética posteriormente (SANTOS; LUCAS JÚNIOR, 2004).

Posteriormente, com base nos equivalentes energéticos dos *inputs* e *outputs*, são possíveis os cálculos dos seguintes indicadores: eficiência no uso de energia, produtividade energética e energia líquida, os quais foram trabalhados por diversos autores, para determinar a eficiência energética na produção de frangos de corte (HEIDARI et al., 2011b; NABAVI-PELESARAEI et al., 2013; KILIC, 2016; AMID et al., 2015; AMID et al., 2016). Para tanto, aplicaram-se as seguintes equações descritas abaixo:

A equação para determinar a eficiência energética foi proposta por Quesada et al. (1991):

$$EUE = \frac{\Sigma E_{output} (convertida)}{\Sigma E_{input} (consumida)} = \frac{\Sigma (E_D output - E_I output) \left(\frac{MJ}{1000 \text{ aves}} \right)}{\Sigma (E_D input - E_I input) \left(\frac{MJ}{1000 \text{ aves}} \right)}$$

em que: (*EUE*) eficiência energética do sistema ou eficiência no uso de energia, (*E_D*): estimativa de energia direta, (*E_I*): estimativa de energia indireta, (*E_{output}*): estimativa de energia que sai no processo de produção (produto), (*E_{input}*): estimativa de energia consumida no processo de produção.

A produtividade energética segundo Ortiz-Cañavate e Hernanz (1999), é a medida da quantidade obtida de um produto por unidade de *inputs* de energia, sendo estimada por:

$$PE_n = \frac{\text{Produção} \left(\frac{kg}{1000 \text{ aves}} \right)}{\text{Input de energia} \left(\frac{MJ}{1000 \text{ aves}} \right)}$$

A energia líquida é obtida por:

$$EL = \text{Output de energia} \left(\frac{MJ}{1000 \text{ aves}} \right) - \text{Input de energia} \left(\frac{MJ}{1000 \text{ aves}} \right)$$

É possível comparar as granjas produtoras de frangos de corte utilizando os valores expressos por estes indicadores, classificando-as em eficientes ou deficientes na questão do uso de energia, e assim propor medidas de forma a tornar a atividade mais eficaz, não apenas por razões financeiras, mas também considerando as questões ambientais.

1.6 Implicações da análise energética no contexto da avicultura atual

Atualmente, as indústrias agroalimentares têm vivenciado uma crescente pressão para aprimorarem seus desempenhos em relação às questões ambientais, paralelamente ao aumento da produção, a fim de atender à crescente demanda global.

Aliado a este cenário é notória a dependência humana por fontes de energia, principalmente aquelas destinadas à produção de alimentos, como o sistema de produção avícola, o qual utiliza quantidades consideráveis de energia. Deste modo, o uso eficiente de energia deve ser considerado, principalmente diante do aumento dos custos de produção.

Em virtude da atual situação econômica vivida pelo Brasil, em decorrência da pandemia da COVID-19, a carne de frango apresentou-se como uma importante fonte de proteína animal para grande parte da população, resultado do enfraquecimento da capacidade de compra, frente à valorização expressiva das carnes bovina e suína em 35% e 32%, respectivamente, comparados a apenas 9% sofridos pela carne de frango (CEPEA, 2021).

O poder de compra dos avicultores também diminuiu, especialmente em relação aos principais insumos que compõem a ração, o milho e o farelo de soja. A alta nos preços destes insumos foram reflexos dos baixos estoques, em virtude do favorecimento das exportações frente à valorização do dólar, aliada às situações climáticas desfavoráveis, a exemplo do predomínio do clima seco enfrentado na primeira safra de 2020.

A repercussão negativa desta situação adversa foi o aumento dos custos de produção, refletindo no preço do produto final, e conseqüentemente, queda dos lucros.

Diante de tal condição tornou-se fundamental a adoção de medidas que garantam ao produtor a obtenção de melhores índices produtivos. Neste contexto, com a análise energética do processo produtivo é possível reduzir os dispêndios com os insumos, especificamente os referentes à ração, que no momento atual tem impactado negativamente o sistema produtivo em função da alta do preço do milho e

do farelo de soja, pois conforme descrito por Van der Klis et al. (2010), a ração é um dos principais custos para a produção avícola, dos quais cerca de 70% está relacionado à energia da dieta.

Logo, com o emprego da análise energética do processo é possível quantificar o retorno energético do produto em relação à energia dispendida para produzi-lo, representando uma importante ferramenta econômica, que aliada ao conhecimento do processo de crescimento dos frangos de corte contribui para a otimização dos recursos energéticos. Através da compreensão das curvas de crescimento é possível determinar o momento mais oportuno para o abate, ou seja, quando a ave atinge o auge de todo o recurso energético investido para o seu crescimento. Desta forma, com o auxílio do PPFM, ferramenta inovadora e robusta tanto para a interpretação da dinâmica do processo de crescimento, quanto para a análise energética, é possível otimizar os recursos envolvidos na produção em virtude da análise da energia envolvida na expansão, como consequência da avaliação da energia cinética, cuja soma no decorrer de todo o processo culmina no cálculo inovador da ação, o qual revela quão eficiente foi o trabalho realizado durante o crescimento. Portanto, é possível maximizar a eficiência energética ao mesmo tempo que se busca a minimização dos gastos, principalmente aqueles relacionados com a ração, a qual impacta negativamente o processo produtivo de frangos de corte em virtude das oscilações de mercado, o que gera preocupações, uma vez que o sistema produtivo de frangos de corte possui baixa eficiência energética.

1.7 Objetivos

1.7.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo foi aplicar o Programa Prático de Modelagem de Forças na análise das curvas de crescimento de frangos de corte, e na avaliação da eficiência energética, através da mensuração da energia retida na carcaça, na produção de frangos de corte.

1.7.2 Objetivo específico

Este estudo teve como finalidade expressar, em modelo matemático, a eficiência no uso de energia, relacionando os *inputs* e *outputs* de energia envolvidos na produção de frangos de corte, segundo os indicadores de eficiência energética.

2 CHAPTER 1 – PPFM: A NEW CONCEPT IN GROWTH CURVE MODELING

2.1 Resumo

O crescimento é um processo bastante complexo. Diversos modelos matemáticos foram utilizados para descrever a dinâmica da expansão que, apesar de enigmática, segue leis da física básica. O Programa Prático de Modelagem de Forças (PPFM), de acesso aberto, com base na planilha Excel[™] da Microsoft[®], por intermédio do suplemento Solver, proporcionou um ajuste das curvas de crescimento de forma acurada e precisa, preocupando-se não apenas na acomodação da geometria da curva (cinemática), mas no seu significado biológico (cinética). Através do aperfeiçoamento do programa foi possível trabalhar com as derivadas (velocidade, aceleração) e ao inserir as leis da física na planilha viabilizou o cálculo da força resultante envolvida no crescimento e assim definiram-se as diferentes fases que caracterizam a curva de crescimento, bem como a avaliação da energia cinética (E_c) envolvida nesta expansão ao longo do tempo, cuja somatória, no decorrer de toda a trajetória descrita, nos leva ao cálculo inovador da ação ($E_c \times Tempo$), que representa a soma de todo trabalho útil realizado durante o crescimento. Cada passo deste processo permitiu uma melhor visão das informações que até então estavam ocultas nas curvas sigmóides de crescimento. Portanto, o PPFM oferece uma nova percepção sobre a interpretação do tempo e energia investidos como trabalho útil aplicado a cada momento do processo de crescimento, permitindo uma nova estratégia ao aproximar o modelo matemático da realidade descrevendo o processo biológico por meio das teorias físicas, de forma clara e prática, contribuindo com a compreensão da dinâmica do crescimento.

Palavras-chave: ação, energia cinética, modelagem matemática, modelos de crescimento

2.2 Abstract

Growth is a very complex process. Several mathematical models have been used to describe the dynamic of expansion that, despite enigmatic, follows the laws of basic physics. The Practical Program for Forces Modeling (PPFM), open access, based on Microsoft® Excel™ spreadsheet, through Solver supplement, has provided an accurate and precise adjustment of the growth curves, worrying not only in accommodating the geometry of the curve (Kinematics), but also with its biological meaning (kinetics). Through the program's refinement, it was possible to work with the derivative (velocity, acceleration) and, by inserting the laws of physics in the spreadsheet, it was possible to calculate the resulting force involved in the growth and thus defined the different phases that characterize the growth curve, as well as the assessment of the kinetic energy (K_E) involved in this expansion over time, whose sum, in the course of all the described trajectory, leads us to the innovative calculation of the action ($K_E \times Time$), which represents the sum of all useful work done during growth. Each step of this process has allowed a better view of the information that was until then hidden in the sigmoid growth curves. Therefore, the PPFM offers a new insight on the interpretation of time and energy invested as useful work applied to each moment of the process of growth, allowing for a new strategy on clearly and practically approximating the mathematical model to reality by describing the biological process through physics' theories, contributing with the understanding of the growth dynamics.

Keywords: action, growth models, kinetic energy, mathematical modeling

2.3 Introduction¹

Several fields of science have adopted, for two hundred years, mathematical models to explain and interpret data obtained through observations and measurements (Narinç *et al.*, 2017). Mathematical modeling is defined as the usage of equations to describe or simulate processes in a system (Dumas *et al.*, 2008). The

¹ Brazilian Journal of Poultry Science
ANEXO B – Normas de Publicação da Revista

use of mathematical models in animal production with the aim of describing biological phenomena, such as growth, is common (Tholon & Queiroz, 2009).

Choosing the best function to model the expansion is of vital importance in the preparation of production models (Demuner *et al.*, 2017). Mathematical models must adjust well to experimental data and also present a small set of parameters with biological meaning (Vázquez & Murado, 2008; Teleken *et al.*, 2017). The development, for Afonso *et al.* (2009), is regarded as a complex process, presenting great relevance for the zootechnics area, for being an important instrument of control and optimization for animal production, whose success consists in minimizing the relation between growth and nutritional cost (Vázquez *et al.*, 2012).

In the poultry industry, predicting poultry growth makes it possible to determine when they are ready for sale, i.e., the best age for slaughter. In addition to predicting nutritional demands, it provides indexes of production efficiency, helping the poultry sector by contributing to the operations economy, given that during the cycle of production, many decisions affect the profitability of the operation (Darmani *et al.*, 2010; Veloso *et al.*, 2015). Because of this, modeling assumes a fundamental function in animal production, because it provides the maximization of the system by producing high precision estimates (Demuner *et al.*, 2017).

A variety of mathematical equations has been employed to adjust animals' development. The mathematical functions, also named growth models, widely used are non-linear regression models, with sigmoid structure such as: Gompertz, Logistical and Von Bertalanffy (all with 3 parameters) and Richards functions (4 parameters) (Narinç *et al.*, 2017).

Measuring growth only through the accumulation of mass in relation to time is insufficient to explain the whole process, because it is a complex process. For Jørgensen *et al.* (2000), it is necessary to determine the quantity of energy involved in this expansion of growth. A new interpretation of growth by uniting the laws of physics to biology has emerged through the Practical Program for Forces Modeling (PPFM) (Garcia Neto *et al.*, 2020).

With PPFM, it was possible not only to work with growth curve adjustment and their first and second derivative (velocity and acceleration, respectively), but also with the force resulting from growth ($F = m \cdot |a|$), and kinetic energy involved in this

expansion [$K_E = (m \cdot v^2)/2$], uniting kinetics (the study of forces) to kinematics (related to the curve – trajectory geometry) as described by Sutherland (1997), finishing with the principle of action ($K_E \times Time$), which represents the investment in energy and time, being considered a fundamental tool in the study of the growth trajectory, which is pointed out as an intelligent process of the living organisms (Grandpierre, 2011b; Jacob *et al.*, 2004).

The aim of this paper is applying the PPFM to broiler chicken growth curves, offering a new strategy to facilitate dynamic interpretation of the growth curve in virtue of the application of the laws of physics (Newtonian Laws), establishing an approximation of mathematical models to growth reality.

Thus, the program adjusts the models by unfolding in the analysis and assessment of the forces that operate in the kinetics of growth, in addition to the energy analysis involved in this process, allowing a better interpretation of the data that is made easier by the graphic and numeric visualization of the different phases of the growth trajectory, and all this with no need for a profound mathematical knowledge.

2.4 Materials and Methods

The result of the post-doctorate work of Garcia Neto, the second author of this paper (Fapesp Process 18/19629-0), carried out through the partnership between the Faculty of Veterinary Medicine of Araçatuba, São Paulo State University “Júlio de Mesquita Filho”, (FMVA – UNESP) and the University of California, Davis (UC Davis), was the refinement of PPFM, an open and accessible program, based on Microsoft® Excel™ which, through the Solver supplement, has accurately and precisely provided a growth curve adjustment, through the iterative optimization procedure, making it possible to find the most adequate parameters for growth curves.

A new, more efficient and appropriate tool that facilitated the interpretation of the growth dynamic and that simultaneously allowed the conciliation of new options of mathematical models, which promoted the adjustment of the curves precisely, was pursued, with the aim of enabling a new concept for current modeling through the ontogenetic growth force and kinetic assessment.

The PPFM was developed in the 2016 version of Excel[™], being compatible with later versions. The spreadsheet has used Macros stored in VBA modules, in addition to codes, in order to reduce the time of iterations performed by Solver during the adjustment process.

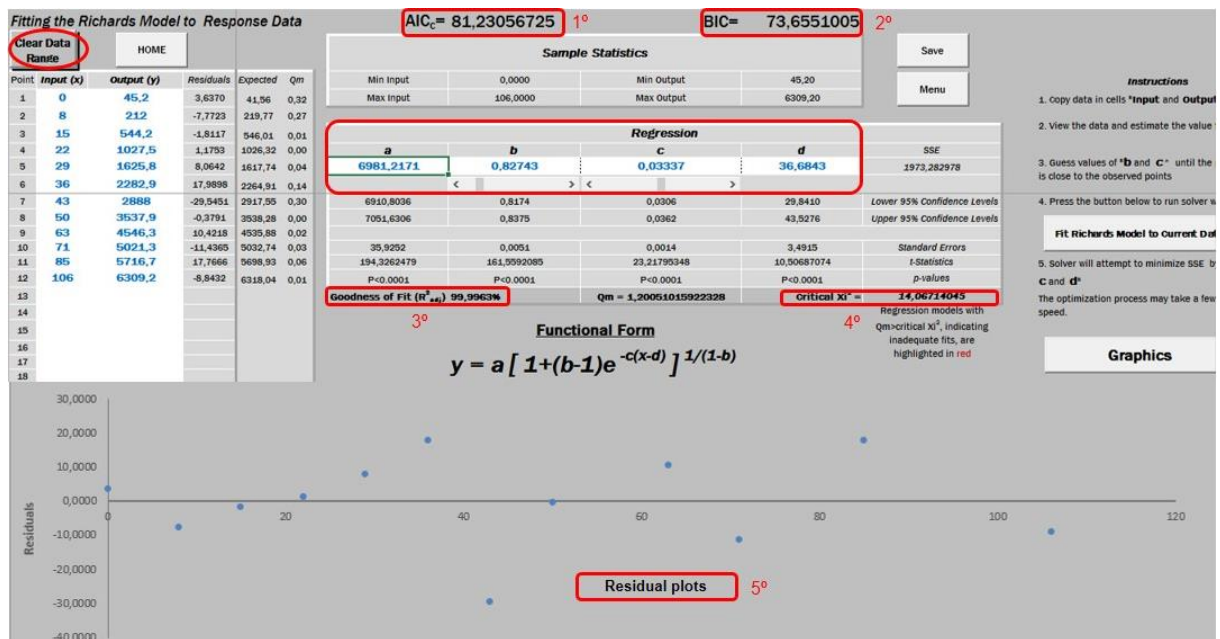
Models with 4, 5, 6, 8, or 9 parameters were provided by the program, the user being the one responsible for determining which function, among the ones available, best fit the data, which must represent all the growth phases.

For this, 8 mathematical models, with one or more flexible inflection points, were enabled by the program: the Richards, Weibull, 5-parameter Richards, 5-parameter General, 5-parameter Logistic, double Logistic, double-Richards, and triple Logistic models. Model adjustment was undertaken by the Least Squares Method (LSM) through successive iterations from the value of the parameters initially adjusted by the user (Kemmer & Keller, 2010).

The PPFM spreadsheet is capable of supporting the entry of up to 1000 data, which can be imported from other spreadsheets as long as their extensions are compatible with Excel[™]. Every input demands, necessarily, a corresponding output, and unfailingly at each new data range, the user must click on the button “clear data range”, so that all previous data is removed, avoiding the inconveniency of the superposition of all previous values by current ones (Figure 1).

The program offers as goodness-of-fit indicators to define the most adequate model the adjusted determination coefficient (R^2_{adj}), the residual standard deviation, the corrected Akaike information criterion (AIC_c), the Bayesian information criterion (BIC), the residual sum of the squares (SSR), as well as providing the residual graphic (Figure 1) (Wit *et al.*, 2012).

Figure 1 – Interface of data entry. Initial adjustment of the parameters. Five indicators of quality of adjustment of the growth curve



Source: Data adapted according to the description for Cobb females, according to Gonçalves (2017). Data adjusted by the PPFM spreadsheet. AIC_c: corrected Akaike information criterion; BIC: Bayesian information criterion; R²_{adj}: adjusted determination coefficient; *a*: the upper asymptote (mature); *b*: shape parameter; *c*: the maximum relative growth; *d*: the age at maximum rate of growth.

The PPFM spreadsheet has allowed to define precisely the points *F*₀, *F*₁, *F*₂, and *F*₃ from the curve of the ontogenetic growth force and derivative: velocity (first derivative of the position), acceleration (second derivative of the position), and also the third derivative of the force, termed Snatch. Hence, the program established the following growth phases: lag phase, exponential increase, quasi-linear, exponential decrease, stationary.

The establishment, with accuracy, of point *F*₀ (critical point which characterizes the moment of transition between the lag phase and the exponential increase), by PPFM, revealed itself as a new indicator of the lag phase duration, a period of great significance, for instance, for the food industry with the intention to guarantee food safety, given the accuracy in time definition of the shelf time of a product is of great relevance not only to the food industry, but also to consumers (Koseki, 2016; Giménez *et al.*, 2012).

In turn, besides the determination of point *F*₀, the point *F*₃, which reveals the moment of growth saturation and may be termed as “biological plateau” was also accurately established. The definition of these points was only possible through the

use of the third derivative of the ontogenetic growth force, the already mentioned Snatch, calculated automatically by the program through the third derivative of the position, in virtue of the application of the concepts of physics which, according to Easwaran (2014), for being equally able to measure sudden changes, is similar to Jerk, third derivative of the position, as described by Bentea *et al.* (2017) and Hayati *et al.* (2020).

