

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS FRANCISCO BELTRÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL:
ANÁLISE E TECNOLOGIA AMBIENTAL**

ANACÉ

**CARACTERIZAÇÃO DA CAMA DE PERU VISANDO
GERENCIAMENTO E PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

DISSERTAÇÃO

FRANCISCO BELTRÃO - PR

2019

ANA CÉ

**CARACTERIZAÇÃO DA CAMA DE PERU VISANDO
GERENCIAMENTO E PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental: Análise e Tecnologia Ambiental como requisito parcial para título de mestre em Engenharia Ambiental.

Linha de Pesquisa: Tecnologia Ambiental

Orientador(a): Prof. Dr. Marcelo Bortoli

Coorientador(a): Prof. Dr. Airton Kunz e Prof. Dr. Francisco Antonio Fernandes Reinaldo

FRANCISCO BELTRÃO

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca UTFPR – Câmpus Francisco Beltrão

C387c Cé, Ana

Caracterização da cama de peru visando gerenciamento e produção de biogás / Ana Cé. – Francisco Beltrão: [s.n.], 2019.
61 f. il.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Bortoli.

Coorientador: Prof. Dr. Airton Kunz.

Coorientador: Prof. Dr. Francisco Antonio Fernandes Reinaldo

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Francisco Beltrão, 2019.

Bibliografia: f. 55-59

1. Aves – Criação. 2. Resíduos de animais – Reaproveitamento. 3. Metano. 4. Digestão anaeróbia. 5. Energia – Fontes alternativas. 5.. I. Bortoli, Marcelo, orient. II. Kunz, Airton, coorient. III. Reinaldo, Francisco Antonio Fernandes, coorient. IV. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. V. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Ambiental. VI. Título.

CDD: 628

FOLHA DE APROVAÇÃO Nº 006

**CARACTERIZAÇÃO DA CAMA DE PERU VISANDO GERENCIAMENTO E PRODUÇÃO
DE BIOGÁS**

por

Ana Cé

Esta dissertação foi apresentada às nove horas do dia vinte e sete de março de dois mil e dezenove como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL, com área de concentração em Meio Ambiente, linha de pesquisa em Tecnologia Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental: Análise e Tecnologia Ambiental. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo citados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Ricardo Luis Radis Steinmetz -
EMBRAPA
Membro externo
(Participação a distância via videoconferência)

Prof. Dr. Marcelo Bortoli - Presidente –
UTFPR
Orientador

Prof.^a Dr.^a Ticiane Sauer Pokrywiecky - UTFPR
Membro

Prof. Dr. Rodrigo Lingnau – UTFPR
Coordenador

**A FOLHA DE APROVAÇÃO ASSINADA ENCONTRA-SE NA COORDENAÇÃO DO CURSO DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL: ANÁLISE E TECNOLOGIA AMBIENTAL**

Aos meus pais Marinês e Sauro, que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando e acreditando em mim. Obrigada por todo apoio. Eu amo vocês!

Dedicatória

“Para todos aqueles em que o destino e a vida pediram pra embarcar em busca dos seus sonhos, se distanciarem dos que mais amam e pagaram o alto preço de viver longe de casa. Nós que viemos não estamos livres do medo e de tantas fraquezas, mas estamos para sempre livres do medo de nunca termos tentado.” (Autor Desconhecido).

AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar presente em todos os momentos da minha vida.

À minha família, principalmente aos meus pais Marinês e Sauro, por me apoiarem em todas as minhas decisões. E ao meu irmão Julio, por ser tão compreensivo e companheiro comigo e com os meus pais.

Aos meus tios(as), primos(as) e avós, por todo carinho, oração, apoio e compreensão prestados durante toda a minha vida, principalmente nessa etapa.

Às minhas amigas, que sempre estiveram ao meu lado, mesmo distantes fisicamente, principalmente a Ana L., Camila e Jerusa, vocês são as irmãs que eu nunca tive.

Às companheiras de mestrado, principalmente a Chayanne, Juliana, Taise e Vitória, obrigada pelo companheirismo e amizade.

À Embrapa – Suínos e Aves, pela disponibilização da estrutura para o desenvolvimento desta pesquisa. Aos funcionários do Laboratório de Estudos e Análises Ambientais (LEAA), em especial aos analistas Ricardo e Fabiane. Aos colegas André, Angélica, Bruno e Camila, obrigada pelos ensinamentos.

Em especial os(as) companheiros(as) Alice, Deisi, Gabriela, Heitor, Helga, Taís, Vitória e William, serei eternamente grata pelos ensinamentos, jantares, carinho e amizade.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná e aos professores do programa PPGEA, principalmente aos meus orientadores: Prof. Dr. Marcelo Bortoli, Prof. Dr. Airton Kunz e Prof. Dr. Francisco Reinaldo, muito obrigada pela oportunidade e ensinamentos.

Ao apoio e bolsa concedida pelo acordo da CAPES e Fundação Araucária, do Ministério de Educação do Brasil, fundamental para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Meus mais sinceros agradecimentos a todas as pessoas que auxiliaram direta ou indiretamente para a realização dessa pesquisa.

“O homem destrói a natureza na justificativa de sobreviver, a natureza luta para sobreviver, para garantir a sobrevivência do homem.” (Mauro Wesley)

CÉ, Ana. **Caracterização da cama de peru visando gerenciamento e produção de biogás.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental: Análise e Tecnologia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2019.

RESUMO

Os resíduos provenientes da produção em forma de confinamento de perus podem apresentar-se como uma fonte alternativa de energia. Nesse sentido, avaliar a caracterização e potencial bioquímico de metano (PBM) da cama de peru é de vital importância para o reaproveitamento energético e gerenciamento desses resíduos. O objetivo da presente pesquisa foi: i) realizar a caracterização física e química e o PBM da cama de peru, ii) obter indicadores da cama de peru para o potencial brasileiro de geração de metano e iii) avaliar a influência de diferentes manejos da cama de peru com 50, 120 e acima de 400 dias de uso da cama após alojamento das aves. A metodologia utilizada para caracterização física e química foi de acordo com APHA et al., (2012). Os ensaios cinéticos para avaliar o PBM das três amostras foram conduzidos em batelada, em temperaturas mesofílicas, conforme preconiza guia VDI 4630 (2016). A maior concentração de sólidos voláteis foi encontrada para a cama de peru de 50 dias (32,2%, $m\ m^{-1}$). Os indicadores obtidos da cama de peru para o potencial brasileiro de geração de metano foram de 7,5 a 31 milhões m^3 de CH_4 com o reaproveitamento dos resíduos de diferentes dias de alojamento proveniente da produção de carne de peru nos anos de 2010 a 2017. O maior valor de PBM ($289 \pm 14\ LN\ CH_4.kg_{SV}\ adic^{-1}$), V_{CH_4N} ($34,3\ m^3\ dia^{-1}$) bem como energia elétrica ($71,3\ kWh\ dia^{-1}$) foi encontrado para a cama de peru de 50 dias de alojamento.

PALAVRAS-CHAVE: Produção de aves; Potencial bioquímico de metano; Fontes renováveis; Excretas de perus; Cama de peru.

CÉ, Ana. **Characterization of turkey litter for management and production of biogas**. Dissertation (Master of Environmental Engineering: Environmental analysis and technology) – Federal University of Technology – Paraná, Campi Francisco Beltrão, 2019.

ABSTRACT

Wastes from turkeys confinement production are presented as an alternative energy source. In this way, to evaluate the characterization and biochemical methane potencial (BMP) of turkey litter is shown as an important perspective for the energy reutilization and management of these wastes. The aim of this study was: i) to perform the physico and chemical characterization and BMP of turkey litter, ii) to obtain turkey litter indicators for the brazilian potential of methane generation e iii) to evaluate the different handling influence of the turkey litter with 50, 120 and above 400 days upon of birds housing. The methodology applied for physical and chemical characterization was according to APHA et al., (2012). The kinetic tests to evaluate the BMP of the three samples were conducted in batch, at mesophilic temperatures, according to VDI standard 4630 (2016). The highest volatile solids concentration obtained was to the surface layer (32.2%, $m\ m^{-1}$). The indicators obtained from the turkey litter for the brazilian potential of methane generation were from 7.5 to 31 million m^3 of CH_4 with the wastes reutilization at different days of housing stemming from the turkey meat production from 2010 to 2017. The highest BMP value ($289\pm 14\ L_N\ CH_4.kg_{SV\ add}^{-1}$), V_{CH_4N} ($35.1\ m^3\ day^{-1}$) as well as energy electrical ($71.3\ kWh\ day^{-1}$) was found in the turkey litter of 50 housing days.

KEYWORDS: Poultry production; Biochemical methane potential; Renewable sources; Turkey manure; Turkey litter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estados exportadores de carne de peru.....	19
Figura 2. Sistema produtivo de perus.....	20
Figura 3. Etapas envolvidas na digestão anaeróbia.....	25
Figura 4. Equilíbrio químico entre dióxido de carbono – bicarbonato – carbonato. ...	28
Figura 5. Curvas típicas acumuladas de produção de biogás/metano.	32
Figura 6. Aparato experimental.	37
Figura 7. CSTR utilizado como inóculo mesofílico para ensaios em batelada. Esquema do reator Tubo de alimentação (1), válvula (2), sistema de mistura (3), banho de água externo (4), vedante da coluna de água (5) e bag para coleta de gás (6).....	38
Figura 8. Perfil da produção acumulada de CH ₄ da amostra de cama de peru (50 dias) nas diferentes relações de SV _{substrato} /SV _{inóculo} estudadas.	43
Figura 9. Perfil da produção acumulada de biogás x produção diária de biogás da cama de peru com tempo de uso de 50, 120 dias e maior que 400 dias de alojamento, respectivamente.....	45
Figura 10. Produção brasileira de carne de peru de 2010 a 2017 e respectiva produção de metano da cama de peru de 50;120 e maior que 400 dias de alojamento, respectivamente.....	48
Figura 11. Produção brasileira de carne de frango de 2010 a 2017 e produção de metano da cama de frango de 504 dias de alojamento.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros e coeficientes técnicos e zootécnicos das duas fases de produção de perus (iniciador e terminador).....	21
Tabela 2. Parâmetros físicos e químicos da cama de peru de diferentes origens.	22
Tabela 3. Parâmetros de aproveitamento energético da cama de peru de diferentes origens.	22
Tabela 4. Valores de parâmetros para diferentes etapas de DA.	26
Tabela 5. Substâncias inibidoras e concentrações tóxicas no processo de DA.....	29
Tabela 6. Resumo dos métodos cinéticos anaeróbios.....	30
Tabela 7. Parâmetros e metodologias/equipamentos utilizados na pesquisa.	35
Tabela 8. Caracterização físicas e químicas das amostras coletadas no aviário.	41
Tabela 9. Dados cinéticos obtidos pelo modelo de Gompertz ajustados aos dados experimentais dos ensaios de produção de CH ₄ das diferentes proporções de SV _{substrato} /SV _{inóculo} estudadas.....	44
Tabela 10. Resíduos produzidos em um sistema de terminação de machos pesados e Potencial bioquímico de metano de cama de peru de 50, 120 e maior que 400 dias de alojamento.....	47
Tabela 11. Avaliação técnica para cama de peru e de frango, para diferentes dias de alojamento.....	50
Tabela 12. Lote inicial e reposição de maravalha (substrato para a cama) para sistema de terminação de perus machos.....	51

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

C/N	Carbono/Nitrogênio
COT	Carbono orgânico total
CSTR	do inglês, <i>Continuous Stirred-Tank Reactor</i>
DA	Digestão anaeróbia
DQO	Demanda química de oxigênio
EE	Energia elétrica
GEE	Gases do efeito estufa
MF	Matéria fresca
PBB	Potencial bioquímico de biogás
PBM	Potencial bioquímico de metano
PNMC	Política nacional sobre mudança do clima
PROINFA	Programa de incentivo às fontes alternativas de energia elétrica
RP	Resíduos produzidos
ST	Sólidos totais
SV	Sólidos Voláteis
TRH	Tempo de retenção hidráulica
UASB	do inglês, <i>Up-Flow Anaerobic Sludge Blanket</i>
V_{CH4N}	Volume de geração de CH ₄
V_{CSTR}	Volume de reator do tipo CSTR

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. OBJETIVOS.....	18
2.1. OBJETIVO GERAL.....	18
2.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	19
3.1. AVICULTURA: CADEIA PRODUTIVA DE PERUS.....	19
3.2. APROVEITAMENTO ENERGÉTICO.....	22
3.3. DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	24
3.4. PARÂMETROS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	26
3.4.1. TEMPERATURA.....	27
3.4.2. pH, ALCALINIDADE E ÁCIDOS VOLÁTEIS.....	27
3.4.3. RELAÇÃO C/N.....	28
3.4.4. SUBSTÂNCIAS INIBIDORAS.....	29
3.5. ESTUDOS CINÉTICOS.....	30
3.5.1. VDI 4630.....	31
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	34
4.1. AMOSTRAGEM.....	34
4.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA.....	35
4.3. POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO (PBM).....	35
4.4. POTENCIAL BIOQUÍMICO DE BIOGÁS (PBB).....	36
4.5. INÓCULO.....	37
4.6. ANÁLISE DO BIOGÁS.....	38
4.7. INDICADORES.....	39
4.8. CENÁRIOS.....	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41

5.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA	41
5.1.1. SV/ST	41
5.1.2. Poder calorífico superior	41
5.1.3. pH.....	42
5.1.4. Relação C/N	42
5.1.5. pH, nitrogênio amoniacal e sólidos voláteis	42
5.2. POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO (PBM).....	43
5.3. POTENCIAL BIOQUÍMICO DE BIOGÁS (PBB).....	44
5.4. INDICADORES	47
5.5. CENÁRIOS	49
6. CONCLUSÃO	53
7. PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS	54
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
9. ANEXO.....	60

1. INTRODUÇÃO

A avicultura é um dos setores que vêm ganhando considerável destaque no Brasil, sendo que a produção em forma de confinamento de perus foi estimada em aproximadamente 390 mil toneladas de carne no ano de 2017, com destinação de 28% para exportação e 72% para o mercado interno (ABPA, 2018). Essa produção é realizada em um sistema produtivo em forma de confinamento, dividido em duas etapas: iniciador e terminador. A primeira etapa caracteriza-se pela criação de pintainhas (filhotes machos e fêmeas) e o sistema terminador divide-se pela criação de peru: macho pesado, fêmea pesada e fêmea leve, que se diferencia conforme a finalidade comercial (exportação, produção regional ou natalina).

No entanto, uma problemática desses sistemas confinados de perus é o acúmulo de resíduos, quando em larga escala. O principal subproduto proveniente dessa atividade é a cama de peru, a qual é constituída por um material com capacidade de absorção de umidade, o qual mantém o local seco e apropriado para o manejo de elevadas quantidades de excretas produzidas nesse sistema produtivo (WILLIAMS et al., 2016).

Os resíduos provenientes desses sistemas produtivos quando descartados de maneira incorreta, sem tratamento prévio, comprometem a qualidade de corpos hídricos (escoamento superficial) e do solo pela elevada quantidade de matéria orgânica e nutrientes que possuem. Devido a riscos de contaminação ambiental, é necessária a adoção de técnicas seguras de tratamentos visando o adequado manejo da cama de aviário de peru (ZIGANSHINA et al., 2014; LEINONEN et al., 2016).