Another particularity of the PPFM spreadsheet was substantiated on the assessment of the energy efficiency of the growth process, implemented through the calculation of kinetic energy. For this purpose, the growth trajectory was divided in 3000 equidistant parts, as proposed by the Riemann sum (Hellmann *et al.*, 2016; Leal Júnior & Pinheiro, 2016). This procedure has made the calculation of the area above and below the curve of kinetic energy possible, enabling the innovative calculation of the action, figure corresponding to the sum of kinetic energy over time, representing all the useful work performed during the growth trajectory (Girtler, 2011).

Through the calculation of the area above and below the curve of kinetic energy, the PPFM has the know-how to identify the unfavorable periods over the growth trajectory, i.e., the moments of stress, or even the decline phase or death. Consequently, when the PPFM spreadsheet appraises the action, it ends up measuring, indirectly, the stress inherent to all organisms.

With this new tool, the PPFM is able to define other possible phases which characterize the growth curve: decline phase or death, resilience and spurts, and also the impact that these moments represent numerically (Fekedulegn *et al.*, 2007).

Alternative units to characterize the growth expansion are allowed in virtue of the biological autonomy according to Grandpierre & Kafatos (2012), unlike the rigidity of physics, which works with predetermined international quantities. So, biologically there is freedom to employ: height, length, mass, individuals, volume, density, to measure expansion, and seconds, minutes, hours, days, years, to gage time, demonstrating the great flexibility of the PPFM spreadsheet, which can be applied in research, teaching, and extension in different areas for different aims, from predicting the growth of a broiler chicken to determine the best moment for slaughter, even estimating the foliar area, predict microbiological growth, study tumor growth, to use in the epidemiological modeling, among other usages (Al-Samarai, 2015; Souza *et al.*, 2015; Koseki, 2016; West & Newton, 2019; Lee *et al.*, 2020).

Data from growth standards for broiler chickens, of both sexes, from Cobb, Hubbard and Ross strains obtained from Gonçalves (2017) essay have been used in order to validate PPFM efficiency in growth curve modeling.

2.5 Results and Discussion

To demonstrate all PPFM attributes, highlighting mainly the moments of change curve trajectory, plotted by the critical points of the curve, as well as the energy assessment of the process, data from the standard body growth and its parameters, for 384 commercial strains of broilers (128 birds/strain), Cobb 500, Hubbard Flex, and Ross 380, males and females, until the 15th week of age, studied at Gonçalves (2017) doctorate thesis, which characterized the potential of feather and body growth of broiler chickens, to the referred lines, was used.

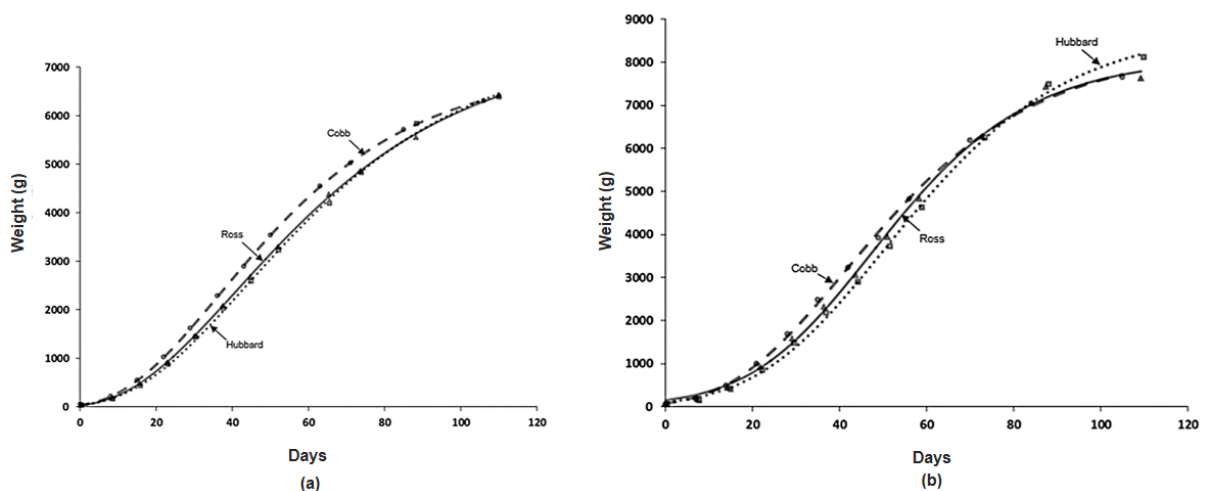
Although the aforementioned study has used the growth equation Gompertz (1825), we employed in our analysis the growth function Richards (1959), since, in spite of the Gompertz function being widely applied for growth analysis of poultry, according to Nariñg *et al.* (2017), the fixed inflexion point may cause limitations and compromise the expansion analysis (Darmani *et al.*, 2010). For Gbangboche *et al.* (2008), the choice of model compromises the estimate of parameters, affecting the inflection point, which, as reported by these authors, is an important economic indicator in animal production.

The approach of the growth process of the mentioned study has followed the traditional standards, i.e., it boiled down only to the measurement of the accumulation of mass in relation to time, which, under point of the growth kinematic, has not considered the forces involved in the process (Figure 2). On the other hand, PPFM has brought a wider view of development, since it has allied kinematics (a merely geometric study) to kinetics (forces that act upon a system), promoting the understanding of the forces related to growth kinetics, as per Shimojo *et al.* (2006).

From this moment, it was possible to work with the curve of the ontogenetic growth force, which portrays only the energy destined to the production of the new biomass responsible for the growth until it reaches maximum development, namely, the asymptote of the curve (Shi *et al.*, 2014). Therefore, the curve of the ontogenetic

growth force revealed itself as an innovative base in the study of the growth curves, in presenting itself as more appropriate and more sensitive form in the definition of the points of transition between the different growth phases (Garcia Neto *et al.*, 2018).

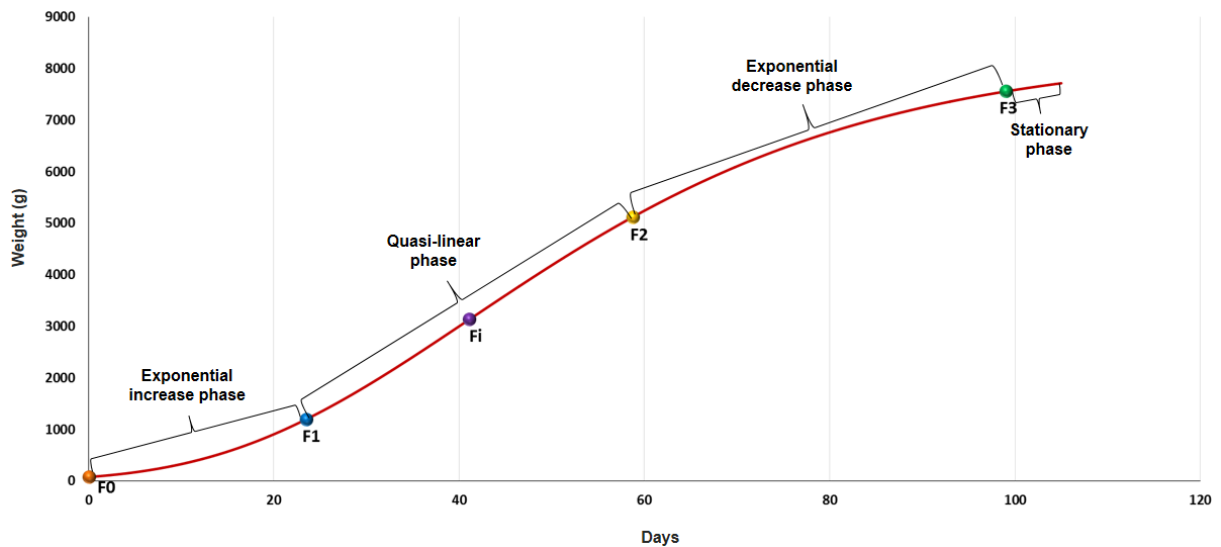
Figure 2 – Graphic representation of the growth curve by the traditional method (accumulation of mass in function of time) for broiler chickens, of both sexes, according strains



Source: Data adapted according to the description for broiler chickens, of both sexes, of the Cobb, Hubbard, and Ross strains, according to Gonçalves (2017). Data adjusted by the PPFM spreadsheet. (a): females; (b): males.

Thus, other points in the curve were outlined precisely, since the PPFM does not operate with only the first two derivative of the growth curve (velocity and acceleration), as is commonly practiced, which results in the identification of only three important curve points (P_1 , P_i , and P_2), as proposed by Gregorczyk (1991; 1998), which offer attempts of characterization of the growth phases curves (exponential, linear and stationary phase).

With the PPFM, innovative points named F_0 (represents the start of the exponential increase phase), F_1 (sets the start of the linear and the end of the phase of exponential increase growth), F_2 (symbolizes the end of the linear phase and the start of the exponential decrease), and F_3 (reveals the exact moment of the end of the exponential phase and start of the plateau phase) were established. Thus, the well-known phases were accurately defined by the PPFM and termed as: lag phase, exponential increase, quasi-linear, exponential decrease, and stationary, all represented by Figure 3, (except for lag phase).

Figure 3 – Location of the critical points F_0 , F_1 , F_2 , F_3 , and respective phases

Source: Data adapted according to the description for Cobb males, according Gonçalves (2017). Data adjusted by the PPFM spreadsheet.

As consequence of these distinct perspectives regarding the growth process (traditional $\times$ PPFM), when comparing Gonçalves (2017) findings with the results presented by PPFM, it was ascertained that the biggest estimates for asymptotic weight, as observed by Gonçalves (2017), were detected for males of Hubbard and Ross strains, given that the estimated weights at 105 days of age, for the referred sex and strains were: 9186.30g and 8375.50g, for Hubbard and Ross respectively, in contrast to observed values of 8111.9g and 7608.8g, for the males of the Hubbard and Ross strains, respectively, considering the same time frame in days (Table 1). The percentage variation between estimated asymptotic weights and observed averages weights for the aforementioned strains and sex were 11.7% and 9.2%, respectively (Table 1).

However, as the spreadsheet works with point F_3 , which sets the moment of saturation of growth, it becomes convenient to assess the estimates for the weights of the poultry at maturity regarding the values presented by F_3 , disregarding the values of parameter “A”, which refers to the asymptotic weight when the time, that is, age of the poultry approaches infinity (Mota *et al.*, 2015; Gbangboche *et al.*, 2008; Knížetová *et al.*, 1995).

The biggest estimate for weight, based on the results presented by PPFM, was verified only to Hubbard line in both sexes. Thus, the estimated weight at 102 days for the Hubbard males was 8128.0g and 6448.79g for the female of the

referred line, at 105 days (Table 1). Differing from the findings of Gonçalves (2017), whose observed weight for the Hubbard line at 105 days of age was 8111.9g, whereas that the female of the same line, it was 6375.5g at 106 days of life (Table 1). The percentage variation between estimated weights at maturity by PPFM and the average weights observed by Gonçalves (2017) were 0.2% and 1.2% for Hubbard line males and females, respectively (Table 1).

Ergo, the conventional assessment of growth may not be as wide-ranging or even accurate when estimating, for instance, asymptotic weight, age at the inflection point, age at the maturity, weight at the inflection point, which may lead, for instance, to over or underestimation of the values.

Table 1 – Estimate of the parameters of the Gompertz and Richards functions for the live weight and percentage variation between estimated and observed weight of broiler chickens, of both sexes, according to the strains, of 1 up to 106 days of age through different approaches of the growth process

(continued)

Parameters		Gonçalves (2017)											
		Cobb				Hubbard				Ross			
		Male	%	Female	%	Male	%	Female	%	Male	%	Female	%
	A (g)	8110.70	100	6565.00	100	9186.30	100	6874.40	100	8375.50	100	6754.80	100
F_i	T_i (days)	40	-	38	-	45	-	42	-	41	-	41	-
	W_i (g)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
F_3	T_3 (days)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	W_3 (g)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$B \left(\frac{g}{days} \right)$	0.042	-	0.042	-	0.037	-	0.039	-	0.040	-	0.040	-
	$\frac{W_i}{A}$ (%)	36.8	-	36.8	-	36.8	-	36.8	-	36.8	-	36.8	-
	W_{mean} (g)	7659.3	94.4	6309.2	96.1	8111.9	88.3	6375.5	92.7	7608.8	90.8	6429.2	95.1
	$K_{E\ max} \left(\frac{g^3}{days^2} \right)$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$T_{K_{E\ max}}$ (days)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$W_{K_{E\ max}}$ (g)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$Action \left(\frac{g^3}{days} \right)$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	T_{action} (days)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	W_{action} (g)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Goodness-of-fit indicators	R^2_{adj}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	AIC_c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	BIC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Source: Data adapted for broiler chickens, of both sexes, for the Cobb, Hubbard, and Ross strains, according to Gonçalves (2017). A: asymptotic weight limit when age approaches infinity; F_i : T_i – age at the point of inflexion; W_i – weight at the point of inflexion; F_3 : T_3 – age at maturity; W_3 – weight at maturity; B – maturity rate; $\frac{W_i}{A}$: determines the position of the point of inflexion in the curve; W_{mean} : average weight at maturity obtained by Gonçalves (2017); $K_{E\ max}$: represents the moment in which the energy efficiency is at its peak; $T_{K_{E\ max}}$: day of the peak of energy investment; $W_{K_{E\ max}}$: weight at the peak of energy investment; Action: represents the useful work applied for growth; T_{action} : total of days for growth; W_{action} : weight reached at the end of growth; R^2_{adj} : adjusted determination coefficient; AIC_c : corrected Akaike information criterion; BIC: Bayesian information criterion.

Table 1 – Estimate of the parameters of the Gompertz and Richards functions for the live weight and percentage variation between estimated and observed weight of broiler chickens, of both sexes, according to the strains, of 1 up to 106 days of age through different approaches of the growth process

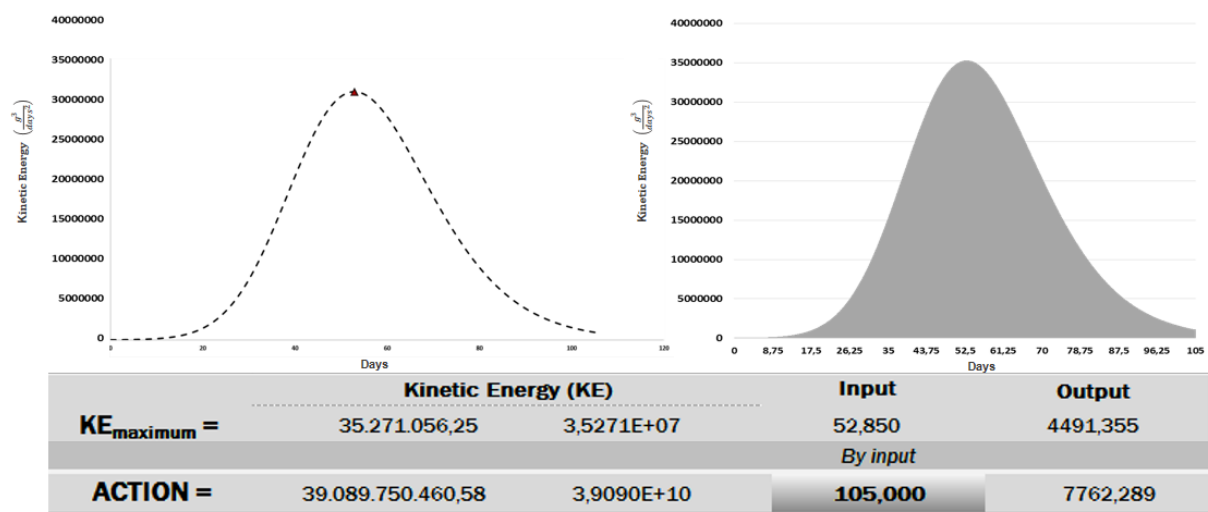
(conclusion)													
Parameters		PPFM											
		Cobb				Hubbard				Ross			
		Male	%	Female	%	Male	%	Female	%	Male	%	Female	%
F_i	A (g)	8329.98	-	6981.23	-	8835.00	-	7499.22	-	8081.44	-	7442.00	-
	T_i (days)	41	-	36	-	47	-	41	-	45	-	39	-
	W_i (g)	3136.04	-	2329.17	-	3664.03	-	2499.49	-	3509.68	-	2381.19	-
F_3	T_3 (days)	99	-	101	-	102	-	105	-	92	-	105	-
	W_3 (g)	7561.81	98.7	6204.73	98.3	8128.00	100	6448.79	100	7453.59	97.9	6395.38	
	$B\left(\frac{g}{days}\right)$	0.040	-	0.033	-	0.045	-	0.030	-	0.054	-	0.029	-
	$\frac{W_i}{A}$ (%)	37.6	-	33.4	-	41.5	-	33.3	-	43.4	-	32.0	-
	W_{mean} (g)	7659.3	100	6309.2	100	8111.9	99.8	6375.5	98.8	7608.8	100	6429.2	
	$K_{E\ max}\left(\frac{g^3}{days^2}\right)$	2.73E+07	-	1.28E+07	-	3.58E+07	-	1.26E+07	-	3.53E+07	-	1.20E+07	-
	$T_{K_{E\ max}}$ (days)	51	-	48	-	56	-	55	-	52	-	53	-
	$W_{K_{E\ max}}$ (g)	4322.95	-	3437.96	-	4799.63	-	3693.20	-	4491.35	-	3604.90	-
	Action $\left(\frac{g^3}{days}\right)$	3.55E+10	-	1.83E+10	-	4.44E+10	-	1.94E+10	-	3.91E+10	-	1.87E+10	-
	T_{action} (days)	105	-	106	-	105	-	106	-	105	-	106	-
	W_{action} (g)	7717.20	-	6318.04	-	8207.61	-	6452.93	-	7762.25	-	6400.37	-
Goodness-of-fit indicators	R^2_{adj}	0.9909	-	0.9999	-	0.9990	-	0.9990	-	0.9982	-	0.9998	-
	AIC _c	119.344	-	81.231	-	126.981	-	121.216	-	133.247	-	99.945	-
	BIC	111.768	-	73.65	-	119.406	-	113.641	-	125.672	-	92.369	-

Source: Data adapted for broiler chickens, of both sexes, for the Cobb, Hubbard, and Ross strains, according to Gonçalves (2017). A: asymptotic weight limit when age approaches infinity; F_i : T_i – age at the point of inflexion; W_i – weight at the point of inflexion; F_3 : T_3 – age at maturity; W_3 – weight at maturity; B – maturity rate; $\frac{W_i}{A}$: determines the position of the point of inflexion in the curve; W_{mean} : average weight at maturity obtained by Gonçalves (2017); $K_{E\ max}$: represents the moment in which the energy efficiency is at its peak; $T_{K_{E\ max}}$: day of the peak of energy investment; $W_{K_{E\ max}}$: weight at the peak of energy investment; Action: represents the useful work applied for growth; T_{action} : total of days for growth; W_{action} : weight reached at the end of growth; R^2_{adj} : adjusted determination coefficient; AIC_c: corrected Akaike information criterion; BIC: Bayesian information criterion.