Uma alternativa para o manejo adequado da cama de aviário de peru e conseqüentemente para a mitigação de riscos ambientais pode ser alcançada pelo processo de digestão anaeróbia, a qual ocorre com a atividade de diferentes grupos de microrganismos, e consiste na transformação de materiais orgânicos complexos em biogás (principalmente CH₄ e CO₂) e biofertilizante. Esse processo ocorre em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2010).

A digestão anaeróbia é uma tecnologia que apresenta vantagens em relação à estabilização do resíduo, geração de fertilizante proveniente do digestato, aproveitamento energético através do biogás, e concomitantemente a isto promoção de fontes alternativas de energia renovável.

No Brasil, tais resíduos são dispostos no solo como fonte de nutrientes e valoração agronômica. Em âmbito internacional, além da disposição em solos, a cama de peru é utilizada como cogeração de energia via queima de biomassa. Porém, até o momento (em âmbito internacional e principalmente nacional) são escassas pesquisas a respeito do gerenciamento e aproveitamento de resíduos da cama de aviário de peru, principalmente no que diz respeito ao reaproveitamento energético dos mesmos.

Sendo assim, a utilização da cama de peru como substrato na digestão anaeróbia mostra-se como uma alternativa interessante como fonte potencial de energia para a diversificação da matriz energética brasileira, bem como recurso renovável com papel mitigador ambiental. Diante disso, o objetivo geral da presente pesquisa foi avaliar o potencial do uso da cama de aviário de peru para produção de biogás.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial energético da produção de biogás usando cama de peru como substrato.

2.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a caracterização física e química da cama de peru do sistema produtivo terminador de perus machos;
- Avaliar o comportamento da produção máxima de CH₄ de diferentes relações de $SV_{\text{substrato}}/SV_{\text{inóculo}}$;
- Realizar ensaios de potencial bioquímico de biogás (PBB) e metano da cama de peru com 50; 120 e acima de 400 dias de alojamento;
- Obter indicadores da cama de peru e de frango para o potencial brasileiro de geração de metano;
- Realizar cenários para cama de peru com tempo de uso de 50; 120 e acima de 400 dias, bem como para cama de frango, com 504 dias de alojamento, através de estudos do PBB.

3. REVISÃO DA LITERATURA

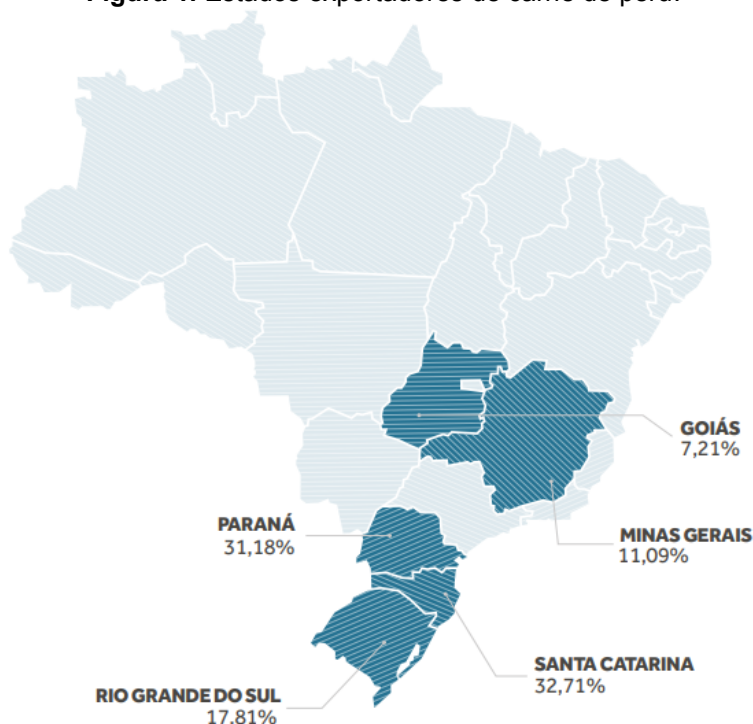
3.1. AVICULTURA: CADEIA PRODUTIVA DE PERUS

A avicultura apresenta-se como um setor ativo no Brasil, constituída pela produção de aves, principalmente frangos e perus (ABPA, 2018). Somente na região do sudoeste do Paraná, foram produzidos cerca de 45.639.041 aves ano⁻¹ conforme estimativas realizadas nos anos de 2006 a 2010, pela Associação dos Municípios do Sudoeste do Paraná (AMSOP, 2010).

O estado do Paraná foi o maior exportador de perus do Brasil até o ano de 2017 (ABPA, 2017). Especificamente a cidade de Francisco Beltrão – PR destacou-se por apresentar elevada produção dessas aves. Por questões de embargo para exportação, a produção de perus na região de Francisco Beltrão diminuiu no segundo semestre de 2018, porém, as variações de demanda de mercado são passíveis de inconstância.

A produção de perus foi avaliada em aproximadamente 390.000 ton ano⁻¹ de aves no ano de 2018, de acordo com dados referentes aos anos de 2010 a 2016 da Associação Brasileira de Proteína Animal. Os estados do Paraná e Santa Catarina apresentam a maior parcela de exportações de perus do Brasil 31,18% e 32,71%, respectivamente (ABPA, 2018), conforme apresentado na Figura 1.

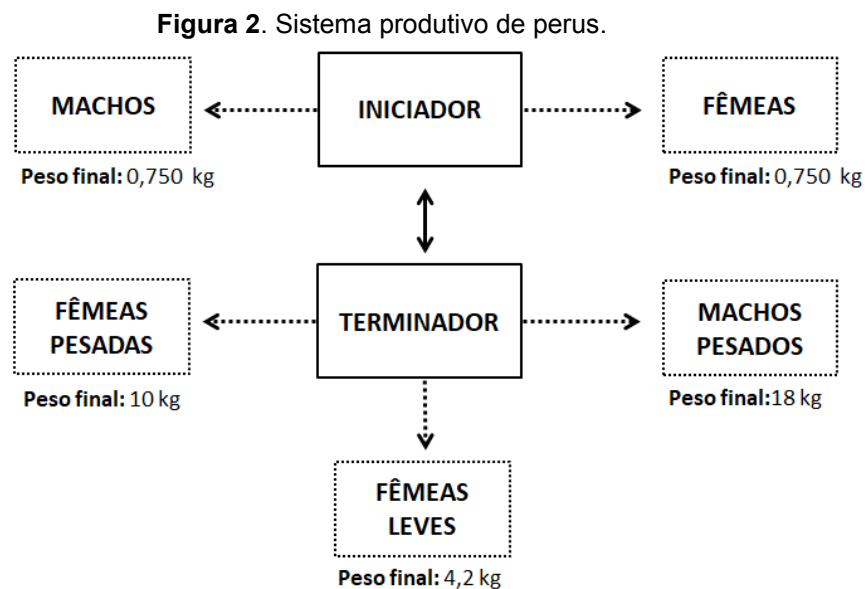
Figura 1. Estados exportadores de carne de peru.



Fonte: Adaptado de ABPA, (2018).

O sistema produtivo de perus é dividido em duas etapas: iniciador e terminador. A primeira etapa caracteriza-se pela criação de pintainhas (machos e fêmeas) e o sistema de terminação é dividido em: macho pesado, fêmea pesada e fêmea leve. O peso final dessas aves varia conforme a finalidade produtiva (exportação, produção regional ou natalina) (MARTINS et al., 2011), conforme apresentado na Figura 2.

A duração de lotes bem como a produção de perus machos e fêmeas difere-se conforme a finalidade e necessidade de peso dos mesmos, visto que essas aves apresentam distintos propósitos de criação. Nesse sentido, a criação dessas aves ocorre em sítios separados para otimização de rentabilidade econômica e desempenho produtivo (CASTRO et al., 2014).



Fonte: Própria (2019).

São apresentados na Tabela 1, os parâmetros, coeficientes técnicos e zootécnicos de sistemas de produção de perus, bem como o custo de energia elétrica nas duas etapas da cadeia produtiva (iniciador e terminador) de aviários provenientes da região Sul do Brasil (localizado no estado de Santa Catarina), baseando-se nos dados publicados por MARTINS et al., (2011).

Tabela 1. Parâmetros e coeficientes técnicos e zootécnicos das duas fases de produção de perus (iniciador e terminador).

Parâmetro/Item	Iniciador	Terminador		
		Fêmea Leve	Fêmea Pesada	Macho pesado
Período para transferência (dias)	26	35	84	114
Intervalo lotes (dias)	12	12	15	18
Intervalo lotes limpeza (dias)	20	25	25	25
Lotes ano ⁻¹	9,39	7,49	3,59	2,71
Animais m ⁻²	21	6	4	3
Tamanho do aviário (m ²)	1.200	1.200	1.200	1.200
Mortalidade (%)	4,0	1,5	2,8	7,3
Peso final (kg)	0,750	4,2	10	18
Substratos para cama (lote inicial m ³ aviário ⁻¹)	72	72	72	72
Substratos para cama (reposição m ³ aviário ⁻¹)	20	15	15	15
Energia elétrica (R\$ lote aviário ⁻¹)	162,50	123,00	294,75	400,00

Fonte: Adaptado de MARTINS et al., (2011).

Para tal atividade, a cama de aviário é o principal subproduto gerado no sistema produtivo de aves, sendo constituída de materiais que absorvam umidade, como maravalha, serragem, casca de arroz, gramíneas, dentre outros, para manutenção de um ambiente seco e favorável para o manejo de aves (KUNZ et al., 2011). Ela também contém uma mistura de restos de ração, fezes, urina, pele, penas e insetos (AVILA et al., 2007).

Esses resíduos (cama de aviário) quando descartados no meio ambiente de maneira incorreta, sem tratamento prévio, comprometem a qualidade de corpos hídricos (escoamento superficial) e do solo. Portanto, é necessário estabelecer métodos ambientalmente corretos, bem como uma destinação segura para estes resíduos (ZIGANSHINA et al., 2014).

Um dos métodos que estão sendo utilizados para o gerenciamento da cama de peru é através da sua disposição em solos, proporcionando condicionamento e fonte de nutrientes aos mesmos (COSTA et al., 2008). Em âmbito nacional, pesquisas vêm sendo desenvolvidas para o aproveitamento desses resíduos como adubo, recuperação de áreas degradadas bem como fertilizantes (TROLEIS, et al., 2017; CIESLIK, et al., 2009; COSTA et al., 2008). Na literatura internacional, pesquisas envolvendo compostagem, fertilizantes, cogeração de energia via queima de biomassa e digestão anaeróbia foram encontrados como alternativa para o gerenciamento desses substratos (ZIGANSHINA et al., 2014; LEWICKI et al., 2013; CHAMY et al., 2012; CHAMY et al., 2011; CHAMY et al., 2011a; DIAZ et al., 2012; AVIANI et al., 2010; KIM et al., 2009).

Nas Tabelas 2 e 3, apresenta-se um levantamento de dados das características físicas e químicas e parâmetros de aproveitamento energético da cama de peru.

Tabela 2. Parâmetros físicos e químicos da cama de peru de diferentes origens.

Parâmetros/Literatura	Cantrell, et al. 2012 (EUA)	Diaz, et al. 2012 (EUA)	Aviani, et al., 2010 (Israel)	Kim, et al., 2009 (EUA)	Costa, et al., 2008 (Brasil)
pH	7,0	7,0/6,9	5,8	-	8,0
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	1045	-	1060	-	-
Relação C/N	11,8	6,5/6,9	9,8	40,9	16

Fonte: Adaptado de CANTRELL, et al., (2013), DIAZ, et al., (2012), AVIANI, et al., (2010), KIM, et al., (2009) e COSTA, et al., (2008).

Tabela 3. Parâmetros de aproveitamento energético da cama de peru de diferentes origens.

Parâmetros/Literatura	Ziganshina, et al., 2014 (Rússia)	Lewicki, et al., 2013 (Polônia)	Chamy, et al., 2011 (Chile)	Chamy, et al., 2012 (Chile)
Rendimento de Biogás ($\text{N m}^3_{\text{biogás}} \text{ kg}_{\text{SV adic}}^{-1}$)	0,195	-	-	0,74
Rendimento de CH_4 ($\text{N m}^3_{\text{CH}_4} \text{ kg}_{\text{SV adic}}^{-1}$)	0,12	-	0,15	0,52
Produtividade de CH_4 ($\text{Nm}^3_{\text{CH}_4}$ $\text{m}^3_{\text{reator}}^{-1} \text{d}^{-1}$)	-	-	-	0,52
Teor de Metano (%)	61,6	51,63	-	70

Fonte: Adaptado de Ziganshina, et al., (2014), Lewicki, et al., (2013), Chamy, et al., (2011) e Chamy, et al., (2012).

Uma maneira de diminuir o acúmulo dos resíduos da cama de peru é através da estabilização e tratamento dos mesmos, que pode ser alcançada pela digestão anaeróbia (GLATZ et al., 2011), que consiste em converter a matéria orgânica complexa, com o auxílio de grupos de microrganismos específicos, em uma mistura gasosa denominada biogás (SANT'ANNA JR., 2013). Aliada a minimização do impacto ambiental desses resíduos, a digestão anaeróbia apresenta vantagem em relação ao aproveitamento energético do metano (AMARAL et al., 2016).

3.2. APROVEITAMENTO ENERGÉTICO

A elevada demanda por consumo energético, associada ao interesse mundial em diminuir a utilização de combustíveis fósseis e conseqüentemente a emissão de gases de efeito estufa, tem contribuído para a promoção de fontes de energias renováveis denominadas como não convencionais, como por exemplo, as pequenas centrais

hidrelétricas, eólica, de oceanos, solar, biogás e biometano (ODORICO et al., 2016; BACENETTI et al., 2013).

No Brasil existem leis que incentivam à utilização de fontes não convencionais de energia, como a Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, revisada pela Lei nº 10.762, de 11 de novembro de 2003, na qual foi criado o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), com o objetivo de aumentar a diversificação da matriz energética brasileira (BRASIL, 2003).

A Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009, da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), regulamentada pelo decreto nº 7.390 de 09 de dezembro de 2010, oficializa o Brasil juntamente à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre mudanças climáticas e diminuição dos gases de efeito estufa (BRASIL, 2010; BRASIL, 2009).

A RenovaBio (Lei nº 13.576/2017 a qual institui a nova Política Nacional de Biocombustíveis) é a principal iniciativa em âmbito federal para a expansão da produção e utilização de biocombustíveis, incluindo a aceleração do aproveitamento racional do biogás e biometano (BRASIL, 2017).

A resolução nº 8 de 30/01/2015, da Agência Nacional do Petróleo, gás natural e biocombustíveis – ANP estabelece a especificação para o biometano de origem nacional, oriundo de produtos e resíduos orgânicos agrossilvopastoris e comerciais, e que seja destinado ao uso veicular (GNV) e às instalações residenciais e comerciais (BRASIL, 2015).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012), pela resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012 (a qual foi revisada em 2018 e está para ser publicada até o final de 2019), apresenta condições gerais para o acesso a microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição e compensação de energia elétrica.

Em âmbito estadual, algumas leis vigentes são: Lei nº 19.500/2018 do Paraná, que dispõe sobre a política estadual do biogás e biometano e adota outras providências; Lei nº 17.542/2018 de Santa Catarina, a qual institui a política estadual do biogás; Lei nº 14.864/16 do Rio Grande do Sul, a qual institui a política estadual do biometano; Lei nº 13.798/09 de São Paulo, sobre mudanças climáticas; Lei nº 6.361/12 do Rio de Janeiro, de gás natural renovável (BRASIL, 2018; BRASIL, 2018a; BRASIL, 2016; BRASIL, 2012; BRASIL, 2009a).

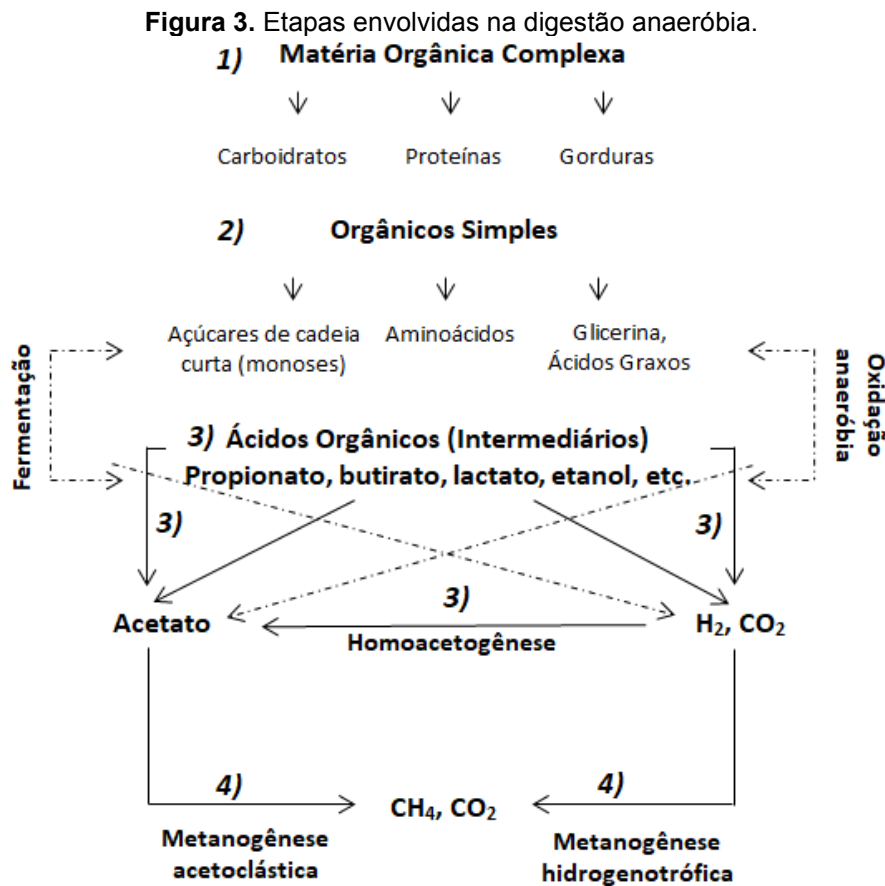
Nesse contexto, com o aumento de resíduos provenientes da avicultura, uma fonte alternativa de energia pode ser alcançada através da digestão anaeróbia da biomassa, mostrando-se como uma medida interessante para sustentabilidade e aproveitamento energético (RIBEIRO et al., 2018; NAYAL et al., 2016).

Existem diferentes métodos (combustão, gaseificação, hidrólise, pirólise e digestão anaeróbia) para geração de energia através da biomassa (NAYAL et al., 2016). Para tanto, o biogás (proveniente da digestão anaeróbia) além de apresentar elevado potencial energético, proporciona benefícios sociais, através da geração de empregos; ambientais, pela reutilização e tratamento de resíduos orgânicos; diminuição de GEE pelo aumento da utilização de fontes limpas de energia; e econômicos, pela parcela de renda extra que pode ser utilizada pelo agricultor (ÖZER, 2017; ODORICO, et al., 2016).

3.3. DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia é um processo biológico que envolve diversos grupos de microrganismos e consiste em transformar os materiais orgânicos complexos em biogás (principalmente metano e dióxido de carbono). Esse processo ocorre em quatro etapas e/ou fases, sendo estas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (SANT'ANNA JR., 2013; CHAMY et al., 2011; DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2010).

Na Figura 3 são apresentadas as quatro etapas envolvidas no processo de digestão anaeróbia, bem como os produtos gerados em cada fase.



*1) Hidrólise; 2) Acidogênese; 3) Acetogênese; 4) Metanogênese.

Fonte: Adaptado de KHANAL (2008) e SANT'ANNA JR. (2013).

Os microrganismos não apresentam capacidade para assimilar a matéria orgânica particulada, portanto, na primeira etapa da digestão anaeróbia, denominada hidrólise, as enzimas extracelulares, excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas, convertem os materiais orgânicos complexos (carboidratos, proteínas e lipídeos) em materiais dissolvidos de cadeia curta (açúcares, aminoácidos e ácidos graxos) (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2010; KHANAL, 2008).

Na segunda etapa do processo de digestão anaeróbia (acidogênese), os compostos resultantes da hidrólise são fermentados pelas bactérias acetogênicas, as quais são responsáveis pela geração de ácidos carboxílicos, denominados ácidos graxos voláteis (formiato, acetato, propionato, etc.) além de hidrogênio, dióxido de carbono, e outras células bacterianas (SANT'ANNA JR., 2013; KHANAL, 2008).

Vale ressaltar que os microrganismos fermentativos são os primeiros atuantes no processo de degradação do substrato, e que a acidogênese será limitante no processo se o substrato não for facilmente hidrolisável (CHERNICHARO, 2010).

A acetogênese é a terceira fase, na qual ocorre a transformação de ácidos de maior cadeia em ácidos de um ou dois átomos de carbono (acético e fórmico), além de produção de hidrogênio e dióxido de carbono. Os microrganismos atuantes nessa fase são as bactérias acetogênicas em simbiose com as arqueas metanogênicas e bactérias homoacetogênicas (consomem hidrogênio e gás carbônico para produzir acetato). (SANT'ANNA JR., 2013; DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2010).

A última etapa, e de maior interesse, é denominada metanogênese, a mesma é conduzida pelas arqueas metanogênicas. Tais microrganismos caracterizam-se pela sua capacidade de formar metano (principal produto do metabolismo) e podem ser divididos em dois grupos principais: arqueas hidrogenotróficas e acetoclásticas (DEPPENMEIER, 2002). As arqueas metanogênicas acetoclásticas utilizam o acetato como fonte de carbono e energia para produzir gás carbônico e metano, e as arqueas hidrogenotróficas utilizam gás carbônico bem como hidrogênio, como fonte de carbono e acceptor final de elétrons, e fonte de energia, respectivamente (CHERNICHARO, 2010).

3.4. PARÂMETROS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA

Diferentes parâmetros podem ser considerados no processo de digestão anaeróbia (Tabela 4), pois os microrganismos anaeróbios dependem de diversos fatores ambientais (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2010).

Tabela 4. Valores de parâmetros para diferentes etapas de DA.

Parâmetros	Hidrólise/Acidogênese	Metanogênese
Temperatura (°C)	25 – 35	Mesofílica: 32 – 42 Termofílica: 50 – 58
pH	5,2 – 6,3	6,7 – 7,5
Relação C/N	10 – 45	20 – 30
Concentração de matéria seca (%)	< 40	< 30
Potencial redox (mV)	+ 400 a – 300	< - 250
Relação C/N/P/S	500/15/5/3	600/15/5/3
Elementos traço	-	Ni, Co, Mo, Se

Fonte: Adaptado de DEUBLEIN e STEINHAUSER, (2010).

Dentre os parâmetros existentes, destacam-se: temperatura; pH, alcalinidade e ácidos voláteis; relação C/N; e substâncias inibidoras, exemplificados abaixo.

3.4.1. TEMPERATURA

Cada microrganismo no processo de digestão anaeróbia (da mesma maneira que outros processos biológicos) depende de uma faixa específica de temperatura, portanto, variações bruscas desse parâmetro podem acarretar em inibição de bactérias e arqueas envolvidas no processo de digestão (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2010; KHANAL, 2008).

Existem três condições de temperatura na qual os microrganismos dividem-se, sendo estas: Psicofílica (T: < 25 °C), Mesofílica (T: 35 – 40 °C) e Termofílica (T: 55°C).

Algumas características dos microrganismos mesofílicos são: apresentam a maior parte de microrganismos metanogênicos; a inibição de NH_4^+ é reduzido devido ao menor teor de NH_3 ; e o balanço de energia é melhor que na faixa termofílica. Em contrapartida, os microrganismos termofílicos apresentam uma taxa de degradação aproximadamente 50% maior em relação à psicofílica e mesofílica.

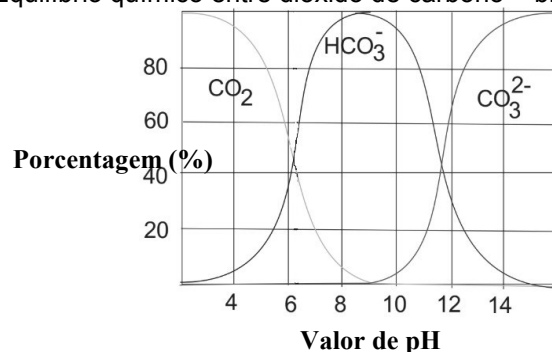
3.4.2. pH, ALCALINIDADE E ÁCIDOS VOLÁTEIS

Os parâmetros de pH, alcalinidade e ácidos voláteis estão intimamente relacionados entre si no processo de digestão anaeróbia. Para tanto, cada microrganismo apresenta uma faixa ótima de pH, que varia com o tipo de microrganismo envolvido bem como o substrato utilizado no sistema. As arqueas metanogênicas apresentam atividade em uma faixa de pH entre 6,0 e 8,0, embora o valor ótimo das mesmas situa-se entre 6,6 e 7,4. Já as bactérias produtoras de ácidos trabalham em uma faixa menor de pH, que pode chegar até 4,5 (CHERNICHARO, 2010).

Na prática, é desejável que se mantenha um valor de pH próximo à neutralidade para não comprometer a metanogênese (etapa limitante no processo) e atender as bactérias acidogênicas (KHANAL, 2008).

O processo de digestão anaeróbia deve apresentar um equilíbrio entre o valor de pH e concentrações de dióxido de carbono – bicarbonato – carbonato, de maneira que o mesmo não decresça e acidifique o meio (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2010). Na Figura 4 é apresentado o equilíbrio químico entre estes compostos (CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-}) em função de suas diferentes concentrações (em %) e valores de pH.

Figura 4. Equilíbrio químico entre dióxido de carbono – bicarbonato – carbonato.



Fonte: Adaptado de DEUBLEIN e STEINHAUSER, (2010).

Observa-se na Figura 4 que em pH 4, todo o CO₂ está presente como molécula livre, enquanto que em pH próximo a 6,0, com valor de 6,52 (próximo à neutralidade), há o ponto de equilíbrio entre as formas gasosas e solúveis no sistema. Conforme o pH aumenta, o CO₂ dissolvido produz ácido carbônico, liberando íons de hidrogênio no meio, e com o contínuo aumento do pH, todo o dióxido de carbono apresenta-se dissolvido na forma de carbonato. Em resumo não é desejável o aumento e nem o decréscimo de pH, pois ocasionam dissociação ou liberação de CO₂ no meio, respectivamente (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2010).

3.4.3. RELAÇÃO C/N

Esse parâmetro representa a relação entre a parcela de carbono e nitrogênio total presente nos substratos de interesse. Para tanto, a relação C/N não deve ser demasiadamente alta ou baixa, pois uma relação C/N alta (maior parcela de carbono) ocasiona desequilíbrio para o metabolismo dos microrganismos, devido à carência de proteínas advindas da falta de nitrogênio no meio (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2010). Em contrapartida, relação C/N baixa (maior parcela de nitrogênio), pode promover acúmulo de amônia, fazendo com que o valor de pH aumente, causando toxicidade ao meio anaeróbio (KOTHARI et al., 2014).

Vale ressaltar que o valor ótimo para a relação C/N varia conforme o tipo de substrato e das fontes de digestibilidade do carbono e nitrogênio. Alguns estudos recomendam uma relação C/N de 20/1 a 30/1, com um valor ótimo de 25/1 de carbono e nitrogênio, respectivamente. (KOTHARI, et al., 2014; ESTEVEZ et al., 2012).

Alguns valores para a relação C/N da cama de peru encontrados na literatura variaram de 6,5 a 41 (Cantrell et al. 2012; Diaz et al., 2012; Aviani et al. 2010; Kim et al. 2009; Costa et al., 2008; Gonçalves et al., 2013).

3.4.4. SUBSTÂNCIAS INIBIDORAS

Qualquer substância em elevadas concentrações pode inibir os microrganismos anaeróbios (CHERNICHARO, 2010). Dentre estas, destacam-se a amônia, metais pesados, sulfetos, ácidos graxos de cadeia longa, cianetos, fenóis e compostos halogenados (KHANAL, 2008).

A concentração de substâncias bem como a adaptação dos microrganismos são fatores determinantes para inibição (ou não) em processos anaeróbios, isso porque alguns microrganismos anaeróbios apresentam capacidade de aclimatação e degradação de compostos tóxicos (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2010).

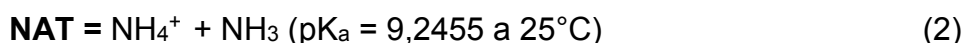
Na Tabela 5 são apresentadas algumas substâncias que causam inibição em determinadas concentrações, além de observações pertinentes aos parâmetros relacionados à DA (BMELV, 2010).

Tabela 5. Substâncias inibidoras e concentrações tóxicas no processo de DA.

Parâmetro	Concentração de inibição	Observação
Oxigênio	> 0,1 mg L ⁻¹	Inibe as arqueas metanogênicas.
Sulfeto de hidrogênio	> 50 mg L ⁻¹ H ₂ S	O efeito inibitório aumenta com o abaixamento do pH.
Ácidos graxos voláteis	> 2000 mg L ⁻¹ Hac em pH 7,0	O efeito inibitório aumenta com o abaixamento do pH.
Nitrogênio amoniacal	> 3500 mg L ⁻¹ NH ₄ ⁺ em pH 7,0	O efeito inibitório aumenta com valores de pH e temperatura maiores.
Metais pesados	Cu > 50 mg L ⁻¹ Zn > 150 mg L ⁻¹ Cr > 100 mg L ⁻¹	Apenas metais dissolvidos apresentam efeito inibidor.

Fonte: Adaptado de BMELV, (2010).

Substratos com elevadas concentrações de nitrogênio podem causar inibição no processo de digestão anaeróbia. A inibição por nitrogênio amoniacal total (NAT) depende do equilíbrio entre a forma do mesmo em íon amônio (NH₄⁺) e amônia livre (NH₃) bem como valor de pH, conforme apresenta a Equação 1 e 2 (KHANAL, 2008).



As arqueas metanogênicas sofrem com determinadas concentrações de NH_3 , pois essa substância penetra na membrana celular desses microrganismos causando inibição nos mesmos (KHANAL, 2008). Vale ressaltar que existem diferentes valores de concentrações relatadas na literatura por inibição de nitrogênio amoniacal, que variam com as condições de pH e temperatura, bem como inóculos, substratos e períodos de aclimatação (RUIZ, 2014).

3.5. ESTUDOS CINÉTICOS

A cinética da DA é obtida por ensaios laboratoriais, realizado em condições controladas com objetivo de investigar características referentes aos substratos, atividade de microrganismos, inóculo, etc. Tais ensaios cinéticos são testes respirométricos anaeróbios que objetivam avaliar a produção de biogás ou de metano, através da biomassa ou matéria orgânica (representada como sólidos voláteis – SV, demanda química de oxigênio – DQO ou carbono orgânico total – COT) proveniente do inóculo ou do substrato de interesse. Alguns métodos cinéticos existentes são: Atividade metanogênica específica (AME); ISO 11734 (1995); ISO 13641 (2003); ASTM E2170-01 (2001); DIN 38414-8 (1985) e VDI 4630 (2016), descritos estes sucintamente na Tabela 6 (STEINMETZ, 2016).