Due to the need of assessment of the energy efficiency of the growth process, the kinetic energy calculation was implemented by the PPFM through the usage of the formula $[K_E = (m \cdot v^2)/2]$ (Kanski *et al.*, 2015). From the standpoint of Jørgensen *et al.* (2000), it is necessary to define the amount of energy used on growth, with the aim of perfecting the understanding of the expansion process.

Because it assesses growth by the coordinates energy $\times$ time, the PPFM managed to demonstrate graphically the growth via the calculation of the area above and below the kinetic energy curve in virtue of the application of the Riemann sum (Hellmann *et al.*, 2016; Leal Júnior & Pinheiro, 2016). The determination of the area of kinetic energy has culminated in the innovative calculation of the action, result of the sum of kinetic energy over time, representing all the useful work performed over the growth trajectory (Girtler, 2011) (Figure 4).

Figure 4 – Action calculation



Source: Data adapted according to the description for Ross males, according to Gonçalves (2017). Data adjusted by the PPFM spreadsheet.

In light of this, a new link which had not yet been explored to improve the understanding of the different growth phases has been established (Grandpierre, 2011a). Ergo, the principle of action has allowed summarizing in a single numerical value all the growth process (Sakthiselvan *et al.*, 2019).

When assessed maximum amplitude of weight (accumulated mass) and action (sum of the kinetic energy over time) for broiler chickens, of both sexes, of the Cobb,

Hubbard, and Ross strains, studied by Gonçalves (2017), in light of the results obtained by PPFM, the weight presented a percentage variation of 6% for males slaughtered at 105 days of age, whereas the maximum range of action, regarding the same period of days was of 20.1% (Table 2). Regarding the females, whose slaughter occurred at 106 days of age, the percentage variation was of 2.1%, in contrast to the maximum amplitude value of action of 5.5% (Table 2).

This difference in values can also be observed when we simulate two conditions of slaughter, the first one occurring on the 42nd day of life for males and on the 43rd day for females, and the second one occurring on the 56th day of life for male broiler chickens and on the 63rd day of life for females. These dates were chosen to illustrate the percentage difference when one works with accumulated mass in relation to energy analysis, given that in his work, Gonçalves (2017) has made available the averages of the body weights of the broiler chickens, for both sexes, and different strains.

We can estimate that for the hypothetical slaughter at 42 days, the percentage variation for the weight in males would be of 10.6%, and for the maximum range of action the value obtained would be 26% (Table 2). As it regards the female broiler chickens, at 43 days we would encounter 10.5% for the percentage variation of weight, and 26% for the maximum range of action (Table 2). But, if the slaughter occurred only on the 56th day of life, we would have a percentage variation of 4 % for the weight and 10.3% for the maximum range of action for the males, in contrast with the determined values for the females if the slaughter happened on the 63rd day of life, as on this date the females would present a percentage variation of weight of 7.8% and a 19.3% maximum range of action (Table 2).

The difference in values between accumulated mass and action clearly demonstrates that there is more sensitivity in the determination of the growth curve through the usage of kinetic energy of the analyzed period, in virtue of the quadratic influence of velocity in the deposition of biomass, than with the usage of accumulated mass, as it is traditionally employed.

Table 2 – Accumulated mass and action (sum of all useful work) for males and females according to strains

Males												
Strains	42 days				56 days				105 days			
	Weight (g)	%*	Action ($\frac{g^3}{days}$)	%*	Weight (g)	%**	Action ($\frac{g^3}{days}$)	%**	Weight (g)	%***	Action ($\frac{g^3}{days}$)	%***
Cobb	3239.69	100.0	1.96E+10	100.0	4783.66	99.8	3.31E+10	93.3	7717.20	94.0	3.55E+10	79.9
Hubbard	2896.79	89.4	1.45E+10	74.0	4603.87	96.0	3.18E+10	89.7	8207.61	100.0	4.44E+10	100.0
Ross	3028.65	93.5	1.63E+10	83.1	4795.21	100.0	3.55E+10	100.0	7762.25	94.6	3.91E+10	88.0

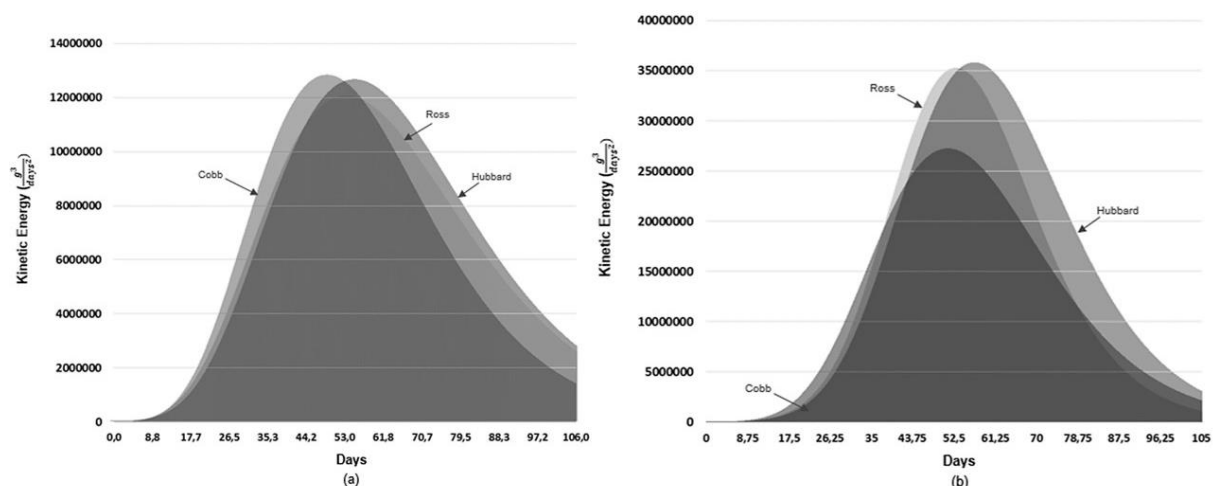
Females												
Strains	43 days				63 days				106 days			
	Weight (g)	%+	Action ($\frac{g^3}{days}$)	%+	Weight (g)	%++	Action ($\frac{g^3}{days}$)	%++	Weight (g)	%+++	Action ($\frac{g^3}{days}$)	%+++
Cobb	2890.45	100.0	1.25E+10	100.0	4545.08	100.0	2.06E+10	100.0	6318.04	97.9	1.83E+10	88.7
Hubbard	2586.96	89.5	9.26E+09	74.0	4191.73	92.2	1.66E+10	80.7	6452.93	100.0	1.94E+10	94.2
Ross	2682.15	92.8	1.03E+10	81.9	4382.17	96.4	1.91E+10	92.7	6400.37	99.2	1.87E+10	90.9

Source: Data adapted for broiler chickens, of both sexes, according to Gonçalves (2017). Weight: accumulated mass. Action: represents the useful work applied for growth +; **, ***: values estimated for slaughter at 42, 56 (hypothetical days), and 105 days of age for males, respectively; +; ++; +++: values estimated for slaughter at 43 and 63 (hypothetical days), and 106 days of age for females, respectively.

Through Gonçalves (2017) study's data, it was possible to determine precisely the values of maximum kinetic energy, identifying the day on which the poultry has reached the peak of energy investment, with the purpose of producing the new biomass, as well as knowing its weight in this period. This information becomes useful to define the most opportune moment for slaughter, since the ideal is that the poultry has the best utilization of the supplied energy resources. Since in the study at hand the slaughter happened late (105 days for males and 106 days for females), there was no harm according to the maximum kinetic energy data for the broiler chickens, of both sexes, of the Cobb, Hubbard, and Ross strains (Table 1).

By the values of maximum kinetic energy, it was observed that the males of the Hubbard line were the latest, needing 56 days to reach the peak of energy investment. In sequence, the Ross males need 52 days to reach the peak of energy investment, followed, immediately, by the Cobb males, which demanded 51 days (Figure 5) (Table 1). The same was observed for the Cobb line females, which were the most precocious, needing 48 days, followed by Ross, with 53 days, and Hubbard, with 55 days (Figure 5) (Table 1).

Figure 5 – Graphic representation of the approach of the growth process by the PPFM (energy assessment) for broiler chickens, of both sexes, according strains



Source: Data adapted according to the description of broiler chicken strains, according to Gonçalves (2017). Data adjusted by the PPFM spreadsheet. Superposition of action for broiler chickens, of both sexes, of the Cobb, Hubbard, and Ross strains. (a): females; (b): males.

However, this late or precocious ranking carries neither a positive nor a negative connotation, all depends on the period when the slaughter is made. If the slaughter happens late, as in Gonçalves (2007) study, the latest strains are the most favorable when compared with the most precocious strains. Through the results of energy assessment made available by the PPFM, we can infer that the useful work was more favorable to the Cobb strain regardless of sex.

Hence, the graphic representation of kinetic energy has shown to be of great value, revealing a large amount of information that were unexplored in the sigmoid curve. Because the principle of action has not only made it possible to characterize growth, but to also measure the conversion of energy in the form of useful work, the latter being effectively destined to growth (Johnson, 1992). Moreover, it has enabled a deeper meaning and a better understanding of the growth process, since it was possible to evaluate numerically the more favorable trajectory that optimized the expansion process as per Grandpierre (2007), given that growth involves strategies and resource optimization (Karkach, 2006).

Therefore, Rosen (1967) defined the principle of action as a cost function, for it is the sum of the product of energy and time investments of the whole process, from the initial to the final phases (Grandpierre & Kafatos, 2013). As described by Lengauer (2001), for a living organism, energy expenditure and time investment are the most valuable, consequently, the product energy versus time must be projected to be ideal. In truth, it is necessary to minimize the expenditure of energy and maximize time, looking to live longer and with more quality (Grandpierre, 2011b).

The knowledge of the parameters of the growth curve for the different breeds and strains becomes essential for the formation of the program of genetic improvement (Knížetová *et al.*, 1991). The PPFM, added to these knowledges, has the potential to become an instrument of support of selection, acting in the follow up of the genetic progression of lines, and in the representation of the differences between the genetic groups, as well as assessing improvements to nutritional, environmental, and handling issues in general.

2.6 Conclusion

The PPFM presents as a new tool in the modeling of growth curves when working with the resulting force involved in the expansion process, as well as the assessment of kinetic energy and its unfolding, the principle of action, hitherto hidden inside the growth curve. Resulting from the numerical metamorphosis started with the adjustment of parameters, followed by the usage of the derivative, the unfolding of the forces, the assessment of the kinetic energy culminating in the calculation of the useful work involved in growth. Thus, the principle of action allows a coherent and more complex biological interpretation, usefully and objectively, allowing the assessment of the process of expansion of growth in the expression of the best investment in energy and time, revealing information that was until now ignored in the sigmoid curve.

2.7 Acknowledgments

To the Coordination for the Improvement of Higher Education (CAPES) for the doctoral scholarship granted to the first author of the article.

To the São Paulo Research Foundation (FAPESP) for the postdoctoral scholarship granted to the second author of the article. Process: 18/19629-0.

2.8 References

Afonso VAC, Quirino CR, Costa RLD, Silva RMC. Aplicação de modelos não-lineares no ajuste de curvas de crescimento em fêmeas ovinas (*Ovis aries*) da raça Santa Inês criadas na região Norte Fluminense/RJ. *Boletim de Indústria Animal* 2009; 66(2): 115-120.

Al-Samarai FR. Growth curve of commercial broiler as predicted by different nonlinear functions. *American Journal of Applied Scientific Research* 2015; 1(2): 6-9.

Bentea L, Watzky MA, Finke RG. Sigmoidal nucleation and growth curves across nature fit by the Finke-Watzky model of slow continuous nucleation and autocatalytic

growth: explicit formulas for the lag and growth times plus other key insights. The Journal of Physical Chemistry C 2017; 121(9): 5302-5312.

Darmani Kuhi H, Porter T, López S, Kebreab E, Strathe AB, Dumas A, Dijkstra J, France J. A review of mathematical functions for the analysis of growth in poultry. World's Poultry Science Journal 2010; 66(2): 227-240.

Demuner LF, Suckeveris D, Muñoz JA, Caetano VC, Lima CG, Faria Filho DE, Faria DE. Adjustment of growth models in broiler chickens. Pesquisa Agropecuária Brasileira 2017; 52(12): 1241-1252.

Dumas A, Dijkstra J, France J. Mathematical modelling in animal nutrition: a centenary review. The Journal of Agricultural Science 2008; 146(2): 123-142.

Easwaran K. Why physics uses second derivatives. The British Journal for the Philosophy of Science 2014; 65(4): 845-862.

Fekedulegn DB, Andrew ME, Burchfiel CM, Violanti JM, Hartley TA, Charles LE, Miller DB. Area under the curve and other summary indicators of repeated waking cortisol measurements. Psychosomatic Medicine 2007; 69(7): 651-9.

Garcia Neto M, Perri SHV, Barros T, Cassiano RP, Faria Junior MJA, Pinto MF. Three major phases of sigmoid growth curve can be identified by ontogenetic growth force. In: International Poultry Scientific Forum; 2018; Atlanta, Georgia. United States of America. p. 97-8.

Garcia Neto M, Kebreab E, Faria Junior MJA. PPFM: Practical Program for Forces Modeling; 2020 [cited 2020 Jun 28]. Available from: <<https://sites.google.com/view/ppfm-spreadsheet/>>.

Gbangboche AB, Glele-Kakai R, Salifou S, Albuquerque LG, Leroy PL. Comparison of non-linear growth models to describe the growth curve in West African Dwarf sheep. Animal 2008; 2(7): 1003-1012.

Giménez A, Ares F, Ares G. Sensory shelf-life estimation: A review of current methodological approaches. Food Research International 2012; 49(1): 311-325.

Girtler J. Valuation method for operation of crankshaft-piston assembly in combustion engines in energy approach. Journal of Polish Cimac 2011; 6(1): 89-98.

Gompertz B. On the nature of the function expressive of the law of human mortality, and on a new mode of determining the value of life contingencies. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 1825; 115: 513-583.

Gonçalves, CA. Modelagem do crescimento, composição do corpo e das penas em frangos de corte. [Thesis]. Jaboticabal (SP): Universidade Estadual Paulista; 2017.

Grandpierre A. Biological extension of the action principle: Endpoint determination beyond the quantum level and the ultimate physical roots of consciousness. *NeuroQuantology* 2007; 5(4): 346-362.

Grandpierre A. On the first principle of biology and the Foundation of the Universal Science. In: Tymieniecka AT, Grandpierre A, editors. *Analecta Husserliana - The Yearbook of Phenomenological Research: volume 107*. Dordrecht: Springer; 2011a. p. 19-36.

Grandpierre A. The biological principle of natural sciences and the logos of life of natural philosophy: A comparison and the perspectives of unifying the Science and philosophy of life. In: Tymieniecka AT, editor. *Analecta Husserliana – The Yearbook of Phenomenological Research: volume 110*. Dordrecht: Springer; 2011b. p. 711-727.

Grandpierre A, Kafatos M. Biological autonomy. *Philosophy Study* 2012; 2(9): 631-649.

Grandpierre A, Kafatos M. Genuine biological autonomy: How can the spooky finger of mind play on the physical keyboard of the brain? In: Hanna P, editor. *An Anthology of Philosophical Studies: volume 7*. Athens: Atiner's; 2013. p. 83-98.

Gregorczyk A. The logistic function – its application to the description and prognosis of plant growth. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae* 1991; 60(1-2): 67-76.

Gregorczyk A. Richards plant growth model. *Journal of Agronomy and Crop Science* 1998; 181(4): 243-247.

Hayati H, Eager D, Pendrill AM, Alberg H. Jerk within the context of science and engineering – A systematic review. *Vibration* 2020; 3(4): 371-409.

Hellmann L, Sandmann A, Hallal R, Carvalho AP, Gasparin PP, Gaffuri SL. Geogebra no ensino de cálculo diferencial e integral I. *Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia* 2016; 2(14): 31-46.

Jacob EB, Becker I, Shapira Y, Levine H. Bacterial linguistic communication and social intelligence. *TRENDS in Microbiology* 2004; 12(8): 366-372.

Johnson L. An ecological approach to biosystem thermodynamics. *Biology and Philosophy* 1992; 7(1): 35-60.

Jørgensen SE, Patten BC, Straškraba M. Ecosystems emerging: 4. growth. *Ecological Modelling* 2000; 126(2-3): 249-284.

Kanski M, Arvidsson PM, Töger J, Borgquist R, Heiberg E, Carlsson M, Arheden H. Left ventricular fluid kinetic energy time curves in heart failure from cardiovascular magnetic resonance 4D flow data. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance* 2015; 17(111): 1-10.

Karkach AS. Trajectories and models of individual growth. *Demographic Research* 2006; 15: 347-400.

Kemmer G, Keller S. Nonlinear least-squares data fitting in Excel spreadsheets. *Nature Protocols* 2010; 5(2): 267-281.

Knížetová H, Hyánek J, Kníže B, Roubíček J. Analysis of growth curves of fowl. I. Chickens. *Journal British Poultry Science* 1991; 32(5): 1027-1038.

Knížetová H, Hyánek J, Hyánková L, Bělíček P. Comparative study of growth curves in poultry. *Genetics Selection Evolution* 1995; 27(4): 365-375.

Koseki S. Predictive modeling for estimation of bacterial behavior from farm to table. *Food Safety* 2016; 4(2): 33-44.

Leal Junior LC, Pinheiro JML. Modos de compreender a soma de Riemann e suas aplicações ao estar em um ambiente informatizado de aprendizagem. *Unión: Revista Iberoamericana de Educación Matemática* 2016; 47: 23-43.

Lee SY, Lei B, Mallick B. Estimation of COVID-19 spread curves integrating global data and borrowing information. *PloS One* 2020; 15(7): 1-17.

Lengauer T. Computational biology at the beginning of the post-genomic era. In: Wilhelm R, editor. Informatics: 10 years back, 10 years ahead. Berlin: Springer; 2001. p. 341-355.

Mota LFM, Alcântara DC, Abreu LRA, Costa LS, Pires AV, Bonafé CM, Silva MA, Pinheiro SRF. Crescimento de codornas de diferentes grupos genéticos por meio de modelos não lineares. Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia 2015; 67(5): 1372-1380.

Narinç D, Narinç NÖ, Aygün A. Growth curve analyses in poultry science. World's Poultry Science Journal 2017; 73(2): 395-408.

Richards FJ. A flexible growth function for empirical use. Journal of Experimental Botany 1959; 10(29): 290-300.

Rosen R. General considerations. In: Rosen R, editor. Optimality principles in biology. New York: Butterworth; 1967. p. 1-12.

Sakthiselvan P, Meenambiga SS, Madhumathi R. Kinetic studies on cell growth. In: Biba Vikas, Michael Fasullo, editors. Cell Growth. London: IntechOpen; 2019. p. 13-22.

Shi PJ, Ishikawa T, Sandhu HS, Hui C, Chakraborty A, Jin XS, Tachihara K, Li BL. On the $\frac{3}{4}$ - exponent Von Bertalanffy equation for ontogenetic growth. Ecological Modelling 2014; 276: 23-28.