Tabela 6. Resumo dos métodos cinéticos anaeróbios.

SIGLA	Propósito e/ou aplicação
AME	Representa a atividade metanogênica específica. Pode ser utilizado para mensurar a atividade específica de produção de metano em lodos anaeróbios, comparar inóculos, além de avaliar a eficiência em reatores anaeróbios.
ISO 13641 (2003)	Avalia a influência de compostos químicos no processo de DA, de maneira a determinar a toxicidade anaeróbia.
ISO 11734 (1995)	Apresenta uma descrição para estimar a degradação de diversos compostos químicos orgânicos, através da medida de produção de biogás.
ASTM E2170-01 (2008)	Estima a degradação de substâncias químicas através da medida de produção de biogás, e também por análises químicas da concentração residual.
DIN 38414-8 (1985)	Esta apresenta métodos para mensurar a degradação de efluentes e lodos através da medida da produção de biogás.

3.5.1. VDI 4630

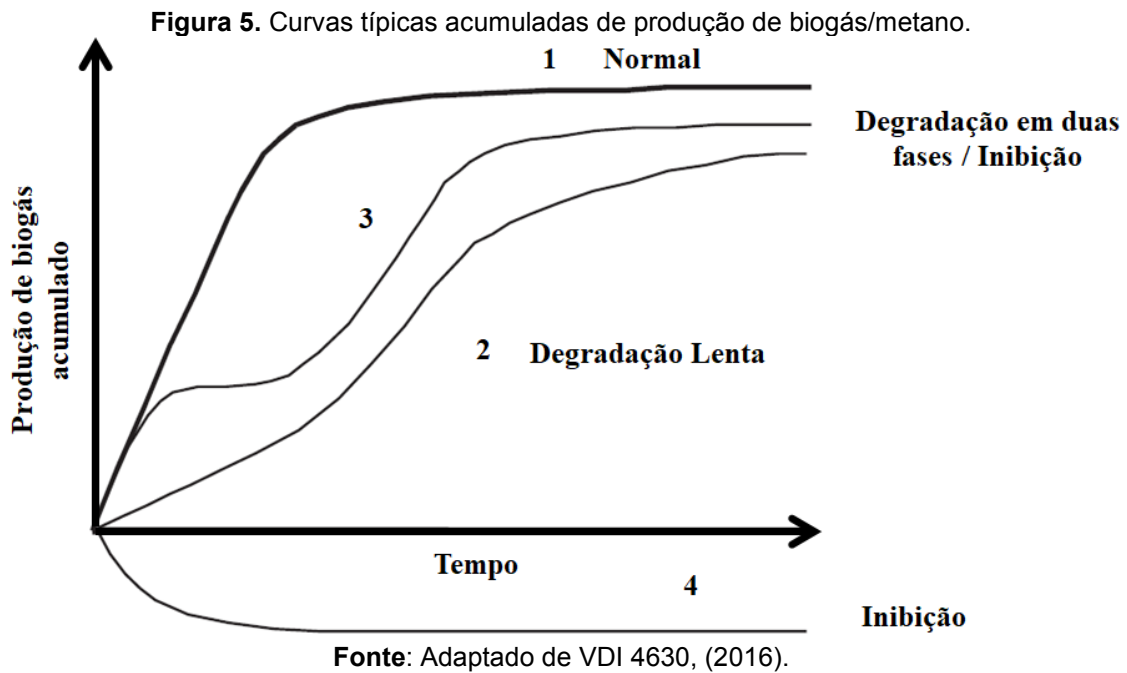
O guia VDI 4630 foi desenvolvida pela Associação Alemã de Engenheiros. A mesma apresenta descrições detalhadas para ensaios cinéticos em batelada, semi-contínuo e contínuo para avaliar o potencial bioquímico de biogás e/ou metano – PBB e PBM (BMP do inglês *Biochemical Methane Potential*), respectivamente, de diferentes substratos orgânicos, com foco em substratos de origem renovável, tais como: agropecuários, resíduos industriais ou urbanos (VDI 4630, 2016).

Algumas informações que os testes em batelada propostos pelo guia VDI 4630 apresentam são: a) possibilidade de produção de biogás e/ou metano de determinado material ou mistura de materiais bem como sua degradabilidade biológica anaeróbia; b) avaliação qualitativa da velocidade de degradação do material investigado; e d) avaliação do efeito inibitório do material estudado em um determinado intervalo de tempo (STEINMETZ, 2016).

No guia VDI 4630, (2016) são destacadas algumas informações referentes ao inóculo anaeróbio utilizado para os testes de fermentação. O inóculo deve conter uma concentração de sólidos voláteis maior que 50% dos sólidos totais. Para determinação da quantidade de inóculo e substrato no teste em batelada, algumas restrições devem ser consideradas, como: 1) a quantidade de substrato não deve exceder a quantidade de inóculo ($SV_{\text{substrato}}/SV_{\text{inóculo}} = 0,5$) para prever inibições no ensaio em batelada; 2) a concentração de sólidos não deve exceder 10%; 3) a produção de biogás a partir do substrato deve ser, no mínimo, 80% maior do que a contribuição do inóculo; e d) deve-se utilizar substâncias ou amostras padrão em ensaios paralelos para avaliar a atividade do inóculo.

Nesse sentido, a produção de biogás proveniente do substrato a ser recuperado (de no mínimo 80%) em um teste de controle, garante que o inóculo apresente atividade biológica satisfatória para realização de testes de PBB/PBM (STEINMETZ, 2016).

Na Figura 5 são apresentadas algumas curvas típicas de produção de biogás/metano acumulado em relação a um período de tempo. A produção líquida de biogás no teste é a diferença entre a produção de biogás do substrato menos a produção de biogás do inóculo (VDI 4630, 2016).



Através da visualização da Figura 5 observa-se que as substâncias degradáveis são convertidas rapidamente em biogás e posteriormente o aumento acentuado da curva caracteriza-se pela produção acumulada de biogás (Normal, 1). Em contrapartida, substâncias pouco degradáveis (substâncias contendo algumas gorduras, lignina), apresentam degradação lenta (2). Uma curva de degradação em duas fases (3) caracteriza-se pela decomposição em dois estágios ou a inibições. Já a curva (4) de inibição, representa uma produção negativa de biogás (VDI 4630, 2016).

Outra consideração pertinente no guia VDI 4630 (2016) é em relação a normalização de volume do biogás em condições padrões de temperatura e pressão (273K e 1013 hPa, respectivamente). A Equação 3 é utilizada para normalização:

$$VN = V * (p - p_w) * \frac{T_0}{p_0} * T \quad (3)$$

Onde:

V_N: Volume de biogás normalizado as condições normais de temperatura e pressão (mL, L ou m³);

V: Volume de biogás produzido (mL, L ou m³);

p: Pressão do biogás no momento da leitura (hPa);

p_w: Pressão de vapor da água em função da temperatura ambiente (hPa);

T₀: Temperatura nas condições normalizadas, 273 K;

p₀: Pressão nas condições normalizadas, 1013 hPa;

T: Temperatura do biogás (K).

4. MATERIAL E MÉTODOS

Primeiramente, os resíduos coletados da cama de aviário de peru foram caracterizados por análises físicas e químicas para avaliar a composição da cama de peru correspondente aos 50 e 120 dias de alojamento. Subsequentemente, foram realizados ensaios cinéticos, para avaliar o comportamento da produção máxima de metano de diferentes proporções de $SV_{\text{substrato}}/SV_{\text{inóculo}}$ da cama de peru de 50 dias. Ainda, foram realizados novos ensaios cinéticos para avaliar o potencial bioquímico de biogás e metano da cama de peru com tempo de uso de 50, 120 e maior que 400 dias de alojamento.

Posteriormente, a partir de um aviário padrão de perus e da produção de carne de peru, bem como valores de PBM das amostras coletadas de diferentes dias de alojamento, foram calculados indicadores de produção brasileira de metano de cama de peru. Além disso, propôs-se diferentes cenários para o manejo da cama de peru a fim de simular a implementação de um biodigestor no aviário. Também foram realizados indicadores e cenários para a cama de frango, considerando dados de um sistema de frangos de corte.

A caracterização física e química e os testes cinéticos foram realizados no laboratório de estudos de biogás (LEB), na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa Suínos e Aves, localizada em Concórdia – SC.

4.1. AMOSTRAGEM

Para avaliação da influência do período do alojamento na qualidade da cama, foram coletadas amostras após 50 e 120 dias, as quais foram coletadas em uma granja de terminação de perus machos no município de Francisco Beltrão – PR.

A amostra com mais de 400 dias de alojamento refere-se à produção do “resíduo final” (retirada de todo material de cama de peru do aviário) de diferentes granjas de terminação de perus machos e fêmeas. Essa cama de peru foi coletada de três propriedades diferentes, localizadas no município de Itapejara d’Oeste e Francisco Beltrão – PR (MOSCHEN, 2017).

As três amostras (50, 120 e maior que 400 dias) coletadas foram armazenadas no freezer a uma temperatura de -4°C , sendo que as mesmas se constituem principalmente de elevadas quantidades de excretas e maravalha.

4.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA

Na Tabela 7 são apresentados os parâmetros e metodologias/equipamentos adotados na caracterização física e química dos resíduos da cama de peru de 50 e 120 dias de alojamento.

Tabela 7. Parâmetros e metodologias/equipamentos utilizados na pesquisa.

Parâmetro	Metodologia/Equipamento
pH	pHmetro (APHA, et al., 2012) / Hanna HI 8424
Pré-matéria seca (% m m ⁻¹)	Gravimetria (APHA, et al., 2012)
Matéria Seca (% m m ⁻¹)	Gravimetria (APHA, et al., 2012)
Cinzas (% m m ⁻¹)	Gravimetria (APHA, et al., 2012)
NTK (mg kg ⁻¹)	AOAC 984.13; AOAC 981.1/ Volumetria (Kjeldahl em sólidos)
C _{total} (%)	Elementar CHN em sólidos
Poder calorífico superior – via Energia Bruta (MJ kg ⁻¹)	Calorimetria / Leco Corporation. AC500 Automatic Calorimeter Instruction
K (mg kg ⁻¹)	AOAC, 956.01 (APHA, et al., 2012) / Fotômetro de chama microbinal B462
P _{total} (mg kg ⁻¹)	AOAC 958.01 (APHA, et al., 2012) / Varian, INC. Cary® 50 UV-Vis
N-NH ₃ (mg kg ⁻¹)	Volumetria (Kjeldahl em sólidos) Tecador Kyttec System 1026 Distilling
Sólidos Totais (% m m ⁻¹)	Gravimetria (APHA, et al., 2012)
Sólidos Voláteis (% m m ⁻¹)	Gravimetria (APHA, et al., 2012)
Sólidos Fixos (% m m ⁻¹)	Gravimetria (APHA, et al., 2012)

Fonte: Própria (2019).

4.3. POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO (PBM)

Primeiramente foram testadas diferentes relações de $SV_{\text{substrato}}/SV_{\text{inóculo}}$ da cama de peru de 50 dias de alojamento (a qual apresentou maior valor de NTK) para verificar o comportamento do PBM do substrato em relação ao inóculo.

Foram utilizados quatro tratamentos com diferentes relações $SV_{\text{substrato}}/SV_{\text{inóculo}}$ (0,2; 0,3; 0,4; 0,5) de maneira a garantir que a quantidade de substrato não exceda a quantidade de inóculo (VDI 4630, 2016), causando inibição. Também foram empregados ensaios controle, em paralelo, sem adição de substratos para observar a produção de biogás proveniente do inóculo, assim como pela avaliação da produção de biogás de substrato padrão de celulose microcristalina (20 µm, Sigma-Aldrich/Alemanha).

Os ensaios foram realizados em triplicata e em batelada, com o auxílio de reatores com capacidade de volume de 500 mL. A produção diária de metano foi mensurada utilizando equipamento automático de testes de potencial de metano – AMPTS II, com agitação automática dos substratos a cada 10 minutos durante 35 dias (BIOPROCESS CONTROL, 2016). As amostras foram mantidas em temperaturas mesofílicas (37 ± 1 °C),

VDI 4630 (2016). O inóculo anaeróbio mesofílico utilizado foi de acordo com Steinmetz, et al., (2016), conforme apresenta item 4.5.

Foi utilizado o modelo não linear de Gompertz (Equação 4) para ajustar os dados de produção de metano. Essa equação é comumente utilizada para simular a produção cumulativa de metano e avaliar o potencial e velocidade máxima de produção de CH₄, além do tempo mínimo para produção de CH₄ (fase lag) (SELVARAJ et al., 2018; PELLERA e GIDARAKOS, 2016). Os coeficientes cinéticos e análises estatísticas foram determinados com o auxílio do software *Statistica 12 (trial®)* (StatSoft).

$$M(t) = A * \exp \left(- \exp \left(\left(\frac{r_m}{A} \right) * (\lambda - t) * e^{\mathbf{1}} + \mathbf{1} \right) \right) \quad (4)$$

Onde:

M (t): Produção acumulada de metano (mL_{N CH₄} .gSV⁻¹) no tempo t (d);

A: Potencial de produção máxima de metano (mL_{N CH₄} .gSV⁻¹);

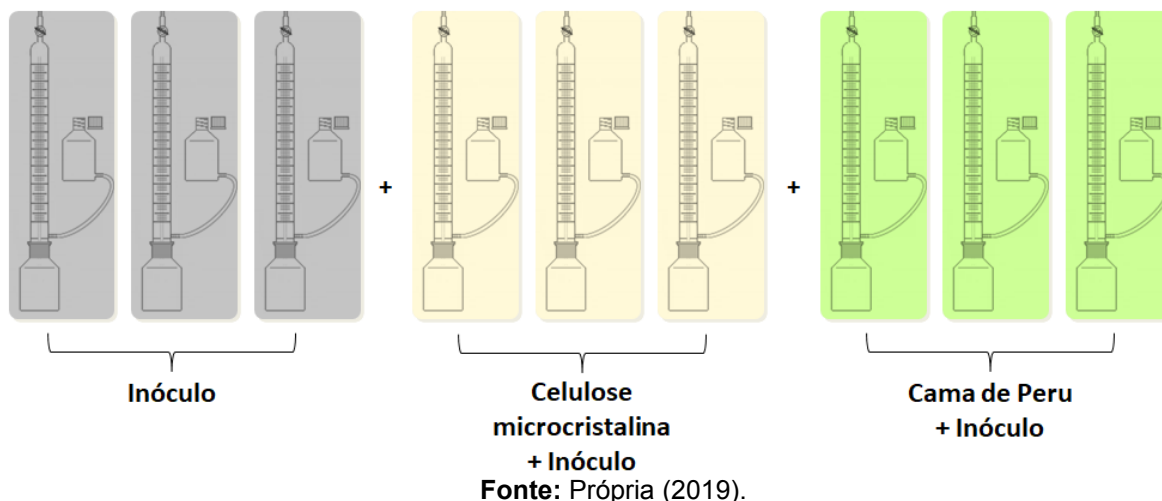
r_m: Velocidade máxima de produção de metano (mL_{N CH₄} .gSV⁻¹ d⁻¹);

λ: fase lag (d).