Shimojo M, Ikeda K, Asano Y, Ishiwaka R, Sato H, Nakano Y, Tobisa M, Ohba N, Eguchi M, Masuda Y. Introducing viewpoints of mechanics into basic growth analysis – (I) three aspects of growth mechanics compared with three laws of motion. Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University 2006; 51(2): 285-287.

Souza ALV, Coelho EF, Campos MS, Brito KS, Melo DM, Oliveira BR. Ajustes de modelos matemáticos para o crescimento da Bananeira Pacovan em condições de semiárido. In: III Inovagri International Meeting; 2015; Fortaleza, Ceará. Brasil. p. 3224-3231.

Sutherland D. The development of mature gait. Gait & Posture 1997; 6(2): 163-170.

Teleken JT, Galvão AC, Robazza WS. Comparing non-linear mathematical models to describe growth of different animals. *Acta Scientiarum. Animal Sciences* 2017; 39(1): 73-81.

Tholon P, Queiroz SA. Modelos matemáticos utilizados para descrever curvas de crescimento em aves aplicados ao melhoramento genético animal. *Ciência Rural* 2009; 39(7): 2261-2269.

Vázquez JA, Murado MA. Unstructured mathematical model for biomass, lactic acid and bacteriocin production by lactic acid bacteria in batch fermentation. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 2008; 83(1): 91-6.

Vázquez JA, Lorenzo JM, Fuciños P, Franco D. Evaluation of non-linear equations to model different animal growths with mono and bisigmoid profiles. *Journal of Theoretical Biology* 2012; 314: 95-105.

Veloso RC, Pires AV, Torres Filho RA, Drumond ECS, Costa LS, Amaral JM, Pereira IG. Crescimento de genótipos de frangos tipo caipira. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia* 2015; 67(5): 1361-1371.

West J, Newton PK. Cellular interactions constrain tumor growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2019; 116(6): 1918-1923.

Wit E, Heuvel EVD, Romeijn JW. 'All models are wrong...': an introduction to model uncertainty. *Statistica Neerlandica* 2012; 66(3): 217-236.

3 CHAPTER 2 – ENERGY ANALYSIS OF THE PRODUCTION OF BROILER CHICKENS FED WITH FEEDS OF DIFFERENT ENERGY LEVELS

3.1 Resumo

Este estudo propôs expressar, em modelo matemático, a eficiência no uso de energia relacionando os *inputs* e *outputs* envolvidos na produção de frangos de corte, pois tal atividade apresenta externalidades negativas em função do alto consumo energético e geração de resíduos com alto potencial energético. Dados dos padrões de crescimento de 560 frangos de corte machos Cobb 500 de 1 a 56 dias foram utilizados. Pintainhos e ração foram considerados como *input* e carcaça eviscerada como *output*. Para estimar a energia depositada na carcaça (ER_{carc}) calculou-se a energia retida como gordura (ER_{gord}) e na forma de proteína (ER_{prot}). O acúmulo de energia retida na carcaça foi descrita pelo modelo de Richards, através do Programa Prático de Modelagem de Forças (PPFM). Para a determinação dos *inputs* obteve-se as energias retidas no pintainho (ER_{pint}) e no alimento (ER_{alim}). A eficiência no uso de energia (EUE), produtividade energética (PEn) e energia líquida (EL) foram determinados. Os dados foram submetidos à análise de variância e ajustaram-se as regressões polinomiais significativas. A análise de superfície de resposta foi empregada para verificar e quantificar os efeitos sinérgicos e antagônicos. Os índices EUE, PEn e EL encontrados foram 30%, 0,024 kg MJ⁻¹ e -72,53 MJ, respectivamente. Os resultados mostraram que o sistema produtivo possui baixa eficiência energética. Portanto, medidas são necessárias para melhorar os índices energéticos, como utilização de dietas que atendam às necessidades energéticas das aves evitando-se o desperdício, já que a ração é o insumo que mais demanda energia, e/ou melhorar o rendimento de carne.

Palavras-chave: eficiência energética, energia, modelos matemáticos, relação *input-output*

3.2 Abstract

This study has proposed to express in mathematical model the efficiency in energy use by relating the inputs and outputs involved in broiler chicken production, since this activity presents negative externalities because of its high energy consumption and generation of residues with high energy potential. Data from the growth patterns of 560 Cobb 500 male broiler chickens of 1 to 56 days of age was used. Chicks and feed were considered as input and the eviscerated carcass as output. In order to estimate the energy deposited in the carcass (ER_{carc}), the energy retained was calculated as fat (ER_{fat}) and in the form of protein (ER_{prot}). The Practical Program for Forces Modeling (PPFM) has assessed the energy retained in the carcass by employing the Richards model. For the input determination, the energies retained in the chicken (ER_{chick}) and in the feed (ER_{feed}) were considered. Energy use efficiency (EUE), energy productivity (EP), and net energy (NE) were determined. The data was submitted to analysis of variance and the significant polynomial regressions were adjusted. The response surface analysis was employed to verify and quantify the antagonistic and synergic effects. The EUE, EP, and NE indexes found were 30%, 0.024 kg MJ⁻¹ e -72.53 MJ, respectively. The results showed that the productive system has low energetic efficiency. Therefore, measures are needed to improve the energy indexes, such as use of diets that meet the poultry's energy needs and avoid waste, since feed is the input that demands the most energy, and/or improving meat yield.

Keywords: energy, energy efficiency, input-output ratio, mathematical model

3.3 Introduction²

The broiler chicken production represents an important segment in several countries' economy, occupying a remarkable position in the industry of animal origin products, including Brazil, whose chicken meat production in 2019 reached the amount of 13.245 million tons, of which 4.214 million were destined to export, making

² Brazilian Journal of Poultry Science
ANEXO B – Normas de Publicação da Revista

it the biggest world exporter in this sector, according to data of the annual report (ABPA, 2020).

Despite occupying a relevant position in the industrial segment of products of animal origin, aviculture is an activity that presents negative externalities, as great demand for inputs, waste generation, besides the high energy consumption, as reported by Nabavi-Pelesaraei *et al.* (2013), which due to population growth and the increase in the standard of living, has increased over the years (Kilic, 2016).

As animal production systems use considerable amounts of energy and taking into account the increase of the production cost, energy must be examined more closely (Sefeedpari *et al.*, 2013). It is important to quantify the inputs involved in the productive system, as well as measuring the energy efficiency. Thus, several studies have concentrated on estimating the use of energy over the productive process of broiler chickens. For, although they possess a great ability to transform the ingested feed in animal protein, in a short space of time, as described by Sefeedpari *et al.* (2012b), by virtue of its high consumption, it becomes necessary to take into account the energy demand of the inputs and the energy contained in the residues.

For this reason, taking into account population growth and the bigger demand for quality and safe food, associated with the increase in costs with renewable energy sources, a perfecting of the energy efficiency in livestock production as a whole, aiming to reduce energy consumption has become imperative (Sefeedpari *et al.*, 2012a). In this context, energy analysis has shown inescapable, after all, have been sought to reduce energy costs and increase production yield (Salehi *et al.*, 2014). Thus, studies on the energy input-output standard are of great value, as suggested by Heidari *et al.* (2011b), since they assess the energy efficiency of the productive systems and the environmental impacts resulting from these systems (Esengun *et al.*, 2007; Salehi *et al.*, 2014). Therefore, energy efficiency, measured by the energy output/input relation, has shown to be a useful economic tool to assess, in the long term, the several productive processes as described by Atilgan & Koknaroglu (2006), allowing the quantification of the energy return of the products in relation to energy invested for its obtainment (Heitschmidt *et al.*, 1996).

This tool, in association to a correct interpretation of the growth curves, which, according to France *et al.* (1989), are also used as response to predict the energy

and protein daily needs for keeping and growing poultry, has shown to be an important resource for the adoption of a sustainable management. Thus, the energy involved in the feed, which represented about 70% to 75% of the relative costs with broiler chicken feeding, as mentioned by Van der Klis *et al.* (2010), has become another relevant point, given that the optimization of the diet's energy level not only reduces the costs of feed per unity of aviary products, as reported by Fan *et al.* (2008), but also influences the development of growth and composition of the carcass and, consequently, meat quality (Boekholt *et al.*, 1994; Aboulezz *et al.*, 2019).

This paper aims to express in mathematical modeling the efficiency in energy use by relating the inputs and outputs involved in the production of male broiler chickens, treated with pellet feeds of different levels of metabolizable energy (ME), considering growth and performance of the broiler chickens, according to energy efficiency indicators.

3.4 Materials and Methods

In order to demonstrate through the mathematical model the energy efficiency in the production of broiler chickens was used the data from the body growth pattern of 560 Cobb 500 male broiler chickens, in the period of 1 to 56 days of age, obtained from the essay performed by Cassiano (2018), whose part of the results were published by the author. The experimental design adopted in this study was entirely at random, with 4 treatments, levels of metabolizable energy (2850, 3000, 3150, 3300 kcal kg⁻¹ of feed), with 7 repetitions and 20 poultry by experimental portion, distributed in 28 boxes.

The aforementioned experiment was conducted at the Experimental Sector of Zootechnics of the Faculty of Veterinary Medicine of Araçatuba, São Paulo State University "Júlio de Mesquita Filho", (FMVA – UNESP), which followed the Ethical Principles in Animal Research, according to the Brazilian College of Animal Experimentation (COBEA), approved by the Ethics Committee in the Use of Animals (CEUA) through process number 2015-00843.

The experimental feeds were formulated based on corn, soybean bran, soybean oil, mineral vitamin supplement, calcitic limestone, dicalcium phosphate, and phytase enzyme, as recommended by Rostagno *et al.* (2017), and calculated by the Practical Program for Formulation Rations (PPFR) for maximum profit broiler chickens, non-linear version (Garcia Neto, 2018) (Table 1). Feed and water were provided *ad libitum*.

Every 7 days, the poultry were weighted and feed consumption was quantified. After weighing, 2 poultry per box were slaughtered, plucked, and eviscerated, removing head, neck, feet, and all the visceral fat, subsequently weighing the eviscerated carcass.

Table 1 – Composition of the feeds for broiler chickens males, according to treatment and breeding phase

Calculated Nutritional Composition	Unit	Starter (1-21 days)				Grower (22-36 days)				Finisher (37-57 days)			
Metabolizable energy	kcal kg ⁻¹	2850	3000	3150	3300	2850	3000	3150	3300	2850	3000	3150	3300
Crude energy	kcal kg ⁻¹	3744.29	3910.20	4064.46	4251.12	3722.32	3897.16	4004.72	4182.50	3578.55	3771.57	3926.93	4096.71
Crude protein	%	21.146	21.558	22.692	23.761	20.486	20.992	21.488	23.478	16.780	17.660	17.915	18.760
Calcium	%	0.798	0.840	0.882	0.924	0.686	0.722	0.758	0.794	0.538	0.567	0.595	0.623
Available phosphorus	%	0.375	0.394	0.414	0.434	0.320	0.337	0.354	0.371	0.251	0.264	0.277	0.290
Available Ca/P	%	2.130	2.130	2.130	2.130	2.141	2.141	2.141	2.141	2.147	2.147	2.147	2.147
Potassium	%	0.824	0.833	0.795	0.816	0.802	0.816	0.706	0.696	0.645	0.680	0.674	0.672
Sodium	%	0.204	0.208	0.217	0.227	0.193	0.200	0.200	0.210	0.174	0.175	0.184	0.193
Chlorine	%	0.353	0.366	0.346	0.381	0.316	0.339	0.239	0.245	0.145	0.178	0.186	0.198
Digestible Lysine	%	1.137	1.197	1.257	1.317	1.023	1.077	1.131	1.185	0.882	0.929	0.975	1.021
Digestible Methionone	%	0.559	0.581	0.625	0.655	0.464	0.497	0.523	0.533	0.425	0.447	0.464	0.490
Digestible Methionine + Cystine	%	0.850	0.877	0.938	0.980	0.747	0.787	0.826	0.865	0.662	0.697	0.718	0.755
DigestibleThreonine	%	0.739	0.778	0.817	0.856	0.706	0.719	0.735	0.781	0.574	0.604	0.634	0.664
Digestible Tryptophan	%	0.240	0.241	0.240	0.252	0.232	0.235	0.213	0.222	0.180	0.190	0.187	0.193
Digestible Arginine	%	1.349	1.359	1.358	1.423	1.308	1.325	1.221	1.279	1.027	1.081	1.072	1.103
EB= K ⁺ + Na ⁺ – Cl ⁻	mEq	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00
ER= (K ⁺ + Cl ⁻)/ Na ⁺	-	3.500	3.500	3.188	3.201	3.500	3.500	2.852	2.710	2.718	2.936	2.807	2.714
Ingredients													
Inert		4.367	0.000	0.000	0.000	5.536	0.910	0.000	0.000	8.997	4.024	0.000	0.000
Corn (7,88%)		55.089	59.290	54.618	47.946	56.148	60.457	61.279	54.796	62.376	65.930	70.319	65.033
Corn Gluten (60%)		0.000	0.131	3.586	4.565	0.000	0.000	5.276	9.174	0.000	0.000	0.442	1.979
Soybean oil		1.000	1.000	3.403	6.702	1.000	1.000	1.747	4.188	1.000	1.000	1.000	3.910
Soybean meal		36.318	36.089	34.505	36.681	34.920	34.990	28.491	28.681	25.384	26.695	25.653	26.284
Dicalcium phosphate		0.617	0.665	0.788	0.889	0.337	0.413	0.562	0.605	0.055	0.099	0.117	0.189
Salt		0.467	0.461	0.396	0.457	0.441	0.455	0.214	0.215	0.115	0.163	0.147	0.159
L-Lysine HCl		0.118	0.194	0.298	0.309	0.011	0.070	0.300	0.334	0.135	0.143	0.224	0.259
DL-Methionine		0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.019	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
L-Threonine		0.014	0.043	0.053	0.057	0.000	0.000	0.015	0.000	0.000	0.000	0.026	0.031
Calcitic limestone		0.962	1.004	1.042	1.079	0.855	0.898	0.933	0.960	0.704	0.739	0.766	0.790
Sodium bicarbonate		0.000	0.020	0.154	0.106	0.000	0.000	0.358	0.394	0.411	0.341	0.395	0.413
Ronozyme HiPhos - GT		0.011	0.013	0.013	0.013	0.010	0.010	0.010	0.013	0.010	0.010	0.013	0.013
Polimax Starter*		1.022	1.076	1.129	1.183	0.724	0.762	0.800	0.625	0.000	0.000	0.000	0.000
Polimax Finisher**		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.798	0.840	0.882	0.924
BHT		0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015

Source: Data from experiment for males Cobb 500, according to Cassiano (2018). EB: electrolyte balance; ER: electrolyte ratio. *composition per kg of product; K⁺: potassium; Na⁺: sodium; Cl⁻: chlorine; Ca/P: calcium/phosphorus ratio, Vit. A: 1670.000 IU; Vit. D₃: 335.000 IU; Vit. E: 2.500 mg; Vit. K₃: 417 mg; Vit. B₁: 250 mg; Calcium pantothenate: 1.870 mg; Cu: 1.000 mg; Co: 17 mg; I: 170 mg; Fe: 8.335 mg; Mn: 10.835 mg; Zn: 7.500 mg; Se: 35 mg; Choline chloride 50%: 116.670 mg; Methionine: 250.000 mg; Coccidiostatic: 13.335 mg; Growth promoter: 13.335 mg; Antioxidant: 2.000 mg. **composition per kg of product: Vit. A: 1670.000 IU; Vit. D₃: 335.000 IU; Vit. E: 2.335 mg; Vit. K₃: 400 mg; Vit. B₁: 100 mg; Vit. B₂: 800 mg; Vit. B₆: 200 mg; Vit. B₁₂: 2.000 mg; Folic Acid: 67 mg; Biotin: 7 mg; Niacin: 70 mg; Calcium pantothenate: 2.000 mg; Cu: 2.000 mg; Co: 27 mg; I: 270 mg; Fe: 16.670 mg; Mn: 17.335 mg; Zn: 12.000 mg; Se: 70 mg; Choline chloride 50%: 100.000 mg; Methionine: 235.000mg; Antioxidant: 2.000 mg.

Although there is an array of inputs in broiler chicken production such as chicks, food, labor, machinery, fossil fuel, facilities, and electric power Heidari *et al.* (2011a), Amid *et al.* (2015), Amini *et al.* (2015), Amid & Mesri-Gundoshmian (2016), and Pishgar-Komleh *et al.* (2017), as simplification, in the current study, to estimate energy efficiency only chicks and feed have been considered inputs, since the other inputs were common to all assessed treatments. As well as Pishgar-Komleh *et al.* (2017) and Amid & Mesri-Gundoshmian (2016), only eviscerated carcass was considered an output, from which it wanted to determine the energy cost of the product.

The energy deposited in the eviscerated carcass (output) was estimated by its fat and protein content in function according to carcass weight, assuming the results from Perreault & Leeson (1992) work, determining then the energy retained as fat (ER_{fat}), as well as that deposited as protein (ER_{prot}), as follows:

$$ER_{fat} (MJ) = W_{fat} \times 38.2$$

$$ER_{prot} (MJ) = W_{prot} \times 23.60$$

with: W_{fat} being the estimated fat content deposited in the carcass (kg); W_{prot} being the estimated amount of protein deposited in the carcass (kg), the 38.2 and 23.60 values correspond, respectively, to the amount of energy (MJ) in 1 kg of fat and in 1 kg of protein (Larbier & Leclercq, 1992). Thus, the energy retained in the eviscerated carcass (ER_{carc}) was obtained by adding it to ER_{fat} and ER_{prot} .

The inputs were determined from the energy retained in the chicken (ER_{chick}), estimated exactly like the energy deposited in the carcass, and the energy retained in the feed (ER_{feed}), which corresponded to the crude energy of the feed multiplied by the consumption per poultry.

Accordingly, the following indicators have been determined: energy use efficiency (EUE), energy productivity (EP), and net energy (NE), as described by Heidari *et al.* (2011a), Nabavi-Pelesaraei *et al.* (2013), Kilic (2016), Amid *et al.* (2015) e Amid *et al.* (2016).

a) Energy use efficiency (EUE): calculated by the equation proposed by Quesada *et al.* (1991)

$$EUE (\%) = \frac{\text{Energy Output (MJ)}}{\text{Energy Input (MJ)}} \times 100$$

b) Energy productivity (EP): measure of the amount obtained from a product by unit of energy inputs (Ortiz-Cañavale & Hernanz, 1999).

$$EP (kg MJ^{-1}) = \frac{\text{Production (kg)}}{\text{Energy Input (MJ)}}$$

c) Net energy (NE):

$$NE (MJ) = \text{Energy Output (MJ)} - \text{Energy Input (MJ)}$$

The results for broiler chickens slaughtered at 43 days was submitted to variance analysis and the significant polynomial regressions were adjusted. To verify and quantify the antagonistic and synergy effects between the studied factors, response surface methodology as per Rodrigues & Iemma (2009) was used, according to the PROC GLM procedures of the SAS System (2009), based on the model described below. Thus, the responses for the energy analysis variables in the production of broiler chickens, in function of the metabolizable energy of the feed and age have always had two entries to define the quadratic function:

$$Y = f(ME, Ag) = a_1 + (a_2 * ME) + (a_3 * Ag) + (a_4 * ME^2) + (a_5 * Ag * ME) + (a_6 * Ag^2)$$

In which:

Y : response for the variable in study;

ME : metabolizable energy of the feed (kg^{-1});

Ag : poultry age (days);

a_1 : value of the intercept of the function;

a_2 and a_3 : values of the parameters for ME and Ag , respectively;

a_4 and a_6 : values of the quadratic parameters for ME and Ag , respectively;

a_5 : value of the parameter of interaction between Ag and ME .

Thus, “ Y ” refers to the results of: energy input by feed (ER_{feed}), energy retained in the carcass (ER_{carc}), energy use efficiency (EUE), energy productivity (EP), and net energy (NE).

The variations in (ER_{carc}), for each of the energy levels of the feed, were analyzed by employing the Practical Program for Forces Modeling (PPFM), developed by Garcia Neto *et al.* (2020), adopting the Richards model for data adjustment in function of age.

$$Y = a[1 + (b - 1)\exp^{-c(x-d)}]^{1/(1-b)}, b \neq 1$$

Where:

Y : response for the variable;

a : upper horizontal asymptote of the curve;

b : curve shape parameter; indicates indirectly the position of the inflexion point;

c : the maximum relative growth;

d : the age at maximum rate of growth.

3.5 Results and Discussion

The results of the response surface statistical analyses, as well as its graph representation of the adjusted model, for all variables studied: ER_{feed} , ER_{carc} , EUE, EP, and NE, for the male Cobb 500 broiler chickens, according to the nutritional density of feed and age of these poultry are presented in Table 2 and Figure 1.

It was noted through the response surface statistical analysis (Table 2) that the net energy and the energy input of feed presented significant interactions for the parameters metabolizable energy versus age (ME x Ag). Consequently, it was not possible to assess these variables separately.

Regarding the quadratic parameter age (Ag x Ag), the answer was quadratic ($P < 0.0001$) for all variables studied (Table 2). For age, P was less than 5% for all variables studied, except for ER_{carc} . It is possible to infer that the variables studied rely heavily on age.

For the quadratic parameter metabolizable energy (ME x ME), a significant quadratic effect for EUE, EP, and NE indicators was observed (Table 2).

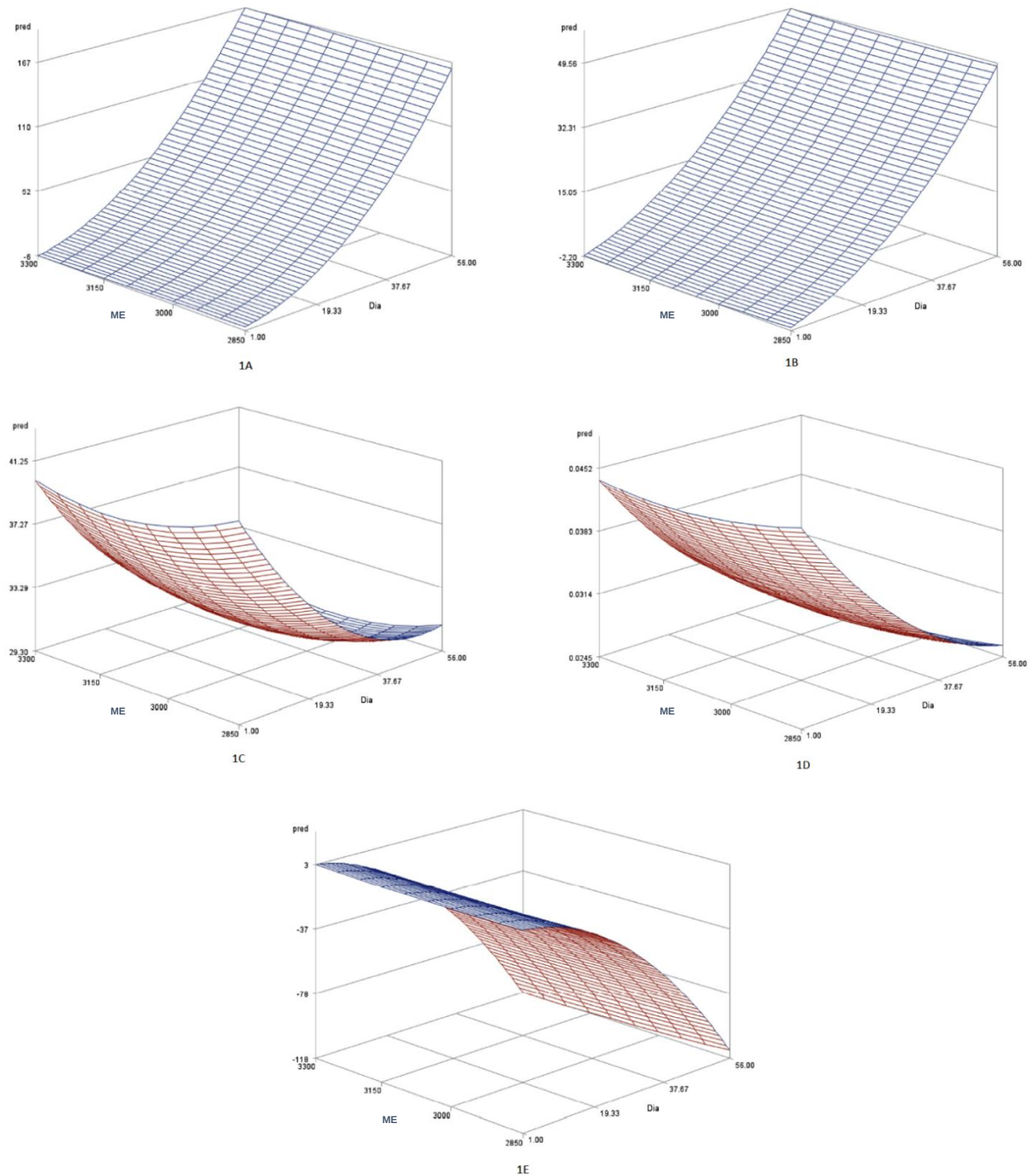
Table 2 – Regression equations' coefficients that describe the response surface models in function of the metabolizable energy and age and analysis of variance for male broiler chickens of the Cobb 500 line

Parameters	ER _{feed} (MJ)		ER _{carc} (MJ)		EUE (%)		EP (kg MJ ⁻¹)		NE (MJ)	
	Coefficients	Pr> t	Coefficients	Pr> t	Coefficients	Pr> t	Coefficients	Pr> t	Coefficients	Pr> t
Intercept	-68.148679	0.4292	91.778131	0.0847	297.242855	0.0005	0.287474	0,0004	159.065511	0.0649
ME	0.0448708	0.3847	-0.06017	0.082	-0.164658	0.0028	-0.000155	0,0033	-0.108583	0.0526
Age	-0.595008	0.0157	0.132852	0.3785	-0.555521	0.0206	-0.000764	0,001	0.727962	0.0031
ME*ME	-9.0670E-06	0.3191	9.5990E-06	0.0876	2.6312E-05	0.0033	2.4762E-08	0,0039	1.8619E-05	0.0408
ME*Age	3.5900E-04	<0.0001	5.2734E-05	0.2666	4.2724E-05	0.5686	4.9258E-08	0,4939	-3.0600E-04	<0.0001
Age*Age	0.044801	<0.0001	0.01104	<0.0001	0.0044319	<0.0001	0.000004745	<0,0001	-0.033762	<0.0001
R ²	0.9970		0.9869		0.4357		0.7595		0.9939	
CV (%)	4.35		8.68		9.22		9.25		6.22	
Analysis of Variance					Pr>F					
Linear	<0.0001		<0.0001		<0.0001		<0.0001		<0.0001	
Quadratic	<0.0001		<0.0001		<0.0001		<0.0001		<0.0001	
Crossproduct	<0.0001		0.2666		0.5686		0.4939		<0.0001	
Total Model	<0.0001		<0.0001		<0.0001		<0.0001		<0.0001	

Source: Data adapted from experiment for males Cobb 500, according to Cassiano (2018).

ME: metabolizable energy; ER_{feed}: energy retained in the feed; ER_{carc}: energy retained in the eviscerated carcass; EUE: energy use efficiency; EP: energy productivity; NE: liquid energy; R²: regression coefficient; CV: coefficient of variation.

Figure 1 – Response surface over the effect of metabolizable energy (ME) and days of life in broiler chickens for: energy retained by feeding (1A), energy retained in the carcass (1B), energy use efficiency (1C), energy productivity (1D), and net energy (1E)



Source: Data adapted from experiment for males Cobb 500, according to Cassiano (2018). Data adjusted by the PPFM spreadsheet.

According to the results obtained in the analysis of variance (Table 2) in function of the variables age and ME, it was ascertained that the mathematical models were highly significant ($p < 0.0001$) for all dependent variables studied. The values obtained as determination coefficient (R^2) have indicated that the results were well explained by the regressions, except for the energy use efficiency (EUE), since the percentage of variation explained by the regression was low 43.57% when compared with the others (Table 2), revealing that the adjusted model was not sufficient to explain all the observed results.

It is possible to observe that the energy input by feed (ER_{feed}) has varied with the level of metabolizable energy (ME) of the feed and increased with poultry age, following the accumulated consumption of feed, whose response surface (Figure 1A) was estimated by the model whose coefficients are presented in Table 2, reaching mean values that varied from 161.8 to 169.78 MJ/poultry at the end of the study period (56 days). The stationary point of this surface is the sealing point, that is, there is neither a maximum nor a minimum point that optimizes the energy input by feeding.

The energy input by feeding, for poultry slaughtered at 43 days of age, grew linearly with the elevation of the feed's ME ($ER_{feed} = 77.6886 + 0.0066 \cdot ME$; $R^2 = 0.8295$), with mean values that varied between 96.07 and 99.22 MJ/poultry (Table 3), however, without any reflex on the energy retained in the carcass ($P > 0.05$), whose means varied between 30.47 and 31.65 MJ/eviscerated carcass, as presented by Table 3.

Table 3 – Averages in function of the metabolizable energy variations for Cobb 500 male broiler chickens for slaughter at 43 days of age

ME (kcal kg ⁻¹)	ER _{feed} (MJ)	ER _{carc} (MJ)	EUE (%)	EP (kg MJ ⁻¹)	NE (MJ)
2850	96.07	31.65	32.81	0.0293	-64.83
3000	98.33	30.57	30.97	0.0278	-68.16
3150	98.85	30.47	30.67	0.0275	-68.78
3300	99.22	31.23	31.36	0.0280	-68.40
CV (%)	2.72	5.95	5.3	4.55	3.62
⁽¹⁾ Effect	L	ns	Q	Q	Q
R ²	0.8295	-	0.9942	0.9934	0.9856
Significance level (Test F)	P<0.05	P>0.10	P<0.10	P<0.05	P<0.10

Source: Data adapted from experiment for males Cobb 500, according to Cassiano (2018).

ME: metabolizable energy; ER_{feed}: energy retained in the feed; ER_{carc}: energy retained in the eviscerated carcass; EUE: energy use efficiency; EP: energy productivity; NE: liquid energy; R²: regression coefficient; CV: variation coefficient; ⁽¹⁾: ns: non significant; L: linear; Q: quadratic.

The energy retained in the carcass (ER_{carc}), as expected, increased with poultry age, since, ultimately, it is a function of the accumulated mass in the period mainly as protein and fat, however, the effect of the increasing levels of ME in the feed had little impact on the accumulation of energy in the product, as it is possible to verify on the response surface (Figure 1B), which represents the model whose coefficients are indicated in Table 2. At 56 days, on average, the energy retained in the carcass varied between 47.68 MJ/eviscerated carcass, regarding the poultry fed with 2850 kcal kg⁻¹, and 49.08 MJ/eviscerated carcass in poultry chicken fed with feed 3150 kcal kg⁻¹.

For Boekholt *et al.* (1994), the effects of low diet energy density is compensated by the increase of feed consumption, whereas the highest level of ME is related to a smaller ingestion (Aboulezz *et al.*, 2019). This statement was confirmed by Cassiano (2018), who described that broiler chickens are capable of regulating the consumption of feed according to the diet nutritional density, that is, there is a bigger consumption in diets with less energy density, and a smaller consumption of feed with high density. Thus, it is possible to justify the low impact of ME level on the accumulation of energy in the carcass.

As feeding represented the majority of the energy input (above 99.5% in the 56 day period) part, the increasing responses with the ME levels, depending on poultry age, resulted in variations in energy use efficiency (EUE), described by the regression whose coefficients are presented in Table 2 and represented by Figure 1C. The EUE reduced with poultry age, which can be explained by the worsening in the feed conversion. The stationary point obtained from this response surface was the minimum point, reached at 49 days of age and with a metabolizable energy level of 3089 kcal kg⁻¹.

Several authors have presented in their works low values for EUE, in the production of broiler chickens, which may be improved reducing inputs and/or increasing meat yield (output) through the utilization of parts such as feet, neck, skin, among others. As examples, there are: Heidari *et al.* (2011a), Nabavi-Pelesaeri *et al.* (2013), Amini *et al.* (2015), Amid *et al.* (2016), Kilic (2016) and Pishgar-Komleh *et al.* (2017).

Also as proposed by Angonese *et al.* (2006), an improvement to the feed conversion due to advancements in nutrition and genetic improvement will positively reflect on the energy indexes.

The production process of broiler chickens, particularly of eviscerated carcass without the feet, neck, and head is very inefficient from the standpoint of energy sustainability. In younger poultry, with up to 15 days, the EUE has situated around 37% (0.37), reducing to about 30% (0.30) in older poultry, aged between 43 and 56 days.

For poultry slaughter at 43 days of age the EUE variation in function of ME levels was described by a second-degree polynomial regression, as informed by Table 3, given by: $(EUE = 306.3074231 - 0.1761703 \cdot ME + 0.0000281 \cdot ME^2; R^2 = 0.9942)$. The estimate of the point of minimum efficiency in energy use corresponded to feeds with ME of 3135 kcal kg⁻¹ (very close to the tested value of 3150), resulting in an EUE of 30.2% (0.302).

Manure produced by broiler chicken farms have a high concentration of nitrogen and high concentration of minerals such as calcium, phosphorus, and potassium, and can be used for biogas (bioenergy) generation, that besides to enabling an environmentally correct destination to this by-product, can also reduce the consumption of non-renewable energy sources, such as fossil fuel, electric power, contributing to the increase the efficiency of the productive process from the standpoint of sustainability (Kilic, 2016). This observation agrees with what Amid *et al.* (2016) expounded over the increase of energy use efficiency, given that the reduction in energy use will reflect in the improvement of the EUE, as described by Amini *et al.* (2015).

Thus, poultry litter, a residue with high energy potential, on being processed (anaerobic biodigestion), will provide this energy as biogas, which, if used inside the shed itself in equipment adapted for its usage, will contribute to an energy equilibrium in the operation (Santos & Lucas Júnior, 2004). So, the utilization of the residues will provide bigger sustainability in terms of energy and environmental efficiency (Angonese *et al.*, 2006).

As illustrated in Figure 1D, the model described in Table 2, energy productivity (EP) has significantly reduced with poultry aging and has varied with the levels of

ME. The optimal point of this response surface was the minimal point, which corresponds to the level of metabolizable energy of 3072 kcal kg⁻¹. EP has decreased about 39.5% in a 56 days period from mean values of 0.040 to 0.024 kg MJ⁻¹, also resulting from the worsening in the feed conversion in older poultry.

Feed conversion is favoured by the increase of the feed's ME, because of the weight gain and the reduction of feed consumption as mentioned by Ferreira *et al.* (2015), which corroborates what Araujo *et al.* (2011) reported, noting that a slight increase in the ME, followed by the increase of broiler chickens age at the time of slaughter, contributes to feed conversion optimization. Hence, based on the response surface of the EP, at the rate that a reduction in the energy level of the feed occurred there was a worsening in the EP indexes, fact observed as the poultry aged, all this in function of the worsening in the feed conversion, as previously described.

For the slaughter of broiler chickens at 43 days of age, each MJ of energy provided in the process was used to produce, on average, between 27.5 and 29.3g of product (eviscerated carcass, without feet, neck, and head), as observed in Table 3. The EP variation with the ME levels is estimated by: $(EP = 0.21652 - 1.1993 \times 10^{-4} \times ME + 1.9034 \times 10^{-8} \times ME^2; R^2 = 0.9938)$, whose minimum value, 0.0276 kg MJ⁻¹, was calculated for the feed with ME equivalent to 3151 kcal kg⁻¹.

This result proves the low energy yield of the product in relation to the energy invested to produce it, confirmed by previous studies, in which the values obtained through the energy analysis of the productive system of broiler chickens revealed 0.02 kg MJ⁻¹ according to Amid *et al.* (2016) and Amini *et al.* (2015), in its turn the value 0.01 kg MJ⁻¹, it was found by Heidari *et al.* (2011a) and Nabavi-Pelesaraei *et al.* (2013), while Kilic (2016) observed the biggest energy productivity for broiler chicken farms with values around 0.30 kg MJ⁻¹.

At production process of broiler chicken, have considered as product only the eviscerated carcass (without feet, neck, and head), had negative energy balance, which was accentuated with the age of slaughter of the poultry and varied in function of the levels of ME based on the regression model presented in Table 2 and that originated the response surface presented on Figure 1E. It was not possible to define a minimum or maximum point, establishing, in this case, a sealing point.

The averages of net energy (NE), for slaughter age at 43 days, in function of the ME levels, are presented in Table 3 and its variation can be described by the second-order polynomial regression ($NE = 345.436268 - 0.261815 \cdot ME + 0.000041 \cdot ME^2$; $R^2 = 0.9855$), which has enabled estimating that the minimum value of net energy, -72,53 MJ per poultry, occurs for feeds with ME of 3193 kcal kg⁻¹.

The calculation of net energy demonstrated the energy performance of the productive system, which is characterized by the great energy demand of the inputs and by the low amount of energy present in the carcass in relation to the energy invested for its production, revealing the waste of a considerable amount of energy in the form of residues, for instance, in poultry litter, or by the parts like neck, feet and head, which are underused.

In relation to the analysis of the ER_{carc} variations in function of age made by the PPFM, through the use of the growth function Richards (1959), for the adjustment of data whose coefficients are presented in Table 4, it was observed that this adjustment for the 56 day period occurred only for the treatments with ME 2850 and 3300 kcal kg⁻¹. The adjusted curve for these treatments (ME 2850 and 3300 kcal kg⁻¹) has exceeded the F_i point, reaching another critical point of the curve, point F_2 , which marks the end of the linear phase and start of the exponential decrease phase (Figures 2A and 2B), respectively. In turn, the curve obtained for the ME 3000 and 3150 kcal kg⁻¹ treatments did not reach point F_i , which sets the moment of inflexion in the curve, that is, where it changes from an ascending trajectory to a descending trajectory. It was observed that the birds which received these treatments the absence of the peak of useful work performed, that represents the peak of the growth process, for the analysed period (Figures 3A and 3B, respectively), contrary to the poultry that received feeds containing ME 2850 and 3300 kcal kg⁻¹, which presented the peak of the growth (Figures 3C and 3D, respectively).