4.4. POTENCIAL BIOQUÍMICO DE BIOGÁS (PBB)

Após a validação dos ensaios cinéticos das diferentes relações testadas de SV_{substrato}/SV_{inóculo}, foram realizados novos ensaios em batelada e em triplicata, com o auxílio de reatores acoplados a tubos eudiômetros graduados, com capacidade de volume de 250 mL e 500 mL, respectivamente.

Uma batelada de reatores em triplicata foi preenchida somente com o inóculo, outra batelada com celulose microcristalina e inóculo, e os demais reatores com os substratos da cama de peru e inóculo, conforme apresentado na Figura 6. O controle positivo para garantir a viabilidade da atividade biológica do inóculo também foi a celulose microcristalina (20 μm, Sigma-Aldrich/Alemanha), com valor de biogás conhecido de 740-750 NmL gSV_{substrato}⁻¹. A VDI 4630 (2016) recomenda que o limite mínimo de recuperação de biogás deverá ser equivalente a 80% (600 NmL gSV_{substrato}⁻¹).

Figura 6. Aparato experimental.

Para condução dos testes a temperatura foi mantida em faixa mesofílica ($37 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$), com auxílio de banhos térmicos com controlador de temperatura, conforme os procedimentos recomendados pelos guias VDI 4630 (2016) e DIN 38414-8 (1985). No momento da montagem dos ensaios, os reatores e eudiômetros foram previamente purgados com nitrogênio gasoso, para garantir condições de anaerobiose.

No desenvolvimento dos testes cinéticos, a produção de biogás foi monitorada por deslocamento de líquido selante ao longo do tubo eudiométrico, sendo este composto por sulfato de sódio decahidratado ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), ácido sulfúrico (H_2SO_4) e alaranjado de metila ($\text{C}_{14}\text{H}_{14}\text{N}_3\text{NaO}_3\text{S}$) (DIN 38414-8, 1985).

A produção de biogás foi considerada estabilizada quando o valor diário da produção de biogás foi igual ou inferior a 1% do total produzido, conforme estabelecido pela VDI 4630 (VDI 4630, 2016). O volume de biogás foi corrigido as condições normais de temperatura e pressão (273,15K e 1013hPa, respectivamente).

4.5. INÓCULO

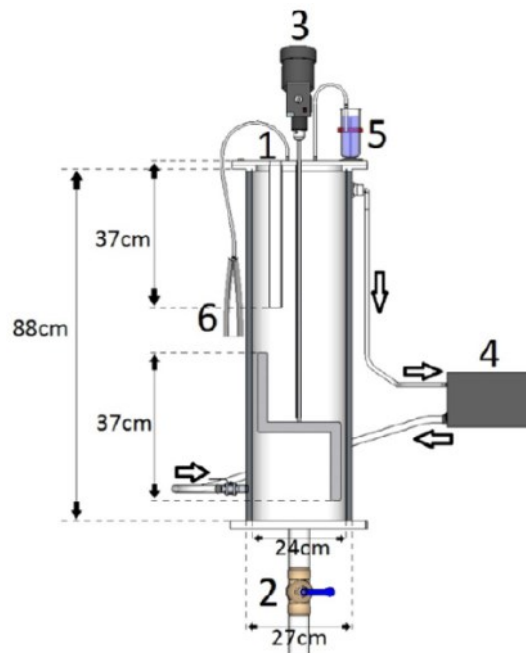
O inóculo anaeróbico mesofílico é composto de partes iguais dos inóculos iniciadores: a) lodo anaeróbico proveniente de reator UASB alimentado com dejetos suínos; b) lodo anaeróbico de reator UASB de indústria de gelatina; e c) dejetos bovinos frescos. A atividade específica da mistura do inóculo é de $0,184 \text{ [gCH}_4\text{-DQO (gSSV d}^{-1}\text{)]}$ (STEINMETZ, et al., 2016).

A mistura do inóculo aclimatado ($37 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$) é realizada em um reator do tipo CSTR, com volume de 40 L (Figura 7), a qual é alimentada diariamente com carga orgânica

volumétrica de $0,3 \text{ gSV (L d}^{-1}\text{)}$ composto por proteínas, carboidratos e lipídeos, sendo estes: a) Grama seca como fonte de celulose, lignina e clorofila (30% SV); b) Leite em pó como fonte de lactose, aminoácidos, lipídeos e alguns micronutrientes (25% SV); c) Ração à base de milho para suínos (30% SV); e d) Óleo vegetal para enriquecimento do substrato lipídico (15% SV).

Antes de iniciar os ensaios cinéticos, o inóculo permaneceu sem alimentação em um período de 7 dias, visando a redução da contribuição da produção de biogás do mesmo, que deve ser inferior a 10% da produção do substrato (STEINMETZ et al., 2016; VDI 4630, 2016).

Figura 7. CSTR utilizado como inóculo mesofílico para ensaios em batelada. Esquema do reator Tubo de alimentação (1), válvula (2), sistema de mistura (3), banho de água externo (4), vedante da coluna de água (5) e bag para coleta de gás (6).



Fonte: Adaptado de STEINMETZ et al., (2016).

4.6. ANÁLISE DO BIOGÁS

Para analisar a composição do biogás, os gases foram coletados com o auxílio de um *bag* (plástico/folha de alumínio, Hermann Nawrot AG, Germany), e determinados utilizando o equipamento BIOGAS5000 (Geotech, UK), o qual faz medições de CH_4 , CO_2 , O_2 (%) e H_2S (ppm).

4.7. INDICADORES

Para o cálculo dos indicadores foram coletados dados de: quantidade e peso de aves de perus por lote; área da granja; lotes e resíduos produzidos anualmente provenientes de um aviário de terminação de perus machos. Ainda, foram utilizados os valores de PBM da cama de peru de 50, 120 e mais de 400 dias de alojamento. Da mesma maneira, foram considerados dados de uma granja de frangos de corte, bem como valores de PBM da cama de frango para os cálculos de indicadores de aves de frango de corte.

Os dados de produção brasileira de carne de peru e frango nos anos de 2010 a 2017 foram coletados da Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA, 2018).

4.8. CENÁRIOS

Foram realizados cenários para simular a implementação de biodigestores em uma granja de perus e de frangos de corte. Para tanto, foram considerados os valores de PBM da cama de peru com 50, 120 e mais de 400 dias de alojamento da presente pesquisa, bem como valores de PBM da cama de frango com 504 dias (MARCHIORO, et al., 2018).

Os cálculos de volume diário de geração de CH₄ (m³ dia⁻¹) e potencial de geração de energia elétrica (kWh dia⁻¹) foram realizados com o auxílio das equações (5) e (6), descritas a seguir (LUISINA et al., 2018):

$$V_{CH4N} = PBM * SV * RP \quad (5)$$

Onde:

V_{CH4N}: Volume diário de geração de CH₄ (m³ dia⁻¹);

PBM: Potencial Bioquímico de Metano (LN CH₄.kg_{SV} adic⁻¹);

SV: Concentração de sólidos voláteis da cama de aviário (kg_{sv} kg_{sv}⁻¹);

RP: Resíduos produzidos (kg dia⁻¹);

1 m³: 1.000 L.

$$EE = V_{CH4N} * \eta_c * \rho_{CH4} * PCI_{CH4} * \eta_e * f_{cap} \quad (6)$$

Onde:

EE: Potencial de geração de energia elétrica (kWh dia⁻¹);

V_{CH_4N} : Volume diário de geração de CH_4 ($m^3 \text{ dia}^{-1}$);

η_c : Eficiência da captura de biogás (85%);

ρ_{CH_4} : Densidade de CH_4 ($0,656 \text{ kg m}^{-3}$);

PCI_{CH_4} : Poder calorífico inferior do CH_4 ($11.900 \text{ kcal kg}^{-1}$);

η_e : Eficiência da conversão de energia térmica a elétrica (30%);

f_{cap} : Fator de capacidade que representa a disponibilidade total do sistema (90%);

1 kcal: $0,00116 \text{ kWh}$.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA

As duas amostras coletadas de cama de peru foram referentes a um sistema de terminação de machos pesados de perus, de 50 e 120 dias de confinamento. As mesmas foram caracterizadas por análises físicas e químicas, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8. Caracterização físicas e químicas das amostras coletadas no aviário.

Parâmetro	Cama de Peru (50 d) ¹	Cama de Peru (120 d) ²	(Moschen, 2017) ³
pH	6,89	8,55	9,12
Pré-matéria seca (% m m ⁻¹)	47,70	44,41	-
Matéria Seca (% m m ⁻¹)	44,48	41,84	-
Cinzas (% m m ⁻¹)	11,14	15,97	-
NTK _{total} (mg kg ⁻¹)	25487	22398	-
C _{total} (% m m ⁻¹)	19,06	12,81	-
Poder calorífico superior (MJ kg ⁻¹)	15,32	11,82	-
K (mg kg ⁻¹)	9035	10121	-
P _{total} (mg kg ⁻¹)	7790	9949	-
N-NH ₃ (mg kg ⁻¹)	7607	13471	-
Sólidos Totais (% m m ⁻¹)	43	40,5	63,6
Sólidos Fixos (% m m ⁻¹)	11,4	16,7	19,9
Sólidos Voláteis (% m m ⁻¹)	32,2	24,6	43,7
SV/ST	0,75	0,60	0,68
Relação C/N	7,62	5,33	-

^{1,2}Cama de Peru referente a 50 e 120 de alojamento, respectivamente.

³Cama de Peru acima de 400 dias de alojamento.

Fonte: Própria (2019).

5.1.1. SV/ST

A maior relação SV/ST foi encontrada para os 50 dias e acima de 400 dias de alojamento, representando maior parcela de matéria orgânica (em relação à cama de 120 dias), com potencial para digestão anaeróbia. Valores próximos para essa relação foram encontrados nos trabalhos de Chamy et al., (2011), Chamy et al., (2011a), Chamy et al., (2012), que foi de 0,71 de SV/ST.

5.1.2. Poder calorífico superior

Os resíduos de 50 dias apresentaram poder calorífico superior de 15,32 MJ kg⁻¹, próximo ao encontrado por Cantrell et al., (2012), que encontraram valor de 15,48 MJ kg⁻¹ para a cama de peru. Isso pode ser explicado pela composição da cama aviária, que

apresentou menor quantidade de maravalha e maior quantidade de excretas (CANTRELL et al., 2012), assim como na presente pesquisa.

5.1.3. pH

Os microrganismos do processo de digestão anaeróbia apresentam uma faixa ótima de pH, variando entre 5,2 – 6,3 para hidrólise e acidogênese e 6,7 – 7,5 para metanogênese, sendo desejável que o mesmo se mantenha próximo a neutralidade para atender o requisito do consórcio microbiano ali presente (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2010; KHANAL, 2008). Nesse sentido, o valor de pH que apresentou valor próximo a neutralidade foi a amostra de 50 dias (pH de 6,89).

5.1.4. Relação C/N

O valor ótimo para a relação C/N varia conforme o tipo de substrato e as características de digestibilidade do carbono e nitrogênio. Algumas pesquisas recomendam uma relação C/N de 20/1 a 30/1 para a digestão anaeróbia (KOTHARI, et al., 2014; ESTEVEZ et al., 2012; KHANAL, 2008). A relação de C/N da cama de peru de 50 e 120 dias, apresentou valores de 7,62 e 5,33, respectivamente, o que representa alta concentração de nitrogênio e pode vir a ocasionar inibições no processo de digestão anaeróbia por amônia livre, a qual é dependente do valor de pH e temperatura (KHANAL, 2008). Nesse contexto, evidencia-se a importância de avaliar as diferentes relações de $SV_{\text{substrato}}/SV_{\text{inóculo}}$ da produção máxima de metano, para verificar a existência de uma possível inibição no processo.

5.1.5. pH, nitrogênio amoniacal e sólidos voláteis

O aumento da idade da cama de peru de 50 para 120 dias de alojamento foi proporcional para os valores de nitrogênio amoniacal ($N-NH_3$ 50d e 120d: 7607 mg kg⁻¹ e 13471 mg kg⁻¹), pH (50d e 120d: 6,89 e 8,55) e sólidos voláteis, fato que possivelmente indique degradação da matéria orgânica (SV_{50d} e SV_{120d} : 32,2% e 24,6%) e mineralização da amônia presentes na cama.

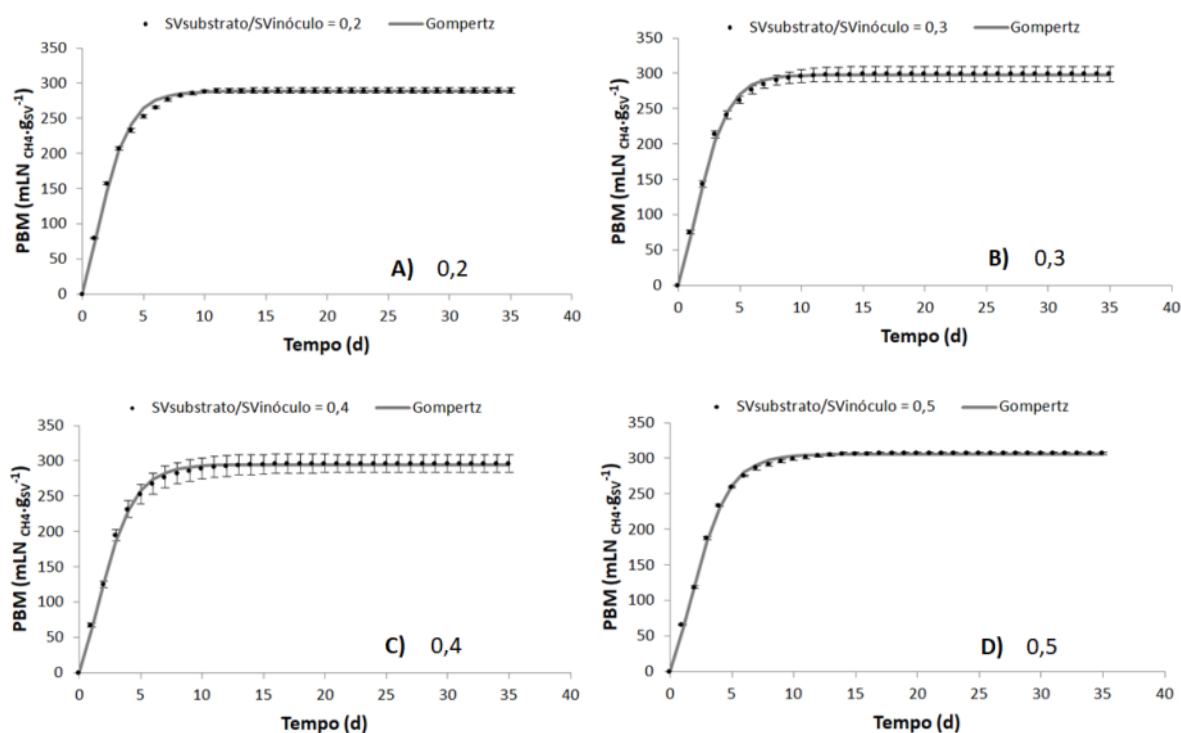
5.2. POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO (PBM)

Foram testadas quatro relações de $SV_{\text{substrato}}/SV_{\text{inóculo}}$ (0,2; 0,3; 0,4 e 0,5) de uma amostra de cama de peru, para avaliar possíveis inibições no processo de digestão anaeróbia.

A celulose microcristalina apresentou 84% de recuperação de biogás, indicando atividade satisfatória do inóculo mesofílico ($>637 \text{ NmL}_{\text{biogás}} \text{ gSV}_{\text{substrato}}^{-1}$), conforme preconiza VDI 4630 (2016) e HOLLIGER et al., (2016).