Thus, the graph representation of kinetic energy versus time has allowed us to infer that the poultry fed with feed with energy density from 2850 and 3300 kcal kg⁻¹ have lost the ability to express all their genetic potential. However, the birds that received diet containing ME 3000 and 3150 kcal kg⁻¹, according to the graph represented by Figures 3A and 3B, presented until the analyzed period, all the

potential for growth, because they haven't already reached the peak of energy investment.

Table 4 – Parameters of the Richards function that describe the model adjustment in function of metabolizable energy variations of feed and of age for Cobb 500 male broiler chickens

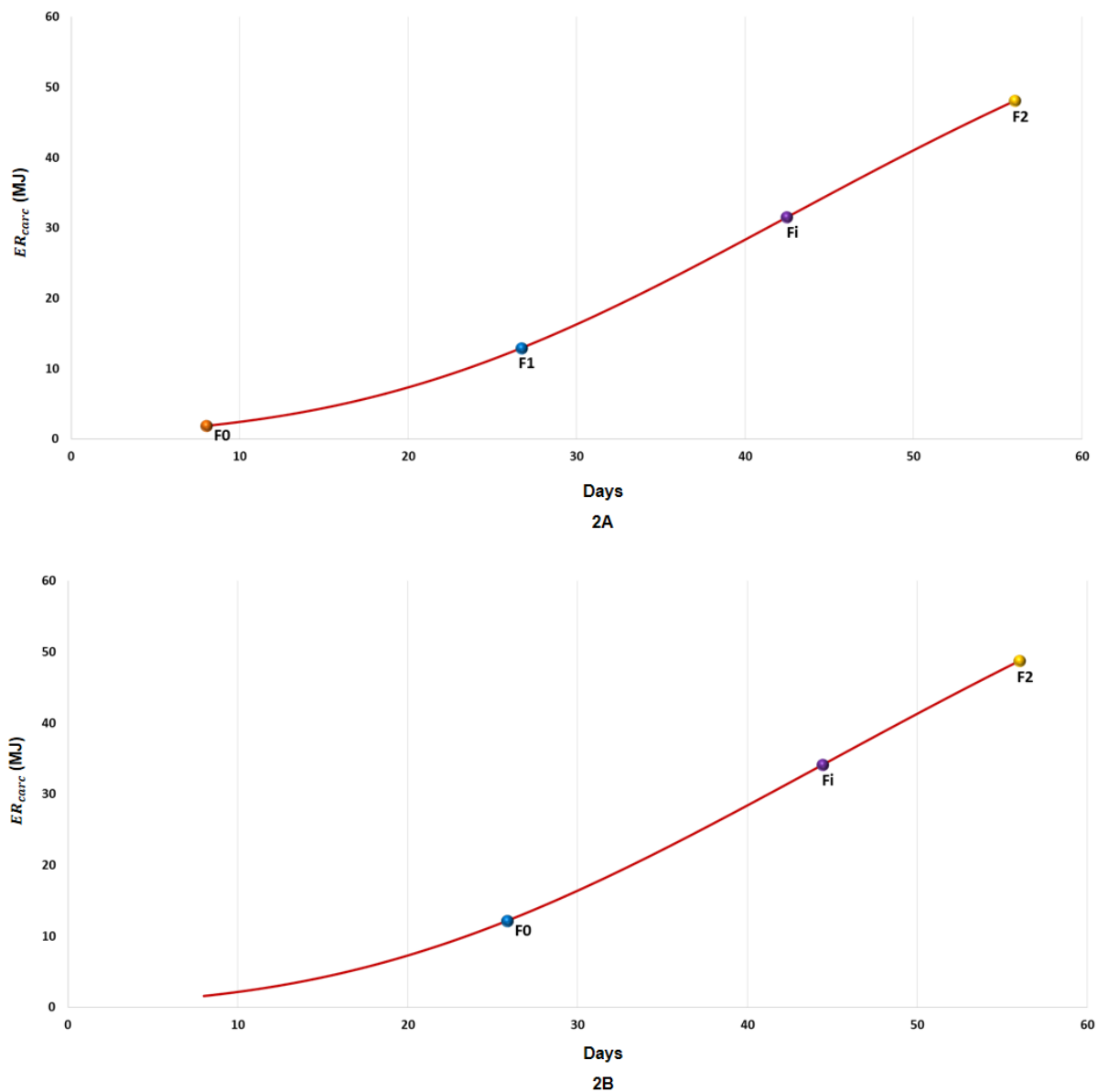
Metabolizable energy (kcal kg ⁻¹)	Parameters				R ² _{adj}
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	
2850	79.8814	1.15463	0.04715	42.4806	99.2287
3000	257.9405	0.55279	0.01109	71.6622	97.9853
3150	271.7526	0.58480	0.01164	73.4947	98.9623
3300	94.3980	0.96576	0.03673	44.4161	99.1218

Source: Data adapted from experiment for males Cobb 500, according to Cassiano (2018).

Model: $y = a [1 + (b - 1)e^{-c(x-d)}]^{1/(1-b)}$; *a*: the upper asymptote (mature); *b*: shape parameter; *c*: the maximum relative growth; *d*: the age at maximum rate of growth.; R²_{adj}: adjusted variation coefficient.

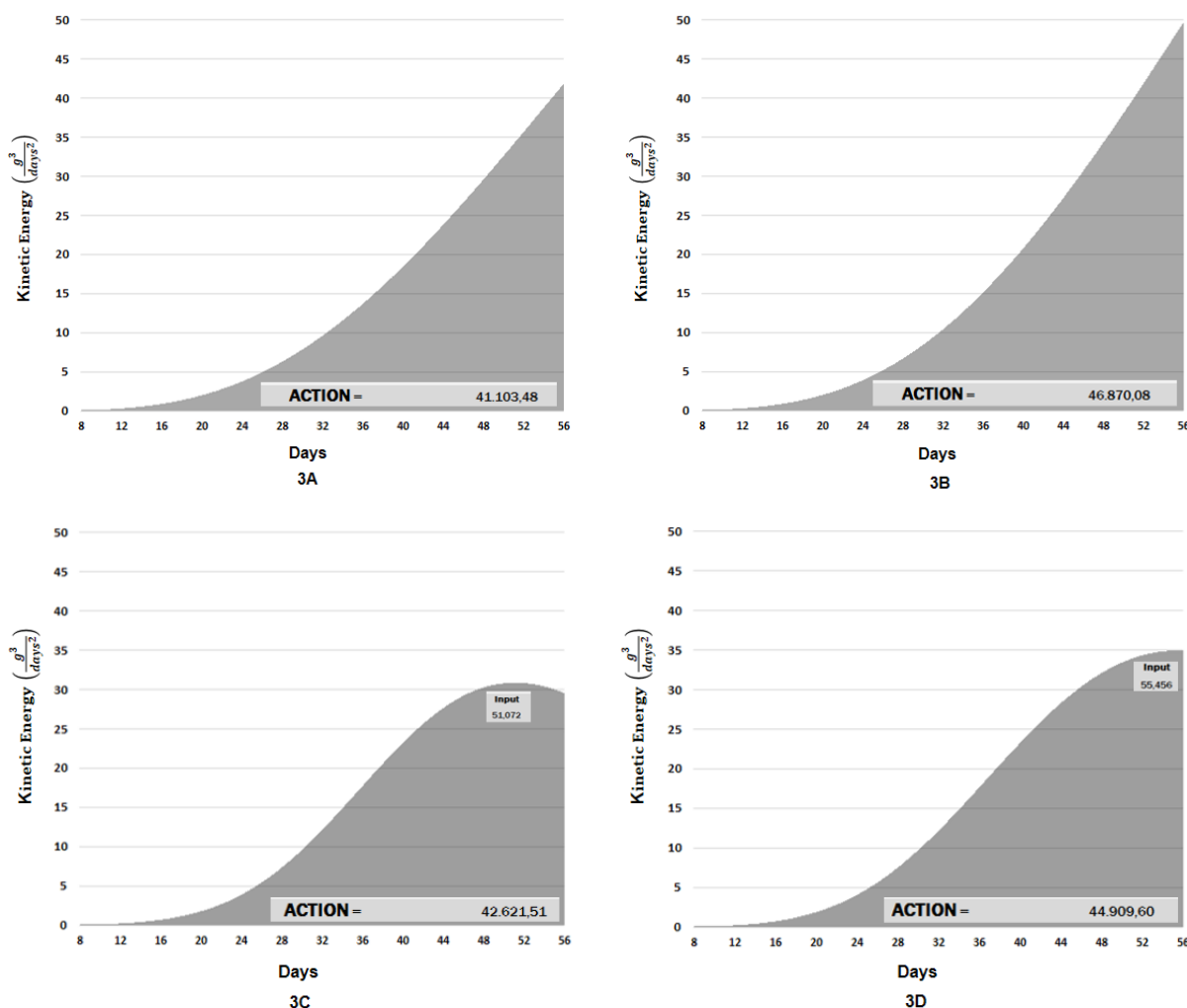
In light of this finding, we can infer that PPFM, an innovative and useful tool for studying growth curves which approximates the mathematical model to the reality of the biological process through the physical theories represented by the ontogenetic growth force and process energy assessment, has shown to be enough to signal that a 3150 kcal kg⁻¹ ME was the most favourable for the input of energy in the carcass until the studied period, according to the values obtained by action calculation (Figura 3B), despite the fact that the program was not efficient in determining the peak of energy investment and, consequently, the growth peak, judging by the short study period, harming, thus, the discussion in the biological context.

Figure 2 – Curves adjusted for energy retained in the carcass, in function of age, for male broiler chickens, according to treatments



Source: Data adapted from experiment for males Cobb 500, according to Cassiano (2018). Data adjusted by the PPFM spreadsheet. F_0 : represents the start of the exponential increase phase, start of growth; F_1 : marks the start of the linear phase and the end of the exponential increase; F_i : represents the inflection point; F_2 : symbolizes the end of the linear phase and the start of the exponential decrease; 2A and 2B: curves adjusted for energy retained in the carcass for treatments with metabolizable energy of 2850 and 3300 kcal kg⁻¹, respectively.

Figure 3 – Graphic representation of the energy assessment for broiler chickens fed with feed of different energy densities, according to the PPFM



Source: Data adapted from experiment for males Cobb 500, according to Cassiano (2018). Data adjusted by the PPFM spreadsheet. Level of metabolizable energy: 3000(3A), 3150(3B), 2850(3C) e 3300(3D) kcal kg⁻¹.

3.6 Conclusion

The values of energy efficiency indexes of 30%, 0.024 kg MJ⁻¹, and -72.53 MJ for energy use efficiency, energy productivity, and liquid energy, respectively, found show that the analyzed broiler chicken productive system has low energy efficiency. Therefore, measures are necessary in order to improve the energy indexes as, for example, using diets that meet the energy needs avoiding energy waste, due to feed being the input that most demands energy.

3.7 Acknowledgments

To the Coordination for the Improvement of Higher Education (CAPES) for the doctoral scholarship granted to the first author of the article.

3.8 References

Aboulezz KFM, Wang Y, Wang W, Lin X, Li L, Gou Z, Fan Q, Jiang S. Impacts of graded levels of metabolizable energy on growth performance and carcass characteristics of slow-growing yellow-feathered male chickens. *Animals* 2019; 9(7): 461.

ABPA – Associação Brasileira de Proteína Animal. Relatório anual 2020, 2020 [cited 2020 Sept. 21]. Available from: <http://abpa-br.org/wp-content/uploads/2020/05/abpa_relatorio_anual_2020_portugues_web.pdf>.

Amid S, Mesri-Gundoshmian T, Rafiee S, Shahgoli G. Energy and economic analysis of broiler production under different farm sizes. *Agriculture* 2015; 78: 29688-29693.

Amid S, Mesri-Gundoshmian T. Prediction of output energy based on different energy inputs on broiler production using application of adaptive neural-fuzzy inference system. *Agriculture Science Developments* 2016; 5(2): 14-21.

Amid S, Mesri-Gundoshmian T, Shahgoli G, Rafiee S. Energy use pattern and optimization of energy required for broiler production using data envelopment analysis. *Information Processing in Agriculture* 2016; 3(2): 83-91.

Amini S, Kazemi N, Marzban A. Evaluation of energy consumption and economic analysis for traditional and modern farms of broiler production. *Biological Forum. An International Journal* 2015; 7(1): 905-911.

Angonese AR, Campos AT, Zacarkim CE, Matsuo MS, Cunha F. Eficiência energética de sistema de produção de suínos com tratamento dos resíduos em biodigestor. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 2006; 10(3): 745-750.

Araujo RB, Faria DE, Faria Filho DE, Lima CG, Trevisan RB, Souza KMR, Sakamoto MI, Souza VN. Modelos de superfície de resposta para predição do desempenho de

frangos e elaboração de análise econômica. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal* 2011; 12(3): 770-783.

Atilgan A; Koknaroglu H. Cultural energy analysis on broilers reared in different capacity poultry houses. *Italian Journal of Animal Science* 2006; 5(4): 393-400.

Boekholt HA, Van der Griten PH, Schreurs VVAM, Los MJN, Leffering CP. Effect of dietary energy restriction on retention of protein, fat and energy in broiler chickens. *British Poultry Science* 1994; 35(4): 603-614.

Cassiano RP. Otimização de modelos não lineares na nutrição de precisão para frangos de corte. [Dissertation]. Ilha Solteira (SP): Universidade Estadual Paulista; 2018.

Esengun K, Erdal G, Gündüz O, Erdal H. An economic analysis and energy use in stake-tomato production in Tokat province of Turkey. *Renewable Energy* 2007; 32(11): 1873-1881.

Fan HP, Xie M, Wang WW, Hou SS, Huang W. Effects of dietary energy on growth performance and carcass quality of White growing Pekin Ducks from two to six weeks of age. *Poultry Science* 2008; 87(6): 1162-1164.

Ferreira GS, Pinto MF, Garcia Neto M, Ponsano EHG, Gonçalves CA, Bossolani ILC, Pereira AG. Ajuste preciso do nível de energia na dieta de frangos de corte para controle do desempenho e da composição lipídica da carne. *Ciência Rural* 2015; 45(1): 104-110.

France J, Dhanoa MS, Cammel SB, Gill M, Beever DE, Thornley JHM. On the use of response functions in energy balance analysis. *Journal of Theoretical Biology* 1989; 140(1): 83-99.

Garcia Neto M. Programa Prático para Formulação e Otimização de Ração - frangos de corte. Programação não linear PPFR; 2018 [cited 2021 Jan. 07]. Available from: <<https://sites.google.com/site/ppfrprogramforfeedformulation/>>.

Garcia Neto M, Kebreab E, Faria Junior MJA. PPFM: Practical Program for Forces Modeling (2020) [cited 2020 July 08]. Available from: <<http://sites.google.com/view/ppfm-spreadsheet/>>.

Heidari MD, Omid M, Akram A. Energy efficiency and econometric analysis of broiler production farms. *Energy* 2011a; 36(11): 6536-6541.

Heidari MD, Omid M, Akram A. Optimization of energy consumption of broiler production farms using data envelopment analysis approach. *Modern Applied Science* 2011b; 5(3): 69-78.

Heitschmidt RK, Short RE, Grings EE. Ecosystems, sustainability, and animal agriculture. *Journal of Animal Science* 1996; 74(6): 1395-1405.

Kilic I. Analysis of the energy efficiency of poultry houses in the Bursa region of turkey. *Journal of Applied Animal Research* 2016; 44(1): 165-172.

Larbier M, Leclercq B. Energy metabolism. In: Wiseman J, editor. *Nutrition and Feeding of Poultry*. Nottingham: Nottingham University Press; 1992. p. 47-73.

Nabavi-Pelesaraei A, Fallah A, Hematian A. Relation between energy inputs and yield of broiler production in Guilan province of Iran. In: *The Second International Conference on Agriculture and Natural Resources*; 2013; Kermanshah, Iran. p. 109-117.

Ortiz-Cañavate J; Hernanz JL. Energy for Biological Systems. In: Kitani O, editor. *Energy and Biomass engineering*. EUA: CIGR – The International Commission of Agricultural Engineering; 1999. p. 13-138.

Perreault N, Leeson S. Age-related carcass composition changes in male broiler chickens. *Canadian Journal of Animal Science* 1992; 72(4): 919-929.

Pishgar-Komleh SH, Akram A, Keyhani A, Vanzelm R. Life cycle energy use, costs, and greenhouse gas emission of broiler farms in different production systems in Iran – a case study of Alborz province. *Environmental Science and Pollution Research* 2017; 24(19): 16041-16049.

Quesada GM, Pereira Filho OP, Beber JAC, Neumann PS. Energia, organização social e tecnologia. *Ciência & Ambiente* 1991; 2(2): 13-29.

Richards FJ. A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany* 1959; 10(29): 290-300.

Rodrigues MI, Iemma AF. Planejamento de experimentos e otimização de processos. 2ed. Campinas, SP/ Cárita Editora; 2009.

Rostagno HS, Albino LFT, Hannas MI, Donzele JL, Sakomura NK, Perazzo FG, Saraiva A, Teixeira ML, Rodrigues PB, Oliveira RF, Barreto SLT, Brito CO. Tabelas Brasileiras para Aves e Suínos: Composição de Alimentos e Exigências Nutricionais. 4 ed. Viçosa; MG/Universidade Federal de Viçosa; 2017.

Salehi M, Ebrahimi R, Maleki A, Mobtaker HG. An assessment of energy modeling and input costs for greenhouse button mushroom production in Iran. *Journal of Cleaner Production* 2014; 64: 377-383.

Santos TMB, Lucas Júnior J. Balanço energético em galpão de frangos de corte. *Engenharia Agrícola* 2004; 24(1): 25-36.

Sefeedpari P, Rafiee S, Akram A. Modeling of energy output in poultry for egg production farms using artificial neural networks. *Journal of Animal Production Advances* 2012a; 2(5): 247-253.

Sefeedpari P, Rafiee S, Akram A. Selecting energy efficient poultry egg producers: a fuzzy data envelopment analysis approach. *International Journal of Applied Operational Research* 2012b; 2(2): 77-88.

Sefeedpari P, Rafiee S, Akram A. Identifying sustainable and efficient poultry farms in the light of energy use efficiency: a data envelopment analysis approach. *Journal of Agricultural Engineering and Biotechnology* 2013; 1(1): 1-8.

Statistical Analysis System: SAS. Version 9.2. Cary: SAS Institute, Inc.; 2009.

Van der Klis JD, Kwakernaak C, Jansman A, Blok M. Energy in poultry diets: adjusted AME or net energy. In: Doppenberg J, Van der Aar P editors. *Dynamics in animal nutrition*. The Netherlands: Wageningen Academic Publishers; 2010. p. 127-133.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

1) O Programa Prático de Modelagem de Forças oferece uma nova percepção sobre a interpretação do tempo e energia investidos ao longo do processo de crescimento, apresentando-se como uma ferramenta útil na determinação dos pontos críticos e o que esses pontos representam para a interpretação de todo o processo de expansão através das diferentes fases ao longo da curva de crescimento, além de medir a conversão de energia na forma de trabalho útil através do princípio da ação, um desdobramento da avaliação da energia cinética do processo, permitindo uma nova estratégia ao aproximar o modelo matemático da realidade do crescimento, descrevendo o processo biológico por meio de teorias físicas, de forma clara e prática, contribuindo para a implementação da dinâmica do crescimento;

2) O sistema produtivo de frangos de corte (carcaça eviscerada) possui baixa eficiência energética. Dessa forma, a adoção de medidas com a finalidade de aprimorar os índices energéticos (eficiência no uso de energia, produtividade energética e energia líquida) se faz necessária, tais como: empregar níveis energéticos adequados na dieta, a fim de atender às necessidades das aves evitando-se o desperdício e garantindo melhores índices de conversão alimentar, uma vez que a ração é o insumo que mais demanda energia, e/ou melhorar o rendimento de carne através do aproveitamento de partes como pescoço, cabeça e pés, as quais são subaproveitadas.

5 CONCLUSÃO

O emprego de instrumentos que garantam ao produtor a obtenção de melhores índices produtivos é de fundamental importância, pois a produção de carcaças evisceradas de frangos de corte é bastante ineficiente sob a ótica da sustentabilidade energética. Neste contexto, através da análise energética do processo produtivo é possível quantificar o retorno energético do produto, bem como mensurar a energia investida para a sua produção, por meio da utilização dos indicadores de eficiência energética, que neste estudo apresentaram valores de 30%, 0,024 kg MJ⁻¹ e -72,53 MJ, para eficiência no uso de energia, produtividade energética e energia líquida, respectivamente. A ração com 3150 kcal kg⁻¹ é a dieta mais favorável ao aporte de energia na carcaça, de acordo com o PPFM, em função da idade das aves, segundo os diferentes níveis de energia metabolizável da ração. Logo, a adoção das ferramentas análise energética e PPFM contribuem, concomitantemente, para a maximização da eficiência energética e a minimização dos gastos, principalmente aqueles relacionados à ração, garantindo dessa forma a sustentabilidade energética da atividade produtiva frente ao mercado mundial competitivo.

APÊNDICE A – Referências da Introdução Geral

ABIEC. Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes. **Beef Report – Perfil da Pecuária no Brasil 2020**. Relatório Anual. 2020. Disponível em: <<http://abiec.com.br/publicacoes/beef-report-2020/>>. Acesso em: 20 set. 2020.

ABPA. Associação Brasileira de Proteína Animal. **Relatório Anual**. 2020. Disponível em: <https://abpa-br.org/wp-content/uploads/2020/05/abpa_relatorio_anual_2020_portugues_web.pdf>. Acesso em: 21 set. 2020.

AFONSO, V. A. C.; QUIRINO, C. R.; COSTA, R. L. D.; SILVA, R. M. C. Aplicação de modelos não-lineares no ajuste de curvas de crescimento em fêmeas ovinas (*Ovis áries*) da raça Santa Inês criadas na região norte Fluminense/RJ. **B. Industr. Anim.**, v. 66, n. 2, p. 115-120, fev. 2009. Disponível em: <<http://www.iz.sp.gov.br/bia/index.php/bia/article/view/1097>>. Acesso em: 15 set. 2020.

AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. **IEEE Trans. Autom. Control**, v. 19, n. 6, p. 716-723, Dec. 1974. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1100705>>. Acesso em: 14 nov. 2020.

AMARAL, F. F.; ALMEIDA, F. A.; COSTA, S. C.; LEME, R. C.; PAIVA, A. P. Aplicação da metodologia de superfície de resposta para otimização do processo de solda a ponto no aço galvanizado AISI 1006. **Soldag. Insp.**, v. 23, n. 2, p. 129-142, abr./jun. 2018.

AMID, S.; MESRI-GUNDOSHMIAN, T.; RAFIEE, S.; SHAHGOLI, G. Energy and economic analysis of broiler production under different farm sizes. **Elixir Agric.**, v. 78, p. 29688-29693, Jan. 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/270576245_Energy_and_economic_analysis_of_broiler_production_under_different_farm_sizes>. Acesso em: 30 nov. 2020.

AMID, S.; MESRI-GUNDOSHMIAN, T. Prediction of output energy based on different energy inputs on broiler production using application of adaptive neural-fuzzy inference system. **Agric. Sci. Dev.**, v. 5, n. 2, p. 14-21, June 2016.

AMID, S.; MESRI-GUNDOSHMIAN, T.; SHAHGOLI, G.; RAFIEE, S. Energy use pattern and optimization of energy required for broiler production using data envelopments analysis. **Inf. Process. Agric.**, v. 3, n. 2, p. 83-91, June 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.03.003>>. Acesso em: 14 set. 2018.

AMINI, S.; KAZEMI, N.; MARZBAN, A. Evaluation of energy consumption and economic analysis for traditional and modern farms of broiler production. **Biol. Forum. Int. J.**, v. 7, n. 1, p. 905-911, Jan. 2015.

ATILGAN, A.; KOKNAROGLU, H. Cultural energy analysis on broilers reared in different capacity poultry houses. **Ital. J. Anim. Sci.**, v. 5, n. 4, p. 393-400, Mar. 2006. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.4081/ijas.2006.393>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

BALDWIN, R. L. **Modeling Ruminant Digestion and Metabolism**. 1 ed. Netherlands: Springer Science & Business Media, 1995. 578p.

BARROZO, S. **Modelos matemáticos no contexto da COVID-19: uma abordagem didática**. Araraquara: Centro de Ciências de Araraquara, [2020]. Disponível em: <cca.iq.unesp.br/arquivos/Artigo-modelagem-matematica.pdf>. Acesso em: 07 fev. 2021.

BAŞ, D.; BOYACI, I. H. Modeling and optimization I: Usability of response surface methodology. **J. Food Eng.**, v. 78, n. 3, p. 836-845, Feb. 2007.

BEZERRA, M. A.; SANTELLI, R. E.; OLIVEIRA, E. P.; VILLAR, L. S.; ESCALEIRA, L. A. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. **Talanta**, v. 76, n. 5, p. 965-977, Sept. 2008.

BLACK, J. L. Brief history and future of animal simulation models for science and application. **Anim. Prod. Sci.**, v. 54, n. 12, p. 1883-1895, Sept. 2014.

BOX, G. E.P.; WILSON, K. B. On the experimental attainment of optimum conditions. **J. R. Stat. Soc.**, v. 13, n. 1, p. 1-45, Jan. 1951. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/2983966>>. Acesso em 10 fev. 2021.

BOX, G. E. P. The exploration and exploitation of response surfaces: Some general considerations and examples. **Biometrics**, v. 10, n.1, p. 16-60, Mar. 1954. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/3001663>>. Acesso em: 10 fev. 2021.

BOX, G. E. P., YOULE, P. V. The exploration and exploitation of response surfaces: An example of the link between the fitted surface and the mechanism of the system. **Biometrics**, v. 11, n. 3, p. 287-323, Sept. 1955. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/3001769>>. Acesso em: 10 fev. 2021.

BRADLEY, N. **The response surface methodology**. 2007. 73f. Dissertation (Master of Science – Applied Mathematics & Computer Science) – Indiana University South Bend, South Bend, 2007.

BRASIL. Lei nº 11.794, de 8 de outubro de 2008. Regulamenta o inciso VII do parágrafo 1º do artigo 225 da Constituição Federal, estabelecendo procedimentos para o uso científico de animais; revoga a Lei nº 6.638, de 8 de maio de 1979; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 9 out. 2008 Seção 1.

BRASIL. Ministério da ciência, tecnologia, inovações e comunicações. Resolução normativa CONCEA nº 17, de 3 de julho de 2014. Dispõe sobre o reconhecimento de métodos alternativos ao uso de animais em atividades de pesquisa no Brasil e dá outras providências. **Normativas do CONCEA**, Brasília, 26 set. 2016.

BURNHAM, K. P.; ANDERSON, D. R. Multimodel inference: Understanding AIC and BIC in model selection. **Sociol. Methods Res.**, v. 33, n. 2, p. 261-304, Nov. 2004.

CAETANO, V. C.; FARIA, D. E.; CANIATTO, A. R. M.; FARIA FILHO, D. E.; NAKAGI, V. S. Desempenho e rendimento de carcaça em frangos de corte de um a 46 dias alimentados com dietas contendo diferentes níveis de valina e reduzido teor proteico. **Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.**, v. 67, n. 6, p. 1721-1728, nov./dez. 2015.

CAMPOS, A. T.; SAGLIETTI, J. R. C.; CAMPOS, A. T.; BUENO, O. C.; RESENDE, H.; GASPARINO, E.; KLOSOWSKI, E. S. Custo energético de construção de uma instalação para armazenagem de feno. **Ciênc. Rural**, v. 33, n. 4, p. 667-672, jul./ago. 2003.

CAMPOS, A. T.; SAGLIETTI, J. R. C.; CAMPOS, A. T.; BUENO, O. C. Análise energética na produção de feno de *Cynodon dactylon* (L.) Pers. **Eng. Agr.**, v. 25, n. 2, p. 349-358, maio/ago. 2005.

CANAKCI, M.; AKINCI, I. Energy use pattern analyses of greenhouse vegetable production. **Energy**, v. 31, n. 8-9, p. 1243-1256, July 2006.

CEPEA. Competitividade da carne de frango é recorde em 2020. **Diárias de Mercado**. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/diarias-de-mercado/-5.aspx>>. Acesso em: 05 jan. 2021.

DAMASCENO, F. A.; YANAGI JUNIOR, T.; LIMA, R. R.; GOMES, R. C. C.; MORAES, S. R. P. Avaliação do bem-estar de frangos de corte em dois galpões comerciais climatizados. **Ciênc. Agrotec.**, v. 34, n. 4, p. 1031-1038, jul./ago. 2010.

DARMANI KUHI, H.; PORTER, T.; LÓPEZ, S.; KEBREAB, E.; STRATHE, A. B.; DUMAS, A.; DIJKSTRA, J.; FRANCE, J. A review of mathematical functions for the analysis of growth in poultry. **World's Poult. Sci. J.**, v. 66, n. 2, p. 227-240, June 2010.

DEMUNER, L. F., SUCKEVERIS, D.; MUÑOZ, J. A.; CAETANO, V. C.; LIMA, C. G.; FARIA FILHO, D. E.; FARIA, D. E. Adjustment of growth models in broiler chickens. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 52, n. 12, p. 1241-1252, Dec. 2017.

DIAS, A. **Seleção multivariada e identidade de modelos não lineares para o crescimento e acúmulo de nutrientes em frutos de mangueira**. 2014. 138 f. Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação Agropecuária) – Universidade Federal de Lavras, 2014.

DUMAS, A.; DIJKSTRA, J.; FRANCE, J. Mathematical modelling in animal nutrition: a centenary review. **J. Agric. Sci.**, v. 146, n. 2, p. 123-142, Apr. 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1017/S0021859608007703>>. Acesso em: 13 nov. 2020.

EBRAHIMI, S.; MESRI GUNDOSHMIAN, T.; ABDI, R.; JADIDI, M. R. Energy efficiency improvement for broiler production using non-parametric techniques. **Agri. Eng. Int.: CIGR J.**, v. 18, n. 2, p. 121-132, June 2016.

EMILIANO, P. C. **Crítérios de informação: como eles se comportam em diferentes modelos**. 2013. 193f. Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação Agropecuária) – Universidade Federal de Lavras, 2013.

ENERGIA. In: Michaelis, **Dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa**. São Paulo: Melhoramentos, 2020. Disponível em: <<https://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/energia/>>. Acesso em: 05 dez. 2020.

FITZHUGH JR H. A. Analysis of growth curves and strategies for altering their shape. **J. Anim. Sci.**, v. 42, n. 4, p. 1036-1051, Apr. 1976. Disponível em: <<http://jas.fass.org/content/42/4/1036>>. Acesso em: 06 ago. 2020.

FREITAS, A. R. Curvas de crescimento na produção animal. **R. Bras. Zootec.**, v. 34, n. 3, p. 786-795, maio/jun. 2005.

GARCIA NETO, M.; KEBREAB, E.; FARIA JUNIOR, M. J. A. **PPFM: Practical Program for Forces Modeling**. [2020]. Disponível em: <<http://sites.google.com/view/ppfm-spreadsheet>>. Acesso em: 08 jul. 2020.

GOUS, R. M.; MORAN JR, E. T.; STILBORN, H. R.; BRADFORD, G. D.; EMMANS, G. C. Evaluation of the parameters needed to describe the overall growth, the chemical growth, and the growth of feathers and breast muscles of broilers. **Poult. Sci.**, v. 78, n. 2, p. 812-821, June 1999.

GUIMARÃES, V. P.; RODRIGUES, M. T.; SARMENTO, J. L. R.; ROCHA, D. T. Utilização de funções matemáticas no estudo da curva de lactação em caprinos. **R. Bras. Zootec.**, v. 35, n. 2, p. 535-543, mar./abr. 2006.

HARLOW, H. B.; IVEY, F. J. Accuracy, precision, and commercial benefits of growth modelling for broilers. **J. Appl. Poult. Res.**, v.3, n.4, p. 391-402, Dec. 1994.

HATIRLI, S. A.; OZKAN, B.; FERT, C. An econometric analysis of energy input-output in Turkish agriculture. **Renew. Sust. Energ. Rev.**, v. 9, n. 6, p. 608-623, Dec. 2005.

HEIDARI, M. D.; OMID, M.; AKRAM, A. Optimization of energy consumption of broiler production farms using data envelopment analysis approach. **Mod. Appl. Sci.**, v. 5, n. 3, p. 69-78, June 2011a.

HEIDARI, M. D.; OMID, M.; AKRAM, A. Energy efficiency and econometric analysis of broiler production farms. **Energy**, v. 36, n. 11, p. 6536-6541, Nov. 2011b.

HEITSCHMIDT, R. K.; SHORT, R. E.; GRINGS, E. E. Ecosystems, sustainability, and animal agriculture. **J. Anim. Sci.**, v. 74, n. 6, p. 1395-1405, June 1996. Disponível em: <<https://doi.org/10.2527/1996.7461395x>>. Acesso em: 06 dez. 2020.

HETZ, E. J. Energy utilization in Chilean agriculture. **Agric. Mech. Asia Africa Latin America**, v. 23, n. 2, p. 52-56, 1992.

KEMMER, G.; KELLER, S. Nonlinear least-squares data fitting in Excel spreadsheets. **Nat. Protoc.**, v. 5, n. 2, p. 267-281, Jan. 2010.

KILIC, I. Analysis of the energy efficiency of poultry houses in the Bursa region of Turkey. **J. Appl. Anim. Res.**, v. 44, n. 1, p. 165-172, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/09712119.2015.1021813>>. Acesso em: 06 mar. 2019.

MARCATO, S. M. **Características do crescimento corporal dos órgãos e tecidos de duas linhagens comerciais de frangos de corte**. 2007. 183 f. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2008.

MARCATO, S. M.; SAKOMURA, N. K.; MUNARI, D. P.; FERNANDES, J. B. K.; KAWAUCHI, I. M.; BONATO, M. A. Growth and body nutrient deposition of two broiler commercial genetic lines. **Braz. J. Poult. Sci.**, v. 10, n. 2, p. 117-123, Apr./June 2008.

MARCATO, S. M.; SAKOMURA, N. K.; FERNANDES, J. B. K.; SIQUEIRA, J. C.; DOURADO, L. R. B.; FREITAS, E. R. Crescimento e deposição de nutrientes nos órgãos de frangos de corte de duas linhagens comerciais. **R. Bras. Zootec.**, v. 39, n. 5, p. 1082-1091, maio 2010.

MARTINS, F. G. L.; BARBOSA, J. A.; CARVALHO, R. C. S.; VELOSO, A. V.; MARIN, D. B. Análise energética da produção de milho para silagem cultivado em diferentes espaçamentos. **Energ. Agric.**, v. 30, n. 4, p.418-428, out./dez. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2015v30n4p418-428>>. Acesso em: 30 set. 2020.

MCMANUS, C.; EVANGELISTA, C.; FERNANDES, L. A. C.; MIRANDA, R. M.; MORENO-BERNAL, F. E.; SANTOS, N. R. Curvas de crescimento de ovinos Bergamácia criados no Distrito Federal. **R. Bras. Zootec.**, v. 32, n. 5, p. 1207-1212, set./out. 2003.

MELLO, R.; MAGALHÃES, A. L. R.; BREDA, F. C., REGAZZI, A. J. Modelos para ajuste da produção de gases em silagens de girassol e milho. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 43, n. 2, p. 261-269, fev. 2008.

MENDES, P. N.; JERÔNIMO, G. C. C.; TURCI, L. F. R; PAMPLIN, P.A.Z. Modelagem otimizada de indicadores biológicos de qualidade da água. **Revista DAE**, v. 68, n. 221, p. 131-141, jan./mar. 2020. Disponível em: <http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_221_n_1830.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2020.

MIGNON-GRASTEAU, S. Genetic parameters of growth curve parameters in male and female chickens. **Br. Poult. Sci.**, v. 40, n. 1, p. 44-51, June 1999. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00071669987827>>. Acesso em: 06 nov. 2020.

MISCHAN, M. M.; PINHO, S. Z. Conceitos gerais. In: **Modelos não lineares: funções assintóticas de crescimento**. 1 ed. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2014. p. 9-28.

MONTGOMERY, D. C. Response Surface Methods and Designs. In: Montgomery, D. C. **Design and analysis of experiments**. 9ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017. p. 489-568.

NABAVI-PELESARAEI, A.; FALLAH, A.; HEMATIAN, A. Relation between energy inputs and yield of broiler production in Guilan province of Iran. In: The Second International Conference on Agriculture and Natural Resources, 2, 2013, Kermanshah. **Anais...**Kermanshah: Razi University, 2013, p.109-117.

NOVAES, C. G.; YAMAKI, R. T.; Paula, V. F.; NASCIMENTO JÚNIOR, B. B.; BARRETO, J. A.; VALASQUES, G. S.; BEZERRA, M. A. Otimização de métodos analíticos usando metodologia de superfícies de resposta – parte I: variáveis de processo. **Rev. Virtual Quim.**, v. 9, n. 3, p. 1184-1215, maio/jun. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20170070>>. Acesso em: 06 fev. 2021.

ORNELLAS, A. J. “Energia” até Aristóteles. In: ORNELLAS, A. J. **A energia dos tempos antigos aos dias atuais**. 1 ed. Maceió: EDUFAL, 2006. p.10-13.