Os resultados obtidos de produção de CH_4 variaram entre 92,9 a 95,5 $\text{LN}_{\text{CH}_4} \cdot \text{kg}_{\text{MF}}^{-1}$, sendo que o maior valor para a produção máxima de CH_4 foi encontrado aplicando-se relação $SV_{\text{substrato}}/SV_{\text{inóculo}}$ de 0,5 ($305,8 \text{ mL}_{\text{LN}} \text{ CH}_4 \cdot \text{gSV}^{-1}$), utilizando o modelo de Gompertz (Figura 8). Os resultados encontrados para a produção máxima de CH_4 , das diferentes relações, apresentaram valor menor que 5% de coeficiente de variação, conforme recomendam HOLLIGER et al., (2016). Os valores de pH tiveram um acréscimo do início ao final dos testes cinéticos que variaram de 7,48 a 7,57 para 7,78 a 7,97.

Figura 8. Perfil da produção acumulada de CH_4 da amostra de cama de peru (50 dias) nas diferentes relações de $SV_{\text{substrato}}/SV_{\text{inóculo}}$ estudadas.



Fonte: Própria (2019).

Os quatro modelos teóricos exibiram ajuste satisfatório com coeficientes de determinação superiores a 0,99. Entretanto, não houve diferença estatística entre as médias para os valores de potencial de CH₄ nas diferentes relações SV_{substrato}/SV_{inóculo} da cama de peru (Tabela 9), representando que os intervalos de relação de 0,2 a 0,5 de SV_{substrato}/SV_{inóculo} podem ser utilizados para os ensaios de potencial bioquímico de metano, conforme metodologia prescrita pela VDI 4630, (2016), sem causar inibição nos testes cinéticos.

Tabela 9. Dados cinéticos obtidos pelo modelo de Gompertz ajustados aos dados experimentais dos ensaios de produção de CH₄ das diferentes proporções de SV_{substrato}/SV_{inóculo} estudadas.

Relação SV _{substrato} /SV _{inóculo}	A (mL _N CH ₄ .g _{SV} ⁻¹)	r _m (mL _N CH ₄ .g _{SV} ⁻¹ d ⁻¹)	λ (d)	R ²
0,2	288,4 ± 3,4 ^a	72,82 ± 0,5 ^{bc}	<0,01 ^d	0,9929 ± 0,06
0,3	298,0 ± 10,1 ^a	74,1 ± 3,3 ^c	0,07 ± 0,07 ^{de}	0,9960 ± 0,07
0,4	294,8 ± 13,2 ^a	66,6 ± 5,0 ^{bc}	0,10 ± 0,0 ^{de}	0,9961 ± 0,19
0,5	305,8 ± 2,0 ^a	66,0 ± 0,3 ^b	0,16 ± 0,01 ^e	0,9972 ± 0,02

As médias seguidas de mesmas letras nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (5%).

A: Potencial máximo de CH₄ (mL_N CH₄ .g_{SV}⁻¹);

r_m: Velocidade máxima de produção de CH₄ (mL_N CH₄ .g_{SV}⁻¹d⁻¹);

λ: fase lag (d).

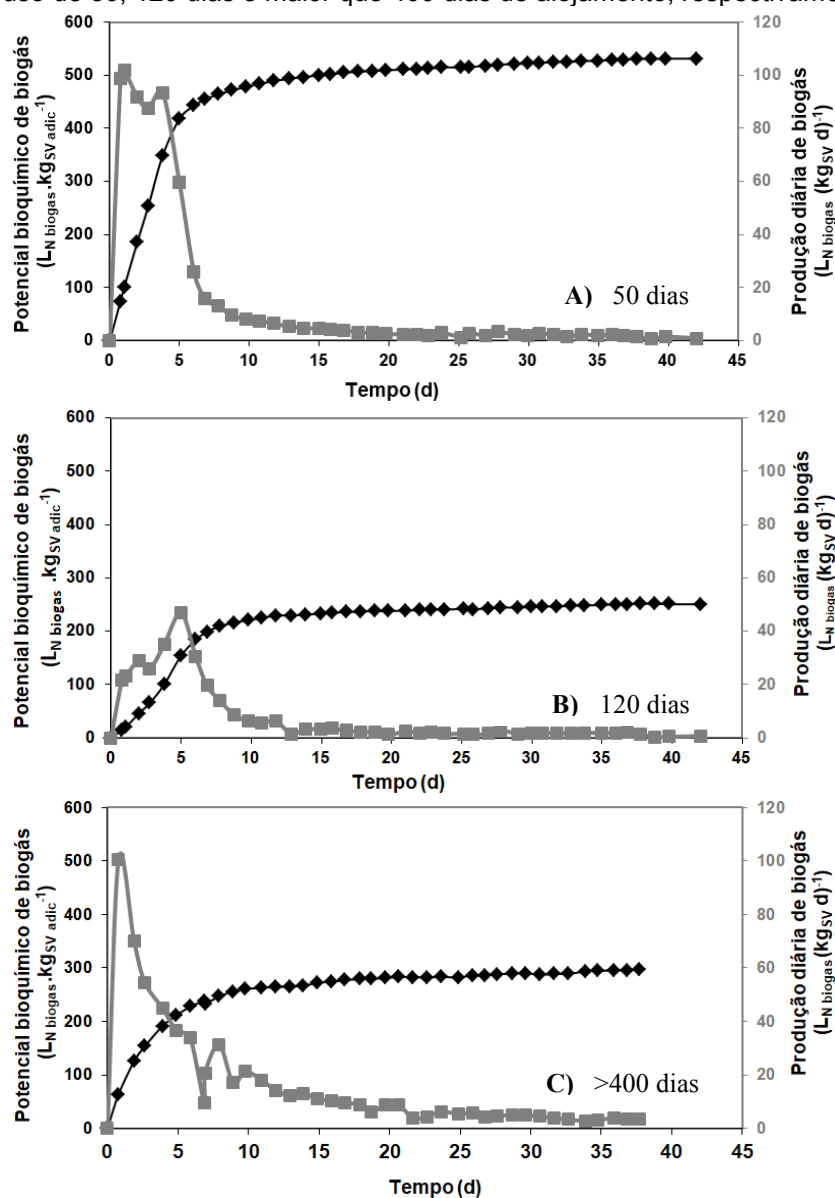
Fonte: Própria (2019).

5.3. POTENCIAL BIOQUÍMICO DE BIOGÁS (PBB)

De maneira a avaliar a influência do manejo da cama de peru (se a retirada dos resíduos é influenciada pelo tempo em que os mesmos permanecem no aviário) nas características e no potencial bioquímico de biogás e metano, efetuaram-se duas coletas em uma mesma propriedade, após 50 e 120 dias de alojamento dessas aves. Para avaliar uma amostra que represente uma cama de aviário de peru “velha”, ou seja, com maior tempo em utilização na granja (proveniente da retirada de todo material de dentro do aviário), foi utilizada uma amostra coleta conforme Moschen, (2017), decorrente de três propriedades diferentes, de cama de peru com mais de 400 dias de alojamento.

Na Figura 9 são apresentadas as produções acumuladas do potencial e produção diária de biogás da cama de aviário com tempo de uso de 50, 120 e maior que 400 dias, respectivamente.

Figura 9. Perfil da produção acumulada de biogás x produção diária de biogás da cama de peru com tempo de uso de 50, 120 dias e maior que 400 dias de alojamento, respectivamente.



Fonte: Própria (2019).

Observa-se que houve maior produção de biogás para a cama de aviário de peru de 50 dias ($532 \pm 26 \text{ mLN biogas.gSV adic}^{-1}$) em relação a cama de 120 dias ($252 \pm 14 \text{ mLN biogas.gSV adic}^{-1}$). O potencial bioquímico de biogás da amostra acima de 400 dias foi de $297 \pm 9 \text{ mLN biogas.gSV adic}^{-1}$. A concentração de CH_4 para as três amostras foi de 54, 54 e 45%, representando um PBM ($\text{mLN CH}_4.\text{gSV adic}^{-1}$) de 289 ± 14 ; 135 ± 8 e 132 ± 4 para 50, 120 e maior que 400 dias de alojamento, respectivamente.

A cama de peru com tempo maior que 400 dias de alojamento (tempo de uso), apresentou maior valor de PBB ($\text{mLN biogas.gSV adic}^{-1}$) que a cama de peru de 120 dias. Entretanto, ambas as amostras apresentaram valores muito próximos para PBM (mLN

$\text{CH}_4 \cdot \text{g}_{\text{SV}} \cdot \text{adic}^{-1}$), podendo ser justificado pela maior concentração de SV (43,7%) e menor concentração de CH_4 (45%) da cama de peru com tempo de uso maior que 400 dias. Amaral et al., (2016) avaliaram a separação sólido-líquido de dejetos suínos por peneiramento e sedimentação, e observaram que a fração sobrenadante do dejetos suínos apresentou maior valor de PBB ($\text{m}^3 \text{N} \cdot \text{kg}_{\text{SV}} \cdot \text{adic}^{-1}$), porém com baixa concentração de SV, influenciando no PBM do substrato. Para tanto, destaca-se a importância dos sólidos voláteis e consequentemente da matéria orgânica dos substratos, para maior aproveitamento energético do metano.

Vale ressaltar que é desejável menor quantidade de resíduos para estocagem em uma granja, do ponto de vista de manejo da cama de peru. Nesse sentido, a cama de peru de 120 dias destaca-se em relação à de acima de 400 dias pelo valor aproximado de PBM das amostras, bem como pela menor quantidade de resíduos em função do menor tempo de alojamento dos mesmos.

A produção diária de biogás máxima ocorreu em menos de dois dias de teste para a cama de peru de 50 e maior que 400 dias. Em contrapartida, a cama de peru de 120 dias alcançou a produção diária de biogás máxima durante o quinto dia de teste (possível fase lag), podendo indicar limitação na etapa da hidrólise, o que pode ser explicado pela presença de material lignocelulósico presente na maravalha, substrato predominantemente utilizado na cama de peru (CHAUMP et al., 2019; SHRESTHA et al., 2017).

Os resultados dos ensaios cinéticos de PBM para cama de 120 e maior que 400 dias foram 135 ± 8 e $132 \pm 4 \text{ LN } \text{CH}_4 \cdot \text{kg}_{\text{SV}} \cdot \text{adic}^{-1}$, já para a cama de 50 dias foi de $289 \pm 14 \text{ LN } \text{CH}_4 \cdot \text{kg}_{\text{SV}} \cdot \text{adic}^{-1}$. Chamy, et al., (2011) avaliaram a relação inóculo/substrato para cama de peru, bem como realizaram ensaios cinéticos de PBM, chegando a valores de $150 \text{ LN } \text{CH}_4 \cdot \text{kg}_{\text{SV}} \cdot \text{adic}^{-1}$. Diferente do presente trabalho e dos autores anteriores que realizaram ensaios cinéticos de PBM, Ziganshina et al., (2014) avaliaram o rendimento de CH_4 de cama de peru em reator contínuo de tanque agitado – CSTR, e a melhor condição encontrada foi de $120 \text{ LN } \text{CH}_4 \cdot \text{kg}_{\text{SV}} \cdot \text{adic}^{-1}$. Ambos trabalhos com valores próximos de PBM para cama de peru de 120 e maior que 400 dias, porém com valores inferiores que a cama de 50 dias: $289 \pm 14 \text{ LN } \text{CH}_4 \cdot \text{kg}_{\text{SV}} \cdot \text{adic}^{-1}$, que apresentou maior valor de potencial bioquímico de metano. Isso pode ser justificado pela disponibilidade da matéria orgânica presente no substrato (YUN et al., 2018), ou seja, a cama de peru com menor tempo de alojamento apresentou matéria orgânica mais disponível para os microrganismos, resultando em um maior valor de PBM.

5.4. INDICADORES

Na Tabela 10 são apresentados valores para a produção de lotes (PL) e resíduos produzidos (RP) de cama de peru, provenientes de um sistema de terminação de perus machos (MOSCHEN, 2017; VANAZZI, 2018), além da quantidade de resíduos produzidos para esse sistema produtivo, bem como os valores de PBM em matéria fresca.

Tabela 10. Resíduos produzidos em um sistema de terminação de machos pesados e Potencial bioquímico de metano de cama de peru de 50, 120 e maior que 400 dias de alojamento.

	Cama de peru (50 d)	Cama de peru (120 d)	Cama de peru (maior que 400 d)
PBM ($L_N CH_4.kg_{MF\ adic}^{-1}$)¹	93,4 ± 4,6	32 ± 1,8	56,4 ± 1,7
PL (lotes ano⁻¹)²		2,71	
RP (kg lote⁻¹)³		50.000	
RP (kg dia⁻¹)⁴		371	

¹Potencial bioquímico de metano em matéria fresca; ²Produção de lotes de um sistema de terminação de perus machos; ³Resíduos produzidos (cama de peru) de um sistema de terminação de perus machos;

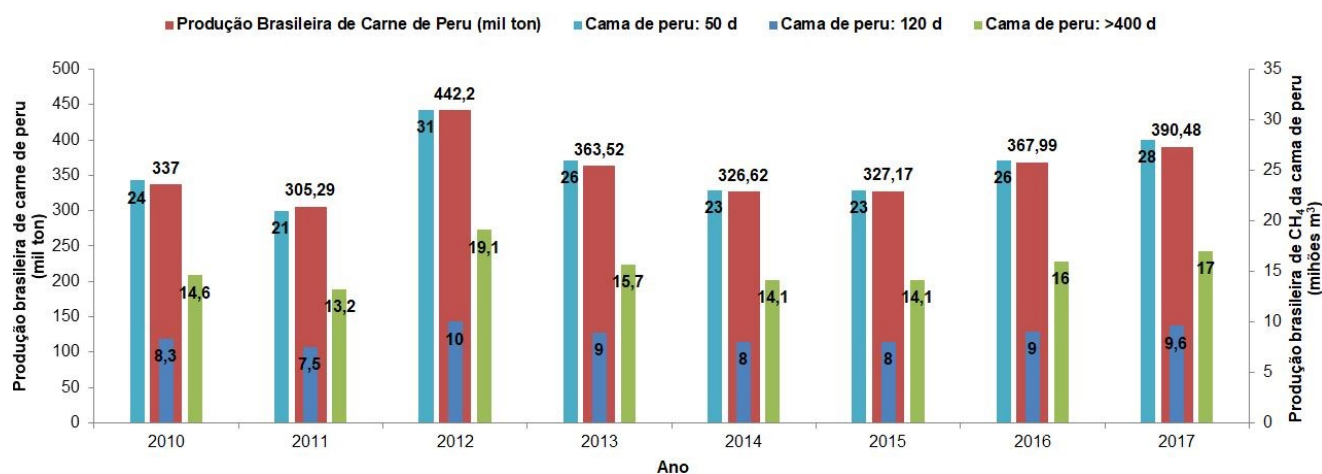
⁴Resíduos produzidos (cama de peru).

Fonte: Própria (2019).

Considerando uma granja de perus machos com área de 1.200 m² com capacidade para abrigar 3,6 mil aves com 18 kg de carcaça inteira cada (MARTINS et al., 2011), e valores de PBM (Tabela 10), foram calculados indicadores de recuperação energética de metano (Figura 10) com a produção confinada de perus nos anos de 2010 a 2017, coletados da Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA, 2018).

Assim, estimou-se que a produção de 1 kg de carcaça inteira de peru correspondeu a geração de 0,77 kg de cama de peru, e com os valores de rendimento de metano (Tabela 10) representou cerca de 71,9; 24,6; e 43,3 L de CH₄ produzidos com a remoção da cama de peru a cada 50, 120 e maior que 400 d de alojamento das aves, respectivamente. Dessa maneira, foi multiplicada a produção anual de carne de peru (mil ton) pela produção de CH₄ (milhões m³) correspondente aos diferentes dias de alojamento da cama de peru.

Figura 10. Produção brasileira de carne de peru de 2010 a 2017 e respectiva produção de metano da cama de peru de 50;120 e maior que 400 dias de alojamento, respectivamente.



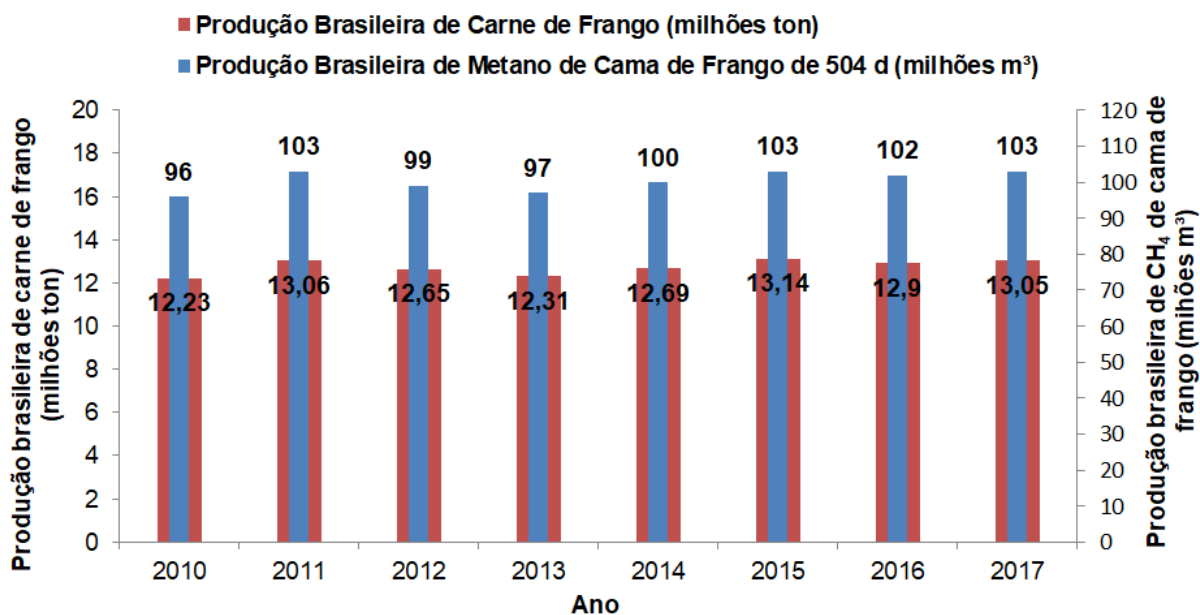
Fonte: Própria (2019).

Com a produção de carne de peru (305 - 442 mil ton) nos anos de 2010 a 2017, poderiam ser produzidos de 7,5 a 31 milhões m³ de metano com os resíduos decorrentes do sistema produtivo de perus confinados.

Na hipótese de comparar a produção em forma de confinamento de aves de perus e frangos, também foram calculados indicadores para o sistema produtivo de frangos. Para tanto, foi considerado uma granja (100m x 12m) de frango de corte com capacidade para alojar 14,5 mil aves, produzindo cerca de 100.000 kg de cama de frango ao final de 12 lotes (1 lote = 42 dias), ou seja, um lote produz aproximadamente 8,33 mil kg de cama de frango (MARCHIORO et al., 2018; DALÓLIO et al., 2017), com geração de 8,7 lotes ano⁻¹ de cama de frango e total de resíduos produzidos de 198 kg dia⁻¹.

Considerando que cada carcaça inteira de frango apresenta 2,625 kg (MIELE et al, 2010) e o rendimento de metano de cama de frango de corte de 12 lotes de 35,9 L_N CH₄.Kg_{MF} adic⁻¹ (MARCHIORO et al., 2018), estima-se que a produção de 1 kg de carcaça inteira de frango de corte corresponde a geração de 0,22 kg de cama de frango e 7,9 L de CH₄ produzidos com a remoção da cama de frango, em intervalo de 504 dias. Na Figura 11, são apresentados os indicadores de recuperação energética de metano para a produção da cama de frango avaliada.

Figura 11. Produção brasileira de carne de frango de 2010 a 2017 e produção de metano da cama de frango de 504 dias de alojamento.



Fonte: Própria (2019).

Através da visualização das figuras 6 e 7, observa-se que a estimativa de produção brasileira de metano (96 a 103 milhões m³) foi superior para a cama de frango, em função da maior quantidade de produção de carne de frango, fruto do apelo cultural brasileiro para consumo de carne dessa ave (12 a 13 milhões ton ano⁻¹) em relação à carne de peru (305 a 442 mil ton ano⁻¹).

Em contrapartida, avaliando um aviário padrão de ambas as aves, o volume produzido de CH₄ (Tabela 11) para o sistema produtivo de frangos de corte foi menor ($V_{CH_4N} = 7 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ para 504 dias de alojamento) que perus ($V_{CH_4N} = 34,3; 12,3; \text{ e } 21,4 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ para 50; 120 e maior que 400 dias, respectivamente), podendo ser explicado pela baixa concentração de CH₄ (40%) da cama de frango (MARCHIORO et al., 2018). Nesse sentido, nas condições dos resíduos avaliadas, trabalhar com cama de peru é uma alternativa interessante do ponto de vista de recuperação energética.

5.5. CENÁRIOS

Foram simulados cenários para o manejo da cama de aviário de peru e frango, de maneira a avaliar a utilização do potencial energético dos resíduos provenientes desses sistemas produtivos. Para simular a implementação de um biodigestor em uma granja de

perus ou frangos de corte, algumas considerações foram avaliadas, como: tipo de biodigestor; concentração de ST (%) do substrato e tempo de retenção hidráulica (TRH).

Na Tabela 11 é apresentada a avaliação técnica para os cenários da cama de peru de 50; 120 e maior que 400 d de alojamento, bem como para a cama de frango (504 d). Foi considerada a simulação para a implementação de um biodigestor do tipo CSTR, o qual apresenta limite de teor de ST de até 12% (WELLINGER et al., 2013). Nesse sentido, tanto a cama de peru quanto a de frango necessitam de diluição para digestão em fase líquida, pela elevada concentração de sólidos presentes nesses substratos (Cama de peru: ST_{50d} : 43%, $m\ m^{-1}$; ST_{120d} : 40%, $m\ m^{-1}$ e $ST_{maior\ que\ 400d}$: 63%, $m\ m^{-1}$; Cama de frango: ST_{504d} : 76%, $m\ m^{-1}$).

Nesse estudo, foi considerado que seriam produzidos 371 e 198 $kg\ dia^{-1}$ de cama de peru e de frango, respectivamente (Tabela 10). Para tanto, foi considerado também uma alimentação de 10 kg de resíduos para cada 100 L de diluição (relação de 1:9), bem como um TRH de 30 dias, para ambos os substratos, resultando em alimentação diária de 3,71 e 1,98 $m^3\ dia^{-1}$, com biodigestores de volume útil de 110 e 60 m^3 para o cenário da cama de peru e frango, respectivamente.

Os cálculos de volume de metano e energia elétrica foram realizados com o auxílio das equações (5) e (6). Os dados de rendimento de metano em matéria fresca, bem como volume de metano para a cama de frango de 12 lotes, foram calculados a partir de dados publicados por Marchioro et al., (2018).

Tabela 11. Avaliação técnica para cama de peru e de frango, para diferentes dias de alojamento.

	Cama de peru (50 d)	Cama de peru (120 d)	Cama de peru (maior que 400 d)	Cama de frango (504d)
ST (% , $m\ m^{-1}$) ¹			10	
TRH (d) ²			30	
V_{CSTR} (m^3) ³		110		60
V_{CH4N} ($m^3\ dia^{-1}$) ⁴	34,3	12,3	21,4	7
EE ($kWh\ dia^{-1}$) ⁵	71,3	25,5	44,4	14,5
EE ($kWh\ dia^{-1}.m_{reator}^{-3}$)	0,65	0,23	0,40	0,24

¹Sólidos Totais; ²Tempo de retenção hidráulica; ³Volume do biodigestor; ⁴Volume de metano; ⁵Energia elétrica.

Fonte: Própria (2019).

Observa-se que independente do tamanho do biodigestor ou da quantidade dos resíduos produzidos em cada lote, a cama de peru apresentou distintos volumes de metano (V_{CH4N} cama de peru: 12 – 34,3 $m^3\ dia^{-1}$ e V_{CH4N} cama de frango: 7 $m^3\ dia^{-1}$) e de energia elétrica

($EE_{\text{cama de peru}}: 25,5 - 71,3 \text{ kWh dia}^{-1}$ e $EE_{\text{cama de frango}}: 14,5 \text{ kWh dia}^{-1}$), em função do rendimento de metano bem como da matéria orgânica presente nos resíduos.

Nesse sentido, o biogás pode ser utilizado como fonte suplementar de energia em uma granja de aves, podendo substituir queimadores comerciais GLP e lenha (MARCHIORO et al., 2018), apresentando-se como uma alternativa vantajosa do ponto de vista econômico, social e ambiental.

De acordo com Martins et al., (2011), um lote de terminação de perus machos consome $1.600 \text{ kWh aviário}^{-1}.\text{lote}^{-1}$ (1 lote = 114 dias), representando energia elétrica em um aviário com aproximadamente $14 \text{ kWh aviário}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, ultrapassando o consumo de energia elétrica ($EE: 25 - 71 \text{ kWh dia}^{-1}$) para as três condições de cama de peru. Shah e Sahito (2017) avaliaram o potencial de geração de biogás de resíduos animais e a implementação de biodigestores para moradores no Paquistão. Os autores obtiveram uma estimativa de 129 ton dia^{-1} de substratos, com potencial para geração de 3.859 m^3 de biogás, utilização de 2.748 m^3 pelos moradores e excedente de 1.111 m^3 de biogás.

A maravalha foi o material utilizado como cama nas três amostras coletadas de cama de peru. Martins et al., (2011) recomendam a quantidade de maravalha ($\text{m}^3 \text{ aviário}.\text{lote}^{-1}$) para adição no lote inicial (condição em que é retirada toda a cama de peru) e para reposição (intervalo de lotes), sendo que retirando a CP a cada 50 e 120 d, deverão ser adicionadas respectivamente 36 e $15 \text{ m}^3 \text{ aviário}.\text{lote}^{-1}$ de maravalha. Considerando a remoção total da cama de peru (cenário para mais que 400 d) e que a cada lote ocorre a reposição da cama, deverão ser adicionados $50 \text{ m}^3 \text{ aviário}^{-1}.\text{lote}^{-1}$ para reposição e $72 \text{ m}^3 \text{ aviário}^{-1}.\text{lote}^{-1}$ para início do próximo lote (Tabela 12).

Tabela 12. Lote inicial e reposição de maravalha (substrato para a cama) para sistema de terminação de perus machos.

	Martins et al., (2011)	Cama de peru (50 d)	Cama de peru (120 d)	Cama de peru (maior que 400 d)
Substrato para cama – lote inicial ($\text{m}^3 \text{ aviário}.\text{lote}^{-1}$)	72	-	-	72
Substrato para cama - reposição ($\text{m}^3 \text{ aviário}.\text{lote}^{-1}$)	15	36	15	50

Fonte: Própria (2019).

Indiferente do manejo, a quantidade de resíduos produzidos ao final do ano será o mesmo. Porém, o rendimento de metano, a quantidade de maravalha a ser adicionada, bem como o tamanho do local (galpão, por exemplo) para armazenar os resíduos será diferente

para as três condições estudadas. Nesse sentido, a cama de peru de 50 dias de alojamento mostra-se como uma alternativa interessante de recuperação energética e manejo, pois a mesma apresentou um PBM, V_{CH_4} e EE maior que a cama de peru de 120 e maior que 400 dias, bem como menor quantidade de resíduos para estocagem.

6. CONCLUSÃO

Com a realização da presente pesquisa conclui-se que o maior valor para o potencial de produção de metano foi encontrado para a cama de peru com 50 dias de alojamento. Ainda, o tempo de alojamento da cama de peru de 50 para 120 dias resultou em um aumento de valor de pH e nitrogênio amoniacal bem como diminuição de sólidos voláteis, podendo indicar volatilização amoniacal e degradação da matéria orgânica, promovendo o acúmulo de amônia livre e diminuição do PBM.

As relações de 0,2 a 0,5 de $SV_{\text{substrato}}/SV_{\text{inóculo}}$ podem ser utilizados em estudos de PBB e PBM sem causar inibição nos ensaios cinéticos.

Embora exista maior produção brasileira de carne de frangos de corte que de perus, os indicadores obtidos de potencial brasileiro de geração de metano apresentaram valores de Volume de CH_4 maiores para cama de peru de 50, 120 e mais de 400 dias de alojamento em comparação com a cama de frango de 504 dias.

Por fim, conclui-se que o cenário proposto para a cama de peru de 50 dias apresenta-se como uma alternativa interessante de manejo e recuperação energética, pois a mesma apresentou volume de CH_4 e Energia elétrica maior, bem como menor quantidade de resíduos para estocagem, que a cama de peru de 120 e maior que 400 dias e a cama de frango com 504 dias de alojamento.

7. PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugerem-se estudos de possíveis limitações de manejo da cama de peru de 50 dias em uma granja, considerando avaliações zootécnicas e de mão de obra.

Sugere-se a operacionalização da cama de peru com 50 dias de alojamento (a qual apresentou maior valor de PBM) em reatores anaeróbios do tipo CSTR, de maneira a avaliar a: Recuperação de metano (%); Rendimento de metano nos testes contínuos ($\text{m}^3_{\text{N CH}_4} \cdot \text{kg}_{\text{SV adic}}^{-1}$); Produtividade de metano em reator de tanque agitado ($\text{m}^3_{\text{N CH}_4} \cdot \text{m}_{\text{reator}}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$). Para tanto, deve-se levar em consideração as condições operacionais do reator como: teor de sólidos totais (ST, %); valores de carga orgânica volumétrica (COV, $\text{kg m}^{-3} \cdot \text{dia}^{-1}$); e tempo de retenção hidráulica (TRH, d), além de verificar a necessidade de diluição da cama de peru, pela elevada concentração de sólidos que o substrato apresenta.