ORTIZ-CAÑAVATE, J.; HERNANZ, J. L. Energy for Biological systems. In: **Energy and Biomass Engineering**. Volume V. EUA: CIGR- The International Commission of Agricultural Engineering, 1999. p. 13-138.

PISHGAR-KOMLEH, S. H.; KEYHANI, A.; RAFIEE, S. H.; SEFEEDPARI, P. Energy use and economic analysis of corn silage production under three cultivated area levels in Tehran province of Iran. **Energy**, v. 36, n. 5, p. 3335-3341, May 2011.

PISHGAR-KOMLEH, S. H.; AKRAM, A.; KEYHANI, A.; VAN ZELM, R. Life cycle energy use, costs, and greenhouse gas emission of broiler farms in different production systems in Iran – a case study of Alborz province. **Environ. Sci. Pollut. Res.**, v. 24, n. 19, p. 16041-16049, May 2017. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11356-017-9255-3>>. Acesso em: 02 jun. 2020.

PUIATTI, G. A.; CECON, P. R.; NASCIMENTO, M.; PUIATTI, M.; FINGER, F. L.; SILVA, A. R.; NASCIMENTO, A. C. C. Análise de agrupamento em seleção de modelos de regressão não lineares para descrever o acúmulo de matéria seca em plantas de alho. **Rev. Bras. Biom.**, v. 31, n. 3, p. 337-351, jul./set. 2013. Disponível em: <http://jaguar.fcav.unesp.br/RME/fasciculos/v31/v31_n3/A2_Guilherme_PauloCecon.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2020.

QUESADA, G. M.; PEREIRA FILHO, O. P.; BEBER, J. A. C.; NEUMANN, P. S. Energia, organização social e tecnologia. **Ciência & Ambiente**, v. 2, n. 2, p. 13-29, jan./jun. 1991.

RIBEIRO, M. J. B. **Curva de crescimento de codornas ajustadas por modelos não lineares**. 2014. 99 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Federal de Sergipe, 2014.

RICHARDS, F. J. A flexible growth function for empirical use. **J. Exp. Bot.**, v. 10, n. 29, p. 290-300, June 1959. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/23686557>>. Acesso em: 04 nov. 2020.

ROBERTSON, T.B. Experimental studies on growth: II. The normal growth of the white mouse. **J. Biol. Chem.**, v.24, n.3, p. 363-383, Mar. 1916. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(18\)87556-1](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)87556-1)>. Acesso em: 13 nov. 2020.

RONDÓN, E. O. O.; MURAKAMI, A. E.; SAKAGUTI, E. S. Modelagem computacional para produção e pesquisa em avicultura. **Rev. Bras. Cienc. Avic.**, v. 4, n. 1, p. 199-207, jan./abr. 2002.

SALEHI, M.; EBRAHIMI, R.; MALEKI, A.; MOBTAKER, H. G. An assessment of energy modeling and input costs for greenhouse button mushroom production in Iran. **J. Clean. Prod.**, v. 64, p.377-383, Feb. 2014.

SANTOS, T. M. B.; LUCAS JÚNIOR, J. Balanço energético em galpão de frangos de corte. **Eng. Agríc.**, v. 24, n. 1, p. 25-36, jan./abr. 2004.

SARMENTO, J. L. R.; REGAZZI, A. J.; SOUSA, W. H.; TORRES, R. A.; BREDA, F. C.; MENEZES, G. R. O. O Estudo da curva de crescimento de ovinos Santa Inês. **R. Bras. Zootec.**, v. 35, n. 2, p. 435-442, mar./abr. 2006.

SCHWARZ, G. Estimating the dimension of a model. **Ann. Statist.**, v. 6, n. 2, p. 461-464, Mar. 1978. Disponível em:< <https://www.jstor.org/stable/2958889>>. Acesso em: 05 nov. 2020.

SEFEEDPARI, P.; RAFIEE, S.; AKRAM, A. Modeling of energy output in poultry for egg production farms using artificial neural networks. **J. Anim. Prod. Adv.**, v. 2, n. 5, p. 247-253, May. 2012a.

SEFEEDPARI, P.; RAFIEE, S.; AKRAM, A. Selecting energy efficient poultry egg producers: A fuzzy data envelopment analysis approach. **Int. J. Appl. Oper. Res.**, v. 2, n. 2, p. 77-88, July 2012b.

SEFEEDPARI, P.; SHOKOOHI, Z.; BEHZADIFAR, Y. Energy use and carbon dioxide emission analysis in sugarcane farms: a survey on Haft-Tappeh Sugarcane Agro-Industrial Company in Iran. **J. Clean. Prod.**, v. 83, p. 212-219, Nov. 2014.

SILVEIRA, S. C.; MUNIZ, J. A.; SOUSA, F. A.; CAMPOS, A. T. Modelos não lineares ajustados à produção acumulada de biogás provenientes de camas sobrepostas de suínos. **Rev. Agrogeoambiental**, v. 10, n. 3, p. 91-103, set. 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.18406/2316-1817v10n320181168>>. Acesso em: 28 jul. 2020.

SINGH, D.; RAO, P. V. A surface roughness prediction model for hard turning process. **Int. J. Adv. Manuf. Technol.**, v. 32, n. 11-12, p. 1115-1124, Mar. 2007.

SOUZA, C. V.; CAMPOS, A. T.; BUENO, O. C.; SILVA, E. B. Análise energética em sistema de produção de suínos com aproveitamento dos dejetos como biofertilizante em pastagem. **Eng. Agríc.**, v. 29, n. 4, p. 547-557, out./dez. 2009.

SOUZA, L. A.; CARNEIRO, P. L. S.; MALHADO, C. H. M.; SILVA, F. F.; SILVEIRA, F. G. Traditional and alternative nonlinear models for estimating the growth of Morada Nova sheep. **R. Bras. Zootec.**, v.42, n. 9, p. 651-655, Sept. 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1516-35982013000900007>>. Acesso em: 03 nov. 2020.

SUGIURA, N. Further analysts of the data by akaike's information criterion and the finite corrections. **Commun. Statist. Theory Meth.**, v. 7, n.1, p. 13-26, Jan. 1978. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/03610927808827599>>. Acesso em: 14 nov. 2020.

TELEKEN, J. T.; GALVÃO, A. C.; ROBAZZA, W. S. Comparing non-linear mathematical models to describe growth of different animals. **Acta Sci. Anim. Sci.**, v. 39, n.1, p.73-81, Jan./Mar. 2017.

TEÓFILO, R. F.; FERREIRA, M. M. C. Quimiometria II: planilhas eletrônicas para cálculos de planejamentos experimentais, um tutorial. **Quim. Nova**, v. 29, n. 2, p. 338-350, mar./abr. 2006.

THOLON, P.; QUEIROZ, S. A. Modelos matemáticos utilizados para descrever curvas de crescimento em aves aplicados ao melhoramento genético animal. **Cienc. Rural**, v.39, n.7, p. 2261-2269, out. 2009.

TJØRVE, K. M. C.; TJØRVE, E. Shapes and functions of bird-growth models: how to characterise chick postnatal growth. **Zoology**, v. 113, n.6, p. 326-333, Dec. 2010.

TJØRVE, K. M. C.; TJØRVE, E. A proposed family of unified models for sigmoidal growth. **Ecol. Modell.** v. 359, n. 10, p. 117-127, Sept. 2017.

VAN DER KLIS, J. D.; KWAKERNAAK, C.; JANSMAN, A.; BLOK, M. Energy in poultry diets: adjusted AME or net energy. In: Doppenberg J, Van der Aar P. **Dynamics in animal nutrition**. 1 ed. The Netherlands: Wageningen Academic Publishers, 2010. p.127-133.

VÁZQUEZ, J. A.; MURADO, M. A. Unstructured mathematical model for biomass, lactic acid and bacteriocin production by lactic acid bacteria in batch fermentation. **J. Chem. Technol. Biotechnol.**, v. 83, n.1, p. 91-96, Jan. 2008.

VELOSO, A. V.; CAMPOS, A. T.; PAULA, V. R.; DOURADO, D. C.; YANAGI JÚNIOR, T.; SILVA, E. B. Energetic efficiency of a deep bed swine production system. **Eng. Agríc.**, v. 32, n. 6, p. 1068-1079, Nov./Dec. 2012.

VON BERTALANFFY, L. Quantitative laws in metabolism and growth. **Q. Rev. Biol.**, v. 32, n. 3, p. 217-231, Sept. 1957. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/2815257>>. Acesso em: 04 nov. 2020.

WEIBULL, W.; STOCKHOLM, S. A statistical distribution function of wide applicability. **J. Appl. Mech.**, v. 18, n. 3, p. 293-297, Sept. 1951. Disponível em: <<http://web.cecs.pdx.edu/~cgshirl/Documents/Weibull-ASME-Paper-1951.pdf>>. Acesso em: 13 nov. 2020.

WICKHAM, H.; GROLEMUND, G. **R para Data Science**. 1 ed. Rio de Janeiro; RJ / Alta Books; 2019.

WINKELSTROTER, L. K. **Crescimento de três genótipos comerciais de frango de corte**. 2013. 55 f. dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, 2013.

YILMAZ, I.; AKCAOZ, H.; OZKAN, B. An analysis of energy use and input costs for cotton production in Turkey. **Renew. Energy**, v. 30, n. 2, p. 145-155, Feb. 2005.

ZUIDHOF, M. J.; SCHNEIDER, B. L.; CARNEY, V. L.; KORVER, D. R.; ROBINSON, F. E. Growth, efficiency, and yield of commercial broilers from 1957, 1978, and 2005. **Poult. Sci.**, v. 93, n. 12, p. 2970-2982, Dec. 2014.

ANEXO A – Certificado da Comissão de Ética



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



CAMPUS ARAÇATUBA
FACULDADE DE ODONTOLOGIA
FACULDADE DE MEDICINA VETERINÁRIA

CEUA - Comissão de Ética no Uso de Animais
CEUA - Ethics Committee on the Use of Animals

CERTIFICADO

Certificamos que o Relatório Final do trabalho intitulado "**Aplicação dos métodos: evolucionário e gradiente reduzindo generalizado a fim de otimizar modelos não lineares na nutrição de precisão**", Processo FOA nº 2015-00843, sob responsabilidade de Manoel Garcia Neto e colaboração de Max José de Araújo Faria Júnior, Marcos Franke Pinto, Sílvia Helena Venturoli Perri, Mayara Maia Rodrigues, Danilo Gualberto de Sandre, Luiza Bruna Passerini Barreiro de Oliveira e Rodrigo Pereira Cassiano foi aprovado pela CEUA em 13 de Abril de 2018.

CERTIFICATE

We certify that the study entitled "**Application of methods: evolutionary and generalized reduced gradient in order to optimize models nonlinear the accuracy of nutrition**", Process FOA nº 2015-00843, under the supervision of Manoel Garcia Neto and collaboration of Max José de Araújo Faria Júnior, Marcos Franke Pinto, Sílvia Helena Venturoli Perri, Mayara Maia Rodrigues, Danilo Gualberto de Sandre, Luiza Bruna Passerini Barreiro de Oliveira and Rodrigo Pereira Cassiano had its the Final Report approved by the CEUA on April 13, 2018.

Prof. Dr. Leonardo Perez Faverani
Coordenador da CEUA
CEUA Coordinator

CEUA - Comissão de Ética no Uso de Animais
Faculdade de Odontologia de Araçatuba
Faculdade de Medicina Veterinária de Araçatuba
Rua José Bonifácio, 1193 – Vila Mendonça - CEP: 16015-050 – ARAÇATUBA – SP
Fone (18) 3636-3234 Email CEUA: ceua@foa.unesp.br

ANEXO B – Normas de Publicação da Revista



ISSN 1516-635X printed version
ISSN 1806-9061 online version

INSTRUCTIONS TO AUTHORS

- [Scope and policy](#)
- [Preparing the manuscript](#)
- [Layout of the articles](#)

Scope and policy

The publication of the Brazilian Journal of Poultry Science is coordinated by the Publishing Committee of FACTA (APINCO Foundation of Poultry Science and Technology). All published research data and conclusions are of authors' full responsibility.

The Brazilian Journal of Poultry Science is published quarterly and the journal will consider for publication only original research material relevant to the field of poultry science. Considered subject areas will include: Immunology, Biochemistry and Cellular Biology, Housing and Environment, Wasting Control, Avian Diseases, Nutrition, Genetic Improvement, Physiology and Breeding, Management, Egg Production, Meat Technology, and Wild and Exotic Birds and Quail Production.

The journal's main objective is to publish complete scientific and technical papers as well as literature reviews in the area of poultry science written by researchers and poultry science specialists. Authors wishing to submit a review, guest editorial or technical review should contact the journal's editor.

All submitted manuscripts are evaluated in a blind peer-review, and in a total confidential and impartial way. Manuscripts should be submitted in the **English language only**.

Submission of a manuscript to the Brazilian Journal of Poultry Science implies that:

1. it has not been previously published;
2. it has not being submitted for publication elsewhere;
3. all authors have approved the submission;
4. all authors have obtained permission from their employer or institution to publish it, and
5. that relevant permissions, including ethical approval, has been obtained. Papers describing experiments which demonstrate a lack of concern of current ethical and welfare standards will not be considered for publication.

The manuscript and other correspondence should be sent preferentially by e-mail:
<https://mc04.manuscriptcentral.com/rbca-scielo>

The Journal uses the software Grammarly/Plagiarism for identifying plagiarism.

The process of review of manuscripts adopted by the journal is blind peer review.

Preparing the manuscript

Full length article

It should contain the results of original research which contributes in a relevant way to the development of poultry science. If part of the results has been published previously as a summary or short paper in scientific events, it must be stated. Priority will be given to manuscript presenting new concepts, methodologies or innovative experimental approaches.

The manuscript should have the following sections:

Title
Abstract
Introduction
Material and Methods
Results
Discussion
References

Acknowledgements should be included after Discussion.

The sections Results and Discussion can be presented jointly if preferred. The Abstract should contain up to 250 (two hundred and fifty) words, followed by the key words in alphabetic order, limited to 5 (five) words which correspond to words or expressions that identify the contents of the article.

Short communications and Case Reports should have the same layout as full length papers, including the headings (Introduction, Abstract, Material and Methods, Result, Discussion, Acknowledgments and References). They should be presented in a text with up to 1000 words (plus Abstract and References) and should contain no more than three tables and/or figures.

Technical article

Technical articles should present the development of new methodologies and/or techniques that can be applied to improve poultry production. These should follow the editorial norms including all sections of the scientific article.

Guest Editorial and Invited Review

Both Guest Editorial and Invited Review will be published by invitation only. The review should follow the norms of the scientific article without the sub-items of Material and Methods, Results and Discussion and preserving all others present in a full length manuscript.

Layout of the articles

1. Cover Page: all manuscripts should have a cover page with the title, complete name(s) of the author(s) and institution of origin. A footnote mentioning the complete address (e-mail is essential) of the author to whom correspondence should be addressed.

2. Tables: must be numbered consecutively with Arabic numerals in the text. Tables must have a descriptive title. All explanatory information should be given in a footnote below the table. All abbreviations must be defined in this footnote, even if they are explained in the text. Tables must be understandable without referring to the text.

3. Illustrations (photographs, graphs, drawings): must be numbered consecutively with Arabic numerals. All figures should be submitted on separate pages with the title of the article, name(s) of the author(s) and indication of the part of the text where they should appear. Photographs, figures and scanned material must be sent in high resolution (minimum 600 dpi, .tif or .jpg format). The figures will be published in black and white. Previous expenses agreement is needed if the author wishes to publish color photos and or figures.

4. Units: the International Metric System must be used for units and abbreviations.

5. References: these should be arranged in alphabetic order by the author's last name. The complete title of the journal should be mentioned. All authors of the article must be cited. Examples:

Bakst MR, Gupta K, Akuffo V. Comparative development of the turkey and chicken embryo from cleavage through hypoblast formation. *Poultry Science* 1997; 76(1):83-90.

Bouzoubaa K, Nagaraja KV. Epidemiological studies on the incidence of salmonellosis in chicken breeder/hatchery operations in Morocco. In: Snoeyenbos GH, editor. *Proceedings of the International Symposium on Salmonella*; 1984; Kenneth Square, PA: American Association Avian Pathologists; 1985. p.337.

Briceno WNO, Guimarães FCR, Cruz FGG. Efeitos da densidade populacional de frangos de corte em época quente no município de Manaus. In: 10o Congresso Brasileiro de Avicultura; 1987; Natal, Rio Grande do Norte. Brasil. p. 131-2.

Gabriel JE. Efeitos do nível energético da ração e do estresse térmico na expressão da proteína de choque térmico Hsp70 e nos níveis do seu mRNA no fígado de frangos de corte em diferentes estágios de desenvolvimento. [Dissertation]. Jaboticabal (SP): Universidade Estadual Paulista; 1996.

Ginsburg M. Primordial germ cell development in avians. *Poultry Science* 1997; 76(1):91-5.

Simon VA, Oliveira C. Vacinação em avicultura através da água de bebida. In: Macari M, editor. *Água na avicultura industrial*. Jaboticabal: Funep-Unesp; 1996. p. 73-85.

Summers JD, Leeson S. Commercial poultry nutrition. 2 ed. New York; N.Y / State Manual Book & Periodical Services; 1997.

6. Quotations in the text: state the last name of the author followed by the year in parenthesis. In the case of two authors both should be stated. In the case of more than two authors the quotation should be given by the last name of the first author followed by the expression *et al.* (in italic).

Examples:

Simon (1996)

Silva & Silva (1988)

Briceno *et al.* (1987)

7. Scientific names of microorganisms: must follow Berg's Manual recommendation.

8. Fees: The BJPS do not charge to submit the article, we only charge if your article was approved to publication. The author(s) will be charged US\$ 500,00 (five hundred dollars) per edited article and the payment should be made previously the publication. No reprints will be supplied to authors as the articles are shown at www.scielo.br/rbca

9. Manuscript Proof: will be sent to the corresponding author, who should be identified on the cover page of the manuscript. Corrected proof should return within three days, preferable by fax. The Editor reserves the right to forward the manuscript to press without submitting the final proof to the author. The Editor shall not be hold responsible for any mistakes shown in the final publication.

10. Offprints: There is no free offprints. They can be provided after Editor consultation.

11. Copyright: it is a condition of publication that the authors issue copyright of their article to FACTA. Authors may use the article after the publication without prior permission from FACTA, provided that acknowledgement is given to the journal as its original source of publication. Authors are responsible for obtaining permission to reproduce in the text copyright material from other sources.

11. Submission: manuscript should be submitted via ScholarOne at: <https://mc04.manuscriptcentral.com/rbca-scielo>.

[\[Home\]](#) [\[About the journal\]](#) [\[Editorial Board\]](#) [\[Subscription\]](#)



All the contents of the journal, except where otherwise noted, is licensed under a [Creative Commons Attribution License](#)

Av. Andrade Neves, 2501 - Castelo
13070-002 Campinas SP Brasil
Tel.: (55 19) 3243-6555
Fax.: (55 19) 3243-8542



rvfacta@terra.com.br