Ainda, sugerem-se estudos para o start-up do reator, de maneira que seja avaliado o inóculo mesofílico empregado bem como a aclimatação dos microrganismos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABPA. Relatório Anual da ABPA. **Associação Brasileira de Proteína Animal**, p. 134, 2017.
- ABPA. Relatório Anual da ABPA. **Associação Brasileira de Proteína Animal**, p. 161, 2018.
- AMARAL, CESTONADO, A.; KUNZ, A.; RADIS STEINMETZ, R. L.; et al. Influence of solid-liquid separation strategy on biogas yield from a stratified swine production system. **Journal of Environmental Management**, v. 168, p. 229–235, 2016.
- AMSOP. Associação dos municípios do Sudoeste do Paraná. 2010. Disponível em: <http://amsop.com.br/sud_pecuaria.php?local=aves&anoIni=2006&anoFim=2010>. Acesso em: 15 de fev. 2018.
- ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012.
- APHA – American public health association. Standard methods for examination of water and wastewater. 22st. ed. Washington. 2012.
- ASTM E2170-01, A. I. Standard Test Method for Determining Anaerobic Biodegradation Potential of Organic Chemicals Under Methanogenic Conditions. 2001.
- AVIANI, I.; LAOR, Y.; MEDINA, S.; KRASSNOVSKY, A.; RAVIV, M. Co-composting of solid and liquid olive mill wastes: Management aspects and the horticultural value of the resulting composts. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 17, p. 6699–6706, 2010. Elsevier Ltd.
- AVILA, V. S. DE; COSTA, C. A. F.; FIGUEIREDO, E. A. P. de; et al. Materiais alternativos, em substituição à maravalha como cama de frango. **Comunicado Técnico**. v. 465, p. 1–5, 2007.
- BACENETTI, J.; NEGRI, M.; FIALA, M.; GONZÁLEZ-GARCÍA, S. Anaerobic digestion of different feedstocks: Impact on energetic and environmental balances of biogas process. **Science of the Total Environment**, v. 463–464, p. 541–551, 2013.
- BIOPROCESS CONTROL. B. Operation and Maintenance Manual. 2016.
- BMELV. Guia Prático do Biogás - Geração e Utilização. **Gülzow**, v. 5, p. 233, 2010.
- BRASIL. Lei nº 13.576/2017. Disponível em:<<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/petroleo-gas-natural-e-combustiveis/renovaveis/programas/renovabio/principal>>. Acesso em: 28 de mai. 2018.
- BRASIL. Lei nº 10.762,11/11/2003. Disponível em:<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2003/L10.762.htm>. Acesso em: 15 de fev. 2018.
- BRASIL. Lei nº 12.187, 29/12/2009. 2009a. Disponível em:<<http://www.camara.gov.br/sileg/integras/841507.pdf>>. Acesso em: 15 de fev. 2018.
- BRASIL. Lei nº 13.798, 09/11/2009. Disponível em:<<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2009/lei-13798-09.11.2009.html>>. Acesso em: 15 de fev. 2018.

BRASIL. Decreto nº 7.390, 09/12/2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7390.htm>. Acesso em: 15 de fev. 2018.

BRASIL. Lei nº 6.361/12 do RJ. 2012 Disponível em: <<http://www.fiscosoft.com.br/index.php?PID=278885>>. Acesso em: 15 de fev. 2018.

BRASIL. Agência nacional do petróleo, gás natural e biocombustíveis. Resolução nº 8 de 30/01/2015. p. 9, 2015.

BRASIL. Lei nº 14.864 de 11/05/2016. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=320440>>. Acesso em: 15 de fev. 2018.

BRASIL. Lei nº 19.500 de 21/05/2018 do PR.2018a. Disponível em: <http://www.normasbrasil.com.br/norma/lei-19500-2018-pr_360329.html>. Acesso em: 27 de fev. 2019.

BRASIL. Lei nº 17.542, 12/06/2018. 2018b. Disponível em: <http://leis.alesec.sc.gov.br/html/2018/17542_2018_lei.html>. Acesso em: 27 de fev. 2019.

CANTRELL, K. B.; HUNT, P. G.; UCHIMIYA, M.; NOVAK, J. M.; RO, K. S. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. **Bioresource Technology**, v. 107, p. 419–428, 2012.

CASTRO, C. M.; GEWEHR, C. E.; REGINATTO, M. F. Rendimento de carcaça e cortes de perus comerciais submetidos a diferentes manejos de alimentação. **Archives of Veterinary Science**, v. 19, n. 4, p. 51–56, 2014.

CHAMY, R.; LEÓN, C.; VIVANCO, E.; POIRRIER, P.; RAMOS, C. Anaerobic monodigestion of poultry manure: Determination of operational parameters for CSTR. **Water Science and Technology**, v. 65, n. 1, p. 53–59, 2012.

CHAMY, R.; RAMOS, C. Factors in the determination of methanogenic potential of manure. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 17, p. 7673–7677, 2011.

CHAMY, R.; VIVANCO, E.; RAMOS, C. Anaerobic Mono-Digestion of Turkey Manure: Efficient Revaluation to Obtain Methane and Soil Conditioner. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 03, n. 08, p. 584–589, 2011.

CHAUMP, K.; PREISSER, M.; SHANMUGAM, S. R.; et al. Leaching and anaerobic digestion of poultry litter for biogas production and nutrient transformation. **Waste Management**, v. 84, p. 413–422, 2019.

CHERNICHARO, C. A. DE L. Reatores anaeróbios: Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. **2º ed.** 2010.

CIESLIK, L.; FARINACIO, D.; GODOY, W.; PLUCINSKI, L, C, F.; SILVA, C. L.; SIGNORINI, A. Produtividade de três variedades de milho (*zea mays*) cultivado sob manejo orgânico em função de diferentes doses de adubação. v. 4, n. 2, p. 105–108, 2009.

COSTA, ADRIANA MONTEIRO.; RIBEIRO, BRUNO TEIXEIRA.; SILVA, A. DE A. Estabilidade de agregados de um latossolo vermelho tratado com cama de peru. **Ciênc. agrotec., Lavras**, v.

32, p. 73–79, 2008.

DALÓLIO, F. S.; NOGUEIRA, J.; CÁSSIA, A.; et al. Poultry litter as biomass energy: A review and future perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, n. March, p. 941–949, 2017.

DEPPENMEIER, U. The unique biochemistry of methanogenesis. **Progress in Nucleic Acid Research and Molecular Biology**, v. 71, p. 223–283, 2002.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction. 2010.

DIN 38414-8, D. N. Determination of the amenability to anaerobic digestion (**S8**). 1985.

ESTEVEZ, M. M.; LINJORDET, R.; MORKEN, J. Effects of steam explosion and co-digestion in the methane production from Salix by mesophilic batch assays. **Bioresource Technology**, v. 104, p. 749–756, 2012.

GLATZ, P.; MIAO, Z.; RODDA, B. Handling and treatment of poultry hatchery waste: A review. **Sustainability**, v. 3, n. 1, p. 216–237, 2011.

GONÇALVES, MORGANA SUSZEK; KUMMER, LARISSA; RUTHES, JULIANE MÔNICA; DA ROZA, D. A. Caracterização De Cama De Frangos E Perus Visando O Manejo. III Symposium on Agricultural and Agroindustrial Waste Management. p. 12–15, 2013.

HOLLIGER, C.; ALVES, M.; ANDRADE, D.; et al. Towards a standardization of biomethane potential tests. **Water Science and Technology**, v. 74, n. 11, p. 2515–2522, 2016.

ISO 11734, I. O. F. S. Water quality - Evaluation of “ultimate” anaerobic biodegradability of organic compounds in digested sludge - Method by measurement of biogas production. 1995.

ISO 13641, I. O. F. S. Water quality — Determination of inhibition of gas production of anaerobic bacteria. 2003.

KHANAL, S. Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications. 2008.

KIM, S. S.; AGBLEVOR, F. A.; LIM, J. Fast pyrolysis of chicken litter and turkey litter in a fluidized bed reactor. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 15, n. 2, p. 247–252, 2009.

KOTHARI, R.; PANDEY, A. K.; KUMAR, S.; TYAGI, V. V.; TYAGI, S. K. Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 174–195, 2014. Elsevier.

KUNZ, A.; VIOLA, E. S.; LIMA, G. J. M. M. DE; MAZZUCO, H. Manejo Ambiental na Avicultura. **Documentos - Embrapa Suínos e Aves**, v. 149, p. 221, 2011.

LEINONEN, I.; WILLIAMS, A. G.; KYRIAZAKIS, I. Comparing the environmental impacts of UK Turkey production systems using analytical error propagation in uncertainty analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 141–148, 2016.

LEWICKI, A.; DACH, J.; JANCZAK, D.; CZEKA, W. Dynamics of methane fermentation process and retention time for different agricultural substrates. **Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering**, v. 58, n. 2, p. 98–102, 2013.

LUISINA, A.; CÓRDOBA, V.; HUNGRÍA, J.; SANTALLA, E. Análisis del potencial energético de lodos de planta depuradora. **RedBioLAC**. p. 1–4, 2018.

MARCHIORO, V.; STEINMETZ, R. L. R.; DO AMARAL, A. C.; et al. Poultry Litter Solid State Anaerobic Digestion: Effect of Digestate Recirculation Intervals and Substrate/Inoculum Ratios on Process Efficiency. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 2, n. August, p. 1–10, 2018.

MARTINS M, F.; SANDI, A, J.; ÁVILA, V, S.; FILHO, J, I, S. Consolidação do custo do avicultor para a produção de frango de corte em Santa Catarina. **Comunicado 494 Técnico**. 2011.

MIELE, M.; FILHO, J. I. DOS S.; MARTINS, F. M.; SANDI; ARI JARBAS. Consolidação dos Custos do avicultor para produção de perus em santa catarina. **Comunicado 480 Técnico**. 2010.

MOSCHEN, J. Caracterização da cama de aviário de peru e potencialidade de produção de biogás. **UTFPR**. 2017.

NAYAL, F. S.; MAMMADOV, A.; CILIZ, N. Environmental assessment of energy generation from agricultural and farm waste through anaerobic digestion. **Journal of Environmental Management**, v. 184, p. 389–399, 2016.

ODORICO, K.; FILHO, M, G.; LUMI, M.; HASAN, C. Atlas das biomassas do rio grande do sul para produção de biogás e biometano. 2016.

ÖZER, B. Biogas energy opportunity of Ardahan city of Turkey. **Energy**, v. 139, p. 1144–1152, 2017.

PELLERA, F.-M.; GIDARAKOS, E. Effect of substrate to inoculum ratio and inoculum type on the biochemical methane potential of solid agroindustrial waste. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 4, n. 3, p. 3217–3229, 2016.

RIBEIRO, E. M.; BARROS, R. M.; TIAGO, G. L.; et al. GHG avoided emissions and economic analysis by power generation potential in posture aviaries in Brazil. **Renewable Energy**, v. 120, p. 524–535, 2018.

RUIZ DIAZ, D. A.; SAWYER, J. E.; BARKER, D. W. Residual Poultry Manure Nitrogen Supply to Corn the Second and Third Years after Application. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, n. 6, p. 2289, 2012.

RUIZ, G, J. Characterization of a mesophilic anaerobic inoculum by means of methanogenic activity, 2014. **Escola Superior d'Agricultura de Barcelona - UPC - Barcelona Tech**.

SANT'ANNA JR, G. L. Tratamento biológico de efluentes: fundamentos e aplicações. **Interciência ed**. 2013.

SELVARAJ, B.; KRISHNASAMY, S.; MUNIRAJAN, S.; et al. Kinetic modelling of augmenting biomethane yield from poultry litter by mitigating ammonia. **International Journal of Green Energy**, v. 15, n. 12, p. 766–772, 2018.

SHAH, A. A. L. I.; SAHITO, A. R. Appraisal of Biogas Potential of Biogas from Animal Dung in Saeedabad, Pakistan. , v. 36, n. 3, p. 707–718, 2017.

SHRESTHA, S.; FONOLL, X.; KHANAL, S. K.; RASKIN, L. Biological strategies for enhanced hydrolysis of lignocellulosic biomass during anaerobic digestion: Current status and future perspectives. **Bioresource Technology**, v. 245, p. 1245–1257, 2017.

STEINMETZ, R. L. R. Avaliação do efeito de drogas veterinárias na produção específica de biogás de substratos agropecuários. **UFSC**, 2016.

STEINMETZ, R. L. R.; MEZZARI, M. P.; DA SILVA, M. L. B.; et al. Enrichment and acclimation of an anaerobic mesophilic microorganism's inoculum for standardization of BMP assays. **Bioresource Technology**, v. 219, p. 21–28, 2016.

TROLEIS, M. J. B.; ROQUE, C. G.; BORGES, M. C. R.; NOGUEIRA, K. B.; GOUVEIA, N. A. Estabilidade de agregados e teor de matéria orgânica em um Latossolo Vermelho sob Urochloa brizantha após a aplicação de cama de peru. , v. 15, n. ix, p. 83–87, 2017.

VANAZZI, V. Informação Pessoal - Produção estimada de cama de peru em um aviário de 100 metros. , 2018.

VDI, 4630. Fermentation of Organic Materials e Characterization of the Substrate, Sampling, Collection of Material Data, Fermentation Tests. **The Association of German Engineers**. 2016.

WELLINGER, A.; MURPHY, J.; BAXTER, D. **The Biogas Handbook. Science, Production and Applications**. 1st ed. 2013.

WILLIAMS, A. G.; LEINONEN, I.; KYRIAZAKIS, I. Environmental benefits of using turkey litter as a fuel instead of a fertiliser. **Journal of Cleaner Production**, v. 113, p. 167–175, 2016.

YUN, S.; FANG, W.; DU, T.; HU, X.; HUANG, X.; LI, X.; ZHANG, C.; LUND, P.D. Use of bio-based carbon materials for improving biogas yield and digestate stability. **Energy**, v. 164, p. 898–909, 2018.

ZIGANSHINA, E. E.; BELOSTOTSKIY, D. E.; SHUSHLYAEV, R. V.; et al. Microbial community diversity in anaerobic reactors digesting turkey, chicken, and swine wastes. **Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 24, n. 11, p. 1464–1472, 2014.

9. ANEXO

ANEXO A - Caracterização física e química da cama de peru de diferentes origens.

Caracterização/ Literatura	Cantrell, et al. 2012 (EUA)	Kim, et al., 2009 (EUA)	Costa, et al., 2008 (Brasil)
Zn (mg kg ⁻¹ _{bs})	424	-	250
H (%)	-	6,12	-
Poder calorífico superior (MJ kg ⁻¹)	15,48	18,74	-
Umidade (%)	-	-	-
Cinza (%)	20,3	5,93	-
Ca (g kg ⁻¹ _{bs})	24,1	-	28,3
Fe (mg.kg ⁻¹ _{bs})	1470	-	3000
K (g kg ⁻¹ _{bs})	25	-	22
Mg (g kg ⁻¹ _{bs})	5,27	-	4,8
Na (mg kg ⁻¹ _{bs})	3800	-	2700
Cr (g kg ⁻¹ _{bs})	4,8	-	-
Mn (mg kg ⁻¹ _{bs})	425	-	277
Cd (mg kg ⁻¹ _{bs})	0,54	-	-
Cu (mg kg ⁻¹ _{bs})	349	-	71
Ni (mg kg ⁻¹ _{bs})	17,1	-	-
Pb (mg kg ⁻¹ _{bs})	0,85	-	-

^a bs = base seca.

^b bn = base natural.

Fonte: Adaptado de CANTRELL et al., (2012), KIM, et al., (2009) e COSTA, et al., (2008).

ANEXO B - Caracterização física e química da cama de peru de diferentes origens.

Caracterização/ Literatura	Chamy, et al., 2011 (Chile)	Chamy, et al., 2012 (Chile)	Gonçalves, et al., 2013 (Brasil)
Zn (mg kg ⁻¹ _{bs})	-	-	-
H (%)	-	-	-
Poder calorífico superior (MJ kg ⁻¹)	-	-	-
Sólidos totais _{bn} ^b (%)	51,2	51,2	-
Sólidos voláteis _{bs} (%)	71,5	71,5	-
Umidade (%)	-	48,8	23,2

^a bs = base seca.

^b bn = base natural.

Fonte: Adaptado de CHAMY, et al., (2011), CHAMY, et al., (2012) e GONÇALVES, et al., (2013).